



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۹۵۰۵

چاپ اول

INSO

19505

1st.Edition

شیمی آتش - تولید و اندازه گیری ذرات آيروسل

Fire chemistry- Generation and  
Measurement of aerosols

ICS:13.220.01

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادهای سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد  
«شیمی آتش - تولید و اندازه‌گیری ذرات آبروسل»

رئیس :

تقی زاده ، مسعود  
( دکترای شیمی )

سمت و / یا نمایندگی

دانشگاه شاهد

دبیر :

گرگانی فیروزجائی ، فرج‌اله  
( کارشناسی ارشد شیمی آلی )

اداره کل استاندارد مازندران

اعضاء : ( اسامی به ترتیب حروف الفبا )

آراسته منش ، شهاب  
( دکترای شیمی پلیمر )

آزمایشگاه همکار صدف ریز ساری

احمدی ، سمیه

( کارشناسی ارشد شیمی فیزیک )

جهاد دانشگاهی مازندران

اشرفی ، فریدون

( دکترای شیمی فیزیک )

دانشگاه پیام نور

بزرگی ، رضاعلی

( کارشناسی ارشد مدیریت سوانح )

مرکز علمی و کاربردی هلال احمر

مازندران

بصیری ، فرشید

( کارشناسی ارشد مهندسی شیمی )

اداره کل استاندارد مازندران

حسینی ، حسام

( کارشناسی ارشد مدیریت )

سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی

شهرداری ساری

سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی  
شهرداری ساری

جوینی ، حسین  
(کارشناسی ارشد مدیریت سوانح)

سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی  
شهرداری تهران

سیافی ، مریم  
(کارشناسی ارشد شیمی)

سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی  
شهرداری ساری

هاشمی ، سیدولی  
(کارشناسی حریق و پیشگیری)

سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی  
شهرداری تهران

والهی ، هادی  
(کارشناسی ارشد حریق و پیشگیری)



## فهرست مندرجات

| صفحه | عنوان                                                       |
|------|-------------------------------------------------------------|
| ب    | آشنایی با سازمان ملی استاندارد                              |
| ج    | کمیسیون فنی تدوین استاندارد                                 |
| ز    | پیش‌گفتار                                                   |
| ح    | مقدمه                                                       |
| ۱    | ۱ هدف و دامنه کاربرد                                        |
| ۲    | ۲ مراجع الزامی                                              |
| ۲    | ۳ اصطلاحات، تعاریف، نشانه‌ها و اختصار اصطلاحات              |
| ۲    | ۳-۱ اصطلاحات و تعاریف                                       |
| ۳    | ۳-۲ نشانه‌ها و اختصار اصطلاحات                              |
| ۴    | ۴ ذرات آروسل                                                |
| ۴    | ۴-۱ کلیات                                                   |
| ۶    | ۴-۲ جابه‌جایی و شکل‌گیری تدریجی آروسل آتش                   |
| ۷    | ۴-۳ خواص قابل اندازه‌گیری آروسل‌ها                          |
| ۱۳   | ۵ روش‌های اندازه‌گیری                                       |
| ۱۳   | ۵-۱ کاربردها                                                |
| ۱۵   | ۵-۲ گروه‌های اندازه‌گیری آروسل                              |
| ۲۳   | ۵-۳ ملاحظات اولیه نمونه‌برداری و تجزیه آروسل‌ها             |
| ۲۴   | ۵-۴ انتخاب روش‌ها                                           |
| ۲۶   | ۵-۵ روش‌های اندازه‌گیری <i>in-situ</i>                      |
| ۳۳   | ۵-۶ روش‌های اندازه‌گیری استخراجی                            |
| ۵۲   | ۶ واژه اندازه‌گیری آروسل                                    |
| ۵۲   | ۶-۱ تولیدکننده‌های استاندارد آروسل برای کالیبراسیون دستگاهی |
| ۵۴   | ۶-۲ کیفیت (تصدیق) تولیدکننده‌ها                             |
| ۵۶   | ۶-۳ روش‌های کالیبراسیون ضروری                               |
| ۵۶   | ۶-۴ اعتباردهی                                               |
| ۶۰   | ۷ گزارش نتایج                                               |
| ۶۰   | ۷-۱ محاسبات                                                 |
| ۶۲   | ۷-۲ گزارش اندازه‌گیری                                       |

|    |                                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------|
| ۶۲ | ۳-۷ عدم قطعیت                                                                          |
| ۶۴ | پیوست الف (اطلاعاتی) اندازه‌گیری‌های تجربی $k_f$ و $D_f$ , $R_g$ , $N_{pp}$ , $D_{pp}$ |
| ۶۶ | پیوست ب (اطلاعاتی) جذب گازهای احتراق‌پذیر روی ذرات                                     |
| ۶۹ | پیوست پ (اطلاعاتی) استنشاق دینامیکی و مسمومیت ذرات                                     |
| ۷۵ | پیوست ت (اطلاعاتی) اثرهای غیرسمی                                                       |
| ۷۷ | پیوست ث (اطلاعاتی) مثال گزارش                                                          |
| ۷۹ | کتاب‌نامه                                                                              |

## پیش‌گفتار

استاندارد " شیمی‌آتش - تولید و اندازه‌گیری ذرات آبروسل " که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط اداره کل استاندارد مازندران تهیه و تدوین شده است و در ۱۲۸۸ اجلاس کمیته ملی استاندارد شیمی و پلیمر مورخ ۱۳۹۴/۲/۲۷ مورد تصویب قرار گرفته است ، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ ، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود .

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع ، علوم و خدمات ، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود ، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت . بنابراین ، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد .

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است :

ISO 29904: 2013 , Fire Chemistry- Generation and Measurement of aerosols

آیروسول‌های تولیدشده در آتش سوزی‌ها، ترکیبات پیچیده‌ای از مخلوط ناهمگن قطره‌های ریز قطران یا آب، دوده متراکم شده کربنی با ترکیبات آلی جذب شده یا ذرات معدنی هستند. بعد از شکل‌گیری از طریق فرایندهای شیمیایی و فیزیکی پیچیده، آیروسول‌های آتش پیوسته از نظر اندازه فیزیکی، ساختار و مواد تشکیل‌دهنده شیمیایی تغییر می‌کنند، به طوریکه ذرات ممکن است دچار تراکم، آمیختگی، جذب گازها، تبخیر یا ته نشینی روی سطوح گردند. غلظت آیروسول، اندازه ذره، دما و ترکیب گازی شکل نیز در سرعت این تغییرات نقش مهمی ایفا می‌کنند [۱][۲][۳].

سازوکارهای پیچیده‌ای وجود دارند که به واسطه آن آیروسول‌های حاصل از آتش‌سوزی بر خطراتی که آتش برای انسان و محیط زیست ایجاد می‌کند تاثیر می‌گذارد. اولاً ذرات کوچک، قابل تنفس هستند و می‌توانند به عمق دستگاه تنفسی نفوذ کنند. ذرات تنفس شده خود می‌توانند تحریک‌کننده بوده و توانایی افراد را برای فرار از آتش کاهش دهند [۴][۵].

ثانیاً این ذرات می‌توانند بخارات و گازهای سمی و تحریک‌کننده را جذب شیمیایی یا سطحی کنند و با گذر از سامانه دفاعی طبیعی دستگاه تنفسی وارد بخش‌های عمیق ریه شوند [۵][۶].

سوماً ذراتی با قابلیت جذب کم در فرایند تنفس یا حتی ذرات غیر قابل تنفس می‌توانند غلظت بخارات و گازهای سمی آتش سوزی را به طور مؤثری کاهش داده و آن‌ها را بر روی سطوح ته نشین کنند. چهارماً آیروسول‌ها ممکن است در دید افراد محدودیت ایجاد کرده و توانایی آنان را برای جابه‌جایی به مکان امن به طور بالقوه‌ای کاهش دهند (استاندارد ملی ۱۰۳۹۹ را ببینید).

در نهایت اجزای آیروسول ناشی از آتش سوزی‌ها می‌توانند بر محیط زیست به خصوص در مناطقی که آتش سوزی‌های بزرگ و طولانی مدت رخ می‌دهد، تأثیرات منفی قابل توجهی داشته باشند [۷][۴].

از این‌رو در زمینه سازوکارهای تولید و تکامل آیروسول‌ها، توانایی اندازه‌گیری دقیق غلظت و توزیع ذرات بسیار مهم است، چراکه می‌توان از این طریق دامنه و محدودیت‌های دستگاه‌ها و روش‌های موجود برای این اندازه‌گیری‌ها را شناسایی و به طور مؤثر تفسیر نموده و با خطرات ارزیابی شده مطابقت داد.

این استاندارد جزئیاتی از دامنه روش‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری را فراهم نموده و راهنمای اشخاصی است که برای کاربردهای خاص توأم با تفسیر مبتنی بر دانش موجود از آن استفاده می‌کنند. این استاندارد هم‌چنین شامل پیوست‌های اطلاعاتی است که جنبه‌های فیزیکی تولید آیروسول‌های حاصل از آتش‌سوزی‌ها، حرکت همراه با ستون گرمایی آتش و تغییر شکل آن‌ها با دور شدن از آن، کمک آیروسول به رشد آتش از طریق تابش شعله و نقش ذرات در خطرات جانی و زیست محیطی را به طور خلاصه بیان می‌کند.

## شیمی آتش - تولید و اندازه‌گیری ذرات آبروسل

### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد در حقیقت راهنمایی برای ایجاد ذرات آبروسل در آتش‌سوزی‌ها، تعیین دستگاه‌ها و روش‌های نمونه‌برداری و روش‌های اندازه‌گیری آبروسل، و تهیه دستورالعملی برای تفسیر و گزارش داده‌ها می‌باشد. این استاندارد برای طراحان آزمون آتش و آزمایش‌گران آتش‌سوزی‌های ناخواسته مفید است و از آن، جهت انتخاب و به‌کارگیری روش‌های مناسب اندازه‌گیری ذرات معلق در خطرات متمایز این ذرات بر مردم و محیط زیست استفاده می‌گردد.

در این استاندارد دامنه، کاربرد و محدودیت‌های هر روش معرفی می‌گردد. تفسیر داده‌های به دست آمده از این روش‌ها کاملاً به کاربرد نهایی داده‌ها بستگی دارد.

آبروسل حاصل از آتش ممکن است به واسطه تاریک نمودن مسیر خروج اضطراری، به‌صورت مستقیم سبب خطر محدود شدن گریز از آتش شود و یا ممکن است سبب ایجاد بیماری مزمن و نیز سموم زیست‌محیطی ناشی از ترکیبات شیمیایی موجود در ذرات آبروسل (برای مثال ترکیبات سمی مانند هیدروکربن‌های آروماتیکی چند حلقه‌ای در دوده یا رادیونوکلوئیدهای ایجاد شده در آتش‌سوزی نیروگاه‌های هسته‌ای) شوند. ذرات آبروسل بسته به اندازه و چگالی‌شان ممکن است در نواحی مختلف ریه‌ها استنشاق و نفوذ کنند و یا در محیط پراکنده شده و در سطح زمین و نهرها رسوب نمایند.

به‌طور اختصاصی، این استاندارد در تولید و اندازه‌گیری آبروسل در آتش‌سوزی‌ها به موارد زیر اشاره می‌نماید:

- انواع فازهای بخار یا گازهای جذب یا حل شده؛

- سازوکارهای فیزیکی موجود در انتقال ذرات آبروسل، پخش شدن در ستون گرمایی آتش، انعقاد یا توده‌ای شدن که منجر به ایجاد تفاوت در کسر و اندازه‌های ذرات می‌شود، "پدیده گرمایی" (عامل اصلی رسوب دوده)، "نفوذپذیری"، و رسوب نمودن؛

- برهم‌کنش بین گازها و بخارات و آبروسل: جذب شدن و جدا شدن اجزا از فاز گازی، انتقال گازهای جذب شده به ریه‌ها؛

- روش‌های نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شامل اصول کار هر عملیات، شرح روش، تهیه داده‌ها و در هر مورد دامنه کاربرد، زمینه کاربرد، مزایا و معایب؛

- شناخت روش‌های اندازه‌گیری، و تولید "آبروسل‌های استاندارد" و عدم قطعیت‌های مربوط؛

- اثرهای زیست‌محیطی و فیزیولوژیکی آبروسل‌ها تا جایی که این اثرها را بتوان جهت تشریح روش اندازه‌گیری در کاربردهای خاص استفاده نمود؛ و

- خطرات ایجاد شده توسط ذرات کربنی موجود در محصولات قابل رویت آتش‌سوزی "دود" با توجه به اندازه، ریخت‌شناسی (مورفولوژی)، ماهیت شیمیایی، و ماهیتی از محصولات آتش‌سوزی که به‌واسطه آن قابلیت معلق شدن یافته‌اند.

این استاندارد برای ذرات آبروسل تولید شده از احتراق کنترل شده (مثلاً خاکستر کردن) کاربرد ندارد. به هر حال، بسیاری از مطالب این استاندارد برای چنین آبروسلهایی نیز مشترک هستند.

## ۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می شود. در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه های بعدی آن ها مورد نظر است. استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۰۲۴، سال: ۱۳۸۷، ایمنی آتش – واژه نامه

## ۳ اصطلاحات، تعاریف، نشانه ها و اختصار اصطلاحات

۱-۳

### اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف در استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۰۲۴ اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به کار می روند:

### ۱-۱-۳ آبروسل

سوسپانسیون قطره های مایع و یا ذرات جامد در زمینه فاز گاز به وسیله آتش تولید می شوند و اندازه ذرات کم تر از ۱۰nm تا بیش از ۱۰μm هستند.

### ۲-۱-۳ ذرات

محصولات فاز جامد موجود در آبروسل

یادآوری دو گروه ذرات آبروسل آتش وجود دارند: ذرات نسوخته یا تا اندازه ای سوخته محتوی نسبت بالایی از کربن بالا (یعنی دوده) و خاکسترهای تقریباً سوخته و با اندازه کوچک. ذرات دوده با قطر کوچک (حدود ۱μm) به طور کلی دارای قطر بین ۱۰nm تا ۵۰nm هستند. تشکیل ذرات دوده به پارامترهای زیادی از جمله هسته دار شدن، توده ای شدن و رشد سطحی بستگی دارد. اکسایش ذرات دوده (یعنی سوختن بیش تر) نیز ممکن است.

### ۳-۱-۳ قطره های ریز<sup>۱</sup>

محصولات فاز مایع موجود در آبروسل ها که عموماً از طریق تجزیه گرمایی (شرایط سوختن اکسیژن کاهیده) هم از آتش سوزی های شعله دار و هم از آتش سوزی های بدون شعله و خفه سوز ایجاد شده که ممکن است به صورت دایره ای شکل کوچک و قیرگونه، متراکم شوند.

یادآوری آب ایجاد شده در اثر سوختن ممکن است اطراف ذرات متراکم شده و قطره های ریز آبروسل متراکم شود.

### ۴-۱-۳ بخش قابل استنشاق<sup>۲</sup>

1- Droplets  
2- Inhalable

بخشی از جرم کل ذرات معلق در هوا می‌باشد که می‌توان به درون بینی و دهان استنشاق نمود و به قطر ذرات، سرعت و جهت گاز دارای ذرات و دوره تنفس بستگی دارند.

### ۳-۱-۵ بخش فوق قفسه سینه‌ای<sup>۱</sup>

بخشی از جرم ذرات تنفس شده که نمی‌توانند از ورای حنجره نفوذ کنند.

### ۳-۱-۶ بخش سینه‌ای<sup>۲</sup>

بخشی از جرم ذرات تنفس شده که از ورای حنجره نفوذپذیرند.

### ۳-۱-۷ بخش تنفسی<sup>۳</sup>

بخشی از جرم ذرات تنفس شده که از ورای حنجره نفوذپذیرند اما از سامانه تنفسی بدون مژه نفوذپذیر نیستند.

### ۳-۱-۸ بخش حبابک‌های ریه<sup>۴</sup>

بخشی از جرم ذرات تنفس شده که از سامانه تنفسی بدون مژه نفوذ می‌کنند.

### ۳-۲ نشانه‌ها و اختصار اصطلاحات

### ۴ ذرات آبروسل

### ۴-۱ کلیات

محصولات آتش‌سوزی شامل گازها و بخارات ناشی از احتراق، قطره‌های آب و آبروسل‌ها (ایجادشده به صورت مایع و جامد در حین سوختن و بعد از آن) است. ترکیبات آبروسل موجود در محصولات آتش، ذرات و قطرات کوچکی هستند که بخش قابل مشاهده دود را تشکیل می‌دهند. در حقیقت آبروسل‌ها، ذراتی از ترکیبات معدنی یا آلی، و قطره‌های ریزی هستند که از سوختن ناقص مواد سوختی ایجاد می‌شوند.

قطره‌های ریز مایع موجود در آبروسل‌ها عمدتاً کروی هستند. ذرات جامد کربنی، ساختاری شبه هندسی دارند و می‌توانند گستره نسبتاً وسیعی از اندازه‌ها را داشته باشند. ذرات معدنی می‌توانند بسته به ساختار اولیه سوخت و نحوه آتش‌سوزی<sup>۵</sup>، شکل‌های مختلفی داشته باشند.

ماهیت محصولات آتش در حریق با دمای بالا (حدود  $1000^{\circ}\text{C}$ ) نسبت به حریق در دماهای پایین‌تر، به نوع ماده سوختنی کم‌تر وابستگی دارد و به نظر می‌رسد که ماهیت این محصولات در دماهای بالا به شرایط موضعی ایجادشان بستگی دارد. مشخص شده است که سوختن مواد سلولزی، تنباکو و انواع پلیمر می‌توانند تقریباً همان مقدار دوده را در اثر اعمال دمای بالای  $1000^{\circ}\text{C}$  تولید کنند.

در آتش‌سوزی‌های روباز و با گردش مقدار هوای کافی، تولید دوده به دماهای درون منطقه شعله (یا خفه-سوزی)، شرایط اکسایش (یعنی دمای هوایی که در معرض آتش قرار می‌گیرد) و مقدار توده‌ای شدن آبروسل یا اکسایش مجدد آن ارتباط زیاد دارد.

---

1- Extrathoracic  
2- Thoracic  
3- Tracheobronchic  
4- Alveolar  
5 - History

شباهت انواع آبروسل حین سوختن سوخت‌های مختلف را می‌توان تا حدی با این حقیقت توضیح داد که پایه‌ی بسیاری از سوخت‌ها، هیدروکربن‌ها یا پلیمرهای هیدروکربنی است که حین تجزیه گرمایی، الگوهای نسبتاً مشابه کراکینک دارند و موادی نظیر متان، اتان، اتیلن و پروپان تولید می‌کنند. بسته به کاربرد نهایی داده‌های حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف آبروسل محصولات آتش سوزی، این خواص اولویت‌های گوناگونی دارند برای مثال:

(الف) برای مطالعه فرار از آتش، تیرگی آبروسل بر دید افراد اثر خواهد داشت (استاندارد ملی ۱۰۳۹۹ را ببینید). در بسیاری از سناریوهای آتش، اثرات منفی آبروسل بر قابلیت دید، یکی از مهمترین عامل امکان فرار است. اقدامات قبل از حرکت و سرعت جابجایی به‌شدت به قابلیت دید در فضای پر از دود بستگی دارد. مقادیر بالای تیرگی دود، مانع جدی گریختن است. برای کسب اطلاعات بیش‌تر پیوست ت را ببینید.

(ب) در مدل‌سازی آتش، بازده دوده عامل ورودی مهمی است که اثر زیادی روی خواص حرارت تابشی شعله‌ها (اغلب یک مدل فرعی از مدل اصلی) دارد و بنابراین در انتقال حرارت تابشی کل موثر است (استاندارد ۱۰۳۹۹ ملی را ببینید) و به‌طور قابل توجهی باعث گسترش آتش و وقوع جرقه الکتریکی (گر گرفتگی)<sup>۱</sup> می‌شود. برای کسب اطلاعات بیش‌تر پیوست ت را ببینید.

(ج) اثر فیزیولوژیکی مستقیم آبروسل بر روی افراد به اندازه کسرهای درون آبروسل، و ریخت-شناسی (مورفولوژی) ذرات و قطرات ریز بستگی دارد. بنابراین، اغلب برای تعیین اثرات فیزیولوژیکی آبروسل، دانستن توزیع اندازه آبروسل و ذرات مهمتر از اندازه جرم کلی آبروسل است. متأسفانه، "توزیع اندازه" پارامتری است که اغلب به‌خاطر فرایند توده‌ای شدن در مدت زمانی کوتاه، به سختی قابل اندازه‌گیری است. توده‌ای شدن می‌تواند به‌شدت بر ساختار ذرات و قطرات، و نیز چگالی و خواص نوری (یعنی تاریکی) آنها تاثیر بگذارد. به‌علاوه، گونه‌های فرار که هنگام نمونه‌برداری و آزمون، با درجات مختلف تبخیر می‌شوند روی ثبت اطلاعات اثر خواهند داشت. گذشته از این، دستگاه‌های اندازه‌گیری که با اصول متفاوت کار می‌کنند، کسر اندازه‌های مؤثر متفاوتی را گزارش می‌نمایند و این روش‌های اندازه‌گیری را نمی‌توان معادل هم فرض نمود. پارامتر اصلی که برای تاثیر فیزیولوژیکی آبروسل مدنظر قرار می‌گیرد، رسوب آنها در دستگاه تنفسی است. درجه‌های مختلف اندازه ذره، بر اساس رابطه آنها با اثرهای فیزیولوژیکی تعریف شده‌اند: "PM10" و "PM2.5"، "قابل استنشاق"، " $(D_p < 100\mu m)$ "، "سینه‌ای"، " $(D_p < 10\mu m)$ "، "قابل تنفس"، " $(D_p < 4\mu m)$ "، "فوق ریز" " $(D_p < 0.1\mu m)$ " و "در حد نانو" " $(D_p < 0.50\mu m)$ ". برای کسب اطلاعات بیش‌تر پیوست پ را ببینید.

غلظت جرمی، و کسر اندازه ذره و قطره ریز، پارامترهای با ارزشی برای مدل‌سازی کامپیوتری دینامیک سیال محاسباتی<sup>۲</sup> (CFD) فرایندهای آتش، هستند. این به‌ویژه در زمانی صحیح می‌باشد که مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی تحول آبروسل‌ها و تاثیرات این تحولات بر تابش شعله باشد.

#### ۲-۴ جابه‌جایی و شکل‌گیری تدریجی آبروسل آتش

1- Flashover

2- Computational fluid dynamics



دانستن محل و چگونه نمونه برداری محصولات آتش‌سوزی برای به دست آوردن توزیع صحیح و مناسب آبروسل ضروری است. بنابراین مدنظر قرار دادن<sup>۱</sup> فرایندهای نقل و انتقال محلی که می‌تواند سبب توزیع ذرات غیریکنواخت شود، مهم است.

تولید ذرات در آتش‌های خفه سوز در محدوده شعله یا ناحیه سوختن شروع می‌شود. به محض آزاد شدن ذرات در فضای آتش، انعقاد می‌تواند در درجات مختلف روی دهد. در ستون گرمایی آتش<sup>۲</sup>، به خاطر اثر پدیده دمایی<sup>۳</sup> (حرکت ذرات ناشی از اختلاف دما) و حرکت به سمت بالا، جابه‌جایی در اثر حرکت شناوری<sup>۴</sup> توده آتش، ذرات می‌توانند مکیده شده و اصولاً به بالای آتش منتقل شوند. ذرات کربنی ملتهب مهم‌ترین عامل شرک کننده در تابش گرمایی از ستون گرمایی آتش هستند، به‌ویژه به خاطر این‌که غلظت ذرات نسبتاً بالا بوده و قابلیت انتشار نزدیک به جسم تابش‌گر<sup>۵</sup> (یعنی در گستره طیفی بسیار بالایی تابش می‌کنند) داشته و در دمای بالا وجود دارند.

پدیده دمایی پارامتر مهم در کنترل جابه‌جایی آبروسل در آتش داغ و رسوب آن‌ها بر روی هر سطح نسبتاً سرد است. پدیده جابه‌جایی دمایی ممکن است به عنوان سازوکاری که به واسطه آن ذرات آبروسل به وسیله اجسام داغ پراکنده می‌شوند و به وسیله جسم سردتر جذب می‌شوند و سبب جابه‌جایی ذرات و قطره‌های ریز از نواحی گرم به سرد می‌شوند، مدنظر قرار گیرند. این فرایند سبب رسوب مشهود ذرات و قطره‌های ریز بر روی سطح‌های سرد مانند پنجره‌ها و دیوارهای ساختمان آتش‌گرفته می‌شود. نواحی داغ می‌توانند نسبتاً عاری از ذرات باشند، اما اگر شرایط دمایی تغییر کند، بالقوه قادر به ایجاد رسوب می‌باشند، زیرا زمانی که دما کاهش می‌یابد مولکول‌های گازی آلی می‌توانند به صورت آبروسل متراکم شوند. در حقیقت، عملکرد نمونه-برداری از این نواحی ظاهراً بدون ذرات بسیار ریز می‌تواند ذرات اندازه‌گیری شده از طریق اثر نفوذ<sup>۶</sup> (به خصوص با سردکردن) بر دستگاه‌های اندازه‌گیری را افزایش دهد.

برای نمونه پدیده رسوب ذره می‌تواند در فاصله‌های قابل ملاحظه‌ای از آتش‌سوزی‌ها به املاک و دارایی‌های ساختمان خسارت وارد کند. هنگامی که احتمال عمده بودن آتش‌سوزی وجود دارد، الگوی ته‌نشینی بعد از آتش، که نوعاً به صورت «V» بر عکس از منبع آتش است، می‌تواند مدرک با ارزشی از منشأ آتش‌سوزی را ارائه نماید. همین الگو را می‌توان برای تعیین مناطقی از سناریوی آتش که احتمال می‌رود عاری از آلودگی‌ها توسط دود- یک ملاحظه اقتصادی مهم برای نمونه نسبت به الزامات بازگردانی اموال در ادامه آتش‌سوزی مورد استفاده قرار داد.

سه فرایند دیگر برای انتقال وجود دارد که می‌تواند بر توزیع آبروسل‌ها در جریان هوای خارج شده از یک آتش مؤثر باشد:

- پدیده نفوذ فرایندی است که به واسطه آن ذرات معلق در یک محیط داغ با یک شیب غلظت از مناطق با غلظت بالاتر به نواحی با غلظت پایین‌تر جابه‌جا می‌شوند.

- 
- 1- Take into account
  - 2- Fire plume
  - 3- Thermophoresis
  - 4- Buoyancy
  - 5- Black body
  - 6- Intrusive effect

- واکنش خواص نوری ذره با نور. در پدیده نوری، ذره نور را جذب می‌کند و با جذب این انرژی در جهت تراکم نوری گرم می‌شود. در هنگام واکنش، ذرات به سمت دور از نور حرکت می‌کنند (به سمت ناحیه سردتر).

- ته نشینی یا رسوب، حرکت ذرات به سمت پایین به خاطر جاذبه زمین و ویژگی‌های محیط اطراف (به ویژه گرانش) است. سرعت ته‌نشینی به خواص گرانشی کل جریان<sup>۱</sup>، دما و جرم و اندازه آيروسول بستگی دارد. ذرات بزرگ‌تر و سنگین سریع رسوب می‌کنند، در حالی که ذرات ریز و سبک به مدت نامشخصی معلق باقی می‌مانند.

در حضور میدان الکتریکی، حرکت ذرات (به ویژه کربن) تغییر خواهد نمود. اثرهای این پدیده بیش‌تر تحت تأثیر جاذبه زمین و پدیده دمایی قرار می‌گیرند. این پدیده اصول اندازه‌گیری تعدادی از دستگاه‌های مذکور در این استاندارد می‌باشد.

فرایندهای انعقاد و توده‌ای شدن که حین شکل‌گیری آيروسول وجود دارد، ممکن است با فاصله‌های قابل توجهی از منبع آتش‌سوزی ادامه یابد، اگرچه هنگامی که با افزایش حجم هوا، غلظت آيروسول‌ها کم می‌شود، این اثرها کاهش می‌یابد. بنابراین در فاصله‌های نسبتاً زیاد از منبع آتش، خوشه‌های با جرم زیاد از ذرات ممکن است شکل گرفته و به سرعت رسوب کند. به عنوان شرحی از اهمیت زمان در کاهش غلظت ذرات از طریق اثر انعقاد، رابطه بین پخش شدن یگانه آيروسول در دامنه غلظت‌های اولیه و زمان‌های مورد نیاز برای دوبرابر شدن قطر و نصف‌شدن غلظت ذرات را نشان می‌دهد جدول ۱ (مرجع ۲ را ببینید). این جدول نشان می‌دهد که اگر چنین ذراتی برای اندازه‌گیری واقعی نمونه‌برداری شوند، تا حد ممکن رقیق کردن سریع برای محافظت کردن توزیع اندازه ذره اولیه و جرم کلی آيروسول ضروری است.

جدول ۱- تغییر اندازه‌گیری اندازه و غلظت جرمی آيروسول تک‌پراکنده اولیه در نتیجه انعقاد [۲]

| غلظت اولیه<br>(particles/mL) | زمان دوبرابر شدن قطر میانگین آيروسول | زمان نصف‌شدن غلظت جرمی |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| ۱۰ <sup>۱۴</sup>             | ۱۴۰ میکرو ثانیه                      | ۲۰ میکروثانیه          |
| ۱۰ <sup>۱۲</sup>             | ۰٫۱۴ ثانیه                           | ۰٫۰۰۲ ثانیه            |
| ۱۰ <sup>۱۰</sup>             | ۱٫۴ ثانیه                            | ۰٫۲ ثانیه              |
| ۱۰ <sup>۸</sup>              | ۱۴۰ ثانیه                            | ۲۰ ثانیه               |
| ۱۰ <sup>۶</sup>              | ۴ ساعت                               | ۳۳ دقیقه               |
| ۱۰ <sup>۴</sup>              | ۱۶ روز                               | ۵۵ ساعت                |
| ۱۰ <sup>۲</sup>              | ۴ سال                                | ۲۳۱ روز                |

تحت شرایط ثابت دمایی، توزیع اندازه آيروسول به سمت حالتی معروف به "خودمحافظتی"، یعنی تمایل به وجود تعادلی بین سرعت انعقاد و سرعت جداشدن پیش می‌روند [۲].

۳-۴ خواص قابل اندازه‌گیری آيروسول‌ها

۱-۳-۴ اندازه و شکل

قطره‌های آيروسول در زمان شکل‌گیری خود، کروی هستند و اصولاً با توده‌ای شدن یا متراکم‌شدن کروی باقی می‌مانند. گستره قطر قطره‌ها کوچک‌تر از ۱ nm تا بزرگ‌تر از ۱۰۰ μm می‌باشد.

ذرات کربنی ایجادشده اولیه کروی هستند، با قطرهای  $D_p$  همگن هستند و دامنه اندازه ذرات بین ۱۰ nm تا ۵۰ nm است. توزیع فراوانی چنین ذراتی معمولاً گاوس<sup>۱</sup> است [۲][۳]. با این وجود هنگامی که این ذرات کوچک به یکدیگر می‌پیوندند و ذرات بزرگ‌تر ایجاد می‌کنند، ذرات توده‌ای و قدیمی کربنی در محصولات آتش سوزی به ندرت کروی بوده، ساختار هندسی آن‌ها نتیجه یک فرایند رشد است. بنابراین، برای توصیف آن‌ها به پارامترهای دیگر به جای یک کره نیاز است. پارامترهای اصلی مورد استفاده قطر آیرودینامیک و قطر جابه‌جایی الکتریکی هستند. این قطرها و تعدادی از پارامترهای تکمیلی در قسمت پایین تشریح می‌شوند.

#### ۴-۳-۱ قطر آیرودینامیک

قطر  $D_a$  نماینده قطر یک کره با چگالی  $1 \text{ gr/cm}^3$  با سرعت رسوب‌گذاری مشابه در جریان آرام ذرات آيروسول در نظر گرفته شده است. برای یک ذره نامشخص، توزیع قطر متوسط جرمی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$D_a = \sqrt{\frac{\rho}{\chi}} \cdot d_{50}$$

#### ۴-۳-۲ قطر معادل جابه‌جایی الکتریکی

این قطر، قطر کره را با داشتن جابه‌جایی الکتریکی مشابه  $Z_p$  در نظر گرفته‌شده برای ذره نشان می‌دهد و طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$D_m = \frac{Cc}{3\pi\mu B}$$

که در آن:

$Cc$  فاکتور تصحیح کونینگ هام<sup>۲</sup>

$B$  جابه‌جایی دینامیکی که نیروی مخصوص ایجاد شده به وسیله گاز احاطه شده بر روی ذره است.

#### ۴-۳-۳ قطر معادل حجم

این قطر، قطر کره با جرم مشابه به عنوان ذره مورد نظر و چگالی مشابه را نشان می‌دهد.

$$D_{ev} = \left[ \frac{m}{(\pi/6)\rho} \right]^{1/3}$$

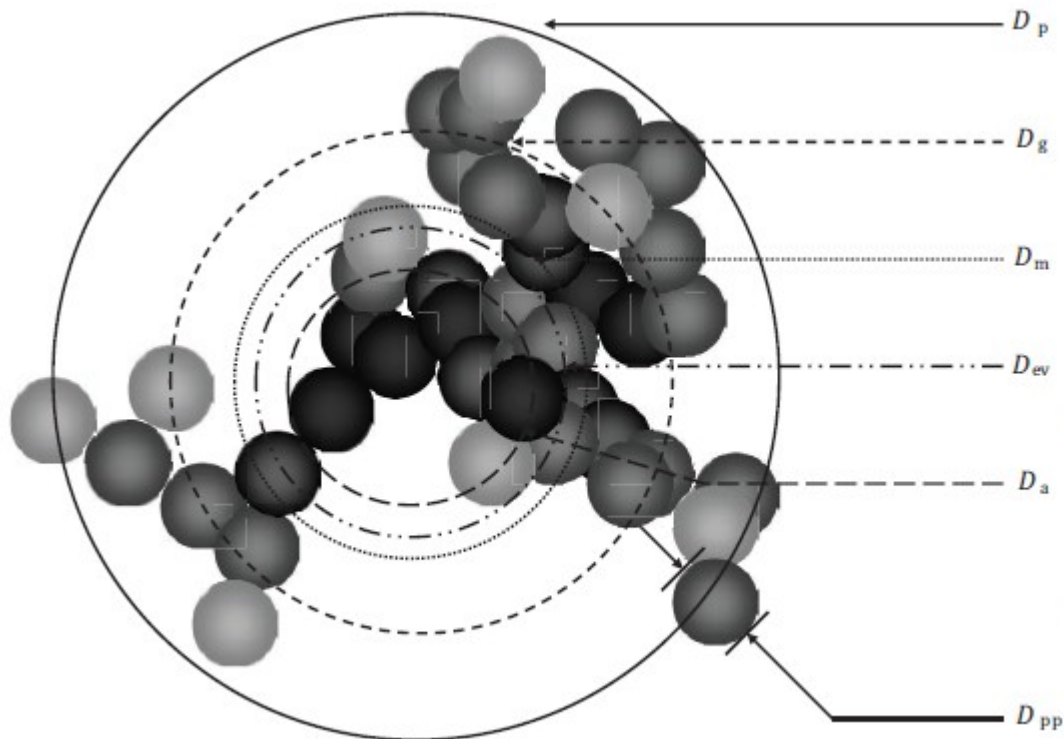
#### ۴-۳-۴ قطر گردش

این قطر،  $D_g$ ، قطر پوسته کره با جرم و جابه‌جایی اینرسی یکسان به عنوان ذره قابل سوختن را نشان می‌دهد. این قطر به‌ویژه برای توصیف ساختار بخشی از آيروسول قابل سوختن مفید است و در بند ۳-۲-۵ شرح داده خواهد شد.

#### ۴-۳-۵ سایر قطرها

1- Gaussian  
2- Cunningham correction factor

قطره‌های دیگر را می‌توان برای توصیف ذرات به کار گرفت، به همین منظور مراجع [۲] و [۳] را ببینید که شامل قطر ذرات اولیه،  $D_{PP}$  قطر توده‌ای،  $D_{agr}$  (قطر یک کره که شامل ذرات کلی است)، قطر مارتین<sup>۱</sup>، قطر فرت<sup>۲</sup> یا قطر استوک<sup>۳</sup> هستند. شکل ۱ تفاوت بین این قطرها را برای یک ذره کربن نشان می‌دهد.



شکل ۱- ویژگی‌های متفاوت قطرهای یک ذره کربن

#### ۴-۳-۱-۶ ساختار آبروسل

شکل ذرات آبروسل قابل سوختن و قطره‌ها به طور جدی در روند کار ابتکاری ویتن و ساندر<sup>۴</sup> [۹] و یولین و بوت<sup>۵</sup> [۱۰] بررسی شده‌اند. بر اساس روش شکل‌گیری آن‌ها، ذرات تولید شده به وسیله آتش یک شکل دارند که به طور عمده تحت کنترل پدیده "نفوذ محدودشده توده‌ای شدن" (DLA)<sup>۶</sup> هستند. یک رابطه نیمه‌هندسی<sup>۷</sup> به منظور تشریح کامل ساختار سوختن آبروسل از طریق فرایند توده‌ای شدن از تعداد ذرات اولیه کم  $N_{pp}$  به تعداد ذرات زیاد توده‌ای رشدیافته معرفی شده است:

$$N_{PP} = k_f \cdot \left( \frac{D_g}{D_{PP}} \right)^{D_f}$$

- 1- Martin diameter
- 2- Feret diameter
- 3- Stokes diameter
- 4- Witten and Sander
- 5- Julien and Botet
- 6- Diffusion limited aggregation
- 7- Quasi-fractal

این به عنوان یک رابطه نیمه‌هندسی در نظر گرفته می‌شود که فقط برای توصیف کوچک‌ترین ذرات اولیه ممکن می‌باشد و بالاترین محدودیت برای ذره توده‌ای شده می‌باشد. تعدادی از اندازه‌گیری‌های  $R_g$ ,  $N_{pp}$ ,  $D_{pp}$  و  $D_f$  و  $K_f$  در پیوست الف معرفی می‌شوند.

#### ۷-۱-۳-۴ توزیع اندازه ذره آبروسل

به طور کلی این پارامترها برای ویژه نمودن توزیع آبروسل گرانولی استفاده شده است که شامل قطر متوسط آبرودینامیکی (MMAD)<sup>۱</sup>، انحراف استاندارد قطرها و توزیع عملکرد هستند. این توزیع به طور کلی توزیع لگاریتم نرمال فرض می‌شود.

#### ۲-۳-۴ پارامترهای کلی آبروسل

#### ۱-۲-۳-۴ ضریب جذب نوری

رابطه بور-بیر-لامبرت<sup>۲</sup> دامنه عبور نور از سوسپانسیون ذرات را بیان می‌کند، به طور معمول برای مطالعه آتش بر اساس یک واحد عبور طول نرمال شده است. این قانون به طول موج نور وابسته است، اگرچه با یک تقریب به طور عادی به کار گرفته می‌شود و وابستگی طیفی در نظر گرفته نمی‌شود. ضریب جذب نور به غلظت دوده و گرایش ذاتی ذرات بستگی دارد و به وسیله سطح جذب ویژه آن‌ها مشخص می‌شوند. کاهش متوسط شدت تابش نور بر اساس معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K_{ext} \cdot L}$$

که در آن:

$L$  طول مسیر عبور نور (مسیری که نور از میان دود عبور می‌کند) (m)؛  
 $K_{ext}$  ضریب جذب نور ( $m^{-1}$ ).

ضریب جذب آبروسل به ضریب جذب حالت توده‌ای شده بستگی دارد و طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{ext}(N, m) = N \int f(d) C^{ext}(d, m) dd$$

که در آن:

$N$  غلظت ذره ( $m^{-3}$ )؛

$m$  ضریب شکست دوده ( $l$ )؛

$f(d)$  توزیع عملکرد قطر ذره ( $l$ )؛

$d$  قطر ذره (m)؛

$C^{ext}(d, m)$  بخش تقاطعی جذب برای قطر ذره ( $d$  ( $m^{-2} sr^{-1}$ )).

وقتی که اندازه پارامتر به اندازه کافی کوچک است،  $C^{ext}$  با تقریب رالی<sup>۳</sup> به دست می‌آید:

1- Mass median aerodynamic diameter  
 2- Bouguer-Beer-Lambert  
 3- Rayleigh approximation

$$x_p = \pi^{d_p/\lambda}$$

با

$$C^{\text{ext}} = \frac{-\pi^2}{\lambda} E(m) d^3$$

$$E(m) = \text{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$$

ضریب جذب مقدار اصلی مورد استفاده برای نمایش کدورت دود است. ضریب جذب اطلاعاتی را برای یافتن مسیر خروج، دیدن علائم خروج و غیره در یک فضای پر شده از دود، برای افراد فراهم می‌کند.

۲-۲-۳-۴ غلظت جرمی دوده

مقدار ضریب جذب برای محاسبه غلظت جرمی دوده را می‌توان طبق معادله زیر محاسبه کرد:

$$C_s = \frac{\sigma_s}{k}$$

$C_s$  غلظت جرمی ذرات دود  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ ؛

$\sigma_s$  سطح جذب ویژه نسبت به واحد جرم دوده  $(\frac{\text{m}^2}{\text{kg}})$ .

در نوشتار مرتبط برای هیدروکربن‌های گازی مقدار  $\sigma = 10 \text{ m}^2/\text{g}$  و با دقت بیشتر برابر  $\text{m}^2/\text{g}$  ( $9.6 \pm 3$ ) ( برای هیدروکربن‌های گازی است [۱۱].

این مقدار به تعدادی از عوامل بستگی دارد و آنرا می‌توان با دقت معلوم فقط برای مواد ساده قابل سوختن تحت شرایط سوختن ایده‌آل مشخص نمود.

۳-۲-۳-۴ کسر حجمی دوده

با استفاده از ضریب جذب، ممکن است بتوان کسر حجمی دوده را طبق معادله زیر به دست آورد:

$$F_v = \frac{\lambda}{6 \pi \text{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)} K_{\text{ext}}$$

که در آن:

$\lambda$  طول موج منبع است.

۴-۲-۳-۴ بازده دوده

بازده دوده نسبت بین جرم دوده و جرم کاهش‌یافته سوخت است. این عامل به طور کلی عبارتی برای سوخت در شرایط عمومی یا برای شرایط مشخص (نسبت اکسیژن، دما، فشار) است. بازده دوده عموماً دارای مراحل سوختن متنوع از افروزش تا جذب سوخت است. بازده دوده به طور معمول بر حسب کیلوگرم دوده به کیلوگرم سوخت بیان می‌شود. این مقدار را می‌توان به طور تجربی از طریق انتگرال ضریب جذب یا به روش اندازه‌گیری مستقیم تعیین کرد. پارامتر بازده دوده عموماً بر حسب ورودی داده به مدل‌های شعله در نظر گرفته می‌شود که برای محاسبه گسترش آتش استفاده می‌شوند.

۵-۲-۳-۴ ضریب پخش

ضریب پخش آبروسل‌ها به بخش برخورد پخش‌شدن توده ارتباط دارد و طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$K^{sca}(N, m) = N \int f(d) C^{sca}(d, m) dd$$

که در آن:

$N$  غلظت ذره ( $m^{-3}$ );

$m$  ضریب شکست دوده ( $l$ );

$f(d)$  توزیع عملکرد قطر ذره ( $l$ );

$d$  قطر ذره ( $m$ );

$C^{ext}(d, m)$  بخش تقاطعی جذب برای قطر ذره ( $d \text{ (m}^{-2} \text{sr}^{-1})$ ).

وقتی که اندازه پارامتر زیر به اندازه کافی کوچک است،  $C^{sca}$  با تقریب رالی<sup>۱</sup> به دست می‌آید:

$$x_p = \pi \frac{d_p}{\lambda}$$

$$C^{sca} = \frac{\pi^4}{4\lambda^4} F(m) d^6$$

که

$$F(m) = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

و

$$K^{sca} = N C^{sca}$$

با تقریب رالی، غلظت ویژه طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$N = \frac{1}{4\lambda^2} \frac{F(m) (K^{ext})^2}{E^2(m) K^{sca}}$$

و قطر ذرات اولیه طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$d_p = \left( \frac{-4\lambda^3 F(m) K^{sca}}{\pi^2 E(m) K^{ext}} \right)^{1/3}$$

دیدگاه‌های متفاوت استفاده از معادله مرتبط بین ضریب پخش‌شوندگی آبروسل و بخش تقاطع پخش‌شوندگی ذرات اولیه (یعنی اجزای اولیه توده هندسی شکل آبروسل) وجود دارد. این دیدگاه‌ها را می‌توان به دو گروه مجزا نمود:

- اولین دیدگاه بسیار تقریبی و فرضی است و مزایای تهیه معادله‌های تجزیه مرتبط با خواص اولیه ذره خود آبروسل و یک توده را دارد.

- دومین دیدگاه تکنیک‌های ریاضی قوی به منظور محاسبه پخش‌شوندگی توده‌های آبروسل با حل معادلات ماکسول<sup>۲</sup> در یک روش شمارشی یا تجزیه‌ای به کار می‌رود. به منظور کاهش تقریب، تکنیک‌های اصلی تئوری

1- Rayleigh approximation

2-Maxwell equations

رالی، تئوری گانس-دبای-رالی هستند و تئوری گانس-دبای-رالی برای توده‌های هندسی یا پخش‌شوندگی چندگانه است [۱].  
درجه تقریب به اندازه پارامتر زیر بستگی دارد.

$$x_p = \pi^{d_p/\lambda}$$

روش‌های انتگرالی (روش معادله انتگرال حجم، روش مومنت<sup>۱</sup>، دو قطبی مستقیم پخش‌کنندگی) یا روش‌های مشتق‌گیری (روش ماتریکس-T<sup>۲</sup>، نظریه عمومی لورنز-می<sup>۳</sup> برای توده‌ی هندسی و غیره) هم‌چنین برای جداسازی معادلات ماکسول استفاده می‌شوند [۱][۲][۳].

#### ۴-۳-۶ ضریب شکست

ضریب شکست یک عامل محاسباتی به دو صورت واقعی و فرضی است و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$m = n - i * k$$

که در آن:

$n$  قسمت واقعی ضریب شکست؛

$k$  قسمت فرضی ضریب شکست.

هنگام استفاده از اندازه‌گیری تجربی، ضریب شکست برای تعیین خواصی نظیر کسر حجمی مورد نیاز است. روش‌های معکوس برای تعیین ضریب شکست آبروسل‌ها با استفاده از ضریب‌های پخش‌کنندگی و جذب از مطالعه تجربی و تلفیق این نتایج با ضریب پخش‌کنندگی و جذب برآورد شده با محاسباتی که می‌توان به شکل توده هندسی در نظر گرفت، توسعه یافته‌اند.

#### ۴-۳-۳ ملاحظه آگاهی پارامترهای خاص آبروسل‌ها

ذرات اصلی در آتش منتشرشونده غنی از کربن هستند. با وجود این، در نظر گرفتن آبروسل‌های دیگر ذرات جامد پایه کربنی که می‌تواند در مقادیر ویژه وجود داشته باشد مهم است. برای مثال این‌ها شامل ذرات معدنی جامد حاصل از مواد سوختنی شامل پرکننده‌های حاصل هستند. در این حالت‌ها، شرح پارامترهای آبروسل باید با دقت اظهار شوند. برای تعدادی از رابطه‌های ارائه‌شده پیشین وقتی برای آبروسل با پایه غیر کربنی به کار گرفته می‌شوند باید دقت شود.

#### ۵ روش‌های اندازه‌گیری

##### ۵-۱ کاربردها

ماهیت اندازه‌گیری‌های آبروسل در این استاندارد از موضوع ایمنی آتش گرفته می‌شود. این موضوع شامل ارزیابی جراحات شخصی، امکان گریختن و اثر بر محیط زیست است. تمامی نواحی به طور طبیعی تحت تأثیر مستقیم و غیر مستقیم هستند و اغلب موارد عامل کلیدی جابه‌جایی گونه‌های آبروسل است. بعضی از گونه‌ها

1- Moment  
2- T-Matrix  
3- Lorenz-Mie



مانند ترکیبات گوگرد یا فلزات رادیواکتیو اثر بالایی بر آبروسل‌های کربنی دارند که می‌توانند در ریه جابه‌جا شوند (عبارت بالا را ببینید) و یا از منبع آتش جابه‌جا شوند.

عوامل مؤثر زیان‌آور فیزیولوژیکی اصلی برای اشخاص در معرض آبروسل‌های آتش، پرکنندگی ذرات، ماهیت شیمیایی و ساختار آبروسل‌ها است. اثرهای گسترش وزنی نفوذ آبروسل‌ها به‌درون دستگاه تنفسی جایی است که ماهیت شیمیایی و ساختار آن عوامل زیان‌آور اصلی هستند. به‌طور عمده اثر ذرات بزرگ‌تر مربوط به توانایی ایجاد موانع مکانیکی آن‌ها در محدوده دستگاه تنفسی است. این ذرات بزرگ ممکن است سبب صدمه حاد بافت بدن، جایی که گونه‌های شیمیایی جذب می‌شوند گردند. ذرات میکرونی به سختی جدا می‌شوند و می‌توانند در حبابچه‌های ریه<sup>۱</sup> انباشته شوند، جایی که آن‌ها می‌توانند توسط فاگوسیت بلعیده شوند و مشکل زیادی برای جدا شدن ایجاد کنند. تجمع این توده‌ها می‌تواند باعث کاهش ظرفیت تنفسی و امکان ایجاد سرطان شوند. دو اثر به نسبت حاد وجود دارند. ذرات ریزتر در حد نانو اثر سمی دارند که بیش‌تر به ماهیت شیمیایی‌شان وابسته است تا به ماهیت ساختاری. چنین اثرهایی به فرایند بیولوژیکی مولکولی مربوط می‌شوند که اخیراً مطالعه شدند.

اثرهای غیر مستقیم آبروسل‌ها بر روی سلامت و محیط زیست می‌تواند به‌طور کلی به انباشتگی زیست محیطی مربوط باشد. دو جنبه که غالباً مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از: اثر خود آبروسل‌ها و اثر گونه‌های جاذب آبروسل است. آبروسل‌های حاصل از آتش زیاد، به‌ویژه در یک دوره طولانی، ممکن است دور از منبع آتش منتقل شوند. آتش بسیاری از صنایع یا طبیعت<sup>۲</sup> به‌عنوان عامل رسوب با کیلومترها فاصله از منبع گزارش شده‌اند، اما به‌طور کلی نواحی تحت تأثیر رسوب در محدوده فاصله کیلومتری کم اطراف منبع تولید است. رسوب آبروسل‌ها بر روی گیاهان می‌تواند فتوسنتز را به دلیل خواص وابسته به نوری آبروسل‌ها کاهش دهد و گونه‌های شیمیایی می‌توانند بر روی گیاهان و منابع آب اثر زیان‌آور پایداری داشته باشند. این جنبه‌ها به تازگی مطالعه شده‌اند و راهنمای این فرایندها و کاهش اثرهای آن‌ها در کمیته فنی استاندارد بین‌المللی ISO TC92/SC3/WG6 توسعه یافته‌است.

به دام افتادن اثر آبروسل‌ها بر روی سامانه تصفیه‌کننده‌ها برای کنترل محیط‌های جوی جایی که تهویه و اثرهای فشار باید به دقت به منظور کاهش دوری از خطرهای مواد شیمیایی کنترل شوند، خیلی مهم است. به‌عنوان مثال، اگر آتش در آزمایشگاه‌های خطرهای زیستی<sup>۳</sup> یا شتاب‌دهنده‌های هسته‌ای اتفاق افتد، کارایی فیلتر آتش برای اطمینان آن که سطوح خارجی آلوده نشوند حیاتی است. در این شرایط ممکن است دستگاه تنظیم آتش بر روی کانال‌های خروجی برای جلوگیری از انتقال آتش و فرآورده‌های آن به مکان‌های ناخواسته، نصب شود. برای کاهش آزاد شدن آبروسل‌های آتش، چنین تجهیزات نصبی ممکن است با جاذب-های گاز و فیلترهایی با کارایی بالا مجهز گردند. به‌خاطر ماهیت مهروموم بودن این محافظ‌های نصب‌شده و اثرهای بالای فشار آتش، این فیلترها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در طول آتش به سرعت جمع<sup>۴</sup> نشوند.

---

1 - Alveoli

2- Wildland

3- Biohazard laboratories

4- Plug

در طراحی مراحل تصفیه، اطلاعات ماهیت انتشار، به‌ویژه آبروسل‌هایی که احتمال آزاد شدن در آتش دارند مورد نیاز است.

به دام افتادن آبروسل در سامانه‌های الکتریکی نیز از خطر مهم آبروسل‌ها در آتش منتشرشونده است. به خاطر رسانایی الکتریکی آبروسل‌ها، اگر مدارهای الکترونیکی آلوده باشند این رسانایی می‌تواند سبب خسارت جدی گردد و این وضعیت به‌ویژه زمانی جدی است که این مدارها جزو دستگاه‌های ایمنی باشند. وقتی که چنین مدارهایی پس از آتش سوزی و با وجود خوردگی (به عنوان مثال جذب هیدروژن کلرید) دوباره به کار گرفته شوند می‌توانند اثر نامطلوب بر جریان مدار داشته باشند و سبب اثرهای تاخیری گردند. چنین جنبه‌هایی دارای مخاطره و ریسک هستند که نیاز است در مطالعه ایمنی مهندسی آتش مورد توجه باشند.

## ۲-۵ گروه‌های اندازه‌گیری آبروسل

### ۱-۲-۵ اندازه‌گیری غلظت

غلظت آبروسل به عنوان مقدار مجموع اندازه‌گیری‌شده نسبت به واحد حجم تعریف می‌شود. برای مثال، غلظت عددی آبروسل برابر با کل تعداد ذرات (بدون توجه به اندازه) نسبت به واحد حجم می‌باشد و غلظت جرمی برابر با جرم کل آبروسل به حجم می‌باشد. دیگر غلظت‌های اندازه‌گیری شامل: قطرهای آبروسل، مساحت سطح، پخش نور و جریان الکتریکی نسبت به واحد حجم می‌باشند. به طور نمونه، یک وسیله اندازه‌گیری می‌تواند برای اندازه‌گیری غلظت از یک گستره وسیعی به کار گرفته شود یا یک غلظت قابل اندازه‌گیری از یک تعداد که محدود به اندازه باشند فراهم نماید. شمارش‌گرهای نوری ذره برای به دست آوردن غلظت عددی و حتی توزیع اندازه ذره برای ذرات بزرگ‌تر از  $300\text{ nm}$  مؤثر هستند. شمارش‌گرهای تراکم ذره برای تهیه غلظت عددی ذرات بزرگ‌تر مؤثر هستند. نمونه‌برداری وزن‌سنجی آبروسل‌ها می‌تواند به طور مناسب برای اندازه‌گیری غلظت جرمی ذرات زیر اندازه واقعی از طریق فشردگی اینرسی ذرات بزرگ به کار رود.

تعداد محدودی از ذرات بزرگ می‌توانند غلظت جرمی، غلظت مساحت سطح یا غلظت پخش نور را به خود اختصاص دهد. برعکس، در جریان شمارش یا عدم نمونه‌برداری تعداد کمی از ذرات بزرگ ممکن است اثر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع عددی نداشته باشند. همین‌طور، عدم توزیع تعداد زیادی از ذرات خیلی ریز ممکن است بر غلظت جرمی مؤثر نباشد.

به طور کلی، اندازه‌گیری مستقیم غلظت با گذراندن نمونه‌های آبروسل آتش به‌درون دستگاه یا انتقال از فیلتر انجام می‌شود. اندازه‌گیری به روش *in-situ* روش اندازه‌گیری غیرمستقیم مثل جذب نوری مورد نظر است. مزیت اندازه‌گیری به روش *in-situ* مثل جذب نوری، سادگی انجام آن و در این‌که ذرات آبروسل گسترش نمی‌یابند، می‌باشد. به هر حال، جذب نوری میانگین فاصله طول مسیر نور است. نمونه‌برداری استخراجی ممکن است مزاحم جریان باشد و نمونه‌برداری غیرهمسان سرعتی، کاهش نفوذی نمونه‌برداری خطی، از رسوب و کاهش جذب و ارتباط کاهش الکترواستاتیکی بر روی نمونه‌برداری مواد و جریان الکتریکی آبروسل مدنظر قرار گیرند. به طور کلی از دست رفتن ذره در تیوپ‌های نمونه‌برداری برای هر اندازه‌گیری ذرات آبروسل باید در نظر گرفته شود. برای حداقل رساندن از دست رفتن ذرات در گستره اندازه مورد نظر باید طراحی ایجاد آزمون و سامانه نمونه‌برداری پیوسته باشد. برای مثال، کوتاه‌ترین حالت ممکن نمونه‌برداری

خطی، تیوپ پلاستیکی رسانا یا فلزی، کاهش الکترواستاتیکی حداقل خواهد شد، خمش پرتوهای بزرگ و خطوط افقی کوتاه کاهش رسوب و متراکم شدن کاهش خواهد یافت و سرعت جریان حجمی بزرگ از دست رفتن نفوذ را کاهش خواهد داد. دما و رطوبت آبروسل برای جریان آن به سامانه دستگاهی و مخلوط شدن با هر نوع رقیق کننده هوا ممکن است بر توزیع اندازه ذره آبروسل اثرگذار باشد. وقتی آبروسل های آتش در دمای بالاتر از محیط جداسازی شوند تراکم کاهش خواهد یافت. هوای رقیق کننده در دما و رطوبت نسبی مشابه، بخار شدن و متراکم شدن ذرات فرار و آب را کاهش می دهد.

غلظت آبروسل اندازه گیری شده ممکن است میانگین مقداری در یک فاصله زمانی یا زمان انحلال باشد که به دستگاه مورد استفاده بستگی دارد. متوسط زمان یک آزمون معمولی مستلزم محدودیت مقداری مانند مقدار کل دوده تولیدی از سوختن نمونه یا وقتی که بازده از کاهش کل جرم نمونه محاسبه می شود، است. نمونه- برداری پالایش وزنی ممکن است به متوسط گیری زمان به منظور انباشتگی کافی جرم برای توزین رسوب به طور صحیح نیاز باشد. همین طور، نمونه برداری جذب آبشاری وزن سنجی<sup>۱</sup> در چند بار فاصله زمانی به منظور به دست آمدن جرم کافی در بسترهای جدا، مرتبط با گستره اندازه مورد نظر، انجام شود.

#### ۵-۲-۲ اندازه گیری توزیع اندازه

توزیع اندازه آبروسل نماینده آماری مقدار کل اندازه های ذرات موجود در یک آبروسل نمونه برداری شده است. یک آبروسل با پراکندگی یک جهتی به وسیله پارامتر یگانه که تمامی ذرات یکسان هستند معرفی می - شود. آبروسل ها با پراکندگی چند جهتی، ذرات اختصاصی در یک دامنه از اندازه هستند. آبروسل های آتش دارای پراکندگی متنوع هستند و ممکن است قطرشان بیش از دو تا سه دهک باشد. توزیع اندازه می تواند هر غلظت اندازه گیری شده موجود در گستره های اندازه جدا<sup>۲</sup> یا به عنوان عامل پیوسته اندازه ذره معرفی شود. بیشتر وقت ها توزیع اندازه ذره از نظر گرافیکی مانند هیستوگرام با غلظت موجود جدا در اندازه میله<sup>۳</sup> یا ظرف معرفی می شود. بسیاری از تجهیزات برای مثال، جاذب های آبشاری، پیمایش حرکتی دانه بندی ذرات<sup>۴</sup>، دانه بندی های نوری<sup>۵</sup> و غیره، داده فشرده<sup>۶</sup> ایجاد می کنند. شکل ۲۴ (بخش ۷-۱ را ببینید). مثالی از یک نمودار هیستوگرام است. منحنی توزیع تجمعی یا تناوبی نماینده های مناسب توزیع اندازه هستند زیرا خواص ریاضی برای محاسبه اندازه اطلاعات مرتبط مورد نظر مجاز می باشد. از روی توزیع تجمعی به آسانی می توان بخش اندازه ثابت بالا یا پایین را معین کرد. شکل توزیع تناوبی برای بسیاری از آبروسل ها با دنباله های طولانی با اندازه های بزرگ تر که در بسیاری از موارد چند مدلی<sup>۷</sup> هستند، نا متقارن است. برخلاف توزیع نرمال، مد، میانه و میانگین اندازه ها متفاوت هستند و توزیع های قطر ذره به طور کلی از کم ترین مقدار به بیش ترین مقدار  $N$ ، میانه و میانگین درجه بندی می شوند. مد اغلب از نظر اندازه متناوب است، در میانه اندازه توزیع ذره به دو ناحیه مساوی تقسیم می شوند و میانگین متوسط مقادیر است.

- 1- Gravimetric cascade impactor sampling
- 2- In discrete
- 3- Size bar
- 4- Particle sizers
- 5- Optical particle sizers
- 6- Binned
- 7- Multimodal

به خاطر توزیع مورب متشکل از دنباله طولانی اندازه‌های بزرگ‌تر، توزیع‌های اندازه آبروسل متناوب با یک توزیع نرمال لگاریتم معرفی می‌شوند. این برابر با توزیع نرمال لگاریتم اندازه ذره است.

#### ۳-۲-۵ اندازه‌گیری ویژگی‌های ریختی

ریخت ذرات از ویژگی‌های مهم آبروسل‌های قابل سوختن، به‌ویژه به منظور بیان میزان سمی بودن بالقوه آن‌ها است. از سال ۱۹۸۰، به عنوان اجسام نیمه‌هندسی در نظر گرفته شده‌اند. چند روش آزمون تعیین عوامل هندسی آبروسل‌های احتراق‌پذیر از این پس معرفی می‌شوند. لیست ارایه شده کامل نیست و اطلاعات بیش‌تر را می‌توان در مرجع [۴] یافت. به هر حال، این موارد همیشه برای اندازه‌گیری‌های آتش منطبق نیستند. برای مثال، پخش نور زاویه‌دار [۱۵] که به طور وسیعی برای ریخت‌شناسی دوده در سوختن استفاده می‌شود به سازگار شدن با انتشار آتش نیاز دارد.

#### ۱-۳-۲-۵ تجزیه میکرونموداری ذرات احتراق‌پذیر

اولین دیدگاه ساده است و در مراجع بسیاری ذکر شده است. این روش مبنای روش نمونه‌برداری *in-situ* و آزمون تصویری میکرو نموداری ذرات احتراق‌پذیر است. نخستین نکته این روش بیش‌ترین استفاده از یک یا چند روش نمونه‌برداری است، در اینجا سه روش که بیش‌تر مورد استفاده‌اند شرح داده شده‌اند.

#### ۱-۱-۳-۲-۵ نمونه‌برداری به روش *in-situ*

#### ۱-۱-۳-۲-۵ رسوب‌گذاری دمایی<sup>۱</sup> (TP)

این روش، به طور عمده برای مطالعات آبروسل به وسیله گرین و واستون<sup>۲</sup> [۶] به کار گرفته شد که رسوب‌کردن دمایی برای اندازه‌گیری غلظت غبار در معادن را توسعه دادند. این فرایند بر اساس جابه‌جایی ذرات از سطح‌های داخلی و از دمای پایین به دمای بالا می‌باشد. در این حالت، میکروسکوپی الکترونی عبوری<sup>۳</sup> (TEM) مستقر بر روی میله دمایی به طور ساده با استفاده از پیستون پنوماتیکی در منطقه شعله جا داده می‌شود. استفاده از این وسیله به فراوانی در منابع به کار رفته است، اما هنوز در مرحله ابتدایی است. باید توجه شود که این دستگاه تجاری اخیر مؤسسه سم‌شناسی و پزشکی تجربی فران هوفر<sup>۴</sup> از تیوپ‌های نمونه‌برداری تشکیل شده است که آبروسل را تا  $180^{\circ}\text{C}$  حرارت می‌دهد و منطقه ترسیب دمایی از یک شبکه TEM مسقر بر روی سامانه سردکننده " اثر پلتیر<sup>۵</sup> " تشکیل شده است. این دستگاه برای مطالعه نانوذرات ایجاد شده گدازنده آلومینیم استفاده شده است [۹]. مزیت‌های عمده نمونه‌برداری پدیده دمایی، نفوذ اثر کم قطر ذره روی کارایی جمع‌آوری دمایی برای ذره با اندازه زیر میکرون می‌باشد. به‌علاوه، ترسیب مستقیم ذرات روی شبکه TEM امکان مشاهده مستقیم بدون هرگونه پیش‌اصلاح ذرات را می‌دهد.

#### ۲-۱-۳-۲-۵ رسوب‌دهنده الکترواستاتیک (EP)

روش دوم بر اساس جابه‌جایی بار ذره داخل یک میدان الکتریکی است. در این شرایط، نیروهای الکترواستاتیک ذرات باردار آزمون‌شده به طور مستقیم به شرایط جریان ذره و شدت میدات الکتریکی مربوط

1- Thermophoretic precipitator

2- Green and Watson

3- Transmission Electron Microscopy Grid

4- Institute of Toxicology and Experimental Medicine

5 - Peltier-effect

می‌شود. این رفتار فیزیکی ذرات باردار در تحلیل‌گر جابه‌جایی دیفرانسیلی<sup>۱</sup> (DMA) برای ایجاد آبروسل با اندازه مشخص برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات زیر میکرون استفاده می‌شود. وسیله تجاری نمونه‌برداری نانوابروسل (NAS 3089) [۲۰]، به تازگی به وسیله TSI به منظور نمونه‌برداری مستقیم آبروسل با اندازه زیرمیکرون روی میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) توسعه یافتند. مطابق با این طراحی، این دستگاه به‌ویژه برای ذرات با قطر کمتر از ۱۰۰nm مناسب است، اما با اصلاح امکان گسترش اندازه ذرات در این محدوده ممکن است.

#### ۳-۱-۱-۳-۲-۵ نمونه‌برداری فیلتراسیون<sup>۲</sup> (FS)

آخرین دیدگاه نمونه‌برداری آبروسل، به منظور آزمون ساختار ذره، بر اساس فیلترنمودن است. این روش شبیه روش وزن‌سنجی مشروح در بند ۲-۶-۵ می‌باشد، تفاوت عمده متوسط نمونه‌برداری است که در این حالت، جنس غشا ریزهسته<sup>۳</sup> از پلی‌کربنات می‌باشد. هنگام استفاده، غشای ریزهسته در داخل فیلتر شیلنگی قرار داده می‌شود و دوره نمونه‌برداری چنان انتخاب می‌شود که غلظت عددی ذرات را بتوان قبل از انباشته‌شدن ذرات در سطح غشا اندازه‌گیری نمود. بعد از نمونه‌برداری یک لایه کربن برای سطح غشا به کار گرفته می‌شود سپس فیلتر ریزهسته توسط حلال کلروفرم به منظور انتقال ذرات به شبکه TEM حل می‌شود. اسپورنی [۲۱] این روش را داده است.

مزیت این روش امکان اندازه‌گیری گستره وسیعی از اندازه ذرات می‌باشد. با فیلترهای دارای منفذ متفاوت، ذرات نانو (کمتر از  $0.1\mu\text{m}$ ) یا ذرات بزرگ‌تر (بزرگ‌تر از  $10\mu\text{m}$ ) را می‌توان با استفاده از روش مشابه نمونه‌برداری نمود. مزیت اصلی این روش پیش‌اصلاحی فیلتر ریزهسته است. در مقابل با روش‌های ترسیبی الکترواستاتیکی و دمایی، این روش بر اساس رسوب لایه کربنی / حلالیت کلروفرم می‌باشد که ممکن است در وضعیت خاص ریختی ذرات مورد مطالعه را اصلاح نمود.

#### ۲-۱-۳-۲-۵ روش تجزیه تصویری میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM)

بعد از نمونه‌برداری آبروسل قابل سوختن، تعداد زیادی از نمودارهای میکرو TEM به منظور نشان دادن مقدار کلی آبروسل قابل سوختن باید اصلاح گردند. قطر اولیه ذره  $D_{pp}$  به طور مستقیم از روی نمودارهای میکرو TEM به دست می‌آید و لاتکس کروی پلی‌استایرن<sup>۴</sup> کالیبره برای کالیبره‌نمودن نمودار پیکسل میکرو به مقیاس نانومتر استفاده می‌شود. سپس نمودارهای میکرو خاکستری<sup>۵</sup> به صورت دوتایی برای آزمون‌های تصویری تبدیل می‌شوند:

الف سطح اولیه ذره  $S_{pp}$  با استفاده از این قطر اندازه‌گیری می‌شود؛

ب تعداد اجزای پیکسل ذرات اندازه‌گیری می‌شود و سطح پیکسل دوبعدی شده<sup>۶</sup> توده  $S_{ag}$  2D به دست می‌آید؛

- 
- 1- Differential Mobility Analyser
  - 2- Filtration sampling (FS)
  - 3- Nucleopore
  - 4 - polystyrene sphere latex
  - 5- Grey-levels micrographs
  - 6- 2D-projected pixel surface

پ تعداد پیش‌بینی‌شده ذرات اولیه دوبعدی که تشکیل‌دهنده ذرات هستند با استفاده از سطح‌های اندازه‌گیری شده ذره اولیه و توده محاسبه می‌شود؛

$$N_{pp2D} = \frac{S_{ag2D}}{S_{pp}}$$

ت تعداد ذرات سه‌بعدی اولیه با استفاده از یک معادله تجربی محاسبه می‌شود: [۲۲][۲۳][۲۴]

$$N_{pp3D} = k_a \cdot N_{pp2D}^\alpha$$

که

$k_a$  و  $\alpha$  مقدار تجربی هستند، بدون بعد که به ترتیب ۱٫۱۵ تا ۱٫۱۶ برای  $k_a$  و ۱٫۰۹ تا ۱٫۱۰ برای  $\alpha$  در نظر گرفته شده است.

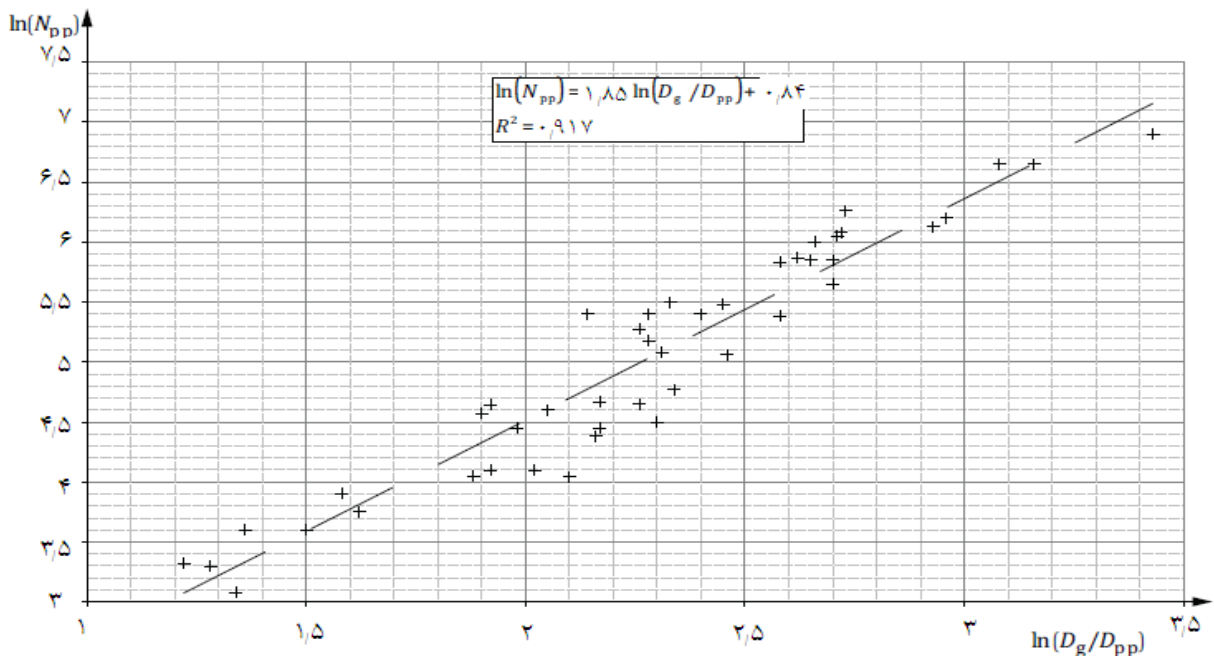
ث چرخش تصویری دوبعدی شعاع  $R_{g2D}$  از روی نمودار میکرو TEM با استفاده از مربع فاصله  $r_i$  بین مرکز جرم توده نمونه و اختلاف ذره اولیه محاسبه می‌شود:

$$R_{g2D}^2 = \frac{1}{N_{pp2D}} \cdot \sum_i r_i^2$$

ج چرخش سه‌بعدی شعاع  $R_{g3D}$  نیز از معادله تجربی محاسبه می‌شود و با استفاده از تکرار روش  $D_f$ :

$$R_{g3D} = \left( \frac{D_f + 2\alpha}{D_f + 2} \right)^{1/2} \cdot R_{g2D}$$

نتایج پایانی چندین مجموعه تجربی ( $N_{pp3D}$ ,  $R_{g3D}$ ) هستند که برقراری رابطه هندسی بین این دو پارامتر را ممکن می‌کند. نمایش کلی روی مقیاس لگاریتم - لگاریتم بین  $N_{pp}$  و نسبت  $D_g/D_{pp}$  است، در این صورت زاویه خطی رگرسیون کاربردی برای نتایج کاربردی ابعاد هندسی  $D_f$  است و عرض از مبدأ لگاریتم پیش‌فاکتور  $k_f$  است. یک مثال از نتیجه تجربی در شکل ۲ ارائه شده است طوری که بعد هندسی ۱٫۸۵ و پیش‌فاکتور هندسی مساوی ۲٫۳۲ است.

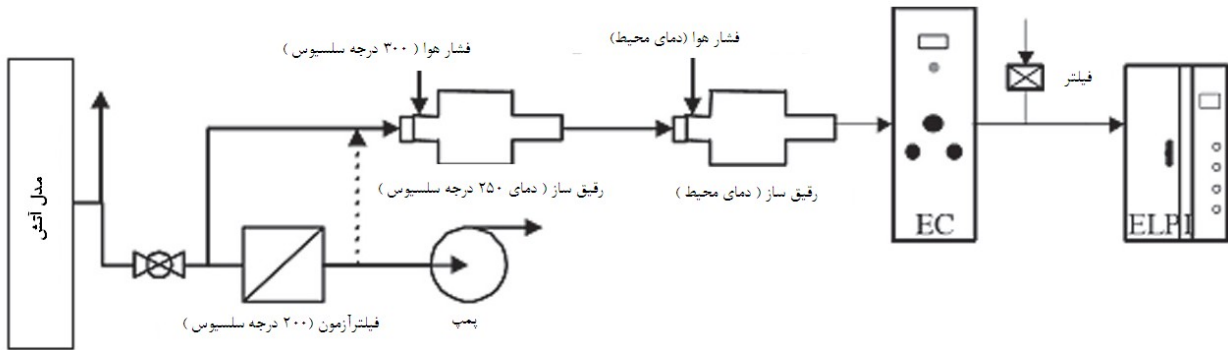


شکل ۲- رابطه کلی بین  $N_{pp}$  و نسبت  $D_g/D_{pp}$

تجزیه مشابه را می‌توان با تکنیک‌های دیگر میکروسکوپی انجام داد. یکی از این روشی را که می‌توان نام برد میکروسکوپ اتمی<sup>۱</sup> برای ذرات نانو است. این تکنیک دانش پارامترهای 3D را ممکن می‌کند، در حالی که روش TEM فقط برای تصویرسازی دوبعدی کاربرد دارد. بعد سوم اندازه‌گیری مستقیم شعاع چرخش 3D و  $R_{g3D}$  و تعداد ذرات اولیه سه‌بعدی را ممکن می‌کند.

۲-۳-۲-۵ تجزیه سری DMA-ELPI<sup>۲</sup>

روش تجزیه TEM آبروسل‌های سوختنی روشی توانمند اما زمان‌بر برای تعیین ریخت‌شناسی است. یک راه مقایسه پاسخ جذب‌کننده فشار پایین الکتریکی به جابه‌جایی یک جهتی قطر ذره دوده طبقه‌بندی شده با استفاده از تحلیل‌گر جابه‌جایی دیفرانسیلی است [۲۵]. تکنیک اول، ELPI، اندازه‌گیری تعداد توزیع بر اساس قطر آئرودینامیکی را فراهم می‌کند، در حالی که روش DMA جابه‌جایی یک‌جهتی آبروسل را بر اساس قطر جابه‌جایی الکتریکی بیان می‌دارد. شمای دستگاه تجربی برای تجزیه ساختاری DMA-ELPI در شکل ۳ تشریح شده است [۲۵].



شکل ۳- دستگاه تجربی برای تجزیه ساختاری DMA-ELPI

در وضعیت جابه‌جایی (قطر ذره همانند مسیر آزاد میانگین مولکول در حالت گازی است)، قطرهای جابه‌جایی الکتریکی و آبرودینامیکی توده‌های هندسی طبق معادله زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{D_{a-\infty}}{D_{pp}} \left( \frac{D_{m,trans}}{D_{pp}} \right)^{\frac{D_f - \alpha'}{3 - \alpha'}}$$

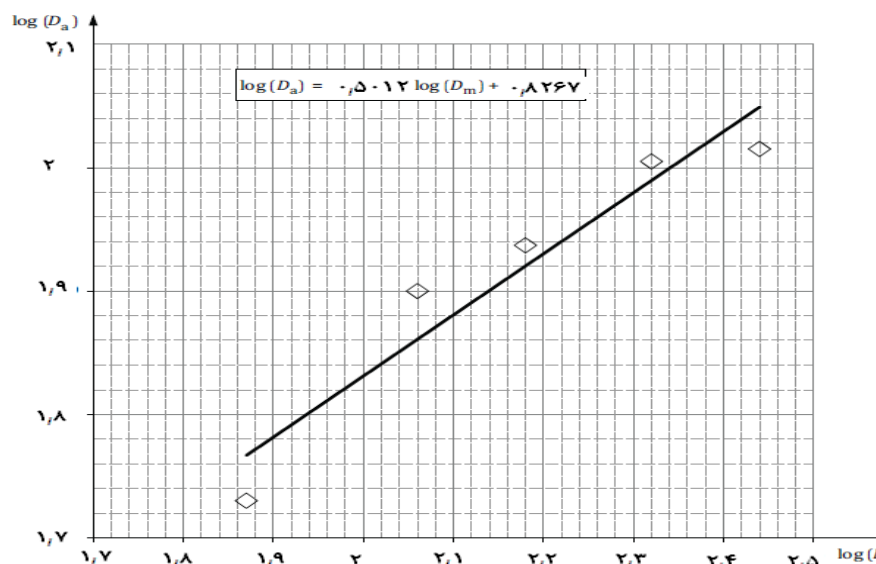
که در آن  $\alpha'$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_c \infty \left( \frac{2. \lambda}{D_p} \right)^{\alpha' - 1}$$

سپس بعد هندسی را می‌توان با چند روش اندازه‌گیری ELPI از DMA دسته‌بندی شده ذرات قابل سوختن تکرار کرد. یک نمونه مثال تابع  $\log(Da) = f(\log(Dm))$  در شکل ۴ ارائه شده است.

1- Atomic Force Microscopy (AFM)

2 - Differential Mobility Analyser- Electrical Low Pressure impactor



شکل ۴- محاسبه بعدهای هندسی به روش تجزیه سری DMA-ELPI

دیدگاه دوم اندازه‌گیری بعد هندسی یک مزیت دارد و آن‌که اندازه‌گیری را بر حسب زمان واقعی مشابه می‌دهد. این روش مستقیم، اندازه‌گیری بعد هندسی را در زمان‌های مختلف حین آتش ممکن می‌سازد. به هر حال باید یادآوری نمود که این روش بر اساس یک سری فرضیه‌های نظری است که از موضوعات جدید است [۱].

#### ۴-۲-۵ اندازه‌گیری شیمیایی

#### ۱-۴-۲-۵ ماهیت شیمیایی آبروسل‌ها

با ارایه یک روش نمونه‌برداری مناسب (تکنیک‌های نمونه‌برداری بالا را ببینید)، آبروسل‌ها را می‌توان به صورت شیمیایی ویژه کرد. یک عامل مهم تجزیه شیمیایی ذرات آبروسل یا قطره‌های ریز، ماهیت سطحی است که آبروسل‌ها جمع‌آوری می‌شوند (به عنوان یک فیلتر). وقتی تجزیه روش وزنی وجود آبروسل پخش چندگانه را نشان می‌دهد، برای تصدیق گستره متنوع اندازه وزنی ممکن است ماهیت شیمیایی هر کدام متفاوت باشند. بنابراین در این حالت تعیین گستره اندازه قطره ریز مایع یا ذرات نیاز است.

بعضی از فراورده‌ها یا مواد احتراق‌پذیر می‌توانند محتوی پرکننده با پایه معدنی یا سایر افزودنی‌هایی باشند که در آبروسل‌های تولیدشده در یک آتش وجود داشته باشند. نمونه‌ای از مواد معدنی عبارتند از تیتانیوم‌اکسید، آلومینیم‌اکسید و خاک رس. به وسیله دستگاه پراش پرتو ایکس و فلورسانس پرتو ایکس بر روی مجموعه فیلترها می‌توان تجزیه کیفی و نیمه کمی به ترتیب برای شناسایی عناصر و ساختار بلوری در سطح مجموعه انجام داد. تجزیه فلزهای موجود در آبروسل را می‌توان با استفاده از حلال منتخب فیلترشده و اصلاح‌شده با اسید، با محلول تیزاب سلطانی<sup>۱</sup> یا اسید سولفوریک انجام داد. محلول حاصل را می‌توان با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یون مایع، پلاسما القایی جفت‌شده یا جذب اتمی تجزیه کرد. در تمام این موارد، تجزیه کمی امکان‌پذیر است. لازم به یادآوری است که فلزهای موجود در شعله می‌توانند اکسیده یا کاهیده شوند و منجر به ترکیب‌هایی شوند که با این روش قابل اندازه‌گیری نباشند.

1- Regal solution



برای تمام این روش‌ها، وقتی که فیلتر برای نمونه‌برداری استفاده می‌شود، تجزیه شاهد فیلتر ضروری است. سایر ترکیبات را می‌توان بر اساس دانش پایه محصولات قابل سوختن ناشی از آتش تجزیه کرد. به هر حال، از آنجایی که ماهیت این ترکیبات با ماهیت سوخت، شرایط احتراق و سایر برهم‌کنش‌ها متفاوت می‌باشد، این روش می‌تواند مشکل باشد.

#### ۲-۴-۲-۵ تجزیه فراورده‌های گازی جذب‌شده

بسیاری از گازها می‌توانند روی آبروسل‌های دوده جذب شوند، به طور ویژه، آبروسل‌های کربنی می‌توانند ساختار و خواص سطحی نزدیک به زغال فعال شده که یک محصول جذب‌کننده گازی تجاری است داشته باشند. گونه جذب‌شده بر روی آبروسل می‌تواند جابه‌جا شود، برای مثال، به درون ریه منتقل شده و به موجب آن اثر فیزیولوژیکی‌شان افزایش یابد. بسیاری از گونه‌های جذب‌شده را می‌توان واجذب نموده و به طور جداگانه هم به روش فاز گازی یا فاز مایع تجزیه کرد.

در جدول ۲ خلاصه‌ای از گستره واجذب‌شدن و سپس تکنیک‌های اندازه‌گیری فهرست شده است. مهم است یادآوری شود که این روش‌ها برای گازهایی استفاده می‌شوند که دارای پیوند الکترواستاتیک یا یونی قوی در سطح مولکولی دارند. گونه‌هایی که پیوند کوالانسی شیمیایی دارند را با این روش نمی‌توان واجذب نمود. ادامه نمونه‌برداری، مواد مخزن<sup>۱</sup> (مثال لایه فیلترها) را می‌توان با یک حلال شست‌وشو داد و گونه‌های گاز جذب‌شده را در یک فاز مایع (استخراج جامد-مایع) استخراج نمود. تجزیه محصول‌های به دام افتاده در حلال‌های مایع می‌تواند اطلاعات بسیاری برای گونه‌های جذب‌شده اصلی دام‌افتاده روی آبروسل فراهم نماید. انتخاب‌های مناسب حلال استخراج و تکنیک آزمونی مهم هستند. تکنیک‌های فاز مایع به طور کلی برای چنین اهدافی مناسب هستند و در جدول ۲ ارایه شده‌اند. مراجع [۲۶] و [۹۰] جزییات کامل تعدادی از این تکنیک‌ها را معرفی می‌کنند.

جدول ۲- تجزیه تعدادی از گازهای به دام‌افتاده در آبروسل‌های کربنی

| روش تجزیه‌ای                        | گونه‌های تجزیه‌شده                | مایع جداشده                                          | ماده به دام افتاده |
|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| HPLC                                | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>     | H <sub>2</sub> O + 3 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub>    |
| Titrimetry , HPLC                   | Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> O                                     | HBr و HCl          |
| HPLC, ISE (Ion-Selective Electrode) | F <sup>-</sup>                    | NaOH 1 M                                             | HF                 |
| HPLC , Spectrocolorimetry           | CN <sup>-</sup>                   | NaOH 0,1 M                                           | HCN                |
| GC-MS, GC-FID                       | مقداری در فاز مایع                | CS <sub>2</sub>                                      | ترکیبات آلی        |

تعدادی از ترکیب‌ها را می‌توان به روش واجذب دمایی<sup>۲</sup> (TSA) و واجذب فشاری<sup>۳</sup> (PSA) استخراج نموده و به صورت فاز گاز تجزیه نمود. این روش برای ترکیب‌های آلی نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک و آلیفاتیک، آلدئیدها و کتون‌ها تا ترکیبات ۲۰ کربنی مناسب است. روش‌های معمول مورد استفاده برای تجزیه

1- Host  
2- Thermal desorption  
3- Pressure desorption

گاز کروماتوگرافی با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای (GC-FID) یا گاز کروماتوگرافی با آشکارساز جرمی (GC-MS) هستند. در پیوست ب اطلاعات کمی گازهای جذب شده که بتوان توسط آبروسل منتقل نمود ارایه شده است.

#### ۳-۵ ملاحظه‌های اولیه نمونه‌برداری و تجزیه آبروسل‌ها

#### ۱-۳-۵ ملاحظه‌های انتخاب دستگاه اندازه‌گیری

نخستین ملاحظه این است که اندازه‌گیری به روش "in-situ" خواهد بود چه نمونه استخراج شده از شعله یا آتش منتشرشونده باشد. در انتخاب روش، اطمینان از این‌که روش برای داده به دست آمده مزاحم نیست مهم است. سپس انتخاب روش، نوع وسیله اندازه‌گیری یا وسایلی که می‌توان به کار گرفت دیکته می‌کند. روش‌های in-situ اغلب بر پایه اصول نوری هستند و به طور کلی غیرمزاحم هستند و اطلاعات زمانی وابسته متمرکز شده از مسیر نور ثابت را می‌دهند. روش‌های استخراجی غیر مزاحم هستند و به احتمال زیاد بر بازداري ماهیت آبروسل نمونه‌برداری شده مؤثر هستند.

دومین ملاحظه این است که داده‌های مورد نظر یا به صورت تعیین غلظت و / یا توزیع اندازه هستند. ملاحظه سوم گستره مورد انتظار از توزیع وزن سنجی آبروسل مورد نظر است. برای مثال، وسایل طراحی شده برای دام‌انداختن نانوآبروسل‌ها به‌طور کلی متفاوت هستند و برای تله‌گذاری بیش‌تر آبروسل‌های متداول نامناسب هستند.

ملاحظه چهارم درجه زمان جداسازی مورد نظر است، یعنی فاصله زمانی که اندازه‌گیری انجام می‌شود. اندازه‌گیری نوری می‌تواند تنها در کسری از ثانیه انجام شود. بنابراین، بسیاری از اندازه‌گیری‌ها برای اختصاصی کردن مواد منتشرشونده در طول آتش نیاز می‌شود. برای روش‌های استخراجی، عواملی مانند نمونه‌برداری حجمی، رقیق‌نمودن آبروسل و حداکثر جرم آبروسل قابل دام افتادن، بر زمان جداسازی مؤثر هستند.

#### ۲-۳-۵ ملاحظه‌های شرح اندازه‌گیری‌ها

اندازه‌گیری‌های تکمیلی وجود دارند و اندازه‌گیری باید در مکان نزدیک به اندازه‌گیری آبروسل انجام شوند. این‌ها شامل دمای آتش منتشرشونده، رطوبت نسبی، سرعت و فشار دینامیکی، جریان دود در نقطه اندازه‌گیری و امکان اجزای گاز منتشرشونده می‌باشد. با چنین داده‌هایی، اگر اجزای عنصری سوخت مشخص باشد موازنه اکسیژن و کربن برای سوخت‌ها ممکن است.

انتخاب مناسب و دقیق مواد مورد استفاده برای نمونه‌برداری خطی و خواص شیمیایی مواد تله‌ای (شامل فیلترها) ضروری است. این کار ممکن است با مواد مورد استفاده در سایر نواحی اندازه‌گیری آبروسل متفاوت باشد. برای مثال، مواد مورد استفاده در نمونه‌برداری آتش منتشرشونده باید نسبت به توده‌ای شدن در برابر ترکیبات اسیدی مقاوم باشد. ملاحظه دیگر انتخاب مواد، امکان حرارت‌دادن کل ظرف نمونه‌برداری به منظور جلوگیری از متراکم‌شدن بخارات منتشرشونده است. هر نقطه سرد می‌تواند سبب توده‌ای شدن بیش‌تر

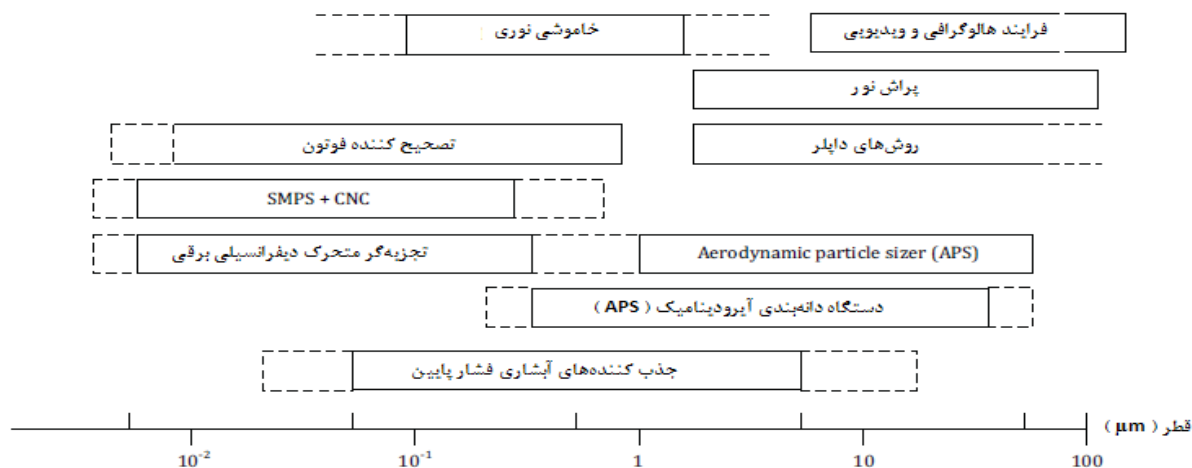
1- Flame-ionization detector

2- Mass-spectrometry

آیروسول شود. به منظور آزمون کمی باید دقت شود تا سامانه نمونه‌برداری فاقد نشستی آزاد و هدررفت نمونه باشد. جنبه‌های محدودکننده شناسایی و آزمون کمی آیروسول‌ها نیز برای گازها کاربرد دارد.

#### ۴-۵ انتخاب روش‌ها

تکنیک اندازه‌گیری برای گستره اندازه قطره ریز مایع و ذره در شکل ۵ و جدول ۳ آمده است، ادامه شکل ۵، تکنیک اصلی اندازه‌گیری آیروسول‌ها در آتش و بعضی از خواص مهم خلاصه شده است.



شکل ۵- گستره اندازه‌گیری بسیاری از روش‌های معمول اندازه‌گیری آیروسول

#### جدول ۳- خلاصه روش‌های اندازه‌گیری آیروسول‌ها

| اصول                          | نام روش                          | اطلاعات دریافت‌شده                   | کاربرد              | گستره قطر (µm)                                  | تفکیک پذیری | حداکثر غلظت     | سادگی روش <sup>a</sup> | سادگی شرح |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|-------------|-----------------|------------------------|-----------|
| خاموشی نوری                   | In situ, غیر مخرب وابسته به زمان | ضرب خاموشی، غلظت دوده و راندمان دوده | مدل‌سازی، تنظیم     | ۰٫۱ - ۱                                         | NA          | بدون محدودیت    | +++                    | +++       |
| پراش نور                      | In situ, غیر مخرب وابسته به زمان | ضرب خاموشی، توزیع اندازه ذره         | مدل‌سازی            | > ۱                                             | NA          | محدود به سیگنال | ++                     | ++        |
| میکروآنالیز، ام‌روسکپی        | In situ, غیر مخرب وابسته به زمان | غلظت دوده و توزیع اندازه             | -                   | > ۵                                             | -           | غلظت‌های کم     | +                      | ++        |
| هالوگرافی                     | In situ, غیر مخرب وابسته به زمان | غلظت دوده و توزیع اندازه             | -                   | > ۱۰                                            | -           | غلظت‌های کم     | +                      | ++        |
| طیف‌سنجی وابسته نور           | In situ, غیر مخرب وابسته به زمان | غلظت دوده و توزیع اندازه             | تحقیقاتی            | ۰٫۰۱ - ۱                                        | -           | غلظت‌های کم     | +                      | +         |
| روش داپلر                     | In- situ, مستقل زمان             | غلظت دوده و توزیع اندازه             | تحقیقاتی            | > ۱                                             | -           | غلظت‌های کم     | +                      | +         |
| روش وزن‌سنجی مستقیم           | استخراج، جمع‌آوری                | غلظت اصلی دوده و بازده دوده          | مقایسه‌ای، مدل‌سازی | کلی                                             | NA          | محدودیت دستگاهی | +++                    | +++       |
| جذب آبخاری                    | استخراج، جمع‌آوری                | توزیع وزن‌سنجی (قطر آئرودینامیک)     | مواد سمی            | ۰٫۳ - ۳۰ <sup>b</sup><br>۰٫۰۲ - ۳۰ <sup>c</sup> | +           | ۰٫۱ - ۱ گرم     | ++                     | ++        |
| جذب فشاری الکتریکی فشار پایین | استخراج- وابسته زمان             | توزیع وزن‌سنجی (قطر آئرودینامیک)     | مواد سمی            | ۰٫۰۲ - ۳۰                                       | +           | ۰٫۱ - ۱ گرم     | ++                     | +         |
| چرخش ریز تعادل عنصر باریک     | استخراج- وابسته زمان             | بازده دوده در سایز برشی داده         | منظم                | ۰٫۵ - ۱۰۰                                       | NA          | -               | +                      | +++       |
| فرکانس ارتعاشی بلور           | استخراج- وابسته زمان             | بازده دوده در سایز برشی داده         | منظم                | ۰٫۵ - ۱۰۰                                       | NA          | -               | +                      | +++       |

|                                                                                                                                           |     |                               |    |            |                            |                                      |                      |                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------|----|------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| +                                                                                                                                         | ++  | -                             | ++ | ۰٫۱-۱      | تحقیقاتی، نانو<br>آیروسرها | توزیع وزن سنجی<br>(قطر الکتریکی)     | استخراج- وابسته زمان | ذره‌ساز پیمایش متحرک<br>(SMPS)      |
| +                                                                                                                                         | ++  | -                             | ++ | ۰٫۰۰۵-۰٫۵۶ | تحقیقاتی، نانو<br>آیروسرها | توزیع وزن سنجی<br>(قطر الکتریکی)     | استخراج- وابسته زمان | ذره‌ساز آگزوز موتور<br>(EEPS- FMPS) |
| ++                                                                                                                                        | +++ | < 100<br>part/cm <sup>3</sup> | ++ | ۰٫۵-۲۰     | تحقیقاتی                   | توزیع وزن سنجی<br>(قطر آئرو دینامیک) | استخراج- وابسته زمان | ذره‌ساز آبرودینامیک<br>(APS)        |
| <p>a انعطاف پذیری، قابل استفاده در مدل‌های مختلف آتش</p> <p>b جذب‌کننده‌های آبخاری استاندارد</p> <p>c جذب‌کننده‌های آبخاری فشار پایین</p> |     |                               |    |            |                            |                                      |                      |                                     |

## ۵-۵ روش‌های اندازه‌گیری in-situ

### ۱-۵-۵ کلیات روش

روش‌های اندازه‌گیری in-situ بر اساس تکنیک‌های نوری مانند جذب نور (فوتومتری)، پراش لیزری یا فرایند تصویری می‌باشد. به‌طور معمول، این اندازه‌گیری‌ها از طریق پنجره‌ها در دستگاه‌ها به منظور جداسازی دود از نورهای ظریف انجام می‌شوند. به هر حال، در حین آزمون، دوده می‌تواند روی پنجره رسوب کند و پیامد آن باعث ناهموار شدن خط مبنا شود. برای رفع این مشکل به تصحیح پیش‌آزمون داده نوری نیاز است. به تازگی طرح بدون پنجره با قطر بسیار کوچک با منبع نور لیزر ممکن شده است. برای جلوگیری از رسوب ذره بر روی تجهیزات نوری، سوراخ بسیار ریزی در دیواره دستگاه ایجاد می‌شود؛ تیوب‌های پرتو نور باریک و طولانی به سمت خارج صفحه ضمیمه می‌شوند. به‌ویژه اگر در قسمت درونی دستگاه نسبت به قسمت بیرونی آن فشار منفی برقرار گردد، حداقل انتشار نشتی را خواهد داشت. ذرات به جای رسوب بر روی سامانه نوری، روی دیواره‌های تیوب رسوب خواهند نمود.

### ۲-۵-۵ جذب نوری (فوتومتری)

#### ۱-۲-۵-۵ اصول

با هر دو روش جذب نوری و پراش نوری می‌توان بعضی از عوامل هندسی آیروسرها نظیر تعداد ذرات اولیه، N، اجزای تشکیل‌دهنده ذرات در توده‌ها، همان‌طور که در شکل ۱ شرح داده شد، و قطر اولیه را اندازه‌گیری نمود.

همانند اندازه‌گیری‌های انتقال نوری، پراش نور در پرتو با پراش نور بدون حضور دود با استفاده از گاز مرجع (اغلب هلیوم) با پراش نوری کم، مقایسه می‌شود. اگر دود وارد مسیر عبور نوری بین منبع نور و آشکارساز شود، بخشی از جریان نور تحت اثر پدیده‌های زیر کاهش می‌یابد:

- جذب مستقیم پرتو نور از طریق ذرات دوده به‌طور فیزیکی ساده مسیر نور را بلوکه می‌کند. این رویداد با اندازه ذرات آن بین چند میکرومتر تا چند میلی‌متر اتفاق می‌افتد.

- پراش یا شکست پرتو نور از روی ذرات کوچک و دوده که اندازه قابل مقایسه با طول موج شکست پرتو نور دارند.

- طیف جذبی توسط گازهای رنگی که نوارهای جذبی در طیف پرتو نور دارند. مقدار اندازه‌گیری شده به غلظت جرمی و خواص ذاتی دود، به‌طور عمده ضریب جذب، هم‌چنین به خواص هندسی آن بستگی دارد.

طول موج پرتو نور مهم می‌باشد و بر اندازه‌گیری‌ها مؤثر خواهد بود. دو نوع منبع نوری برای کدورت-سنجی<sup>۱</sup> موجودند که عبارتند از:

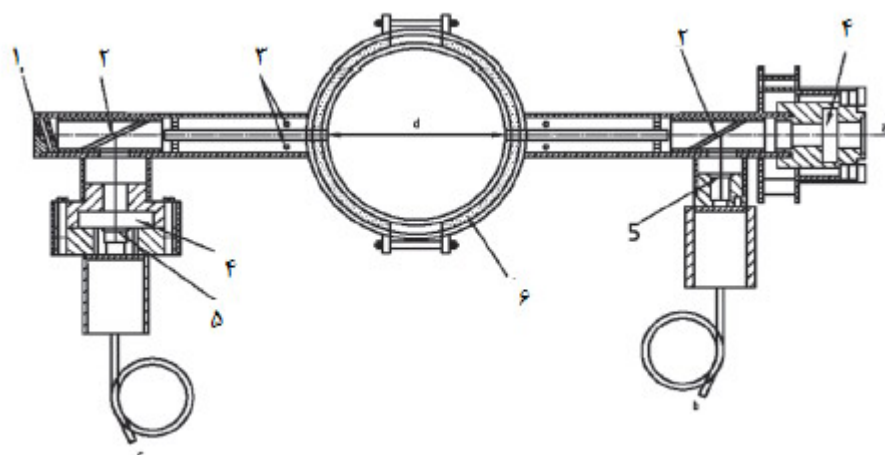
لیزرهای تک‌رنگی<sup>۲</sup> که با یک طول موج نشر می‌کنند (مثلاً ۳۵۰nm یا ۶۳۲nm از نوع لیزر هلیم-نئون) - منابع چند رنگی، عموماً با نور سفید که به طیف نور طبیعی محیطی نزدیک‌ترند، اما با قانون بیر لامبر مطابقت ندارد. راسباش و فیلیپس<sup>۳</sup> [۲۷] نشان دادند که یک منبع پایدار نور سفید که در دمای رنگی (۱۰۰ ± ۲۹۰۰) کلوین کار می‌کند، می‌تواند با تأمین ولتاژ پایدار فراهم شود.

هنگام استفاده از منبع نور سفید چند رنگی، انتخاب آشکارساز مهم است. آشکارسازهای مختلف برای طول موج‌های متفاوت نور حساس خواهند بود. به‌علاوه، آشکارسازها نسبت به زمان پاسخ‌گویی متنوع هستند. تجهیزاتی که فوتوسل بر اساس سلنیم‌اکسید دارند زمان پاسخ‌دهی به نسبت کندی دارند و برای رویدادهای باتغییر کند مناسب هستند. تجهیزاتی که بر مبنای فوتودیود سیلیکونی هستند حساسیت ویژه در برابر نور قرمز و زیر قرمز تا طول موج ۱۱۰۰nm دارند و زمان پاسخ‌دهی سریع دارند، به‌ویژه برای آشکارسازی با جابه‌جایی سریع یا تغییر انتقال‌ها در وضعیت دینامیکی مانند توده دودکش مناسب هستند. یادآوری می‌شود که خواص پراش نور به طول موج وابسته است، بنابراین برای مقایسه مستقیم پراش اندازه‌گیری شده با منبع نور سفید، اندازه‌گیری‌ها با لیزرهای هلیم-نئون نیاز به تصحیح است.

۲-۲-۵-۵ شرح روش

۱-۲-۲-۵-۵ جنبه‌های عملی

شکل ۶ دستگاه جذب سوارشده<sup>۴</sup> را نشان می‌دهد. این دستگاه در ISO 5560-2 تشریح شده است. این دستگاه با پرتو نور لیزر هلیم-نئون به عنوان منبع نور و دارای دو آشکارساز است که یکی از آنها برای اندازه‌گیری رقت<sup>۵</sup> و مقایسه‌ای<sup>۶</sup> است. این نوع دستگاه به تازگی در آزمایشگاه‌های آتش استفاده می‌شود.



۴ روزنه فیلتر

۱ راهنما  
درپوش

- 1- Opacimeter
- 2- Monochromatic laser
- 3- Rasbash and philips
- 4- Stack- mounted
- 5- Attenuation
- 6- Compensation

|   |                  |   |                            |
|---|------------------|---|----------------------------|
| ۲ | تقسیم‌کننده پرتو | ۵ | شیشه شیری رنگ <sup>۱</sup> |
| ۳ | دهانه تصفیه هوا  | ۶ | پوشش الیاف سرامیک          |

شکل ۶- مثالی از دستگاه جذب نور سوار شده (ISO 5560-2)

پیش از استفاده، دستگاه را می‌توان با استفاده از فیلترهایی با رقت نوری مشخص و با طول موج مرجع کالیبره نمود. عوامل اندازه‌گیری در قسمت بعدی تشریح می‌شوند.

#### ۵-۲-۳ عوامل اندازه‌گیری

۵-۲-۳-۱ ضریب خاموشی (k). این عامل به طور پیوسته حین آزمون به دست می‌آید. انتگرال‌گیری از این عامل کدورت‌سنجی کلی به دست آمده حین آزمون آتش را نشان می‌دهد.

۵-۲-۳-۲ جرم ذرات دوده بر حسب حجم گازها. این عامل با عملیات بعد از آزمون آتش به دست می‌آید، که فرصت را برای اندازه‌گیری بازده دوده به عنوان تابع زمان فراهم می‌کند.

۵-۲-۳-۳ سطح خاموشی ویژه<sup>۲</sup> (SEA). این عامل به عنوان نسبت سطح جذب دوده به جرم از دست رفته نمونه مورد آزمون که همراه با دود است (ISO 5560-2 را ببینید) تعریف می‌شود.

#### ۵-۲-۴ مزایا و معایب

مزایای این روش به طور اصولی همراه با اندازه‌گیری دینامیکی با زمان پاسخ‌گویی پایین و غیر مزاحم است. کاربرد این روش آسان است و اغلب در آزمایشگاه‌های آزمون آتش به کار گرفته می‌شود و برای بسیاری از آزمون‌های استاندارد آتش، نتایج اغلب به صورت مستقیم در مقررات (به‌ویژه جابه‌جایی) استفاده می‌شوند. دستگاه‌ها به نسبت ارزان هستند، برای کارکردن، کالیبراسیون و تعمیر و نگهداری ساده است و به مهارت بالا نیاز نیست.

معایب عمده این روش این است که فقط داده‌های کلی آبروسل و بدون اطلاعات روی هرگونه جنبه‌های وزن‌سنجی را می‌دهد. این تکنیک وقتی که برای ذرات استفاده می‌شود دارای مزاحمت است که مزاحمت‌ها عبارتند از:

- نشر نور از آتش، اگر به وسیله اندازه‌گیری خیلی نزدیک باشد، می‌تواند مقدار به دست آمده توسط آشکارسازها با افزایش مقدار عبور روشنایی رسیده به آشکارساز را تغییر دهد.

- گازها به‌ویژه نیتروژن دی‌اکسید (NO<sub>2</sub>) می‌توانند نور را جذب کنند. نور سفید به کار رفته توصیف‌شده وقتی که داده‌ها با استفاده از قانون بیر لامبرت بررسی می‌شوند اندازه‌گیری دقیق را نمی‌دهد. روش‌های پراش و یا شکست با استفاده از آشکارساز تک‌رنگی هنگامی که منبع نور با اندازه ذرات قابل مقایسه باشد خطای بالقوه بالا دارند.

- اگر سامانه نوری شامل پنجره‌ها باشد، رسوب دوده می‌تواند اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار دهد. داده‌های موجود بر اساس روش‌های آزمون تکرارپذیری SEA بالای ۲۰٪ ( $r = 28.83 + 0.14 \times SEA$ ) و تجدیدپذیری بالای ۹۰٪ ( $R = 15.03 + 0.56 \times SEA$ ) بر اساس ISO 5660-2 را نشان می‌دهند. SEA نسبتی از کل غلظت جرمی آبروسل است. داده قابل دسترس بر اساس این روش اندازه‌گیری وجود ندارد.

1- Opal  
2- Specific Extinction Area

### ۵-۲-۵-۵ کاربردها

یک منبع تک‌رنگ برای انجام آزمون مطابق با ISO 5660-2 و نیز یک منبع چند رنگی برای انجام آزمون مطابق با استاندارد ملی ۱۸۲۷۷ یا ISO 5659-2 تعریف شده است.

### ۳-۵-۵ پراش لیزری

#### ۱-۳-۵-۵ اصول

هنگامی که پرتو لیزر از میان آبروسل می‌گذرد، پرتو پراکنده می‌شود. ضریب پراکندگی در یک مسیر ثابت اندازه‌گیری و طبق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$I^{SCA}(\theta) = I_0 K^{SCA}(\theta) V_C \Delta\Omega$$

که در آن:

$I^{SCA}(\theta)$  شار تفرق پرتو؛

$V_C$  حجم سلول؛

$\Delta\Omega$  زاویه جسم جامد بین پرتو و آشکارساز.

$V_C$  و  $\Delta\Omega$  با مشکل به دست می‌آیند و در عمل با استفاده از گاز مرجع با خواص پراش معلوم اندازه‌گیری می‌شوند:

$$I_{RG}^{SCA}(\theta) = I_0 K_{RG}^{SCA}(\theta) V_C \Delta\Omega$$

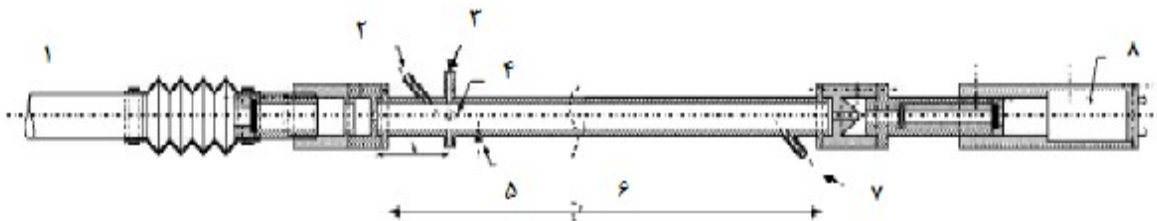
به‌علاوه براین، اندازه‌گیری‌های پرتو پراش لیزر آبروسل به‌طور متناوب با استفاده از پرتو قطبی شده به‌دست می‌آیند که طبق معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{I_{VV}(\theta)}{I_{VV}^G(\theta)} = \frac{K_{VV}(\theta)}{K_{VV}^G(\theta)}$$

زیروند ۷۷ به حالت قطبش مربوط است، طوری که قطبش نسبت به سطح پراش عمود<sup>۱</sup> است. لازم به یادآوری است که زاویه پراش  $90^\circ$  مقداری است که به طور تجربی برای کارهای تمرینی انتخاب می‌شود، اگرچه بعضی از دستگاه‌ها این اندازه‌گیری‌های پراش را بالاتر از حد زوایای مورد استفاده از آشکارساز چرخشی مجاز می‌کنند.

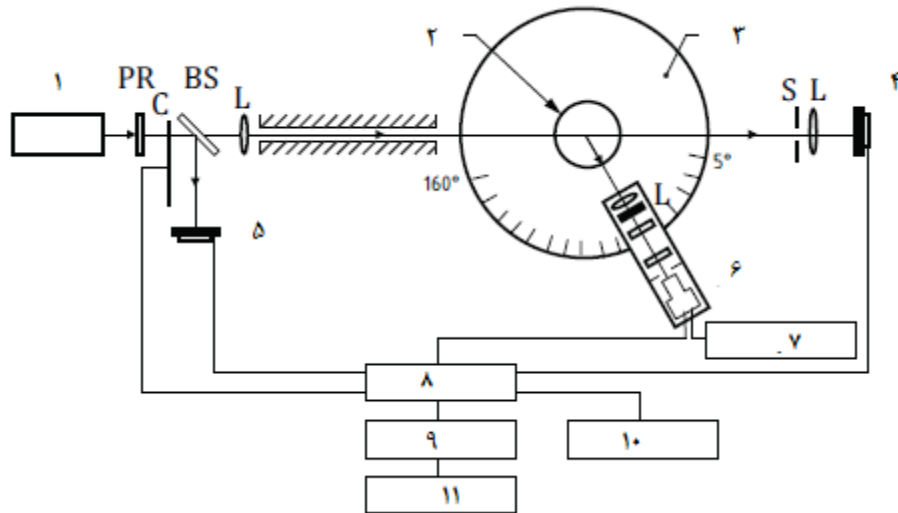
### ۲-۳-۵-۵ شرح روش

شکل‌های ۷-الف و ۷-ب نمونه‌ای از دستگاه جذب و پراش نوری سوار شده را نشان می‌دهند. در این دستگاه پرتو لیزر هلیوم-نئون به عنوان منبع نوری استفاده می‌شود و دو آشکارساز برای اندازه‌گیری رقت و مقایسه استفاده می‌شود. این نوع دستگاه اغلب در آزمایشگاه‌های پژوهشی آتش استفاده می‌شود.



الف - نمونه‌ای از دستگاه اندازه‌گیری پراش جذب سامانه کوچک (زاویه  $90^\circ$ ) [۱۲]

|                                                  |   |        |
|--------------------------------------------------|---|--------|
| پرتو لیزر (هلیوم- نئون)                          | ۱ | راهنما |
| خروجی آيروسل                                     | ۲ |        |
| آشکارساز نوری برای اندازه‌گیری پراش در سطح موازی | ۳ |        |
| آشکارساز نوری برای اندازه‌گیری پراش در سطح قائم  | ۴ |        |
| نشت فشار                                         | ۵ |        |
| مسیر نور                                         | ۶ |        |
| ورود آيروسل                                      | ۷ |        |
| آشکارساز نوری برای اندازه‌گیری                   | ۸ |        |
|                                                  |   | جذب    |



ب - نمونه‌ای از دستگاه اندازه‌گیری پراش با سکوی آشکارساز چرخشی [۱۳]

|                        |    |        |
|------------------------|----|--------|
| لیزر آرگون             | ۱  | راهنما |
| خروجی هود              | ۲  |        |
| سکوی چرخشی             | ۳  |        |
| آشکارساز               | ۴  |        |
| آشکارساز               | ۵  |        |
| لوله فوتومولتی پلایر   | ۶  |        |
| تأمین‌کننده ولتاژ بالا | ۷  |        |
| کلید تقویت‌کننده       | ۸  |        |
| مبدل A-D               | ۹  |        |
| نوسان‌نما              | ۱۰ |        |
| کامپیوتر               | ۱۱ |        |
| قطبش‌کننده             | PR |        |
| مقایسه‌کننده           | C  |        |
| تقسیم‌کننده پرتو       | BS |        |
| عدسی                   | L  |        |
| دیافراگم               | S  |        |

شکل ۷

۳-۳-۵-۵ پارامترهای به دست آمده

۱-۳-۳-۵-۵ غلظت ذره و قطر آيروسل یا ذره. این عوامل با مقدار ضریب شکست داده به دو روش اندازه‌گیری ضریب جذب و پراش تعیین می‌شوند.

۲-۳-۳-۵-۵ ضریب شکست. این عامل را می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری‌های ضریب پراش و جذب تعیین کرد.

۴-۳-۵-۵ مزایا و معایب

تلفیق این روش‌ها با روش وزن‌سنجی امکان استفاده از روش اندازه‌گیری ضریب شکست آيروسل با مدنظر قرار دادن شکل نسبی آيروسل را فراهم می‌کند.



اندازه‌گیری‌های پراش نور به خاطر مقادیر کوچک در برابر اغتشاش سیگنال بالا و به خاطر این که زوایای پراش باید ثابت باشند مشکل‌تر از اندازه‌گیری جذب است.

۵-۳-۵ کاربردها

کاربردهای کمی در صنایع گزارش شدند.

۴-۵-۵ سایر روش‌های اندازه‌گیری *in-situ*

دیگر روش‌های اندازه‌گیری *in-situ* به طور کلی بر پایه فرایند نوری هستند. روش‌های اصلی که در منابع ذکر شده‌اند عبارتند از:

- میکرونورسنجی و آمبروسکوپی<sup>۱</sup> (روش بازتاب نوری است که می‌توان ذرات را پویش کرد و تجسم بهتری از شکل ذرات داشت). این روش‌ها به خواص حساسیت نوری ثبات‌های ویدیویی و جداسازی حسگرهای CCD بستگی دارند و به طور کلی به ذرات بزرگ‌تر از  $5\mu\text{m}$  محدود می‌شوند.

هالوگرافی<sup>۲</sup> این روش امکان اندازه‌گیری‌ها با میدان عمق بالا یعنی با دید سه‌بعدی فراهم می‌کند. این روش در دو مرحله انجام می‌شود: نخستین مرحله ایجاد هالوگرام با استفاده از برقراری تکنیک‌هایی برای نشر ذرات با نور لیزر تپی<sup>۳</sup> و ثبت بسیاری از منظرهای ذره بر روی یک صفحه منفرد عکاسی می‌باشد. در مرحله دوم تقویت<sup>۴</sup> تصویر ذره در سه بعد و تجزیه تصویر است. این روش بر اساس ثبت زمان است، پیچیده و محدود به کمینه اندازه وزن ذرات می‌شود و به سختی با کمینه غلظت‌های آيروسول مطابقت دارد. محدودیت اندازه مرتبط با طول مسیر نور بر اساس رابطه  $D_p^2 > \lambda_0 l$  وجود دارد که  $\lambda_0$  طول موج لیزر می‌باشد و  $l$  طول فاصله بین صفحه حساس و ذره هنگام تصویرسازی است. در گمارش عمومی، این روش به ذرات بزرگ‌تر از  $10\mu\text{m}$  محدود می‌شود.

- سرعت‌سنجی داپلر. نور نفوذی جابه‌جایی ذره به وسیله آشکارساز تجزیه می‌شود که به طور متناوب بر اساس تغییر سرعت ذرات و جهت جابه‌جایی با ملاحظه آشکارساز ثبت می‌شود. تکنیک اصلی کاربرد اثر داپلر بر اساس فاز گازی داپلر<sup>۵</sup> است (PDA). تفسیر این روش مشکل است، برای جزییات بیشتر مراجع [۲۸] و [۲۹] را ببینید.

- طیف‌سنجی همبستگی فوتون<sup>۶</sup> [۳۰]. برای آيروسول‌های کم‌تر از میکرون، شدت تغییر نور نفوذی به حرکت براوانی<sup>۷</sup> (یعنی جابه‌جایی ایجادشده در اثر برخوردهای مولکولی) ذرات آيروسول بستگی دارد. این روش در شرایط دمایی یا فشار بحرانی عمل می‌کند. با این وجود این روش فقط برای ذرات آيروسول با پخش‌کنندگی یگانه انطباق دارد. پژوهش‌های جدید به منظور گسترش کاربرد آن برای آيروسول با پخش‌کنندگی چندگانه ادامه دارد.

---

1- Ombroscopy

2- Holography

3- Pulsed laser

4- Restitution

5- Phase Doppler Anemometry

6- Photon correlation spectroscopy

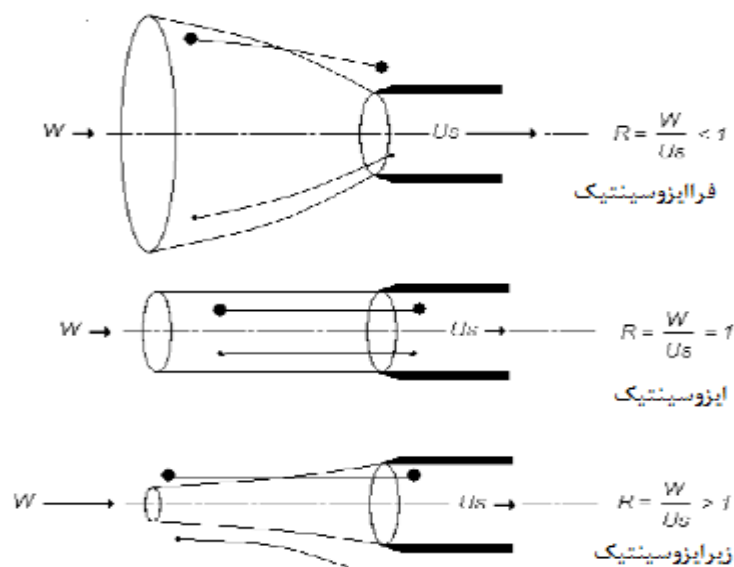
7- Brownian

نور سفید القایی لیزر<sup>۱</sup> (LII). LII روش نوری که وقتی دوده به وسیله پرتو لیزر گرما می‌بیند، تصویربرداری از کسرحجمی دوده در یک یا دو بعد با اندازه‌گیری افزایش پرتو پلانک منتهی به نور سفید می‌شود، سیگنال LII به کسرحجمی دوده در یک یا دو بعد با اندازه‌گیری افزایش پرتو پلانک منتهی به نور سفید می‌شود، سیگنال LII طور تقریبی نسبتی از کسر حجم دوده است. LII را به‌علاوه می‌توان برای اندازه‌گیری اندازه ذره دوده با تعیین کاهش سیگنال LII به کار گرفت. این روش دارای معایبی است، زیرا LII یک تکنیک خط دید<sup>۲</sup> است و نیاز است که شفافیت زمینه‌ای آن کاهش داده شود.

۶-۵ روش‌های اندازه‌گیری استخراجی

۱-۶-۵ روش‌های نمونه‌برداری

تلاش اصولی برای نمونه‌برداری آبروسل به عنوان نماینده مورد اطمینان آبروسل در فرایند نمونه‌برداری قبل از آشکارسازی مهم است. به‌ویژه، آبروسل در آتش منتشرشونده به طور کلی در شرایط دمایی، رطوبت و فشار بالا هستند، هر کدام از آن‌ها بسته به شرایط کارکرد سامانه آشکارساز، تفاوت زیاد ایجاد می‌کنند. یکی از ضرورت‌های مهم، نیاز به سرعت نمونه‌برداری است. این ضرورت با استفاده از فاکتور R، نسبت سرعت نمونه‌برداری به سرعت ذرات اختصاص داده می‌شود. برای صحت بیشتر، سرعت نمونه‌برداری باید نسبت به سرعت ذرات نمونه یکسان باشد. این به عنوان نمونه هم‌سرعت<sup>۳</sup> شناخته می‌شود. اگر R بزرگ‌تر از واحد باشد (یعنی سرعت نمونه‌برداری بیشتر از سرعت ذرات نمونه باشد)، نتایج به وسیله تداخل رفتاری ذرات نمونه مختل می‌شود. اگر R کوچک‌تر از واحد باشد، عکس آن اتفاق می‌افتد (یعنی می‌تواند سبب حذف ذرات بزرگ‌تر از نمونه شود). سرعت نمونه‌برداری کم‌تر یا بیشتر از سرعت ذرات در جو نمونه به عنوان زیرایزوسینتیک<sup>۴</sup> یا فراایزوسینتیک<sup>۵</sup> نمونه‌برداری به ترتیب تعریف می‌شوند. برای ذرات کوچک، این اثرها قابل چشم پوشی هستند. اثرهای زیرسینتیک و فراایزوسینتیک در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



- 1- Laser induced incandescence
- 2- line-of-sight technique
- 3- Isokinetic
- 4- Subisokinetic
- 5- Supersisokinetic

شکل ۸- اثرهای نمونه‌برداری: ایزوسینتیک، زیرایزوسینتیک و فراایزوسینتیک [۲]

بنابراین مشکل مربوط به اندازه‌گیری گسترده‌گی نمونه استخراج‌شده است، که بیانگر حجم یا جریانی از شروع نمونه‌برداری است. این وضعیت شامل چگونگی خوب مخلوط‌شدن آبروسل به عنوان ویژگی از جریان استخراج نمونه‌برداری حجمی است. به عبارت دیگر، ذرات تحت شرایط تعلیق یا توده‌ای شدن در محدوده نمونه‌برداری به طور عمده خواص‌شان اصلاح خواهد شد. گرین و ایوان و پوی<sup>۱</sup> [۳۱]، رومی- نواس و لیو<sup>۲</sup> [۳۲] گرمای انتقال آبروسل را به عنوان تابعی از گونه‌های هندسی مطالعه کردند. معلوم شده است این کارایی وقتی بهینه می‌شود که لوله‌های خمیده با انحنای شعاع‌های بزرگ‌تر از ۴ استفاده می‌شوند. کارایی انتقال نیز به عنوان تابعی از عدد استوکس<sup>۳</sup> ذرات و کاهش برای عددهای استوکس بالا است. عدد استوکس یک عدد بدون بعد مربوط به رفتار ذرات معلق‌شده در جریان یک سیال است. عدد استوکس به عنوان نسبت فاصله توقف یک ذره به بعد ویژه مانع، تعریف می‌شود.

۵-۶-۱ نازل و پروب<sup>۴</sup>

برای روش‌های استخراج، خواص نازل برای نمونه‌برداری ایزوسینتیک صحیح ضروری است. قطر، شکل هندسی و وضعیت نازل برای محدودیت اثر نازل در حرکت ذرات حین نمونه‌برداری باید مشخص گردند. بسته به آتش منتشرشونده مورد مطالعه، حفظ ایزوسینتیکی ذرات در دوره آتش ضروری است. برای تمامی این عوامل، باید فرض شود که جریان یک جریان آرام است، به عنوان یک ویژگی در اصطلاح عدد رینولد، اندازه‌گیری درجه جریان آرام یا جریان آشفته. اگر پروب اندازه‌گیری آبروسل وارد لوله خروجی می‌شود ( برای مثال آزمون‌های ISO 9705 و یا استاندارد ملی ایران ۱-۷۲۷۱)، حفظ جریان آرام حین انجام کامل آزمون ضروری است. تحت عملکرد سرعت‌های نرمال در آزمون آتش با لوله خروجی مستقیم، جریان خوب مخلوط‌شده را می‌توان مطمئن شد به شرط آن که نازل در فاصله حداقل ده برابری قطر جریان پایین لوله بدون هرگونه موانع و پنج برابری جریان بالا بدون هرگونه موانع قرار داده شود. برای این منظور در صورت امکان، جریان آرام بهتر از جریان آشفته خوب مخلوط شده است.

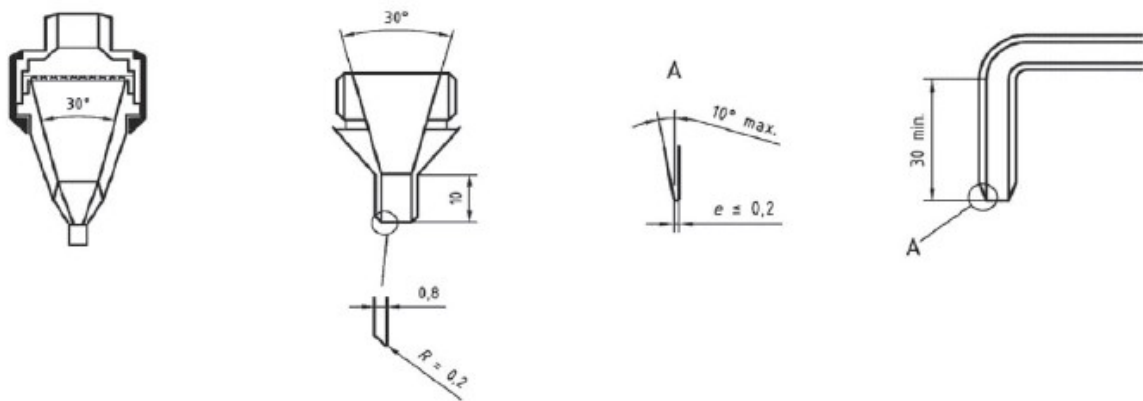
در آتش منتشرشونده، آگاهی از دما و فشار در نقطه نمونه‌برداری از عوامل ضروری برای تفسیر نتایج است. به همین منظور قراردادن حسگرهای اضافی (به عنوان مثال ترموکوپل) در نقطه استخراج ضروری است، اما برای محدود کردن آشفته‌گی جریان منتشرشونده باید وضعیت‌شان طراحی مناسب شود. به علاوه، موادی که نازل و میله از آن ساخته می‌شوند باید برای آتش منتشرشونده مناسب باشند. به عنوان مثال مقاوم به خوردگی، قابل جداسازی و قابل شست‌وشو باشند. برای کاهش جذب الکترواستاتیکی و رسوب‌های ناخواسته، قطعات فلزی نیز باید اتصال الکتریکی به زمین داشته باشند. مواد معمول مورد استفاده برای نازل‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن، شیشه بورسلیکات و کوارتز هستند.

---

1- Grane and Evans and Pui  
2- Romay- Novas and Liu  
3- Stokes number  
4- Nozzle  
5- Probe

همچنین برای محدود کردن جریان آشفته در جریان نفوذی اصلی، از نظر ایده‌آل باید نازل‌ها باریک و تیز باشند. به هر حال، این‌ها ممکن است که دلایل مکانیکی باشند که ضخامت میله نسبت به نیازمندی یک نازل "لبه پخ"<sup>۱</sup> محدود خواهد بود که اندازه مناسب برای باقی ماندن پایدار تحت شرایط آتش کافی باشد. همچنین برای اطمینان از عدم قطعیت مربوط به سطح نمونه‌برداری واقعی کم‌تر از ۱۰٪ به منظور رسیدن معیار نمونه‌برداری هم‌سرعت ضروری است. برای رسیدن به این، پیشنهاد می‌شود که نازل با قطر داخلی بزرگ‌تر از ۶mm استفاده شود. برای گازها، با سرعت بیش از ۲۰m/s، استفاده از نازل با قطر ۴mm ممکن است. برای کاهش شکستن نازل در اثر ایجاد سوراخ در آن، موارد زیر باید در نظر گرفته شوند:

- قطر داخلی نازل باید از دو طرف با حداقل فاصله ۱۰mm یکسان باشد.
- هرگونه تغییر در قطر داخلی باید تدریجی باشد و زاویه کم‌تر از ۳۰° باشد.
- خم‌شدن فقط وقتی مجاز است که آن‌ها در فاصله کمینه ۳۰mm از قسمت مستقیم قرار داده شوند. شعاع‌های انحنای‌شان باید کمینه و نصف قطر داخلی باشد.
- هرگونه تغییر در قطر خارجی میله و قرار دادن در فاصله کم‌تر از ۵۰mm نسبت به روزنه نازل باید باریک و زاویه کم‌تر از ۳۰° داشته باشد.
- هیچ مانعی همراه با تجهیزات نمونه‌برداری در جریان بالای دهانه نازل مشاهده نشود. مانع می‌تواند در جریان پایین وجود داشته باشد به شرطی که ۵۰mm از سوراخ فاصله داشته باشد و حداکثر ۱٫۵ برابر اندازه نازل باشد.



شکل ۹- نمونه‌هایی از نازل‌های هندسی

بعضی از میله‌ها را می‌توان برای گرفتن کل آبروسل طراحی کرد، در حالی که سایر موارد فقط برای انتخاب کم‌ترین مقدار آبروسل مناسب هستند. برای محدودیت گستره اندازه ذرات آبروسل نمونه‌برداری شده، می‌توان از روش‌های "پرچه کوچک"<sup>۲</sup> یا "متراکم کننده اینرسی"<sup>۳</sup> استفاده کرد.

۵-۶-۱-۲ ظرف نمونه‌برداری و خطوط نمونه‌برداری

- 1- Chamfer
- 2- Mini-cyclones
- 3- Inertial impactors

برای محدود کردن تفاوت‌های خصوصیات اصلی ذرات آبروسل (مثلاً غلظت، توزیع اندازه و ریخت) باید مسیر انتقال این نمونه از نازل به دستگاه اندازه‌گیری طراحی گردد. به این منظور و به واسطه رطوبت بالای آتش منتشرشونده، استفاده از وسایل گرمادیده و تیوپ‌های نمونه یا لوله‌ها اساسی است. به‌علاوه، باید توجه شود که آبروسل‌ها به دما و پدیده دمایی حساس هستند. برای محدود کردن ایجاد تراکم، دمای ظرف نمونه‌برداری باید به اندازه کافی بالا باشد اما تا حدی که بر خواص آبروسل اثر نداشته باشد. دمای مورد استفاده به طور کلی بین  $50^{\circ}\text{C}$  و  $100^{\circ}\text{C}$  است. سطح داخلی لوله‌ها باید سنباده نرم خورده باشند و به طور منظم قابل بازرسی و تمیز کردن باشند. سازگاری‌شان با خوردگی ناشی از آتش‌بازی قابل اندازه‌گیری باشد. به منظور کاهش رسوب الکترواستاتیکی قسمت‌های فلزی باید به چاه الکتریکی<sup>۱</sup> متصل شوند.

#### ۵-۶-۱-۳ رقیق‌سازی

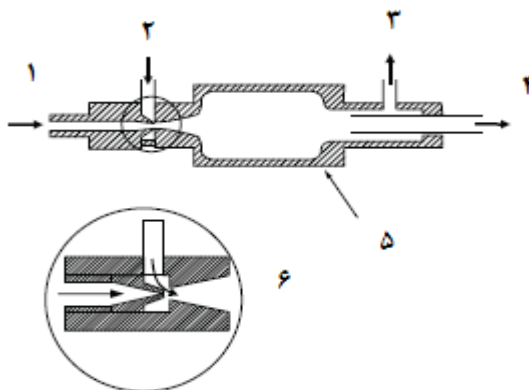
به طور کلی آبروسل‌های تولید شده در اثر سوختن دارای خواص متنوعی هستند. به علاوه، غلظت ذره و دما و رطوبت نسبی جریان بسته به شرایط و زمان می‌توانند تفسیر گردند. بسته به خواص ذرات آبروسل، گسترش ذره ممکن است به صورت انعقاد، متراکم‌شدن و هسته‌زایی در حین نمونه‌برداری تغییر کنند. اغلب، برای کاهش تغییر خواص ریختی ذرات و توده‌ای شدن آن، افزایش سرعت نمونه‌برداری تا حد ممکن توصیه می‌شود. بعد از این موارد ممکن است به رقیق کردن سریع نمونه نیاز باشد. مشکل اصلی هنگامی روی می‌دهد که نمونه‌برداری از ذرات آبروسل غلیظ‌شده به منظور جلوگیری از رویداد اثرهای بالای دما باید رقیق شوند و آبروسل‌ها در دمای بالا قرار دارند که با رطوبت و بخارهای متراکم اشباع می‌شود. بنابراین هنگام رقیق‌سازی نمونه سه پارامتر مهم باید در نظر گرفته شوند که عبارتند از: مدت زمان نمونه در ظرف نمونه، درجه رقیق‌سازی و دمای نمونه رقیق شده.

بیش‌تر وقت‌ها اثر مدت زمان بسیار مهم است و بستگی به شرایط استخراج دارد. هنگام نمونه‌برداری، بسته به ترکیب‌های آبروسل و جریان انتشار، میعان آب و بخارات دیگر می‌تواند اتفاق بیافتد. پدیده قابل ملاحظه دیگر، ایجاد انعقاد در خطوط نمونه‌برداری هنگام استخراج است. این پدیده می‌تواند به طور سریع برای غلظت ذرات بالاتر از  $10^{11}$  particles/cm<sup>3</sup> مهم باشد. این غلظت در آزمون آتش سریع فراهم می‌شود و لذا رقیق‌سازی لازم است.

دستگاه‌های ویژه برای رقیق‌سازی موجود است که در یک مرحله یا دو مرحله به دست می‌آید. دستگاه رقیق‌کننده در یک مرحله شامل دفع‌کننده<sup>۲</sup> است که آبروسل به محفظه مخلوط‌کننده گرم عمودی تزریق می‌شود [شکل ۱۰-الف]. برای دستگاه رقیق‌کننده در دو مرحله [شکل ۱۰-ب]، اولین مرحله رقیق‌سازی با استفاده از تکنولوژی لوله‌های سوراخ‌دار انجام می‌شود که برای مؤثر بودن ابزار در مطالعه آبروسل ثابت شده است. نسبت رقیق‌سازی اولین مرحله رقیق‌نمودن قابل تنظیم و کنترل هستند. رقیق‌سازی در دمای اولیه نمونه، اثر بخارهای فرار و نیمه‌فرار را کم می‌کند، در حالی که رقیق‌سازی در دمای سرد اثر هسته‌زایی و متراکم‌شدن را افزایش می‌دهد. در رقیق‌سازی دومرحله‌ای همانند یک‌مرحله‌ای از دفع‌کننده رقیق‌ساز<sup>۳</sup> استفاده می‌شود اما هر کدام به عنوان پمپ نمونه عمل می‌کنند و نمونه را به دمای محیط می‌رسانند. نسبت

1- Electric ground  
2-Ejector  
3-Ejector diluter

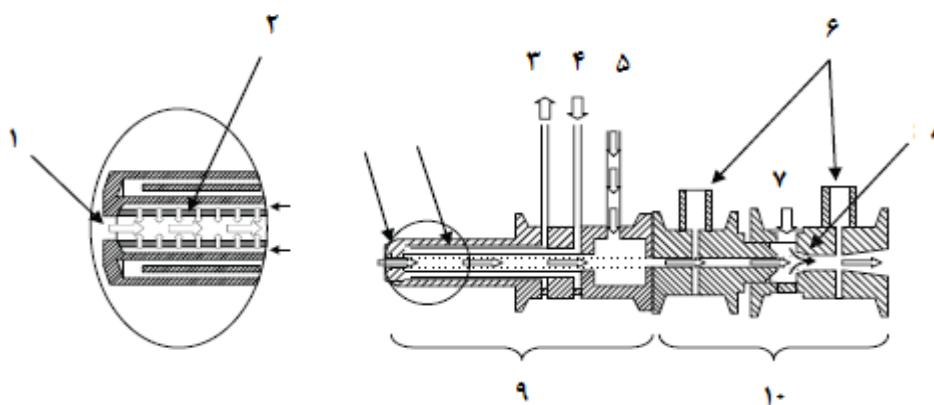
رقیق‌سازی دفع‌کننده نیز قابل تنظیم و کنترل است. برای اندازه‌گیری کمی اثر چنین رقیق‌سازی بر روی هسته‌زایی توده‌ای شدن یا رسوب آيروسل بر روی این وسایل، مطالعه زیادی صورت گرفته است. دستگاه‌های رقیق‌کننده دیگری نیز موجود هستند. می‌توان از دستگاه‌های نمونه‌برداری ذرات ریز [۳۳]، تزریق‌کننده‌های حرارتی ساده [۳۴] و یا رقیق‌کننده‌های صفحه چرخشی [۳۵] نام برد.



الف - دستگاه رقیق‌کننده آيروسل یک مرحله‌ای

راهنما

- |               |                  |
|---------------|------------------|
| ۱ ورودی نمونه | ۲ رقیق‌کننده هوا |
| ۳ خروجی هوا   | ۴ خروجی نمونه    |
| ۵ محفظه مخلوط | ۶ دفع‌کننده      |



ب - دستگاه رقیق‌کننده آيروسل دو مرحله‌ای

راهنما

- |                                     |                           |
|-------------------------------------|---------------------------|
| ۱ ورودی آيروسل                      | ۲ لوله متخلخل             |
| ۳ سردکننده هوای خروجی               | ۴ سردکننده هوای ورودی     |
| ۵ رقیق‌کننده اولیه هوا (هوای سرد)   | ۶ حسگرهای فشار            |
| ۷ رقیق‌ساز هوا (هوای گرم)           | ۸ فشارشکن <sup>۱</sup>    |
| ۹ مرحله رقیق‌سازی اولیه لوله متخلخل | ۱۰ مرحله رقیق‌سازی ثانویه |

شکل ۱۰

#### ۴-۱-۶-۵ کیفیت نمونه‌برداری

از دست رفتن نمونه و مراحل تجزیه و شناسایی باید محاسبه شود، اما در بسیاری از موارد مشکل خواهد بود. بنابراین تا حد ممکن کاهش تغییرات در خواص آبروسل مهم است. در آزمون آتش، در نظر گرفتن اثر طرح دستگاه‌های آزمون بر روی ماهیت آبروسل‌های تولید شده به وسیله مدل‌های فیزیکی مورد استفاده آتش، قبل از نمونه‌برداری مهم است. برای مثال سپرها، صفحه‌ها<sup>۲</sup> و دیگر منفذها<sup>۳</sup> مورد استفاده برای تولید جریان یکسان در وسایل بر اساس استاندارد ملی ۱-۷۲۷۱ و ISO 9705 گرماسنج‌ها بر خواص کسر آبروسل تولید شده به‌ویژه توزیع اندازه ذره مؤثر خواهد بود. صفحه‌های اریفیس مورد استفاده برای اندازه‌گیری جریان نیز خواص آبروسل را اصلاح خواهد کرد. اختلاف در دما، فشار و رطوبت نسبی رقت آتش منتشرشونده بر خواص آبروسل اثر کامل خواهند داشت و چنین اثرهایی باید مدنظر باشند. برای سایر مدل‌های آتش، عواملی مثل زمان انعقاد می‌تواند مهم باشد و خواص قبلی ممکن است برای تفسیر نتایج نیاز باشد.

#### ۲-۶-۵ روش مستقیم وزن‌سنجی

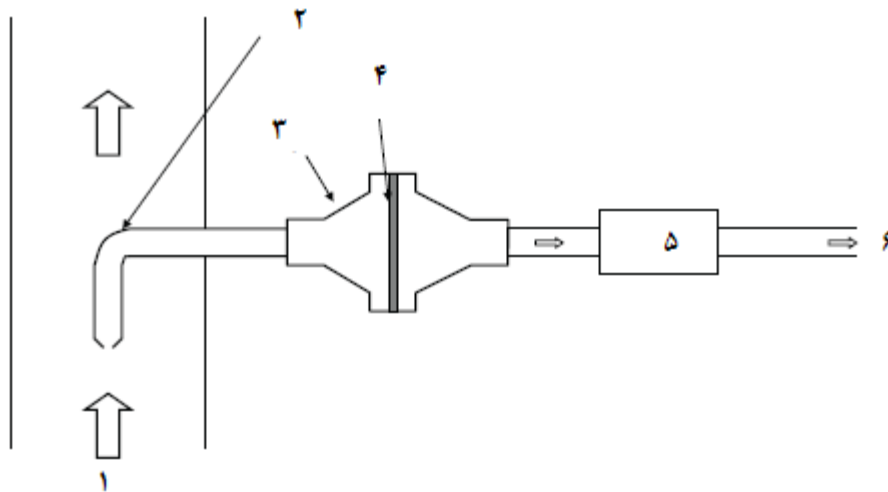
##### ۱-۲-۶-۵ اصول

روش وزن‌سنجی به نسبت ساده است. دود برای آزمون نمونه‌برداری، در صورت نیاز رقیق (بند ۱-۶-۵) را ببیند) و با فیلتر دارای کارایی بالا تصفیه می‌شود. محصول فیلترشده قبل و بعد از نمونه‌برداری توزین می‌شود. اختلاف وزن و نسبت بین جریان کل و جریان نمونه‌برداری برای محاسبه بازده کل دوده آبروسل استفاده می‌شود.

##### ۲-۲-۶-۵ شرح روش

وسایل شامل خط نمونه‌برداری، نگه‌دارنده فیلتر با کارایی بالا، جریان‌سنج وزنی و پمپ می‌باشد. نمونه فیلترشده در شرایط خشک نگهداری و قبل از آزمون توزین می‌شود. بعد از این که نمونه مورد آزمون جمع-آوری شد، از دستگاه جدا و پیش از توزین در رطوبت‌گیر خشک می‌شود. اختلاف وزن، مقدار وزن آبروسل دام‌افتاده را می‌دهد. برای اندازه‌گیری قابل اطمینان و جلوگیری از میعان بخار آب، کل خطوط نمونه‌برداری و فیلتر باید در دمای ثابت بالای  $80^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شوند. دستگاه‌های اندازه‌گیری و کنترل‌کننده جریان جرمی برای برقراری جریان ثابت از فیلتر استفاده می‌شوند. در این روش سرعت نمونه‌برداری که مشابه جریان نمونه منتشرشونده باشد مهم است. نگه‌دارنده فیلتر باید به صورت مخروطی و زاویه کم‌تر از  $30^{\circ}$  ساخته شود. نگه‌دارنده فیلتر را می‌توان به طور مستقیم در شار مسیر آتش منتشرشونده یا خارج از مسیر قرار داد. در حالت پیشین، اثرهای دمایی روی فیلتر می‌تواند مهم باشد و شاید انتخاب مواد فیلترکننده را محدود کند. در حالت بعدی میله نمونه‌برداری، نمونه را از جریان کانال به فیلتر انتقال می‌دهد (شکل ۱۱) که باید پیشنهادهای بند ۱-۶-۵ را در نظر داشت.

- 1- Baffles
- 2- Plates
- 3- Intrusions



|        |                   |   |                      |
|--------|-------------------|---|----------------------|
| راهنما |                   |   |                      |
| ۱      | جریان خروجی       | ۴ | فیلتر با کارایی بالا |
| ۲      | پروب نمونه برداری | ۵ | جریان سنج جرمی       |
| ۳      | شیلنگ فیلتر       | ۶ | به سمت پمپ           |

شکل ۱۱- روش مستقیم وزن سنجی

این روش بر اساس غلظت جرمی است. در این روش دوده کل تولید می شود نتایج را می توان نسبت به جریان انتشار (یعنی غلظت میانگین جرم بر حسب  $\frac{kg}{m^3}$ ) یا نسبت به جرم مواد آزمون شده به عنوان جرم سوخت از دست رفته (یعنی جرم دوده به جرم سوخت بر حسب  $\frac{kg}{kg}$ ) بیان کرد. لوازم اختیاری بیشتر برای به دام انداختن آبروسل برای تجزیه مواد شیمیایی بیشتر گونه های جذب شده استفاده می شود. برای جزئیات اندازه گیری های شیمیایی بند ۴-۲-۵ را ببینید.

#### ۴-۲-۶-۵ مزایا و معایب

صحت این روش به طور تقریبی خوب و به آسانی قابل استفاده است. معایب عمده آن نبود داده توزیع اندازه ذره یا سرعت رسوب کردن است.

#### ۵-۲-۶-۵ کاربردها

این روش اغلب در آزمون های مقیاس کوچک<sup>۱</sup>، به ویژه گرماسنج مخروطی مشروح در ISO 5660-2 برای اندازه گیری بازده دوده استفاده می شود.

#### ۳-۶-۵ دستگاه جذب آبشاری

#### ۱-۳-۶-۵ اصول

دستگاه بسیار معمول برای مطالعه توزیع اندازه آبروسل، جذب کننده آبشاری چند مرحله ای است [۲][۳]. کار این دستگاه بر اساس ویژگی اینرسی ذره ها است. آبروسل وارد مدخل مخروطی شده و آبشارها از میان



مرحله‌های دهانه پشت سر آن با سرعت‌های بالاتر پی‌درپی از نخستین مرحله به آخرین مرحله از دهانه عبور می‌کند.

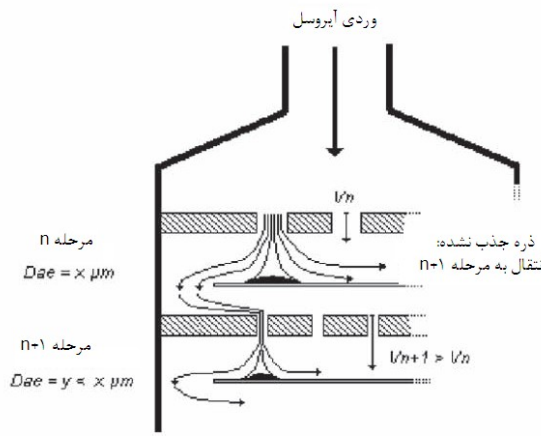
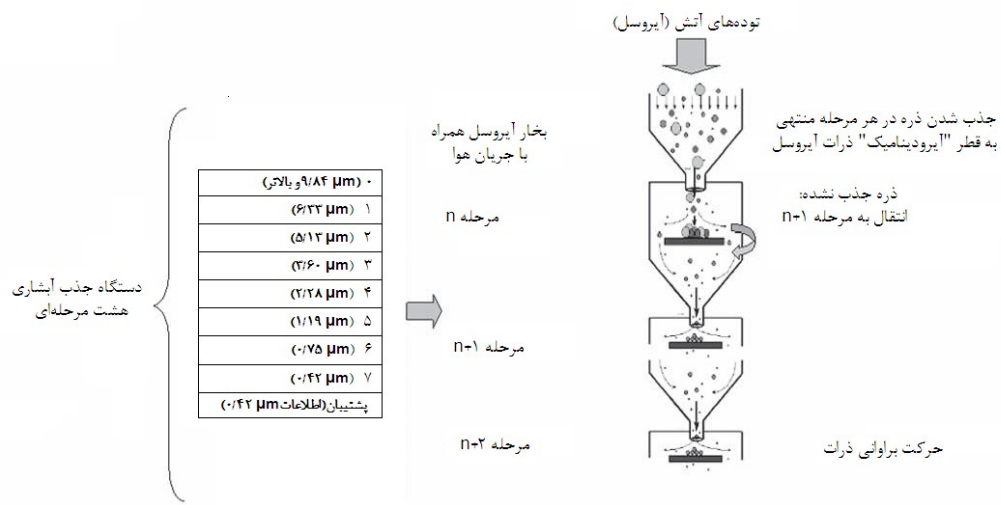
در هر مرحله، سرعت بالایی ایجاد می‌شود که  $90^\circ$  منحرف می‌شود. این عمل بر روی رسوب‌گذاری یا جذب ذراتی اثر دارد که نمی‌توانند در هر مرحله باقی بمانند. قطر سوراخ‌ها در اولین مرحله به مرحله بعدی جذب کاهش می‌یابد، طوری که ذرات جذب‌نشده در مرحله  $N$ ، به آرامی بیش‌تر از مرحله  $N+1$  به سمت سطح جمع‌کننده سرعت می‌گیرند، شکل ۱۲ را ببینید.

اینرسی یک ذره تحت اثر سه عامل شکل، چگالی و سرعت می‌باشد. شکل و چگالی یک ذره در بسیاری از موارد برای آبروسل داده‌شده نامعلوم هستند. اندازه ذره اجتماع یافته در هر مرحله از جذب به عنوان یک قطر آیرودینامیک بیان می‌شود که شامل دو عامل بعدی است. بنابر این چگالی ذره به عنوان واحد برابر در نظر گرفته می‌شود و اطلاعات ویژگی‌های ذرات به مدل آیرودینامیکی جرم متوسط (MMAD)<sup>۱</sup> مرتبط می‌شود که در بند ۴-۳-۱ توصیف شده است.

هر مرحله از جذب به وسیله برش اندازه<sup>۲</sup> مشخص می‌شود، با  $D_{50}\%$  نشان داده می‌شود. برش اندازه مربوط به قطر دینامیکی ذرات به دام‌افتاده با کارایی  $50\%$  در هر مرحله مشخص است. راه دیگر برای مشخص کردن یک مرحله، از طریق قطر میانگین هندسی، جذر<sup>۳</sup> حاصل ضرب برش اندازه داده در هر مرحله معین و مرحله پیشین است.

---

1- Mass-Median Aerodynamical Model  
2- Cut-off size  
3- Square root



شکل ۱۲- دستگاه جذب آبشاری و جذب مرحله‌ای

۲-۳-۶-۵ تشریح روش دستگاهها

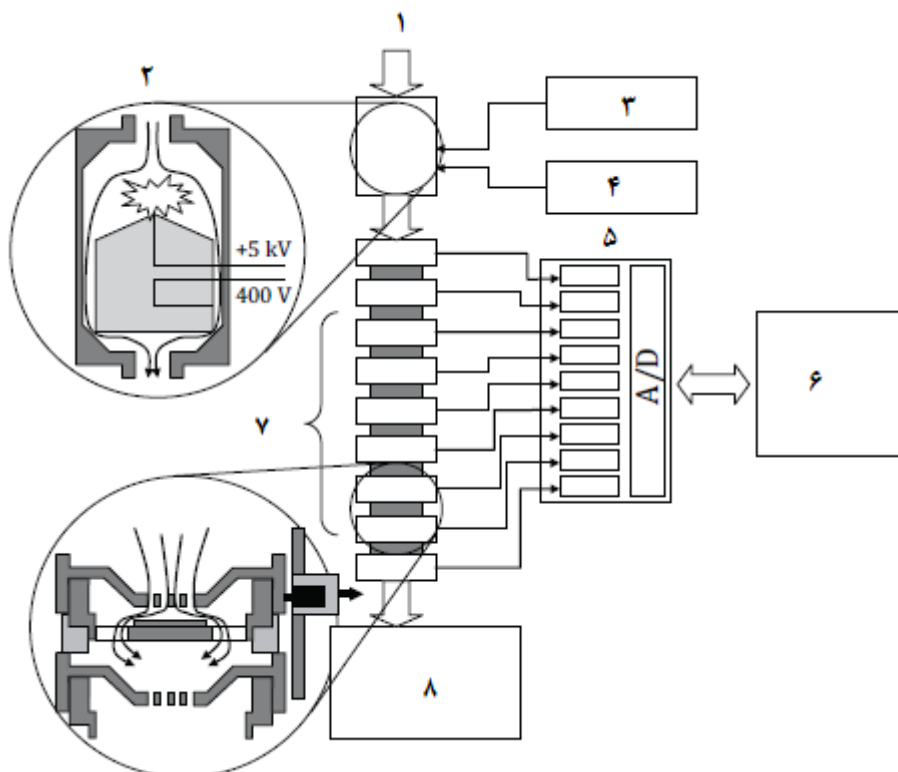
برای به دست آوردن بهترین صحت ممکن و کاهش اثر دستگاهها بر روی خواص ذره‌ها، باید دستگاه‌های نمونه‌برداری و آزمون تنظیم شوند. هر بخش از دستگاهها را می‌توان به عنوان پتانسیل تله، با داشتن کارایی انتقال در نظر گرفت. دستگاه‌های آزمون می‌توانند تا حد امکان اصلاح بالقوه ترکیب‌های آبروسل را داشته باشند.

اندازه‌گیری به طور عادی با جمع‌آوری فیلترهای جذب‌کننده بعد از نمونه‌برداری و اندازه‌گیری اختلاف وزن بین مرحله شروع و پایان دوره جمع‌آوری انجام می‌شوند. قبل از آزمون، فیلترها خشک و توزین می‌شوند. بعد از آزمون، آنها از جذب‌کننده‌ها جدا و قبل از توزین دوم در رطوبت‌گیر خشک می‌شوند. اختلاف جرم، مقدار آبروسل به دام‌افتاده بین این مرحله و مرحله پیشین را می‌دهد. به عنوان شاهد بالا، این اختلاف با استفاده از برش قطر هر دو مرحله اختصاص داده می‌شود. مرحله آخر نمونه‌برداری فیلترهایی با کارایی بالا است که تمام ذرات باقی مانده از مرحله قبل را جمع می‌کند.

جذب‌های آبشاری عادی به گستره اندازه‌های ذره بین حدود 300nm و 30μm محدود می‌شوند. برای اندازه‌گیری اندازه‌های کوچک، جذب‌کننده‌ها را می‌توان طوری طراحی کرد که فشار دستگاه کم‌تر از فشار

جو باشد. در این صورت دستگاه قادر به رسیدن اندازه از حدود 20nm تا 30µm به طور نمونه در ۱۲ مرحله خواهد بود.

برای تعدادی از دستگاه‌ها، غلظت عددی ذرات با زمان را می‌توان به روش الکتریکی اندازه‌گیری نمود. این دستگاه جذب‌کننده فشار پایین الکتریکی است<sup>۱</sup>(ELPI)، شکل ۱۳ را ببینید. پیش از شروع اصلاح جذب‌کننده آبشار، ذرات به وسیله تخلیه بار تاجی<sup>۲</sup> ولتاژ بالا باردار می‌شوند. هر مرحله جذب به طور مؤثر یک الکترومتر است، که بار ایجاد شده ذرات را اندازه‌گیری می‌کند. بین بار ذره و قطر آیرودینامیکی آن رابطه وجود دارد.



|   |                    |   |                                          |
|---|--------------------|---|------------------------------------------|
| ۱ | ورودی آيروسل       | ۵ | الکترومترها                              |
| ۲ | باردارکننده تاجی   | ۶ | کامپیوتر و کنترل الکترونیکی              |
| ۳ | منبع ولتاژ بالا    | ۷ | جذب‌کننده‌ها با عایق‌ها و سوزن‌های تماسی |
| ۴ | منبع ولتاژ تله یون | ۸ | پمپ مکش                                  |

شکل ۱۳- اصول جذب‌کننده الکتریکی فشار پایین (ELPI)

### ۳-۳-۶-۵ پارامترهای ایجاد

جذب‌کننده آبشاری اطلاعات توزیع جرم دانه‌سنجی کل را در هر مرحله می‌دهد. این روش ایجاد توزیع اندازه را ممکن می‌سازد (بند ۷-۱ را ببینید). ابزارهای ELPI نیز توزیع عدد اندازه را توسط اندازه‌گیری‌های سینتیکی فراهم می‌سازند. ذرات به عنوان نسبت قطر/ جرم کمی می‌شوند اما این نسبت به ماهیت آيروسل مورد بررسی ارتباط زیاد دارد.

1- Electrical Low Pressure Impactor  
2- High voltage corona discharge

این هم‌چنین برای تجزیه ویژگی سطوح جذب‌کننده‌ها بعد از آزمون ممکن است. به‌علاوه با اختصاصی کردن قطر برش هر مرحله، این ذرات را می‌توان با خواص ریختی و خواص شیمیایی، اختصاصی کرد. برای جزییات خواص ریختی و شیمیایی به ترتیب بند ۵-۲-۳ و ۵-۲-۴ را ببینید. اطلاعات باارزشی را می‌توان از تجزیه ریختی یا تجزیه شیمیایی ذرات دام‌افتاده برای کنترل به دست آورد، در صورتی که ماهیت آبروسل برای هر گستره اندازه شبیه باشد. این اطلاعات به‌ویژه برای آبروسل با پخش‌کنندگی چندگانه مهم هستند و مسمومیت آبروسل مفهوم برجسته دارد.

#### ۴-۳-۶-۵ مزایا و معایب

این روش به طور نسبی تجزیه آسان توزیع وزن‌سنجی یا جداسازی آبروسل به صورت کسر ذرات را ممکن می‌سازد. این روش سال‌ها برای اندازه‌گیری کنترل سوختن به کار رفته است. ارتباط بین خواص تراکمی و قطر ذرات باید به عنوان مدل شکل ذره در نظر گرفته شود. این روش به‌ویژه برای وسایل ELPI مهم است. این موضوع باید در هنگام تفسیر نتایج در نظر گرفته شود. در دستگاه‌های آزمون آتش، مانند گرماسنج با هود جمع‌کننده و لوله آتش منتشرشونده، دمای آتش منتشرشونده در موقعیت‌های مختلف تفاوت زیاد خواهد داشت. انحراف در دما بر روی ایزوسینیتیک و اصلاح قطر برشی همراه هر مرحله جذب‌کننده اثر دارد. برای محدود کردن تأثیر تغییرات درجه حرارت در جذب‌کننده، این است که به طور کلی به دمای بالاتر از  $80^{\circ}\text{C}$  گرم شود. این گرما دادن از میعان بخار روی فیلترهای جذبی جلوگیری می‌کند. به هر حال، استفاده از جذب‌کننده تحت شرایط دمایی بالاتر به اندازه‌گیری اندازه قطر برشی برای هر مرحله نیاز دارد. برای کسب اطلاعات بیش‌تر بند ۶-۳ را ببینید.

#### ۵-۳-۶-۵ کاربردها

این روش را می‌توان برای وسایلی که آتش منتشرشونده به صورت پیوسته استخراج می‌شود، همانند گرماسنجه‌ها در مقیاس کوچک (استاندارد ملی ایران ۱۸۲۷۷ و ۱-۷۲۷۱) یا آزمون‌های مقیاس بزرگ (ISO 9705 و سایر) برای اندازه‌گیری توزیع اندازه آبروسل به کار برد. در چنین وسایلی، اگر خاموش‌کننده‌ها یا ثابت‌کننده جریان در لوله آگزوز وجود دارند باید مراقب بود، زیرا این موارد می‌توانند توزیع اندازه با برخورد نسبی آبروسل را اصلاح نمایند. مرجع [۳۶] طرح اصلاح لوله آگزوز گرماسنج مخروطی را برای اطمینان از عدم جذب قبل از نقطه نمونه‌برداری معرفی می‌کند.

#### ۴-۶-۵ ریزترازوی نوسانگر مخروطی<sup>۲</sup> (TEOM) و فرکانس ارتعاشی بلوری

ریزترازوی نوسانگر مخروطی به طور عمده برای اندازه‌گیری ذرات معلق در هوا<sup>۳</sup> کاربرد دارد [۳]. این سامانه اغلب با سامانه نمونه‌برداری سیلکون است. روش TEOM اندازه‌گیری وزن‌سنجی کلی را می‌دهد. تمامی ذرات در آبروسل بر روی بستر چرخشی جمع آوری می‌شوند که فرکانس نوسانی اصلاح‌شده تولید می‌کند (شکل ۱۴ را ببینید). شرح رابطه رفتار TEOM از معادله حرکت چرخشی هارمونیک به دست می‌آید. فرکانس چرخشی،  $f$ ، عنصر گرداننده به عنوان مقاومت و جرم،  $M$ ، طبق معادله زیر به دست می‌آید:

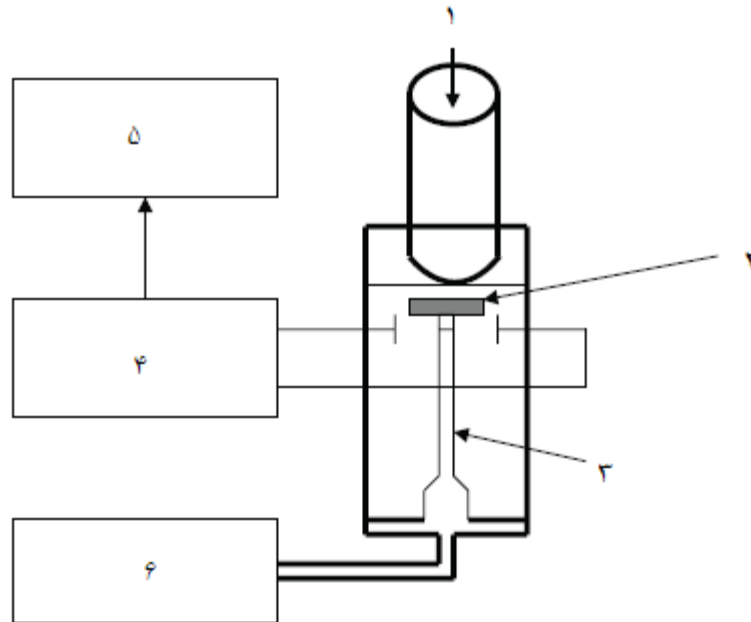
1- large-Scale Test  
2- Tapered Element Oscillating Microbalance  
3- Airborne

$$f = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

بنابراین، انحراف جرم عنصر،  $\Delta m$ ، طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta m = K_0 \cdot \left( \frac{1}{f_1^2 - f_0^2} \right)$$

$K_0$  ثابت تبدیل ویژه عنصر گرداننده؛  
 $f_0$  و  $f_1$  فرکانس چرخشی اولیه و واقعی عنصر (Hz)



| راه‌نما      | ۱                               | ۲          | ۳                 | ۴                        | ۵                 | ۶ |
|--------------|---------------------------------|------------|-------------------|--------------------------|-------------------|---|
| ورودی آبروسل | فیلتر جمع‌آوری کننده قابل تعویض | عنصر چرخشی | تقویت کننده چرخشی | اندازه‌گیری کننده فرکانس | تنظیم کننده جریان |   |

شکل ۱۴- ریزترازوی نوسانگر مخروطی

این دستگاه جرم کل آبروسل جمع‌آوری شده در زمان واقعی، از کمترین مقدار تا حدود  $100 \mu\text{m}$  را می‌دهد. انتخاب سیکلون به طور عمده در ورودی دستگاه برای انتخاب حداکثر مقدار ذره برای اندازه‌گیری به کار گرفته می‌شود.

دستگاه فرکانس ارتعاشی بلوری بر اساس اصول خیلی مشابه می‌باشد. در این صورت، عنصر گرداننده به وسیله بلور پیزو-الکتریک<sup>۱</sup> جایگزین می‌شود، وقتی که جریان الکتریکی برقرار می‌شود گردش صورت می‌گیرد. وجود ذرات روی بلور فرکانس متنوع ایجاد می‌کند که مرتبط با اندازه ذره است.

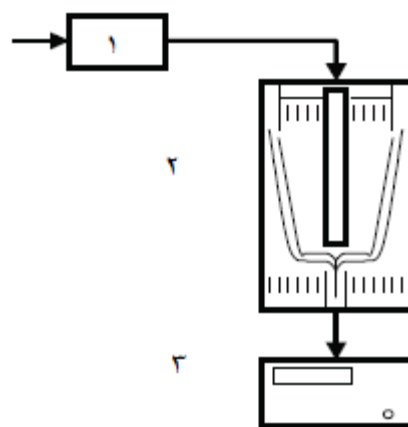
۵-۶-۵ دستگاه پیمایشی متحرک دانه‌بندی ذره (SMPS)

۱-۵-۶-۵ اصول

این روش به طور عمده برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره آيروسول‌ها در حد نانو ذره به کار می‌رود [۱][۲][۳]. روش SMPS مشتمل بر خنثی‌کننده، تجزیه‌کننده متحرک نفوذی (DMA) و شمارشگر تراکم ذره<sup>۲</sup> (CPC) در شار پیوسته است. این دستگاه خنثی‌کننده، آيروسول خنثی را پیش از یونش آن ممکن می‌سازد. روش DMA ذرات معلق در جریان گاز را با جابه‌جایی الکتریکی‌شان تنظیم می‌کند و جریان پایین شمارشگر تراکم ذره این ذرات پیش‌انتخاب‌شده را شناسایی می‌کند که شکل ۱۵ این فرایند را نشان می‌دهد. توزیع اندازه از روی تعداد ذرات دریافت‌شده به وسیله شمارشگر تراکم ذره و تابع جابه‌جایی تجزیه‌کننده متحرک نفوذی با استفاده از روش داده معکوس محاسبه می‌شود. به هر حال، اگرچه روش SMPS بیش‌تر برای برقراری روش در نظر گرفته می‌شود، تعدادی از عدم قطعیت استفاده تلفیقی آن با اندازه‌گیری توزیع ذره باقی می‌ماند که تاکنون ارزیابی نشده‌اند.

#### ۵-۶-۲ شرح روش

نمونه آتش منتشرشونده خنثی به وسیله منبع رادیواکتیو که به طور کلی شامل  $^{210}\text{Po}$  یا  $^{85}\text{Kr}$  است یونیده می‌شود. سپس بزرگ‌ترین ذرات به وسیله جذب جداسازی می‌شوند. این فرایند از این ذرات بزرگ که می‌توانند تجمع بار بیش از یک گرفته و مزاحم اندازه‌گیری شوند جلوگیری می‌کند. نمونه آتش منتشرشونده وارد DMA می‌شود، جایی که آيروسول‌ها در یک میدان الکترواستاتیک پیوسته با جابه‌جایی الکتریکی‌شان جدا می‌شوند. نمایه قطر ذرات در خروجی تابعی از میدان الکترواستاتیکی است. سپس ذراتی که به این ترتیب انتخاب شده‌اند وارد شمارشگر تراکم ذرات می‌شوند، جایی که تراکم بخار اشباع‌شده را، هسته‌دار می‌کنند که به طور کلی با گرمادادن مایع قطبی بوتانول در مسیر جریان به دست می‌آید. بخار بوتانول متراکم می‌شود و قطره‌های ریز حدود  $10\ \mu\text{m}$  ایجاد می‌کند و این قطره‌ها با سامانه نوری شمارش می‌شوند. این شمارش مستقل از اندازه ذرات اولیه است.



راهنما

۱ یونش  $^{210}\text{Po}$   
۲ طبقه‌بندی DMA

۳ شمارشگر CPC

1- Diffusion mobility analyser  
2- Condensation particle counter

## شکل ۱۵- دستگاه پویسی متحرک دانه‌بندی ذره ( SMPS )

### ۳-۵-۶-۵ پارامترهای ایجاد

دستگاه بر اساس اندازه‌گیری تعداد، اندازه، مساحت سطح و جرم ذرات طراحی می‌شود و نتایج اصلی بر حسب غلظت ذرات در مترمکعب است. یکی از ویژگی‌های مهم این دستگاه‌ها جداسازی در DMA بر اساس قطر الکتریکی ذرات است. با این روش امکان اندازه‌گیری ذرات از  $10\text{ nm}$  تا  $1\text{ }\mu\text{m}$  در زمان واقعی است. برای مواد هندسی مثل دوده کربن، دستگاه SMPS جرم و مساحت سطح ذرات غیرکروی را بیش‌تر برآورد می‌کند. مطالعات اخیر [۳۷] نشان می‌دهد وقتی که از دستگاه SMPS استفاده می‌شود گنجاندن ماهیت هندسی ذرات دوده ممکن است.

### ۴-۵-۶-۵ مزایا و معایب

مزیت اصلی روش SMPS جداسازی و دسته‌بندی ذرات به‌ویژه ذرات ریز است. ذره ریزتر، از نظر جابه‌جایی الکتریکی اهمیت بیش‌تری خواهد داشت.

عیب اصلی این روش اثر بار چندگانه است. هنگام یونش در DMA و بسته به قطر آن، احتمال باردارشدن ذره با درجه بالاتر (۲، ۳ یا ۴) است. بر اساس اصول روش SMPS، توزیع اندازه بر اساس قطر متحرک، تمام ذرات بار یگانه می‌گیرند. هر ذره با بار چندگانه (به ویژه برای ذرات با اندازه بزرگ‌تر از  $150\text{ nm}$  تا  $200\text{ nm}$ ) با ذرات کوچک‌تر دارای تک‌بار اشتباه می‌شود. عیب دیگر روش SMPS جمع‌شدن<sup>۱</sup> زمان سامانه است. روش SMPS یک وسیله پیمایشی است که به تدریج اندازه‌های ذرات کامل می‌شود. اندازه‌گیری توزیع اندازه معتبر حداقل سی ثانیه طول می‌کشد. بنابراین دوره کوتاه، انتقال پدیده (رویداد بیش از یک ثانیه یا بیش‌تر) با استفاده از این دستگاه کامل نمی‌شود. وجود منبع رادیواکتیو برای یونش با مشکلات انتقال دستگاه بین سازمان‌ها همراه است.

### ۶-۶-۵ دستگاه دانه‌بندی اگزوز موتور<sup>۲</sup> (EEPS) و دستگاه دانه‌بندی ذره با جابه‌جایی بالا<sup>۳</sup> (FMPS)

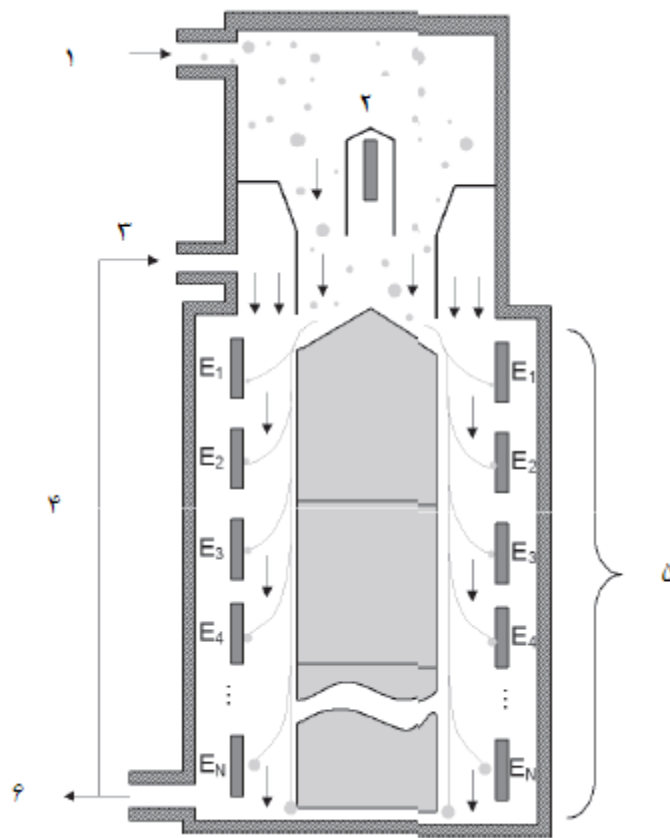
دستگاه SMPS مشروح در بند بالا به‌ویژه برای مطالعه توزیع اندازه ذرات با قطر کم‌تر از  $1\text{ }\mu\text{m}$  مناسب است. این وزن‌سنج به مقدار زیاد مورد استفاده قرار گرفته است و ملاحظه‌های تئوری مرتبط با جابه‌جایی قطر الکتریکی و پارامترهای ساختاری در نوشته‌ها موجود است [۳۷]. به عبارت دیگر، عیب عمده روش SMPS واقعی نبودن زمان پیمایش است. به تازگی، وسیله‌ای به منظور استفاده از اصول فیزیکی DMA توسعه داده شده است، اما هرکدام، اندازه‌گیری زمان واقعی توزیع اندازه ذره را ممکن می‌سازد. این وسیله دستگاه دانه‌بندی اگزوز موتور (EEPS) نام دارد و بر اساس ترسیب الکترواستاتیکی ذرات، مشابه روش DMA می‌باشد [۱]. این دستگاه توسط بعضی از تولیدکنندگان DMS نیز نامیده می‌شود.

### ۱-۶-۶-۵ اصول

در ورودی دستگاه EEPS، آبروسل از میان جذب‌کننده سیکلونی با قطر برشی  $0.8\text{ }\mu\text{m}$  (۵۰٪) می‌گذرد. سپس ذرات در سطح مجاز با استفاده از نفوذ ایجاد بار تک‌قطبی، بار مثبت می‌گیرند. ذرات باردار به ناحیه

1- Integration time  
2- Engine Exhaust Particle Sizer  
3- Fast Mobility Particle Sizer

اندازه‌گیری مرکز ستون الکتروود با اعمال ولتاژ بالا تزریق می‌شوند. سپس ذرات دارای بار مثبت با قرارگرفتن چند الکترومتر بر روی سطح خروجی منطقه اندازه‌گیری از مرکز ستون دفع می‌شوند. یک ذره با جابه‌جایی الکتریکی بالا (یعنی قطر جابه‌جایی الکتریکی پایین) به قسمت بالایی خروجی ستون الکترومترها برخورد خواهد کرد در حالی که ذره با جابه‌جایی پایین (یعنی قطر جابه‌جایی الکتریکی بالا) از ستون می‌گذرد و در قسمت پایین‌تر الکترومتر برخورد خواهد کرد. ترتیب چندگانه الکترومترها (۲۲ کانال) امکان اندازه‌گیری زمان واقعی توزیع اندازه را با استفاده از ایجاد سیگنال دیجیتالی فرایند سخت‌افزاری و نرم‌افزاری ممکن می‌سازد. دو نوع از این دستگاه به فرم EEPS و FMPS موجودند. مدل EEPS دستگاه سریع‌تر با سرعت داده ۱۰Hz است در حالی که مدل FMPS (ایجادکننده ذره با جابه‌جایی بالا) سرعت داده آن ۱Hz است. بر اساس زمان پاسخ‌گویی متفاوت آن‌ها، حساسیت دامنه دستگاه FMPS بیش‌تر از دامنه دستگاه EEPS است، اما دامنه اندازه قابل سنجش برای هر دو مدل شبیه است. شکل ۱۶ اصول کار دستگاه مدل EEPS را نشان می‌دهد.



|         |   |                |
|---------|---|----------------|
| راه‌نما | ۱ | ورودی نمونه    |
|         | ۲ | شارژکننده      |
|         | ۳ | پوشش ورودی هوا |
|         | ۴ | جریان اضافی    |
|         | ۵ | الکترومترها    |
|         | ۶ | اگزوز          |

شکل ۱۶ - دستگاه دانه‌بندی اگزوز موتور (EEPS)

۵-۶-۶-۲ پارامتر ایجاد



این دستگاه برای اندازه‌گیری توزیع اندازه عددی بر اساس قطر جابه‌جایی الکتریکی از ۵۶۰nm تا ۵۶nm بر حسب زمان واقعی طراحی می‌شود. دامنه غلظت برای EMPS از  $1 \times 10^2 - 1 \times 10^7$  particles/cm<sup>3</sup> در طول موج ۵۶۰nm و  $1 \times 10^1 - 1 \times 10^5$  particles/cm<sup>3</sup> در ۵۶۰nm است.

#### ۳-۶-۶-۵ مزایا و معایب

مزایای عمده این دستگاه‌ها پاسخ زمان واقعی و کار آسان با آن‌ها است. این دستگاه‌ها نماینده یک گرانول‌سنج همه‌کاره<sup>۱</sup> هستند. در مقابل دستگاه SMPS، به منبع رادیواکتیو نیاز ندارد و دستگاه اندازه‌گیری در چند دقیقه آماده می‌شود.

معایب این دستگاه‌ها فرکانس بالا در تعمیر و نگهداری است. عیب دیگر دستگاه‌های EEPS و FMPS این است که به ذرات بزرگ یا ذرات الیافی حساس هستند که ممکن است بین الکترومترها پل ایجاد کنند.

#### ۷-۶-۵ دستگاه دانه‌بندی آیرودینامیک

##### ۱-۷-۶-۵ اصول

دستگاه دانه‌بندی آیرودینامیک (APS) [۳۸] به عنوان دسته‌بندی‌کننده وزن‌سنجی ذرات در گستره بین  $0.5 \mu\text{m}$  تا  $20 \mu\text{m}$  با استفاده از روش زمان پرواز<sup>۲</sup> که قطر آیرودینامیکی را در زمان واقعی اندازه‌گیری می‌کند عمل می‌کند (شکل ۱۷). به خاطر زمان پرواز، اندازه آیرودینامیکی به شکل ذره ارتباط دارد و تحت تأثیر ضریب شکست یا پراش می<sup>۳</sup> قرار ندارد و برای دانه‌بندی به روش پراش نور عالی است. علاوه بر این، پاسخ یکنواخت منحنی اندازه‌گیری زمان پرواز، جداسازی بالای دانه‌بندی دامنه کامل اندازه ذره را تأمین می‌کند.

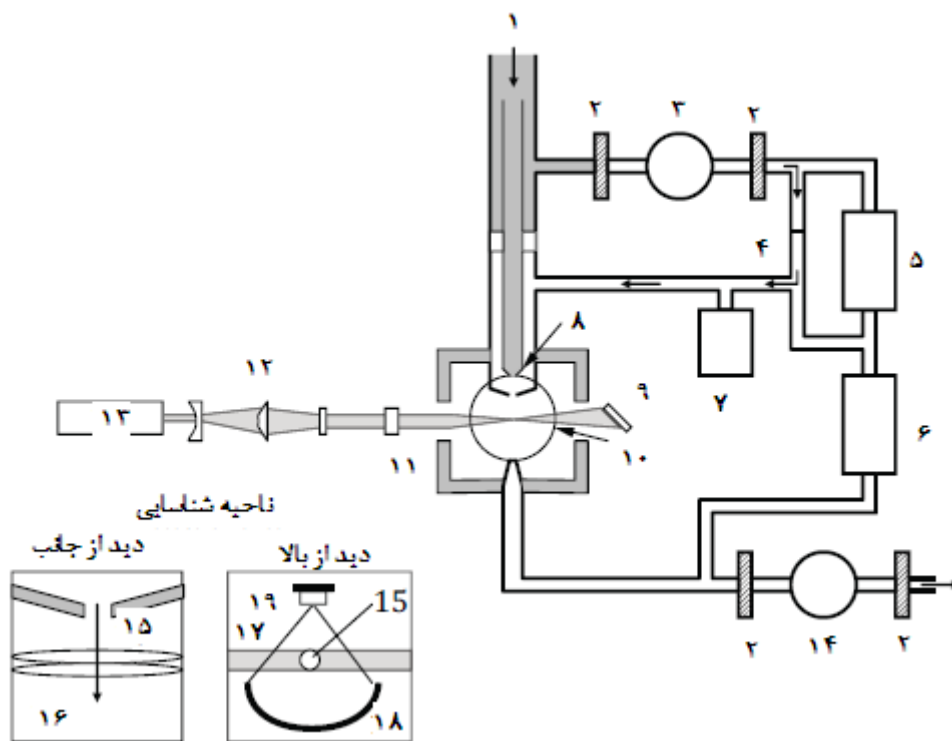
#### ۲-۷-۶-۵ شرح روش

در روش APS، جریان نمونه آيروسول نخست از دهانه شتاب‌دهنده می‌گذرد. اندازه آیرودینامیکی یک ذره نرخ شتاب را تعیین می‌کند، با ذرات بزرگ‌تر در نتیجه اینرسی بزرگ آن‌ها، شتاب آهسته‌تر می‌شود. وقتی که ذرات از نازل خارج می‌شوند، از دو باریکه لیزر که به طور جزئی همپوشانی می‌کنند در محدوده آشکارسازی می‌گذرند.

وقتی که ذره از میان پرتو هم‌پوشانی می‌گذرد، نور پراشیده می‌شود. یک آینه مدور، در زاویه  $90^\circ$  درجه محور عمودی پرتو لیزر قرار داده می‌شود که نور را جمع‌آوری و بر روی فوتو آشکارساز متمرکز می‌کند. ساختار ناحیه آشکارساز، آشکارسازی ذره را بهبود می‌بخشد و نوسان‌های پراش می<sup>۲</sup> را در اندازه‌گیری‌ها شدت پراش نور حداقل می‌رساند.

---

1- All-in-one granulometer  
2- Time-of-flight technique  
3- Mie scattering



|    |                              |         |
|----|------------------------------|---------|
|    |                              | راه‌نما |
| ۱  | ورودی نمونه                  | ۱       |
| ۲  | فیلترها                      | ۲       |
| ۳  | پوشش پمپ سیال                | ۳       |
| ۴  | اریفیس                       | ۴       |
| ۵  | ترانسدیوسر پوشش فشار سیال    | ۵       |
| ۶  | ترانسدیوسر پوشش فشار کل سیال | ۶       |
| ۷  | ترانسدیوسر پوشش فشار مطلق    | ۷       |
| ۸  | اریفیس سرعت‌دهنده            | ۸       |
| ۹  | پرتوگیر <sup>۱</sup>         | ۹       |
| ۱۰ | آینه بیضوی                   | ۱۰      |
| ۱۱ | ناحیه اندازه‌گیری            |         |
| ۱۲ | سامانه شکلی پرتو             |         |
| ۱۳ | لیزر                         |         |
| ۱۴ | پمپ جریان کل                 |         |
| ۱۵ | نازل                         |         |
| ۱۶ | مقسم پرتو لیزر               |         |
| ۱۷ | پرتو لیزر                    |         |
| ۱۸ | آینه بیضوی                   |         |
| ۱۹ | فوتو آشکارساز                |         |

شکل ۱۷- دستگاه دانه‌بندی آیرودینامیک (APS) [۳۸]

استفاده از دو پرتو لیزر، با هم‌پوشانی نسبی در هر ذره به یک سیگنال، سیگنال دو تاجی می‌دهد. قله به قله پرواز زمان بین دو پرتو با جداسازی کم‌تر از نانوثانیه اندازه‌گیری می‌شود. دامنه سیگنال برای شدت پراش نور ثبت می‌شود. کوچک‌ترین ذره شاید یک تاج قابل اندازه‌گیری داشته باشد و جداگانه ذخیره شود. ذرات با بیش از دو تاج، حاکی از منطبق شدن است که جداگانه ذخیره می‌شوند، اما برای دانه‌بندی‌کننده آیرودینامیکی یا توزیع‌های پراشیدگی نور استفاده نمی‌شوند.

۳-۷-۶-۵ پارامترهای ایجاد

این دستگاه برای اندازه‌گیری توزیع قطر آیرودینامیک ذره از  $0.5\mu\text{m}$  تا  $20\mu\text{m}$  طراحی می‌شود و اطلاعات کیفی ذرات کمتر از  $0.5\mu\text{m}$  را می‌دهد. یکی از ویژگی‌های مهم چنین دستگاه‌ها بر اساس جداسازی قطر آیرودینامیکی ذرات است.

#### ۵-۶-۴ مزایا و معایب

کار با این روش بسیار آسان است و امکان اندازه‌گیری دامنه گسترده اندازه‌ها در زمان واقعی را ممکن می‌کند. با این وجود این روش برای ذرات در حد نانو کاربرد ندارد و برای اطلاع از ذرات کمتر از  $0.5\mu\text{m}$  باید با احتیاط عمل شود. به‌علاوه، مطابق با اصول کار با دستگاه، APS فقط برای آشکارسازی غلظت کمتر از  $1000\text{ particles/cm}^3$  طراحی می‌شود.

#### ۵-۶-۸ دیگر روش‌های اندازه‌گیری استخراجی

دیگر روش‌های اندازه‌گیری استخراجی مذکور در منابع عبارتند از:

- معیار بتا<sup>۱</sup> که امکان اندازه‌گیری ارتباط زمانی بین جرم آيروسول جذب‌شده بر روی فیلتر جمع‌کننده را مقدور می‌سازد. اصول فیزیکی بر اساس اضافه‌شدن الکترون به آيروسول است که روی بستر<sup>۲</sup> رسوب کرده است. اساس آن بر این فرض است که اضافه‌شدن الکترون به جرم آيروسول رسوب‌شده نسبی است. عامل‌های محدودکننده شامل بعدهای متنوع آيروسول‌ها، غیر یکنواخت بودن بستر و وابستگی اندازه‌گیری به عدد‌های اتمی عناصر شیمیایی درون آيروسول هستند. این روش تا حدی تحت تأثیر عدد اتمی‌های بالا قرار می‌گیرد.

- تحلیل‌گر جابه‌جایی نفوذ<sup>۳</sup> (DMA) از نوع برقی، ارایه‌شده برای دستگاه EEPS و SMPS بالا نیز می‌تواند با دیگر آشکارسازها به غیر از شمارشگر تراکم ذره (CPC) استفاده شود. تکنولوژی‌های مختلف مناسب CPC نیز موجودند. نوع دیگر آشکارساز ذکر شده در منابع فیلتر-الکترومتر<sup>۴</sup> است.

- دستگاه جذب‌کننده مایع چندمرحله‌ای، متشکل از نوع ظرف استوانه‌ای شیشه‌ای با قطر  $80\text{ mm}$  و ارتفاع  $20\text{ mm}$  (اندازه متغیر است) به صورت سه بخش عمودی جداشده می‌باشد. به‌ویژه جریان گاز بارگیری‌شده (مرتبط با جریان واقعی دستگاه‌های واقعی مورد استفاده) از بخش بالا از طریق جت نسبتاً بزرگ وارد می‌شود و روی صفحه مرطوب جاری می‌شود که ذرات بزرگ‌تر از  $10\mu\text{m}$  به دام می‌افتند. سپس جریان گاز از طریق جت کوچک‌تر وارد بخش مرکزی دانه‌بندی ذره می‌شود و روی صفحه مرطوب دوم برخورد می‌کند. ذرات به دام‌افتاده در این قسمت بین  $2\mu\text{m}$  تا  $10\mu\text{m}$  هستند. سپس جریان گاز به بخش پایین‌تر منتقل می‌شود و از طریق جت کوچک‌تر و از صفحه سوم می‌گذرد، ذرات به دام‌افتاده دارای قطر  $0.5\mu\text{m}$  تا  $5\mu\text{m}$  هستند. فرایند تله‌گذاری قابل مقایسه با اصول به دام افتادن ذره اولیه است و بنابراین به‌ویژه در بررسی‌های خطر تنفس قابل توجه هستند [۳۹]. یک سامانه جریان نمونه شبیه به آنچه که برای تکنیک‌های وزن‌سنجی/غلظت ذره استفاده شده مناسب است.

## ۶ استاندارد اندازه‌گیری آيروسول

- 1- Beta gauges
- 2- Substrate
- 3- Diffusion Mobility Analyser
- 4- Electrometer-filter

## ۱-۶ تولیدکننده‌های استاندارد آيروسل برای کالیبراسیون دستگاهی

### ۱-۱-۶ نیازمندی به آيروسل‌های استاندارد

برای اطمینان از اندازه‌گیری درست آيروسل، آيروسل‌های استاندارد نیاز هستند. آيروسل‌های استاندارد باید دارای سه ویژگی اصلی یک نمونه آيروسل را داشته باشند: غلظت، توزیع وزنی و ریخت آن. دستگاه‌های متنوع برای تولید آيروسل‌های کنترل‌شده استفاده می‌شوند. پارامترهای حاکم در انتخاب تولیدکننده آيروسل استاندارد ابعاد، دامنه، کمینه و بیشینه غلظت برای تهیه، ماهیت شیمیایی و حالت فاز (مایع یا جامد)، ریخت ذرات آيروسل و بار الکتریکی و یا خنثی بودن الکتریکی آيروسل هستند.

### ۲-۱-۶ تولیدکننده‌های پلیمر توپی<sup>۱</sup>

ساده‌ترین راه برای تولید آيروسل پراکندگی یگانه توپ‌های کروی پخش‌کننده پلی‌استایرن یا لاتکس پلی وینیل به صورت محلول مایع و سپس تبخیر مایع محلول است. مایع‌های استاندارد برای وزن‌سنجی از ۱۰ nm تا ۳۰ μm در دسترس هستند. انحراف استاندارد چنین پخش‌کننده‌ای به طور کلی خیلی خوب است. با این وجود، چند مشکل در این روش وجود دارند. اولین مورد آن مربوط به امکان شکل‌گیری ذرات لاتکس دوتایی و سه‌تایی در محلول است، این اثر فقط با رقیق کردن بسیا زیاد لاتکس در حلال مایع کاهش می‌یابد [۴۰]. مشکل دوم مربوط به حذف حلال مایع از گلوله‌های لاتکس است. حلال باید خیلی خالص باشد و جداسدن آن هیچ‌گونه اثری روی لاتکس آيروسل نداشته باشد.

### ۳-۱-۶ تولیدکننده‌های تخلیه بار الکتریکی<sup>۲</sup>

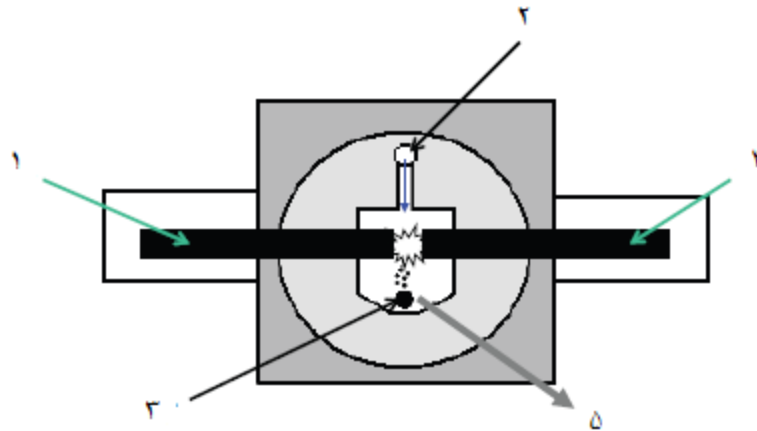
از کار هلسپر و همکارانش<sup>۳</sup> [۴۱]، تولیدکننده تخلیه بار الکتریکی (شکل ۱۸) برای تولید ذرات آيروسل با اندازه در حد نانو به وسیله تخلیه قوس الکتریکی<sup>۴</sup> بین دو الکترود ممکن است [۴۲]. وقتی الکترودها مصرف می‌شوند فضای بین آن‌ها برای تولید قوس الکتریکی پایدار و تولید مجدد و بنابراین ایجاد آيروسل به صورت پایدار حفظ می‌شود. نیازمندی قوس برای تولید ذرات حاصل از تخلیه یک خازن، مقاومت چرخان است که فرکانس‌شان از طریق مقاومت متغیر کنترل می‌شود. برای جلوگیری از اکسیدشدن الکترودها، جریانی از گاز بی‌اثر آرگون اطراف قوس عبور داده می‌شود. ذرات اولیه ایجاد شده در اثر قوس به صورت آيروسل خوشه‌ای در می‌آیند، گسترش آن به غلظت‌شان بستگی دارد. این اجتماع ایجادشده خوشه‌ای را به طور نسبی می‌توان با رقیق کردن مرحله بعد آيروسل‌های ایجادشده در هوای فیلترشده کاهش داد و کنترل کرد.

1- Ball

2- Spark discharge generators

3- Helsper and etc

4- Electrical arc discharge

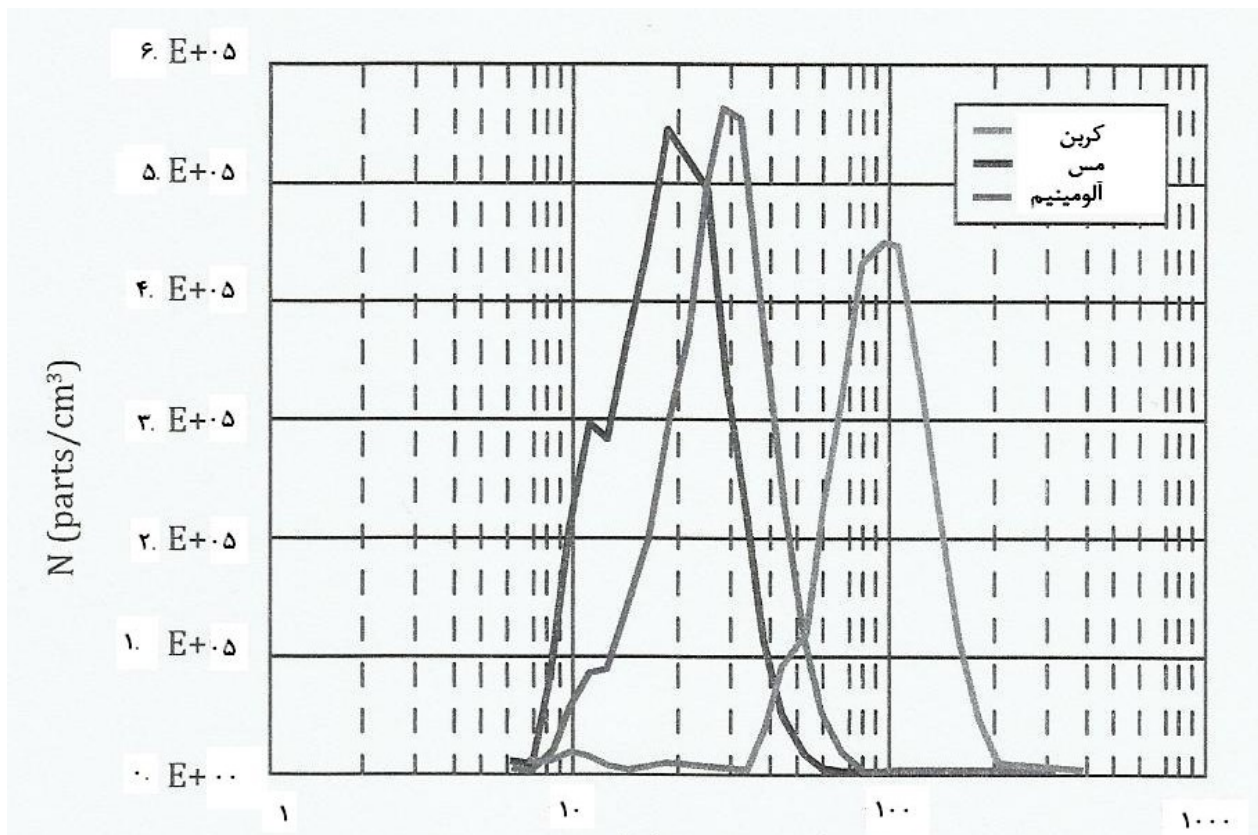


| راه‌نما |                                           |   |                                         |
|---------|-------------------------------------------|---|-----------------------------------------|
| ۱       | الکتروود گرافیت متصل به زمین              | ۲ | آرگون                                   |
| ۳       | هوای متراکم                               | ۴ | الکتروود گرافیت متصل به مولد ولتاژ بالا |
| ۵       | آرگون + هوا + ذرات گرافیت (۳۰nm تا ۳۰۰nm) |   |                                         |

شکل ۱۸- اصول تخلیه بار

هنگامی که فرکانس تخلیه بار الکتریکی افزایش می‌یابد، توزیع اندازه ذره به سمت قطر بالاتر جابه‌جا می‌شود و غلظت کل افزایش می‌یابد. این افزایش در قطر متوسط با فرکانس تخلیه بار الکتریکی بین دو الکتروود به غلظت ذره تولیدشده در محدوده قوس محفظه مرتبط می‌شود. در عمل، همان‌طور که فرکانس قوس افزایش می‌یابد، تعداد ذرات اولیه ایجادشده ممکن است آن‌قدر بزرگ شوند که بارهای بین ذرات مجاور منجر به انباشته‌کردن آن‌ها گردند.

شکل ۱۹ اثر ماهیت شیمیایی الکتروودها را نشان می‌دهد. خواص فیزیکی و شیمیایی مواد مورد استفاده برای الکتروودها اثر بالایی بر ماهیت تولید آيروسول دارند. الکتروودهای کربنی هدایت دمایی و الکتریکی ضعیف‌تری دارند و ایجاد ذرات اولیه بسیار اثرپذیر است زیرا انرژی پراکنده‌شدن بین الکتروودها به طور نسبی پایین است. این موضوع سبب می‌شود که توزیع اندازه ذرات در اثر فرایند انعقاد به سمت قطرهای بزرگ‌تر منتهی شود.



شکل ۱۹- توزیع وزن سنجی  $N(dm)$  برای ماهیت شیمیایی متفاوت الکترودها فشار هوا برابر صفر و فشار قوس برابر  $1\text{ bar}$  و  $W$  برابر  $500$  [۴۲]

#### ۴-۱-۶ تولیدکننده‌های دیگر

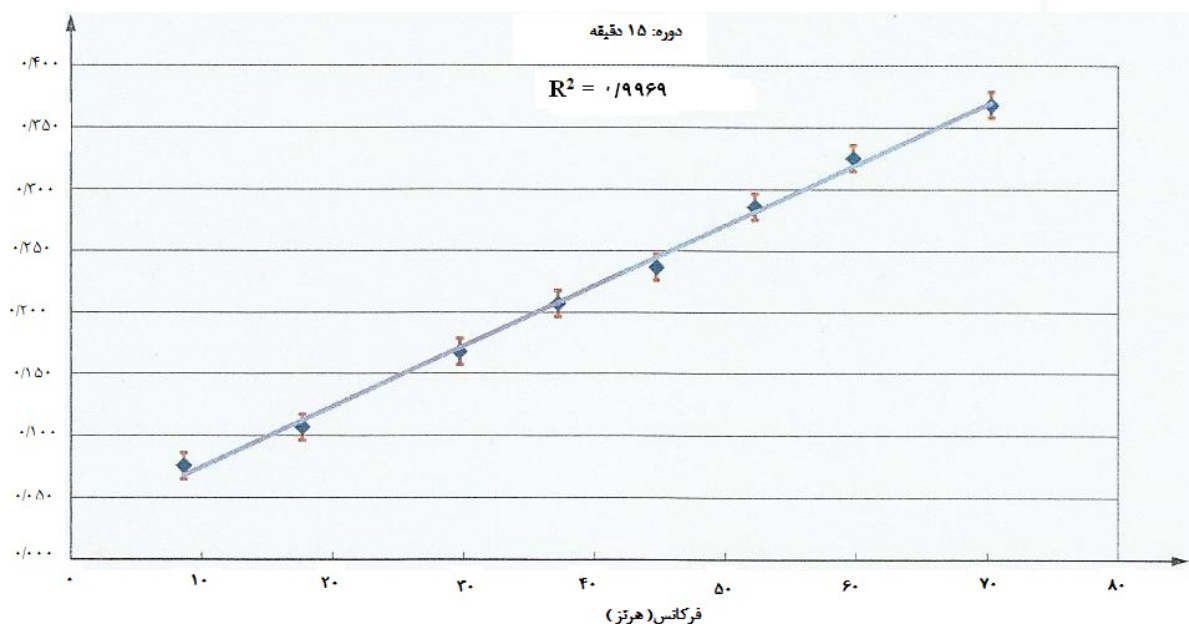
پراکندگی مستقیم پودرهای کالیبره شده به تازگی در حال گسترش است، اما موضوع بسیاری از مشکل‌ها است، به ویژه این که تولید پودرهای تک پراکنده مشکل است. با این وجود، توزیع وزنی در آبروسل می‌تواند به پودر اصلی خیلی نزدیک باشد و ترکیب شیمیایی ممکن است به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر کند. چنین جهت پراکنش پودرها به طور عادی در دو مرحله ایجاد می‌شود. نخستین مرحله شامل تغذیه پودر به یک محفظه<sup>۱</sup> با جریان ثابت از میان یک پراکنش کننده است. دومین مرحله پراکنش پودر به عنوان آبروسل است. این روش به طور عمده بر اساس اصول هوای فشرده است.

پراکنش قطره‌های ریز مایع آبروسل‌ها با روش‌های متفاوت نیز امکان پذیر است. بیشترین گزارش‌ها مربوط به مه‌پاش پنوماتیکی<sup>۲</sup> است، جایی که ذرات ریز از گستره  $1\mu\text{m}$  تا  $10\mu\text{m}$  با انحراف استاندارد هندسی بین  $1.7$  و  $2.5$  و غلظت جرمی بین  $1\text{ g/m}^3$  و  $50\text{ g/m}^3$  تولید می‌شوند. روش‌های دیگری برای تولید آبروسل مایع با پراکنش یگانه وجود دارند که شامل صفحه گردان، دهانه لرزشی، سوزن لرزاننده و روش‌های اسپری کردن الکترواستاتیکی هستند.

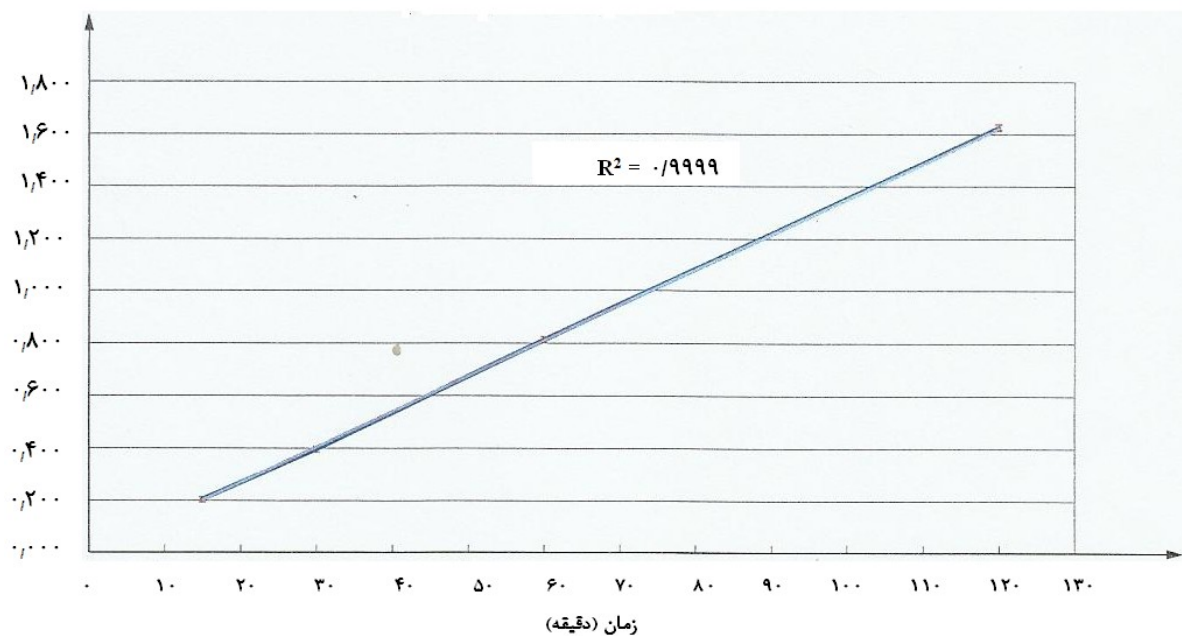
#### ۴-۶ کیفیت (تصدیق) تولیدکننده‌ها

1- Enclosure  
2- Pneumatic nebulisor

کیفیت تولیدکننده‌های آبروسل استاندارد برای اطمینان تکرارپذیری، تجدیدپذیری و زمان پایداری ضروری است. روش بسیار عمومی برای رسوب کل آبروسل ایجادشده روی فیلتر برای بررسی، با روش وزنی (بند ۵-۶ را ببینید) مرتبط بین وزن مورد انتظار و اندازه‌گیری شده است که در شکل ۲۰-الف و ۲۰-ب ارائه می‌شود.



الف - مثال کیفی تولیدکننده تخلیه بار خطی با مقایسه بین فرکانس بارها و جرم آبروسل‌های تولید شده در مدت ۱۵ دقیقه فرکانس تخلیه‌های بار: ۳۷ هرتز



ب - مثال کیفی جابه‌جایی تولیدکننده تخلیه بار

شکل ۲۰

۳-۶ ضرورت روش‌های کالیبراسیون

برای کالیبراسیون وسایل اندازه‌گیری آبروسل در آتش منتشرشونده، تولید آبروسل با خواص تا حد ممکن مشابه خواص یون‌های آبروسل در آتش منتشرشونده مهم است. با این شرایط، امکان تولید آبروسل‌ها با توزیع وزنی و غلظت خیلی نزدیک به آبروسل‌های آتش برای اندازه‌گیری است، اما برای دستیابی صحت نمایش ریختی ذره مشکل است.

هنگامی که تولیدکننده مناسب راه‌اندازی شده است، این تولیدکننده به مدل ایجاد آتش یا به طور مستقیم به دستگاه نمونه‌برداری و اندازه‌گیری متصل می‌شود، اطمینان از اتصال صحیح ضروری است. برای مثال، به-خصوص برای تنظیم فشار بین تولیدکننده و دستگاه‌هایی کالیبره ضروری است. برای اندازه‌گیری‌های استخراجی، پیشنهاد‌های بند ۵-۶-۱ باید در نظر گرفته شوند و دستگاه‌ها باید تحت شرایط مشابه همانند اندازه‌گیری آبروسل آتش حرارت ببینند. برای مثال، برای دستگاه‌های نظیر جذب‌کننده‌های آبشاری، قطر برشی هر مرحله به دما و شرایط محیطی ارایه شده توسط سازندگان دستگاه بستگی دارد. باید شرایط کاری مدل آتش واقعی اندازه‌گیری و نتایج تصحیح شوند.

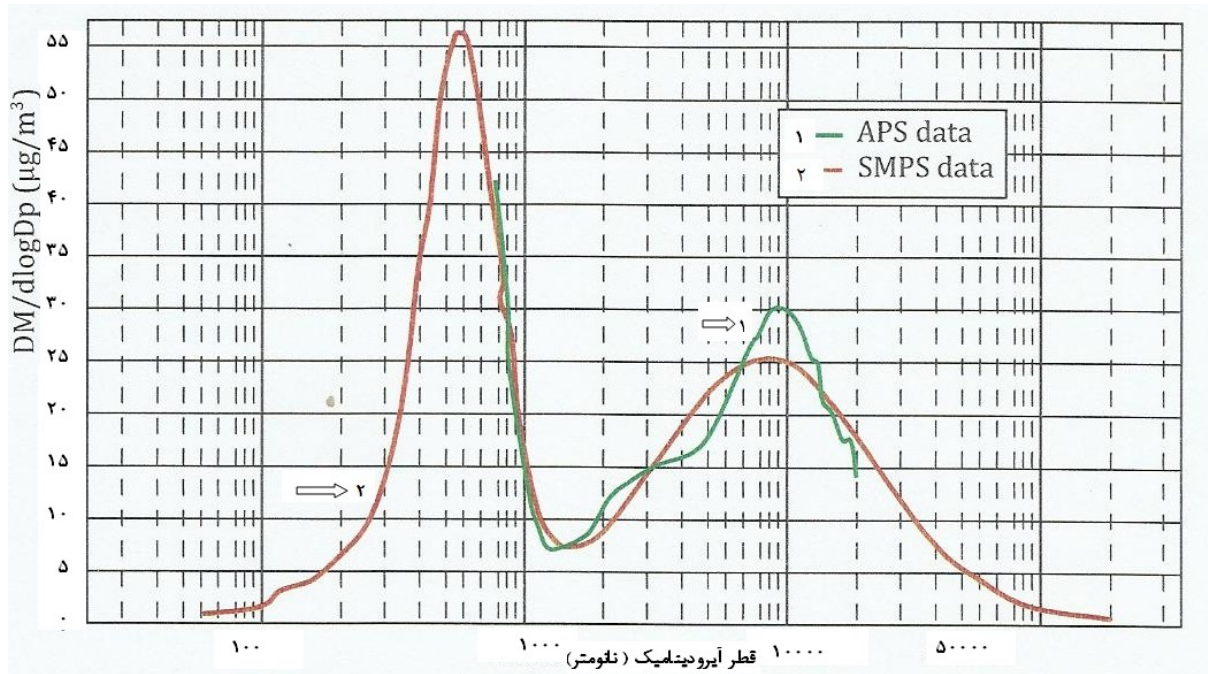
بسته به خواص دستگاه کالیبره‌شده و سایر پارامترهای به دست آمده، چنین کالیبراسیونی سبب اعتبار نصب می‌شود. با این وجود، کالیبراسیون هرگز نمی‌تواند تمام منظرهای آبروسل‌های تولیدشده در آتش را دوباره فراهم کند و انحراف‌ها باید بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی آبروسل‌ها مورد نظر قرار گیرند.

۶-۴ اعتباردهی

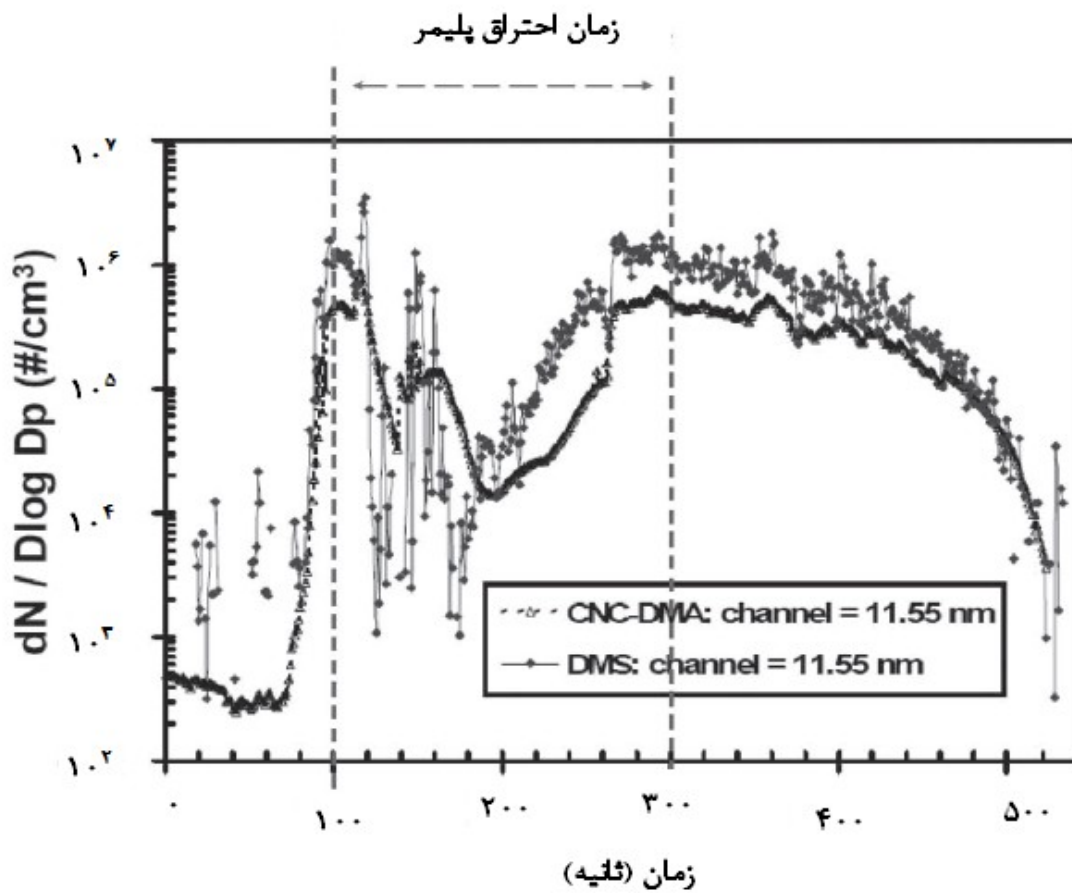
۱-۴-۶ مقایسه بین دستگاه‌ها

اعتباردهی اندازه‌گیری آبروسل را می‌توان با مقایسه بین داده‌های به دست آمده از دستگاه‌های متفاوت بر اساس اصول اندازه‌گیری متفاوت انجام داد. برای اندازه‌گیری آبروسل، درک دامنه کاربرد و محدودیت‌های روش نمونه‌برداری و اندازه‌گیری متفاوت، شرح کامل گزارش و نتایج برای مقایسه ضروری است. شکل ۲۱-الف مقایسه موفقیت‌آمیز بین دو دستگاه APS و SMPS برای آبروسل با پراکنش دوتایی را نشان می‌دهد. هر سامانه بر اساس اصول اندازه‌گیری فیزیکی متفاوت است. در روش SMPS یک مدل برای تفسیر اندازه‌گیری قطر جابه‌جایی الکتریکی در قطر آبرودینامیکی استفاده می‌شود. شکل ۲۱-ب مقایسه بین روش SMPS و EEPS در ناحیه پیمایش ۱۱/۵۵nm هنگام سوختن ۶-PA در گرماسنج مخروطی را نشان می‌دهد [۴۳].





الف- مثال مقایسه بین اندازه گیری های SMPS و APS

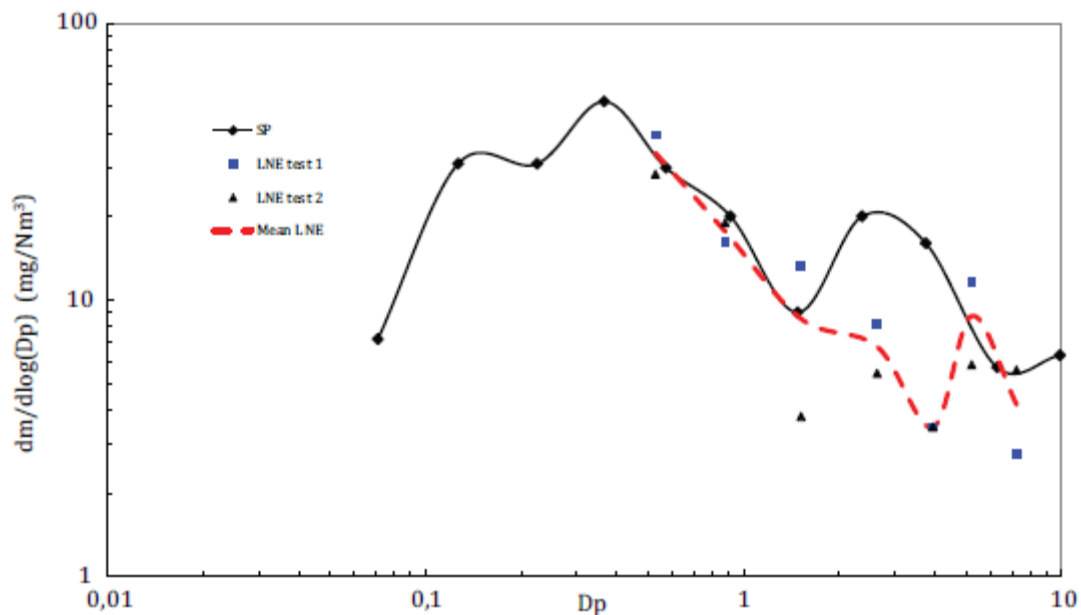


شکل ۲۱

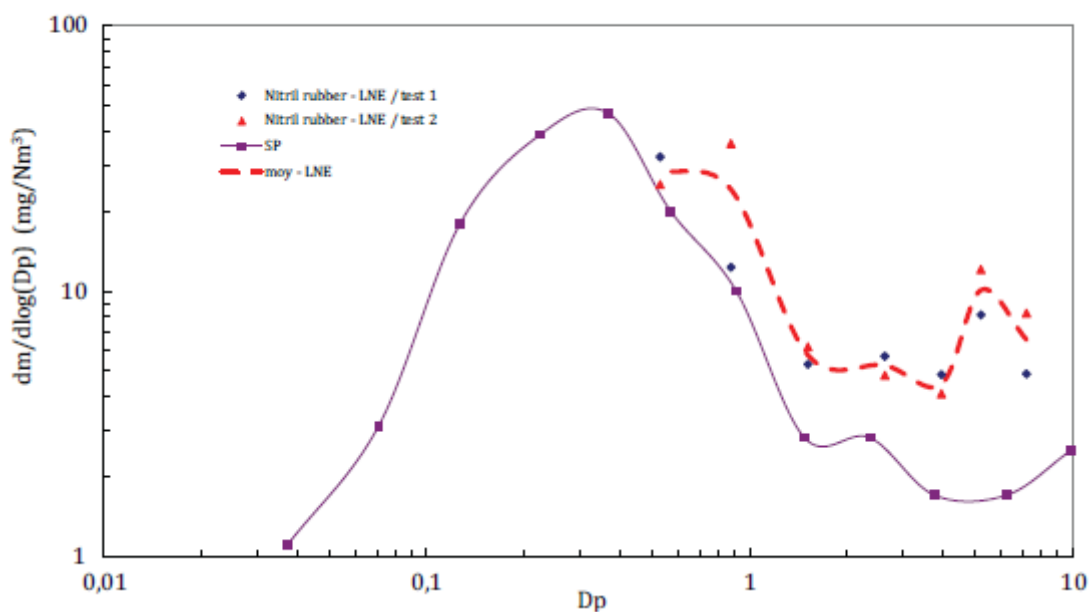
۲-۴-۶ مقایسه بین آزمایشگاهها

اطلاعات کمی بین داده‌های بین آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری آتش‌های منتشرشونده وجود دارد. در مرجع [۳۶] نتایج به دست آمده برای سه نمونه آزمون شده در آزمایشگاه SP (سوئد) و LNE (فرانسه) ارائه شده است. مدل آتش طبق استاندارد ملی ۷۲۷۱-۱ گرماسنج مخروطی بود و مواد مورد مطالعه پلی‌استایرن قابل انبساط، فوم پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر و لاستیک نیتریل بودند. آزمایشگاه SP از جذب آبشاری فشار پایین استفاده نمود، در حالی که آزمایشگاه LNE از جذب آبشاری کلاسیک استفاده کرد. این مقایسه‌ها برای این سه مواد در شکل ۲۲ ارائه شده است. این نتایج انطباق خوبی از توزیع ذرات میکرونی نشان را می‌دهد.

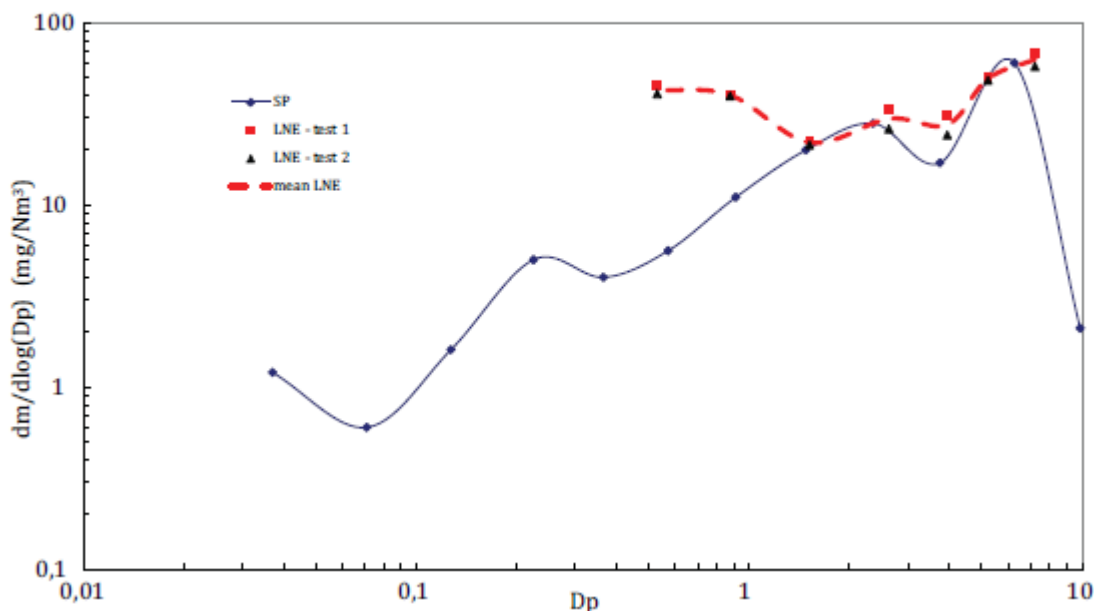
### پلی یورتان



### لاستیک نیتریل



## پلی استایرن

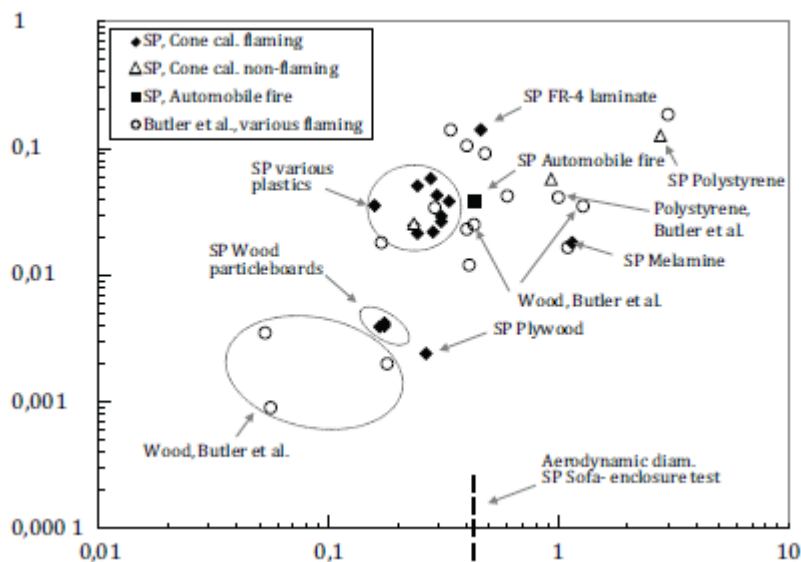


شکل ۲۲- مثال مقایسه بین آزمایشگاهها

### ۳-۴-۶ شرح اثرهای مقیاس و مقایسه با نوشتجات

بلام کویست<sup>۱</sup> [۴] داده‌های توزیع ذره از آزمون‌های آتش و داده‌های گردآوری شده از کار بوتلر و مولهولاند<sup>۲</sup> [۴۴] را مقایسه کرد. قطر آیرودینامیک متوسط جرم (MMAD)، همان‌طور که به وسیله هیندس<sup>۳</sup> [۴۵] تشریح شده، برای مجموعه‌ای از آزمون‌های کالریمتر مخروطی، برای یک آزمون درون چهار دیواری با یک نیمکت<sup>۴</sup> [۴۶] و برای آزمونی که ماشین به طور کامل سوخته [۴۷]، محاسبه شده است. داده‌ها در شکل ۲۳ به عنوان بازده ذرات بر حسب MMAD ارزیابی شده‌اند. نتایج توزیع ذرات کمی گردآوری شده به وسیله بوتلر و مولهولاند شامل داده‌هایی از منابع مختلف و اندازه‌های متنوع آتش است، اما همه آن‌ها از مواد قابل سوختن تشکیل می‌شوند. از این داده‌ها، فقط داده‌های آتش ناشی از سوخت‌های جامد در شکل در نظر گرفته شده است. این داده شامل سوخت‌هایی از انواع مواد چوبی و پلیمرها با بررسی‌های گوناگون و مؤلفین مختلف است.

1- Blomqvist  
2- Bulter and Mulholland  
3- Hindes  
4- Enclosure test with a sofa



شکل ۲۳- بازده دود بر حسب قطر متوسط آیرودینامیک [۴]

در یک روند بوتلر و مولهولاند مشاهده کردند که قطر آیرودینامیک با افزایش بازده دود افزایش می‌یابد. بنابر این می‌توان متوجه شد که فراورده‌های چوبی آزمون‌شده با آزمون‌های گرماسنج مخروطی بازده‌های پایین ذره با توزیع جرم ذره با یک MMAD کوچک ایجاد می‌کنند. این با قسمت پایین گروه داده چوب از بوتلر و مولهولاند در یک راستا است. به علاوه، دو نقطه داده اضافی از بوتلر و مولهولاند برای چوب وجود دارند. بالاترین این نقطه‌ها از آتش گسترده و تحت تهویه تخت چوبی است.

داده‌های تعبیرشده از سوختن شعله‌دار ملامین و لامینیت FR-۴ (لامینیت برم‌دارشده) انتهای بالای منحنی هستند. هر دو این فراورده‌ها در اثر ترکیب شیمیایی‌شان به طور ضعیف سوختند و به‌ویژه لامینیت FR-۴ بازده ذره خیلی بالایی تولید کرد. نقطه داده "SP پلی‌استایرن" بازده ذره بالا و توزیع قطر آیرودینامیک بالا را نشان داد. این فراورده در آزمون گرماسنج مخروطی آتش نگرفت. مقادیر بالاتر با داده تهیه شده به وسیله بوتلر و مولهولاند مقایسه شدند، همان‌طور بودند که انتظار می‌رفت.

تمایل به افزایش MMAD با بازده ذره افزایش یابنده برای آزمون‌های گرماسنج مخروطی، چنان‌چه سوختن در آزمون گرماسنج مخروط استاندارد خوب تهویه شده باشد، در اساس باید ناشی از تفاوت در ترکیب شیمیایی مواد باشد. مواد شدیداً اکسیژنه شده، نظیر چوب، خوب می‌سوزند، در حالی که پلیمرهای آروماتیک نظیر پلی‌استایرن ضعیف می‌سوزند و دارای بازده دوده هستند [۴۸]. شرایط احتراق برای بازده بالاتر به دست آمده از آتش که خوب تهویه نشود، نیز مهم هستند [۴۸].

داده‌های حاصل از آزمون‌های مقیاس بزرگ با نتایج توزیع اندازه جرم ذره حاصل از آزمون‌های گرماسنج مخروطی و داده‌های بوتلر و مولهولاند تأیید می‌شود. هر دو آزمون‌ها مقیاس بزرگ MMAD تا حدی بالاتر از  $0.4\mu\text{m}$  نشان را می‌دهد و نتیجه حاصل از آتش اتومبیل در بازده ذره با روش MMAD خوب منطبق است. در مورد آزمون‌های آتش نیمکت درون چهار دیواری، محاسبه بازده ذره ممکن نیست چون از دست دادن جرم نیمکت نامشخص است.

عوامل توصیفی عمده که غلظت آبروسل را مشخص می‌کنند، تعداد ذرات در هر مترمکعب یا غلظت جرمی است. این عوامل به صورت مستقیم از وسایل شرح داده شده در این استاندارد به دست می‌آیند یا تفسیر می‌شوند. این عوامل توصیفی عمده تولیدی در تجزیه آبروسل در ارتباط با توزیع وزن‌سنجی، قطر آبرودینامیک متوسط جرم و انحراف استاندارد هندسی آن هستند. جزییات روش‌های محاسبه در مرجع [۴۹] در پایین معرفی می‌شوند. خواص ریختی آبروسل برای اظهار نظر پیچیده است. برای جزییات بیش‌تر بند ۵-۲-۳ را ببینید.

#### ۱-۱-۷ قطر آبرودینامیک متوسط جرمی (MMAD)

برای محاسبه MMAD، جدول درصد تجمعی معلوم - کم‌تر از اندازه ذره گفته شده رسم کنید و جرم کلی نمونه مورد آزمون جمع‌آوری شده در جذب آبشاری را محاسبه کنید. با نمونه مورد آزمون جمع‌آوری شده در مرحله‌ای که کم‌ترین کسر اندازه ذره را جمع‌آوری کرده آغاز کرده و این جرم نمونه مورد آزمون را به کل جرم یافته شده بالا تقسیم کنید. برای تبدیل به درصد، این خارج قسمت<sup>۱</sup> را در صد ضرب کنید. این درصد را در برابر اثر قطر برش مرحله بالای آن در دودکش، وارد کنید. این مرحله را برای مراحل باقی‌مانده به ترتیب تکرار کنید. برای هر مرحله، درصدهای جرم به دست آمده را به درصد جرم مراحل پایین اضافه کنید. منحنی درصد جرم کم‌تر از اندازه اظهار شده نسبت به اندازه ذره با مقیاس نسبی بر حسب لگاریتم مقیاس اندازه را ذره رسم کنید. خط راستی که بیش‌ترین هم‌خوانی با نقاط منحنی را دارد رسم کنید. خط کمینه مربع‌های رگرسیون تجزیه وزنی ممکن است برای دستیابی به هم‌خوانی بهتر استفاده شود. لازم به یادآوری است که اندازه ذره در هر تقاطع خط ۵۰٪ درجه است. این عمل برای محاسبه آبرودینامیک جرم متوسط است.

#### ۲-۱-۷ انحراف استاندارد هندسی<sup>۲</sup> (GSD)

برای محاسبه انحراف استاندارد هندسی، به لگاریتم منحنی احتمال مورد استفاده برای محاسبه قطر آبرودینامیک جرم متوسط مراجعه کنید. مشروط بر آن‌که خط به دست آمده به خوبی با داده‌ها منطبق باشد، توزیع ذره دارای لگاریتم نرمال باشد و محاسبه انحراف استاندارد هندسی ممکن باشد. باید یادآوری شود که اندازه ذره در تقاطع خطوط باید ۸۴٫۱٪ درجه‌بندی باشد. دیگر آنکه اندازه ذره در ۵۰٪ تقاطع منحنی باشد و طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$GSD = 84.1 \% \text{ mark} / 50 \% \text{ mark.}$$

برای تأیید این‌که در حقیقت آبروسل تک‌کیفیتی است و لگاریتم نرمال توزیع، جرم نرمال شده هر مرحله ( $f'$ ) به عنوان هیستوگرام ارزیابی می‌شود.  $\Delta \log D_p$  برابر  $\log D_{p+1} - \log D_p$  است، در حالی که  $D_p$  کم‌تر از حد کاهش اندازه و  $D_{p+1}$  بیش‌تر از حد کاهش اندازه مرتبط مرحله جذب مربوط است. هیستوگرام  $f'$  طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$f'_H = \frac{1}{N_f} \times \frac{\text{mass / stage}}{\Delta \log D_p}$$

لگاریتم نرمال توزیع جرم  $y'(D_{ae}) = 1/N_f \times y(D_{ae})$  به عنوان تابعی از قطر  $(D_{ae})$  آیرودینامیک طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

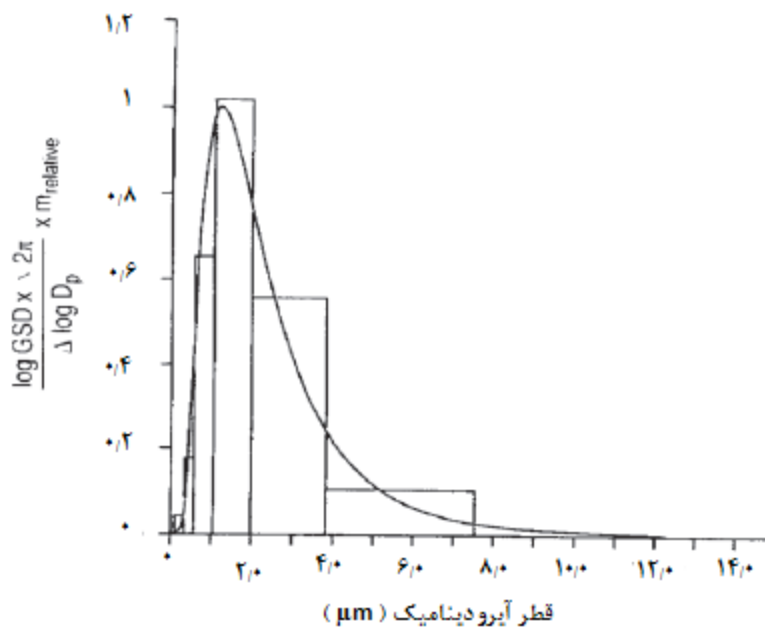
$$y'(D_{ae}) = \exp\left(-\frac{(\log D_{ae} - \log MMAD)^2}{2 \times \log^2 GSD}\right)$$

و فاکتور نرمال‌کننده  $(N_f)$  از معادله زیر به دست می‌آید:

$$N_f = \frac{\Sigma mass}{\log GSD \times \sqrt{2\pi}}$$

الگوریتم برای محاسبه خواص اندازه ذرات از آثار مرجع مربوط در فیزیک آروسول [۵۰][۵۱] گرفته می‌شود و به طور کلی قابل اعمال می‌باشد [۶]. توزیع اندازه نشان‌داده‌شده در شکل ۲۴ با استفاده از این معادله محاسبه می‌شود.

جرم نسبی قطر آیرودینامیک کمتر یا مساوی  $3\mu m$  ("کسر جرم قابل استنشاق") [۵۲][۵۳][۵۴] از معادله خط رگرسیون محاسبه می‌شود. برای جابه‌جایی پروبیت<sup>۱</sup> و رگرسیون خطی، الگوریتمی که توسط روسیلو و همکارانش [۵۵] منتشر شد می‌تواند مناسب باشد. MMAD با استفاده از معادله‌های به دست آمده محاسبه شده است [۵۱][۶][۵۶].



شکل ۲۴- اصول ویژگی محیط آروسول

جرم نسبی قطر آیرودینامیک کمتر یا مساوی  $3\mu m$  ("کسر جرم قابل استنشاق") [۵۲][۵۳][۵۴] از معادله خط رگرسیون محاسبه می‌شود. برای جابه‌جایی پروبیت<sup>۲</sup> و رگرسیون خطی، الگوریتمی که توسط روسیلو و همکارانش [۵۵] منتشر شد می‌تواند مناسب باشد. MMAD با استفاده از معادله‌های به دست آمده محاسبه شده است [۵۱][۶][۵۶].

۲-۷ گزارش اندازه‌گیری

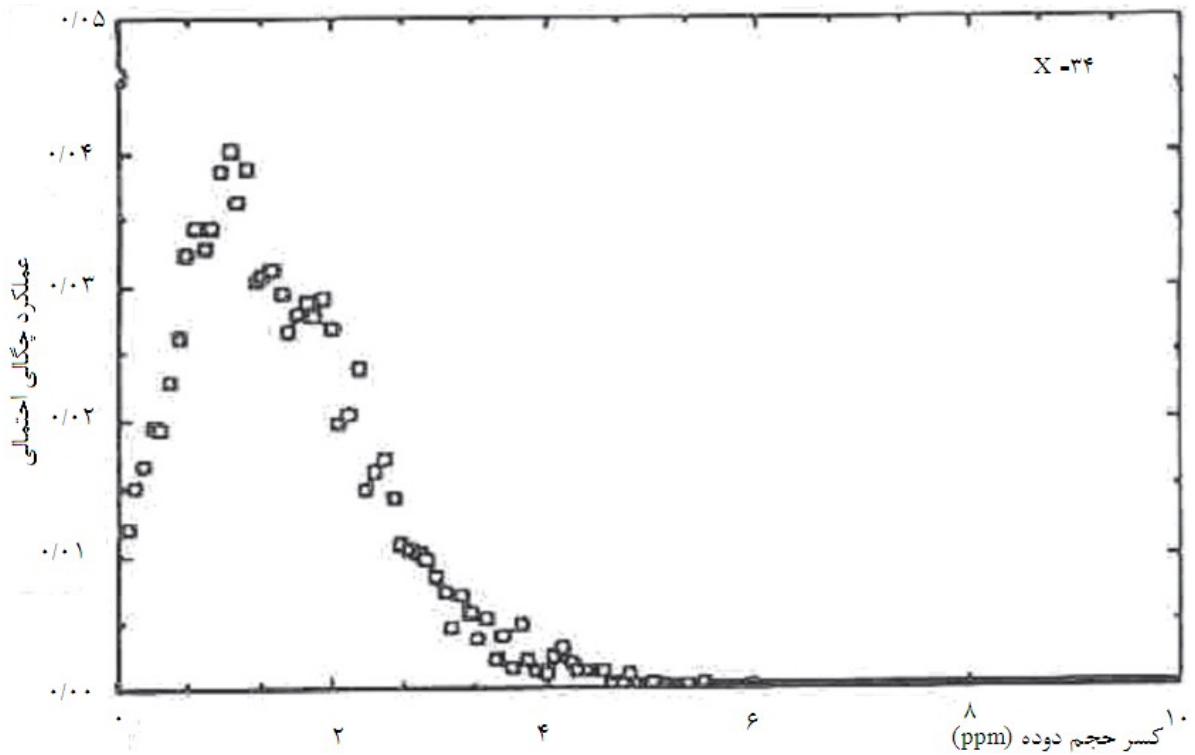
گزارش اندازه‌گیری آبروسل باید شامل آگاهی‌های زیر باشد:

- شرح نصب، شامل قطرهای خطوط یا تیوپ نمونه‌برداری، فاصله بین آتش و محل نمونه‌برداری.
- جریان نمونه.
- شرح دستگاه مورد استفاده و شرایط کار (دما و فشار).
- شرح شرایط محیط از نظر دما، فشار و رطوبت نسبی.
- مسیر داده به دست آمده به وسیله دستگاه، برای نمونه  $D_p$  برای SMPS و  $D_a$  برای جذب‌کننده‌های آبشاری.
- شرح ماهیت تفسیر و روش محاسبات مورد استفاده، شامل تمام فرضیه‌ها، به‌ویژه ملاحظه‌های ریختی ذره.
- نتایج محاسبه داده با عدم قطعیت‌ها
- نمونه‌ای از گزارش مناسب در پیوسته ت ارائه شده است.

### ۳-۷ عدم قطعیت

عدم قطعیت‌ها در حین اندازه‌گیری آبروسل در آزمون‌های آتش، ناشی از انواع مشکلات برای دستیابی به نتیجه مشترک می‌باشد. خطاهای واقعی برای توزیع غلظت و وزن‌سنجی می‌تواند عامل رسوب دوده یا متراکم‌شدن روی سطوح ناخواسته شوند. این مشکل را می‌توان با دقت در انتخاب و استفاده از وسیله اندازه‌گیری مخصوص کاهش داد. دما و رطوبت نیز می‌توانند سبب خطاهای سیستماتیک شوند. تکرارپذیری و تجدیدپذیری عدم قطعیت‌ها می‌تواند از مدل آتش و/یا ایجاد خودبه‌خودی آبروسل ناشی شود، اما می‌تواند از شرایط محیط (دما، فشار و رطوبت نسبی) و وسایل اندازه‌گیری نیز ناشی گردد، تمامی این موارد می‌توانند عامل اثرهای ناخواسته، مانند توده‌ای شدن یا رسوب آبروسل باشند.

اندازه‌گیری‌ها معمولاً مقادیر متوسط را می‌دهند. وقتی که اختلاف کسر حجم دوده به عدم قطعیت‌های بزرگ در مقادیر منتهی شوند، توزیع غلظت آبروسل (کسر حجم دوده) نیاز است. مثالی از توزیع کسر حجم دوده در شکل ۲۵ آمده است، به وسیله منحنی گوسین کوتاه شده وابسته به مقدار دیراک عدم وجود دوده تعریف شد. اثر عدم قطعیت‌های ضریب شکست  $m$  از روی تعیین  $Fv$  به دست آمده از اندازه‌گیری‌های جذب توسط یوکس<sup>۱</sup> نشان داده شده است.



شکل ۲۵- مثال توزیع کسر حجم دوده در یک محل محور خط مرکزی فوران شعله [۵۷]

پیوست الف

(اطلاعاتی)

اندازه‌گیری‌های تجربی  $D_{pp}$ ,  $N_p$ ,  $R_g$ ,  $D_f$  و  $k_f$

جدول الف- ۱ مقادیر به دست آمده  $D_{pp}$ ,  $N_p$  و  $R_g$

| مرجع     | $R_g$<br>nm | $N_p$  | $D_{pp}$<br>nm | نوع شعله         | سوخت         |
|----------|-------------|--------|----------------|------------------|--------------|
| [۵۸]     | -           | -      | ۲۰-۳۰          | -                | استیلن       |
| [۵۹]     | ۴۷۲         | ۴۱۷    | ۴۷             | شعله نفوذی آشفته | استیلن       |
| [۶۰]     | -           | ۵۰-۱۸۰ | ۱۷-۳۴          | شعله نفوذی آشفته | استیلن       |
| [۶۱]     | ۲۷۷         | ۷۰     | ۶۴-۶۶          | شعله نفوذی آشفته | استیلن       |
| [۵۹]     | ۸۲۴         | ۵۵۲    | ۵۰             | شعله نفوذی آشفته | بنزن         |
| [۶۲][۶۳] | -           | -      | ۴۲             | شعله نفوذی آشفته | بوتادیان     |
| [۶۲][۶۳] | -           | -      | ۴۲             | شعله نفوذی آشفته | سیکلوپانگان  |
| [۶۴]     | -           | -      | ۳۰-۳۷          | شعله نفوذی آرام  | اتیلن        |
| [۵۹]     | ۴۵۲         | ۴۶۷    | ۳۲             | شعله نفوذی آشفته | اتیلن        |
| [۶۰]     | ۲۰-۶۰       | ۲۰-۵۰  | ۱۹-۳۵          | شعله نفوذی آشفته | اتیلن        |
| [۱۸]     | -           | ۵-۱۹۰  | ۱۸-۳۱          | شعله نفوذی آرام  | اتیلن‌هوا    |
| [۶۵]     | -           | -      | ۲۰-۴۰          | شعله آرام        | هیدروکربن‌ها |
| [۵۹]     | ۳۳۰         | ۲۵۵    | ۳۱             | شعله نفوذی آشفته | ایزوپرانول   |
| [۶۶]     | -           | -      | ۱۹-۳۰          | شعله نفوذی آشفته | کروزین       |



|      |     |     |         |                  |               |
|------|-----|-----|---------|------------------|---------------|
| [۶۷] | -   | -   | ۲۰      | شعله پیش مخلوط   | متان/اکسیژن   |
| [۵۹] | ۳۵۹ | ۲۶۰ | ۳۵      | شعله نفوذی آشفته | هیپتان نرمال  |
| [۵۹] | ۳۶۶ | ۳۶۴ | ۳۰      | شعله نفوذی آشفته | پروپان        |
| [۶۸] | -   | -   | ۱۵-۲۶   | شعله پیش مخلوط   | پروپان/اکسیژن |
| [۵۹] | ۵۱۸ | ۴۶۰ | ۴۱      | شعله نفوذی آشفته | پروپیلن       |
| [۶۹] | -   | -   | ۱۴-۲۰   | شعله نفوذی آشفته | تولوئن        |
| [۵۹] | ۸۰۷ | ۵۲۶ | ۵۱      | شعله نفوذی آشفته | تولوئن        |
| [۷۰] | ۲۶۰ | ۱۰۰ | ۵۲-۶۵   | شعله نفوذی آشفته | تولوئن        |
| [۷۱] | -   | -   | ۲۰-۲۵   | شعله پیش مخلوط   | تولوئن/اتیلن  |
| [۷۲] | -   | -   | حدود ۳۰ | موتور دیزل       | دبزل          |
| [۷۳] | -   | -   | حدود ۴۵ | شعله نفوذی آشفته | روغن          |
| [۶۱] | -   | -   | ۱۳-۴۳   | شعله نفوذی       | پلیمر         |
| [۶۱] | -   | -   | ۴۲-۵۴   | شعله نفوذی آشفته | پلیمر         |

جدول الف- ۲ مقدارهای  $D_f$  و  $k_f$  ارایه شده توسط مولف‌های مختلف

| مرجع     | $k_f$         | $D_f$ | روش       | نوع شعله             | ناحیه | سوخت          |
|----------|---------------|-------|-----------|----------------------|-------|---------------|
| [۷۴]     | ۱٫۷           | ۱٫۸   | 2D TEM    | شعله نفوذی آرام      | شعله  | استیلن        |
| [۲۲][۲۳] | ۲٫۴۱          | ۱٫۸۲  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته     | شعله  | استیلن        |
| [۶۰]     | $۱٫۹ \pm ۰٫۳$ | ۱٫۸۲  | 2D TEM    | شعله آشفته پیش مخلوط | شعله  | استیلن        |
| [۶۱]     | $۱٫۶۸ - ۲٫۳۱$ | -۱٫۹۳ | 2D TEM    | شعله نفوذی آرام      | شعله  | استیلن        |
| [۷۵]     | -             | ۱٫۷۹  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته     | شعله  | استیلن        |
| [۲۲][۲۳] | ۲٫۷۸          | ۱٫۷۵  | ALS       | شعله نفوذی آشفته     | شعله  | استیلن- اتیلن |
| [۷۵]     | ۲٫۳۵          | ۱٫۶۶  | 2D TEM    | شعله نفوذی آرام      | شعله  | استیلن- اتیلن |
| [۷۶]     | -             | ۱٫۹۶  | پراش نور  | شعله نفوذی آرام      | توده  | بوتان         |
| [۷۷]     | -             | ۱٫۹۷  | SEM       | -                    | -     | بوتان         |
| [۷۸]     | -             | ۱٫۷   | 2D TEM    | شعله نفوذی           | شعله  | دبزل          |
| [۱۸]     | ۲٫۸           | ۱٫۷۲  | 2D TEM    | -                    | شعله  | اتیلن         |
| [۷۹]     | -             | ۲٫۱۵  | DMA- ELPI | شعله نفوذی آرام      | شعله  | اتیلن         |
| [۶۰]     | $۲٫۲ \pm ۰٫۴$ | ۱٫۷۴  | 2D TEM    | شعله پیش مخلوط       | توده  | اتیلن         |
| [۷۵]     | -             | ۱٫۷۳  | 2D TEM    | شعله آشفته پیش مخلوط | توده  | اتیلن         |
| [۷۵]     | -             | ۱٫۷   | 2D TEM    | شعله پیش مخلوط       | -     | ایوپروپانول   |
| [۸۰]     | ۲٫۴۵          | ۱٫۷۴  | 2D TEM    | شعله پیش مخلوط       | شعله  | متان          |
| [۸۱]     | -             | -۱٫۹۵ | ALS/ TEM  | شعله پیش مخلوط آرام  | -     | متان/ هوا     |
| [۷۶]     | -             | ۱٫۷۳  | پراش نور  | -                    | توده  | متان/اکسیژن   |
| [۷۵]     | -             | ۱٫۷۳  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته     | توده  | هیپتان نرمال  |

|          |             |       |           |                  |             |              |
|----------|-------------|-------|-----------|------------------|-------------|--------------|
| [۷۵]     | -           | ۱,۷۴  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته | توده        | پروپان       |
| [۷۵]     | -           | ۱,۷۵  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته | توده        | پروپیلن      |
| [۷۵]     | -           | ۱,۷۳  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته | توده        | تولون        |
| [۶۱]     | ۱,۸۹ - ۲,۶۶ | -۱,۸۶ | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته | شعله        | تولون        |
| [۲۲][۲۳] | ۲,۲۵        | ۱,۸۶  | ALS       | شعله نفوذی آشفته | توده        | هیدروکربن‌ها |
| [۷۵]     | ۲,۳۳        | ۱,۶۷  | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته | توده        | هیدروکربن‌ها |
| [۷۹]     | -           | ۲,۳   | DMA- ELPI | موتور دیزل       | موتور اگزوز | دیزل         |
| [۷۹]     | -           | ۲,۰۴  | SEM       | شعله نفوذی       | توده        | دیزل         |
| [۷۷]     | -           | ۱,۸۸  | SEM       | شعله نفوذی       | توده        | سوخت روغن    |
| [۶۱]     | ۲,۶۳ - ۲,۸۴ | -۱,۷۸ | 2D TEM    | شعله نفوذی آشفته | توده        | پلیمر        |
| [۷۷]     | -           | ۲,۳۵  | SEM       | شعله نفوذی       | توده        | چوب          |

## پیوست ب

### (اطلاعاتی)

#### جذب گازهای قابل سوختن روی ذرات

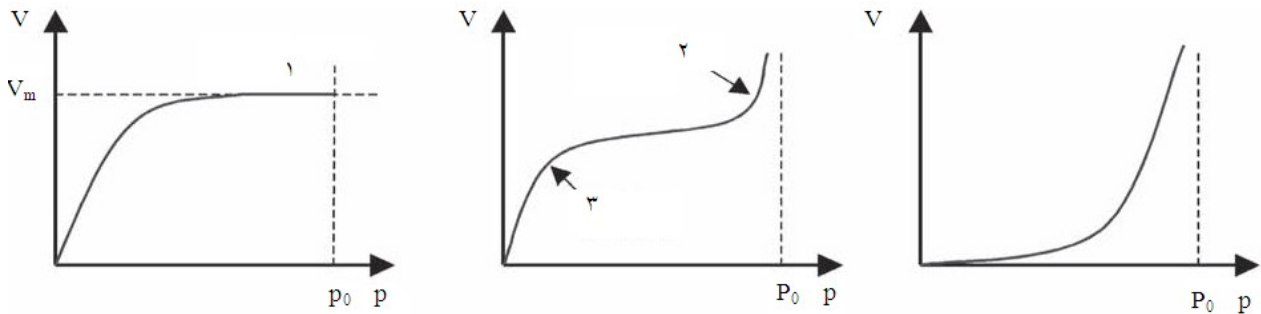
نیروهای ضعیف شیمیایی می‌توانند سبب جذب گازهای سمی قابل سوختن روی سطح ذرات دوده و افزایش این گازها به قطره‌های ریز مایع آبروسل گردند. تنفس آبروسل فرایندی را برای انتقال مواد سمی از سد دفاعی بدن فراهم می‌کند. آگاهی‌های بیش‌تر در پیوست پ ارائه شده است.

ذرات دوده کربنی رفتار مشابه زغال فعال شده دارند که به طور گسترده به عنوان جاذب گاز یا بخار استفاده می‌شوند. ساختار این ذرات منفذدار است، با سطح بزرگ معمولاً از حلقه‌های آروماتیک تشکیل شده‌اند. الکترون‌های پی حلقه‌های آروماتیک‌ها می‌توانند بار الکترواستاتیکی ایجاد کنند و تشکیل پیوند واندروالسی را تسهیل نمایند. به خاطر مساحت سطح بزرگ این ذرات، مقدار گازهای قابل احتراق که می‌توانند جذب شوند قابل ملاحظه هستند.

جذب نمونه‌ها روی ذرات دوده کربنی با آنتالپی ترمودینامیک پایین روی می‌دهد، یعنی پیوندها ضعیف هستند. قدرت پیوند به دما و فشار بستگی دارد. نمونه‌های جذب‌شده اولیه را می‌توان به آسانی جدا نمود در صورتی که دما افزایش یابد، یا فشار کاهش یابد و یا در حضور حلالی که قدرت جذب نمونه آن نسبت به دوده بیش‌تر باشد. این وضعیت دینامیکی را می‌توان با شرایط هم‌دما و هم‌فشار مشخص کرد که ارتباط نیروهای بین ذرات و گونه‌های جذب‌شده را با در نظر گرفتن تغییر فشار و دما نشان می‌دهد. به هر حال به عنوان موضوع عملی، رسم تجربی این نمودارها مشکل است، به‌ویژه وقتی گازها و ذرات در آتش منتشرشونده مورد نظر باشند.

نخستین لایه گاز جذب شده در سطح ذره به عنوان لایه لانگمویر<sup>۱</sup> معروف است. این تنها لایه موجود برای محیط بدون منفذ و برای سطحهایی با میکرو منفذهای کم تر از ۲۵nm نانومتر است. به طور معمول همه ی مواد جذب شده را می توان بازیابی کرد.

برای مواد جامد با منافذ بزرگ (بیش از ۲۵nm)، لایه های زیاد مولکولی می توانند جذب شوند. این لایه ها را می توان بر حسب حجم گاز جذب شده نسبت به فشار بیان نمود. مثال های تک لایه لانگمویر، جذب منفذهای بزرگ آبروسل و آبروسل قطبی در شکل ب-۱ ارایه شده اند.



راهنما

|   |                   |
|---|-------------------|
| ۱ | بازیابی کل آبروسل |
| ۲ | جذب چندلایه       |
| ۳ | جذب یک لایه       |

شکل ب-۱ مثالهایی از جذب همدمای روی آبروسل بدون منفذ، درشت منفذ و قطبی

$P_0$  فشار بخار اشباع گاز جذب شده است و  $p$  فشار نسبی گاز است. مقدار گاز جذب شده از روی مقدار آبروسل را می توان به وسیله معادله فروندلیچ<sup>۲</sup> توسط جذب لانگمویر یک لایه شرح داد.

$$\frac{x}{m} = K \cdot p^{1/n} \quad V = K \cdot p^{1/n}$$

که در آن:

$x$  جرم گاز جذب شده؛

$m$  جرم آبروسل جذب کننده؛

$V$  حجم جذب شده.

$K$  و  $n$  ثابت های بدون بعد هستند که ویژه جفت جذب کننده/گاز هستند. این مقادارها به دما بستگی دارند و

به طور تجربی تعیین می شوند.

$n$  بین ۱ و ۲ است.

1- Langmuir layer  
2- Freundlich equation

برای جذب چند لایه، بروناور، امت و تله<sup>۱</sup> در سال ۱۹۳۵ مدلی را پیشنهاد کردند که لایه‌های چند جذبی بعد از اولین مرحله وجود دارند. ارتباط بین آن‌ها به عنوان یک اصطلاح BET شناخته می‌شود و امکان محاسبه حجم نمونه قابل جذب روی سطح را ممکن می‌سازد. عبارت BET طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

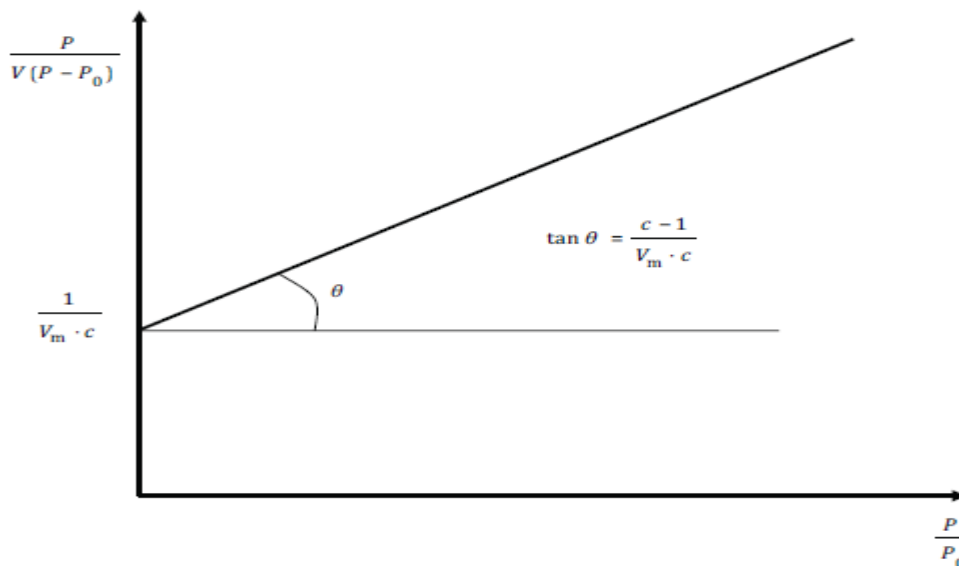
$$V = \frac{V_m \cdot c \cdot p}{(p_0 - p) \left[ 1 + (c-1) \left( \frac{p}{p_0} \right) \right]}$$

که در آن:

$V_m$  حجم جذب شده روی یک لایه؛

$c$  ثابت ویژه جفت آيروسل/گاز.

نمودار ارتباط بین این مقادیر به صورت خطی است که در شکل ب-۲ نشان داده شده است.



شکل ب-۲ نمودار ایزوترم BET

از روی معادله BET می‌توان سطح ویژه جذب‌کننده،  $S_0$  را محاسبه کرد. این سطح، کل سطح ۱g ماده جذب‌کننده است وقتی که مولکول‌های شیمیایی ویژه سطح را اشغال می‌کنند. این سطح با سطح ظاهری آيروسل ارایه شده در بند ۲-۵-۳ متفاوت است. سطح ویژه طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$S_0 = N \cdot \sigma \cdot \frac{V_m}{V_M}$$

که در آن:

$N$  عدد آووگادرو ( $6.02 \times 10^{23}$ );

$\sigma$  سطح اشغال شده توسط یک مولکول؛

$V_M$  حجم مولار گاز.

به طور نمونه،  $\sigma$  با استفاده از مولکول نیتروژن اندازه‌گیری شده است و مقدار آن برابر  $0.162 \text{ nm}^2$  است. این محاسبه‌ها برای کار با آتش‌های منتشرشونده واقعی مشکل است. این مشکل به خاطر تعداد گازهای قابل جذب موجود و غلظت‌های متنوع و دما در محدوده زمان و مکان است. این روابط ترمودینامیکی را می‌توان به حداکثر گاز جذب‌شده نسبت داد، اما اندازه‌گیری‌های شبیه آن‌چه که در شکل ۵-۲-۴ ارایه گردید به تعیین مقدار واقعی نمونه‌های جذب‌شده نیاز دارد.

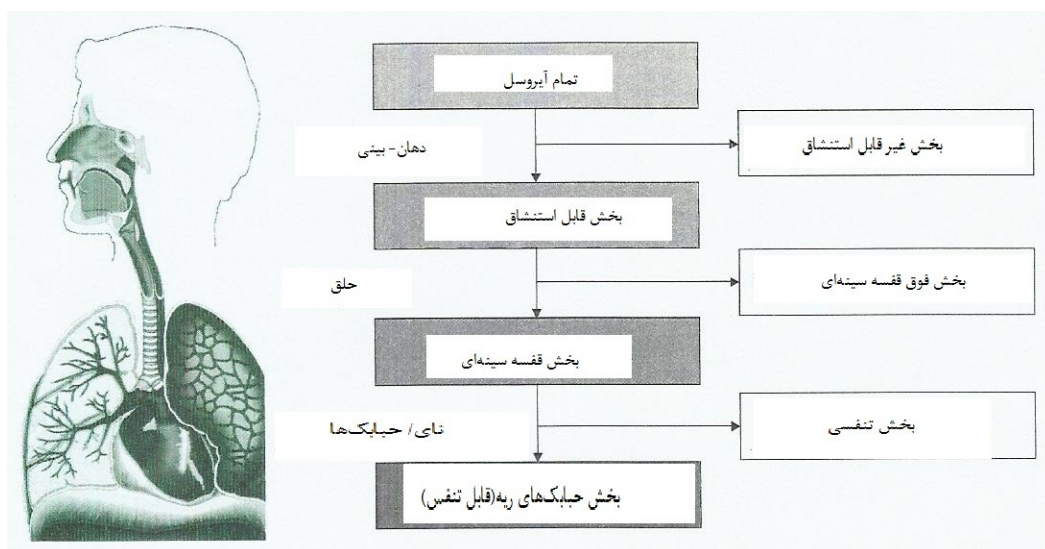
## پیوست پ (اطلاعاتی)

### تنفس دینامیکی و مسمومیت ذرات

#### پ-۱ نمودارهای استاندارد تنفس

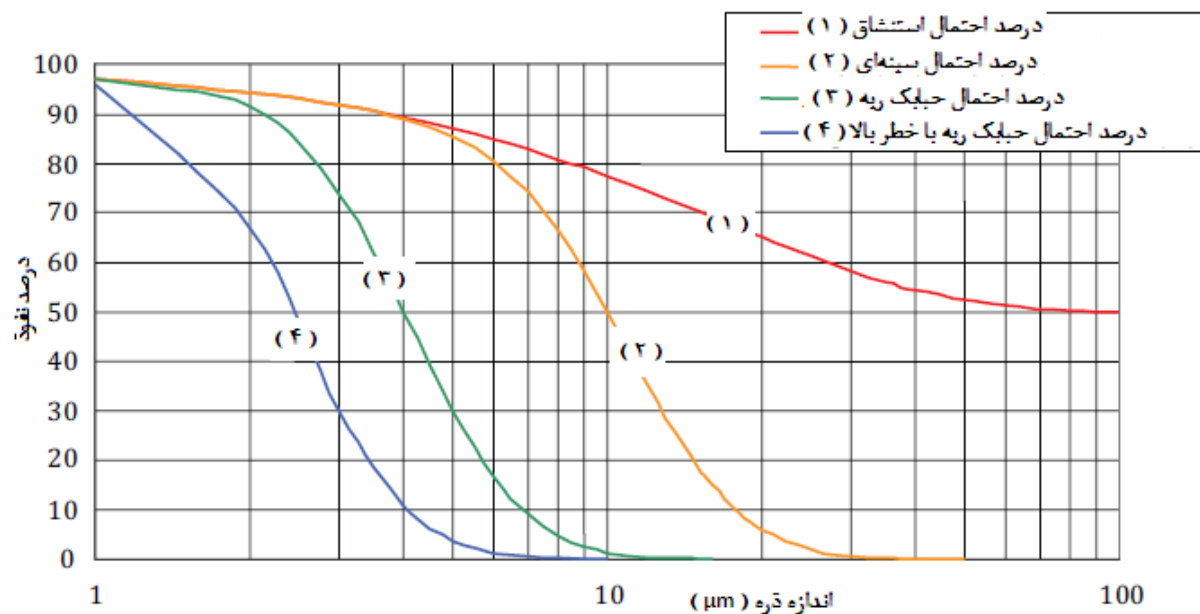
قبل از اندازه‌گیری اثر ذرات آبروسل بر روی افراد، تهیه مبنای کمی که چه مقدار ذرات به اندام نفوذ می‌کنند ضروری است [۸۲]. بحث کلی برای آبروسل سه مرحله ممکن عملی وجود دارد: قسمت بالایی دستگاه تنفسی، درخت نایژه‌ای یا کیسه هوایی اطراف دندان‌ها<sup>۱</sup>. این بخش‌های مختلف از اندامگان از نظر فیزیولوژیکی تفاوت دارند.

شرح تفاوت قسمت‌های دستگاه تنفسی پیش از این ارایه گردید. بخش حباب‌دار ریه بالاترین خطر را برای سلامت دارد: بخش بالایی مژه‌دار است و می‌تواند به صورت مکانیکی ذرات را دور کند اما حبابچه‌های ریه برای دست‌یافتن به این منظور مجهز نیستند. وقتی که ذرات به درون حبابچه ریه رسوخ می‌کنند، در دام خواهند افتاد و فقط از طریق هضم سلولی می‌توانند حذف شوند. بخش‌های حباب‌دار ریه و صدی سینه به ریتم تنفسی بستگی دارند و فقط تقریبی از یک حالت میانگین هستند.



شکل ج ۱- شرح بخش‌هایی که ذرات در آن رسوخ می‌کنند

این یک فرایند کلی را نشان می‌دهد، امکان آزار تنفسی و عمق نفوذ با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. بزرگ‌ترین ذرات با قطر بیش از  $10\ \mu\text{m}$ ، در قسمت گوشتی بینی رسوب خواهند کرد [۷]. بر اساس گزارش مهافی و میلر [۸۳] و پترسون<sup>۱</sup> [۸۴] ذرات کم‌تر از  $10\ \mu\text{m}$  توسط دستگاه تنفسی انسان فیلتر نمی‌شوند. آن‌ها از قسمت بالایی دستگاه تنفسی (بینی و دهان) عبور و در قسمت تنفسی پایین‌تر نفوذ می‌کنند. منحنی استاندارد مشخص برای بخش‌های مختلف ذکر شده در بالا تهیه شده‌اند و به طور کامل در ISO 7708 تشریح شده‌اند. نمودارها احتمالاتی را می‌دهند که یک ذره با اندازه مشخص می‌تواند به قسمت‌های مختلف درخت تنفسی برسد. این نمودارها نسبی هستند. جدول‌های باارزشی برای این مقادیر در ISO 7708 [۵۶] وجود دارند.



شکل پ ۲- منحنی‌های احتمال نفوذ ذرات

این منحنی‌ها به این معنی هستند که یک ذره  $4\ \mu\text{m}$  به احتمال ۸۹٪ تا حد حنجره، به احتمال ۸۹٪ بین حنجره و نایژک حضور داشته باشد و به احتمال ۵۰٪ هنوز هم در حبابچه ریه افراد سالم و به احتمال ۱۱٪ در افراد در معرض خطر وجود داشته باشد<sup>۲</sup>.

انتخاب هر منحنی برای استفاده به برآورد خطر بستگی دارد. اگر ذرات مورد بررسی در همه سطح‌های درخت ریوی اثر کنند منحنی تنفسی انتخاب می‌گردد، در حالی که منحنی حبابچه‌های ریه برای ذراتی که اثر موضعی در قسمت پایین شش‌ها دارند انتخاب می‌شوند. هر منحنی به بخش‌هایی مربوط است که به یک

1- Mahaffey and Miller and Peterson

۲- برای کودکان و سالمندانی که تحت تأثیر بیماری تنفسی خاص قرار دارند، ناحیه نایژه‌ای ذرات بیش‌تری را با قطر آیرودینامیکی پایین، نسبت به افراد سالم، جذب می‌کند. این به اصطلاح منحنی "نبهنگ‌شده" قرارداد حبابچه در معرض خطر نامیده شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سطح اندام رسوخ می‌کنند و نه در قسمتی که در آن جای می‌گیرند. در بسیاری موارد برای مجموع حبایچه، بخشی از ذرات تنفس شده بدون رسوب دفع می‌شوند و اثر بیولوژیکی نخواهند داشت.

## پ-۲ اثرهای فیزیولوژیکی و پاتولوژیکی ذرات جای‌گرفته در قسمت‌های مختلف قفسه تنفسی

نشست ذرات در قسمت‌های مختلف دستگاه تنفسی سبب اثرهای متفاوتی در سلامت می‌شوند که به خواص سمی ذرات و محل رسوب آن بستگی دارد [۲]. هنگام تنفس، ذرات بزرگ‌تر (به نام PM10، با قطر کم‌تر از  $10\mu\text{m}$ ) می‌توانند به قسمت صدری سینه و نایژه‌ای ریه برسند. ذرات با قطر کم‌تر از  $2.5\mu\text{m}$  (PM2.5) بسیار خطرناک هستند، همان‌طور که می‌توانند به عمق بیشتری از ریه‌ها نفوذ کنند ممکن است به ناحیه حبایچه‌های ریه برسند. ذرات PM10 ممکن است در چند ساعت پس از تشکیل از سوسپانسیون نشست کنند، در حالی که ذرات PM2.5 می‌توانند برای روزها یا حتی برای هفته‌ها از زمان تشکیل معلق بمانند.

سازمان کشاورزی آمریکا<sup>۱</sup> (USDA) ملاحظه‌هایی دارد که ذرات با قطر متوسط بین  $5\mu\text{m}$  و  $10\mu\text{m}$  تمایل دارند در دستگاه تنفسی در نایژه‌ها<sup>۲</sup> با اندازه متوسط نشست کنند، اما سپس با عمل مژک‌ها و سرفه کردن خارج شوند. ارتباط بین غلظت ذرات و قطر زیر  $10\mu\text{m}$  (PM10) و کاهش در عملکردهای ریوی (روابط مشابه بین غلظت کربن مونوکسید، فرمالدهید و آکرولئین وجود دارند) برقرار شده است.

توزیع اندازه ذره اثر مشخص بر روی نسبت اتمسفر آتش تنفس شده و جایگاه رسوب آن دارد. اندازه ذره بر حسب قطر آیرودینامیک تعریف می‌شود: هر ذره بدون توجه به اندازه واقعی، شکل و چگالی به عنوان کره با چگالی واحد با قطر معین رفتار می‌کند و این تعیین می‌کند که کجا رسوب کند. رسوب کردن به متراکم‌شدن، ته‌نشینی، نفوذ و یا ربایش الکترواستاتیکی بستگی دارد. ذرات با قطر آیرودینامیکی بزرگ‌تر حدود  $5\mu\text{m}$  به طور عمده در بینی رسوب می‌کنند. ذرات دارای قطر  $2\mu\text{m}$  تا  $5\mu\text{m}$  به طور عمده در راه عبور هوا هستند. ذرات با قطر کم‌تر از  $1\mu\text{m}$  به حبایچه ریه می‌رسند و در همان محل رسوب می‌کنند. انسان و سایر راسته پستانداران نخستین پایه<sup>۳</sup> هنگام استراحت یا هنگام فعالیت سبک، به طور عمده از راه بینی تنفس می‌کنند. به هر حال هنگام ورزش یا تحت فشار، تنفس دهانی بیش‌تر معمول می‌شود و ضربان تنفسی در این حالت بیش‌تر از تنفس با بینی است. مقدار هوای تنفسی دهانی نسبت به هوای تنفسی از راه بینی بیش‌تر است، در این شرایط ذرات بزرگ (تا قطر حدود  $50\mu\text{m}$ ) می‌توانند با سرعت بیش‌تری نسبت به تنفس از راه بینی رسوخ کنند.

کوچک‌ترین ذرات قابل تنفس (قطر بین  $0.5\mu\text{m}$  و  $5\mu\text{m}$ ) [۷]، زیر  $3\mu\text{m}$  [۸۵] یا زیر  $2.5\mu\text{m}$  [۸۶] می‌توانند به ناحیه حبایچه‌های شش برسند جایی که ممکن است به وسیله ماکروفاژها بلعیده شوند. این ذرات هر گونه مواد شیمیایی جذب شده با خود را به شش‌ها می‌رسانند و می‌توانند "جذب" جریان خون شوند. این ذرات می‌توانند سبب ضایعه در اطراف محل رسوب شوند، به‌ویژه اگر گازهای خورنده در گونه‌های جذب شده وجود داشته باشند. بنابراین وجود ذرات دوده همیشه مسمومیت بالقوه گازهای آتش را افزایش می‌دهند [۵]. همان‌طور که ذرات دوده به طور عمده از زغال فعال شده تشکیل یافته‌اند می‌توانند بعضی از ترکیب‌های

1- United States Department of Agriculture

2- Bronchioles

3- Primates

موجود در سطح خود را آزاد نمایند. این مواد ممکن است در مدت زمان بیش‌تری آزاد شوند و اثرهای خود را افزایش دهند. معلوم شده است که گاز  $SO_2$  به طور تقریبی به وسیله دوده خوب جذب می‌شود. ذرات بسیار ریز (کم‌تر از  $1\ \mu m$ ) رفتاری شبیه گازها دارند و جذب آن‌ها به نفوذپذیری و حلالیت بستگی دارد. آن‌ها در هوا پایدارند<sup>۱</sup> و اگر نامحلول باشند ممکن است به صورت جذب‌نشده بلعیده شوند. تفاوت‌هایی بین نشست‌کردن در گونه‌های متفاوت حیوانی وجود دارند، اما تفاوت آن‌قدر زیاد نیست که چونندگان انتخاب مدل نامناسب برای انسان باشند.

اندازه قطره‌های ریز آبروسل ممکن است هنگام تنفس تغییر کنند، یعنی قطره‌های ریز می‌توانند تبخیر شوند یا تجمع کنند. برای مثال ذرات دود سیگار قطر  $0.2\ \mu m$  تا  $0.5\ \mu m$  دارند، اما وقتی که بخار را جذب می‌کنند و تنفس می‌شوند به قطر  $2\ \mu m$  تا  $5\ \mu m$  می‌رسند، بنابراین تا حدی امکان رسوب در مسیر هوای تنفسی را دارند.

اثر سمی ذرات تنفس‌شده به خواص شیمیایی و محل رسوب بستگی دارد. رویه بافت‌های هر قسمت از دستگاه تنفسی خواص عملکردی و ساختاری ویژه دارند که اثرهای فیزیولوژیکی و پاتولوژیکی رسوب‌کردن ذرات سمی را تعیین می‌کنند. قسمت‌های بالایی دستگاه تنفسی، شامل دهان و قسمت‌هایی از بینی و حنجره، بافت پوششی پولکی<sup>۲</sup> دارند که به طور نسبی در برابر زخم شدن مقاومت دارند، اگرچه تحریک عصب سه‌شاخه توسط بخارهای تحریک‌کننده و اثر ذرات بزرگ در درد و اثرهای فیزیولوژیکی مانند نرخ افسردگی تنفسی، نگه‌داشتن تنفس و سرفه‌کردن، خاتمه می‌یابد. بافت پوششی مژک‌دار راه عبور هوای اصلی، بیش‌تر در معرض خونریزی است. اثرهای فوری شامل تحریک عصب ریوی حسی در برونشیت (مانند حملات آسمی) همراه با تورم بیش از حد شش‌ها و مشکل بازدم است. رسوب ذرات تحریک‌کننده نیز ترشح بلغم<sup>۳</sup> از سلول‌های گلبول قرمز و غده‌های زیربلغمی<sup>۴</sup> در راه عبور هوا را تحریک می‌کند. نتیجه ترکیب ذرات و بلغم، می‌تواند راه عبور هوای تنفس را مسدود کرده و باعث افزایش اضطراب تنفسی هنگام مواجهه با آتش و بعد از آن شود. در معرض قرار گرفتن راه عبور هوا با تحریک‌کننده‌ها در یک دوره از یک روز یا چیزی مانند این، منجر به حالت سکون مژک‌ها و از بین رفتن آن‌ها می‌شود که به عنوان نتیجه‌ای از سیگار کشیدن رخ می‌دهد. التهاب راه عبور هوا به دنبال حادثه آتش‌سوزی منجر به برونشیت حاد، همراه با ناراحتی گلو و قفسه سینه، انقباض برونش و مشکلات تنفسی بسته به شخص از چند روز تا هفته‌ها دوام می‌آورد. این اثرها در اشخاص در شرایط وجود بیماری تنفسی به طور محتمل شدیدتر و ماندگارتر هستند. یک‌بار قرارگرفتن در معرض چنین آتشی می‌تواند منجر به بیماری‌های تنفسی دائمی مانند آسم (در نتیجه تنفس حساس‌کننده‌ها در دود) و سیندروم بیماری هوایی واکنشی<sup>۵</sup> (RADS) شوند که به موجب آن افراد به‌ویژه به انقباض برونش<sup>۶</sup> از نظر قرار گرفتن در معرض گستره وسیعی از تحریک‌کننده‌ها (مانند تنفس هوای سرد) حساس می‌شوند.

1- Aerostable

2- Squamous epithelium

3- Mucus

4- Submucosal

5- Reactive Airway Disease Syndrome

6- Bronchoconstriction



رسوب بخارهای محرک یا ذرات در راه‌های کوچک‌تر عبور هوا می‌توانند اثرهای جدی بیش‌تری مانند گسترش برونشیت مرگ‌آور یک تورم مسدودکننده برونشی داشته باشند.

بیش‌ترین قسمت حساس دستگاه تنفسی بافت تنفسی حساس ناحیه حبابچه‌های شش است. ذرات کوچک (قطر تقریبی  $0.5\mu\text{m}$  تا  $1\mu\text{m}$ ) به طور خاص روی حبابچه‌های شش رسوب می‌کنند، در حالی که ذرات فوق ریز (با قطر حدود  $1\mu\text{m}$  /  $0.1$ )، نه تنها روی سطح حبابچه‌های شش رسوب می‌کنند بلکه به روزنه شش، ناحیه مویرگ‌های خونی کوچک نفوذ می‌کنند، پاسخ اولیه رسوب مواد تحریک‌کننده در عمق شش باعث تورم و خیز ریه است که در مدت کوتاهی از مواجهه با آتش گسترش می‌یابد. این بیماری شامل جابه‌جایی تورم‌های وابسته و انتقال به روزنه و مجرای حبابچه‌های شش است. این نتایج در اختلال جابه‌جایی گاز موجب افزایش فاصله نفوذ گاز بین فضای حبابچه‌های شش و خون می‌شود. گسترش خیز موجب مزاحمت در مواد ف شش فعال سطح<sup>۱</sup> آسیب‌رسانی بیش‌تر عملکرد مکانیکی شش و جابه‌جایی گاز می‌شود. تورم می‌تواند سبب خرابی بافت پوششی دستگاه تنفسی و موجب گسترش آمفیزم یا فیبروز شش شود.

ذرات ریزتر، به طور معمول در غلظت به نسبت پایین می‌توانند به‌ویژه در کودکان دستگاه تنفسی را تحریک و یا عمل تنفسی را دگرگون کنند. تعدادی از ذرات بسیار ریز (با قطر  $0.2\mu\text{m}$  تا  $0.5\mu\text{m}$ ) رسوب نمی‌کنند و دوباره می‌توانند هنگام عمل بازدم از دستگاه تنفسی خارج شوند [۷].

نفوذ ذرات بسیار ریز به جریان خون با افزایش مرگ و میر قلبی، شامل اثر روی قلب مانند آنژین و سکتة قلبی ناشی از تشکیل لخته و برهم‌کنش با آتروم<sup>۲</sup> رگی، همراه هستند.

به علاوه ذرات می‌توانند دارای اثر دوره کوتاه/حاد یا فوری باشند. نخست آن‌که کاهش ظرفیت تنفسی ششی می‌تواند از راه محدودیت مکانیکی مشخص حبابچه‌های ریه روی دهد. از آن‌جایی که تاول‌های دور دندان‌ی مزک‌دار نیستند و برخی از ذرات برای هضم توسط سلول‌های ماکروفاژ بسیار بزرگ هستند، اندام وسیله کافی برای حذف مؤثر این‌گونه ذرات مهاجم را ندارد. بنابراین ظرفیت شش کاهش خواهد یافت و ممکن است منجر به علامت‌های آسم‌مانند و سیندرم مزمن با از دست رفتن توانایی شش، شود.

ذرات بسیار ریز در قسمت تاول‌های دور دندان‌ی رسوب خواهند کرد و از تغییرات گازی حبابچه‌های شش جلوگیری می‌کنند. آن‌ها می‌توانند پس از دوره‌های طولانی نشانه‌های حاد بیماری‌ها، سبب سرطان‌های ریه یا گسترش آن شوند. به دلیل تهاجم‌های زیادی که ریه‌ها در زمان زندگی متحمل می‌شوند (مانند دود سیگار، آلودگی خودرویی، آذوقه‌ها و غیره)، گردآوری داده‌های سم‌شناسی از این نوع هرگز مشکل نیست. اثر ذرات بر مرگ‌ومیر در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای زیست‌محیطی هرگز صورت نگرفته است.

بنابراین اثر ذرات بر روی ریه‌ها به صورت آسم مزمن و یا کاهش ظرفیت ریه مربوط می‌شود. در دراز مدت، سرطان‌ها می‌توانند افزایش یابند. این اثرها ممکن است چند روز بعد از آتش‌سوزی مؤثر باشند و خطرهای باقی‌مانده برای افراد حاضر پس از یک فاجعه که باید ماسک تنفسی مناسب برای ذرات بسیار ریز به کار می‌گرفتند باقی بماند.

سازمان بهداشت جهانی (WHO) تأکید می‌کند که ۸۰۰۰۰ زندگی را می‌توان در اروپا در سال ۲۰۱۰ به لطف اجرای رهنمود ۱۹۹۹ / ۳۰ CE نجات داد. این رهنمود مقادیر حد روزانه PM10 را  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  و

1 - Surfactant

2 - Atheroma

مقدار حد سالانه را  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  دسته‌بندی می‌کند. آمار و ارقام مربوط به  $\text{PM}_{2.5}$  هنوز مشخص نشده است. با این حال، ذرات  $\text{PM}_{2.5}$  تاکنون سمی‌ترین هستند. علاوه بر این، در حال حاضر هیچ مقدار حد آستانه تعریف‌شده برای در معرض قرار گرفتن‌های حاد وجود ندارد. مقدار  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در چندین منبع برای ذرات  $\text{PM}_{10}$  دیده شده است.

## پیوست ت

(اطلاعاتی)

### اثرهای غیر سمی

#### ت-۱ شار گرمای تابشی

در جرقه الکتریکی، به تقریب تمام مواد قابل‌سوختن در اتاق آتش می‌گیرند از جمله آن‌هایی که با مواد آتش‌گرفته نخستین در تماس نبوده‌اند. بسیاری از این آتش‌گیری‌ها فرعی توسط تابش گرمایی شعله به‌ویژه از لایه گازهای قابل سوختن داغ که به تدریج بخش بالایی فضا را پر می‌کند ایجاد می‌شود. شار تابشی از این لایه دود بر اساس دما و چگالی نوری اندازه‌گیری می‌شود. چگالی نوری توسط غلظت ذرات و ویژگی‌های نوری اندازه‌گیری می‌شود. کمی پیش از جرقه الکتریکی، تابش از لایه بالایی به ویژگی‌های نوری ذرات دود حساس می‌شود. همین که جرقه الکتریکی به اتاق رسید، دما به سرعت افزایش می‌یابد و چگالی ذره بالا است و ماهیت دقیق ذره کم‌اهمیت می‌شود.

#### ت-۲ اثرهای الکتریکی و فیلترکردن

ذرات دوده کربنی ممکن است رسانای الکتریسیته باشند. این عامل می‌تواند مدار کوتاه برقرار کند و اجزای الکتریکی صدمه ببینند، به‌ویژه وقتی که آن قسمت مربوط به سامانه ایمنی باشد. در سامانه‌هایی که فیلتر ضروری است، مانند اتاق‌های تمیز الکترونیکی، آگاهی از وضعیت دانه‌بندی ذره آبروسل برای اندازه‌های فیلترها برای جداسازی مؤثر ذره در شرایط اضطراری بسیار مهم است. در صنایع هسته‌ای این شرایط حتی مهم‌تر است، زیرا ذرات توانایی جذب گونه‌های رادیواکتیو را دارند.

#### ت-۳ کاهش دید

افراد نیاز به عمل در یک ساختمان در حال آتش‌سوزی شامل گروه‌هایی هستند که سعی دارند از آن‌جا فرار کنند و کسانی که برای پیدا کردن محل ایجاد آتش برای کنترل آن تلاش می‌کنند. غلظت بالای دود قابل دید در این عملیات مزاحم است و ویژگی‌های نوری برای کاهش درجه دید مهم هستند. بر اساس جرمی، ذرات همگی نفوذ آهسته‌ای دارند [۸۴]، اما نه به یک روش یا در یک گستره. ذرات با اندازه نزدیک به طول موج‌ها در طیف‌سنج مرئی (بین  $0.3 \mu\text{m}$  تا  $0.8 \mu\text{m}$ ) بسیاری از نورها را پراکنده می‌سازند [۸۸]. شافر [۸۹] مشخص کرد قطر ذراتی که بیش‌ترین تاریکی را ایجاد می‌کنند نزدیک به  $0.6 \mu\text{m}$  است. برای ذرات با قطر زیر میکرومتر، پخش نور متناسب با توان ششم شعاع آن است [۸۴]، به طور کلی یک ذره با قطر بیش از  $1 \mu\text{m}$  نور را متناسب با مربع شعاع آن پراکنده می‌سازد. یادآوری می‌گردد که اگر شخصی به اندازه کافی دور از آتش باشد خطر گرما جدی نیست، ذرات اولیه با چیرگی ذرات دارای قطر بزرگ‌تر دلمه خواهند شد [۸۸].

#### ت-۴ ملاحظات زیست‌محیطی

اثر ذرات آبروسل معلق در هوا بر محیط زیست از نگرانی‌های بزرگ بوده و باقی می‌ماند. کارشناسان بهداشت حرفه‌ای تشخیص داده‌اند که اثر بالقوه بر روی سلامتی مربوط به قرارگرفتن در معرض ذرات ریز است. این ذرات تا حدی از مواد قابل سوختن ناشی می‌شوند. به هر حال سهم آتش سوزی‌های ناخواسته به انتشار ذرات در جو قابل چشم‌پوشی است، وقتی که با منابعی مانند تامین انرژی، ترافیک خودرو و صنعت در مقیاس بزرگ، به‌استثنای آتش‌سوزی‌های منطقه‌ی طبیعت دست‌نخورده، مقایسه گردد.

ذرات هنگام رسوب بر روی گیاهان، روزنه گیاهی را مسدود می‌کنند (اندامک‌هایی که در تنفس کلروفیل دخالت دارند) و به موجب آن باعث پژمرده‌شدن گیاه می‌شوند. در ارتباط با حیوانات اثرها مشابه اثرهای مشاهده شده در انسان است. اثرهای سمی از راه هضم ذرات مشاهده نشده است و فقط به نظر می‌رسد هر اثری از طریق تنفس ذرات باشد.

### پیوست ث

(اطلاعاتی)

### مثال گزارش

#### گزارش - جذب آبشاری

| ردیف | رده برخورد<br>( $\mu\text{m}$ ) | قطر کران پایین<br>( $\mu\text{m}$ ) | رده جرم<br>(mg) | جرم نسبی<br>(%) | جرم تجمعی<br>(%) |
|------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| ۱    | ۰٫۲۱ - ۰٫۰۶                     | ۰٫۰۶۰                               | ۰٫۰۰۰           | ۰٫۰۰            | ۰٫۰۰             |
| ۲    | ۰٫۲۵ - ۰٫۱۲                     | ۰٫۱۲۰                               | ۰٫۰۰۲           | ۰٫۱۴            | ۰٫۰۰             |
| ۳    | ۰٫۴۹ - ۰٫۲۵                     | ۰٫۲۵۰                               | ۰٫۰۴۹           | ۳٫۴۳            | ۰٫۱۴             |
| ۴    | ۰٫۹۰ - ۰٫۴۹                     | ۰٫۴۹۰                               | ۰٫۳۷۸           | ۲۶٫۴۳           | ۳٫۵۷             |
| ۵    | ۱٫۸۵ - ۰٫۹۰                     | ۰٫۹۰۰                               | ۰٫۷۴۵           | ۵۲٫۱۰           | ۳۰٫۰۰            |
| ۶    | ۳٫۶۹ - ۱٫۸۵                     | ۱٫۸۵۰                               | ۰٫۲۳۰           | ۱۶٫۰۸           | ۸۲٫۱۰            |
| ۷    | ۷٫۴۲ - ۳٫۶۹                     | ۳٫۶۹۰                               | ۰٫۰۲۱           | ۱٫۴۷            | ۹۸٫۱۸            |
| ۸    | ۱۴٫۸۰ - ۷٫۴۲                    | ۷٫۴۲۰                               | ۰٫۰۰۵           | ۰٫۳۵            | ۹۹٫۶۵            |
| ۹    | ۳۰٫۰۰ - ۱۴٫۸۰                   | ۱۴٫۸۰۰                              | ۰٫۰۰۰           | ۰٫۰۰            | ۱۰۰٫۰۰           |

قطر آبرودینامیک متوسط جرمی (MMAD):  $۱٫۲۸\mu\text{m}$

انحراف استاندارد هندسی (GSD):  $۱٫۷۷$

قطر آبرودینامیک متوسط عددی (NMAD):  $۰٫۴۹\mu\text{m}$

قطر آبرودینامیک متوسط سطح (SMAD):  $۰٫۹۳\mu\text{m}$

سامانه: BERNER- IMPACTOR I

جریان هوا:  $۵٫۸۵\text{ L/min}$

زمان نمونه‌برداری:  $۳۶۰۰٫۰۰\text{ s}$

غلظت (محاسبه شده):  $۴٫۰۷\text{ mg/m}^3\text{ air}$

قابلیت تنفسی (درصد کم‌تر از  $۱\mu\text{m}$ ):

۱- جرم وابسته:  $۳۳٫۳\%$  (اندازه‌گیری شده)

۸۹٫۷٪ (نموداری)

۲- عدد وابسته:

قابلیت تنفسی (درصد کم‌تر از  $3\mu\text{m}$ ):

۹۳٫۳٪ (اندازه‌گیری شده)

۱- جرم وابسته:

۹۹٫۹٪ (نموداری)

۲- عدد وابسته:

قابلیت تنفسی (درصد کم‌تر از  $5\mu\text{m}$ ):

۹۹٫۳٪ (اندازه‌گیری شده)

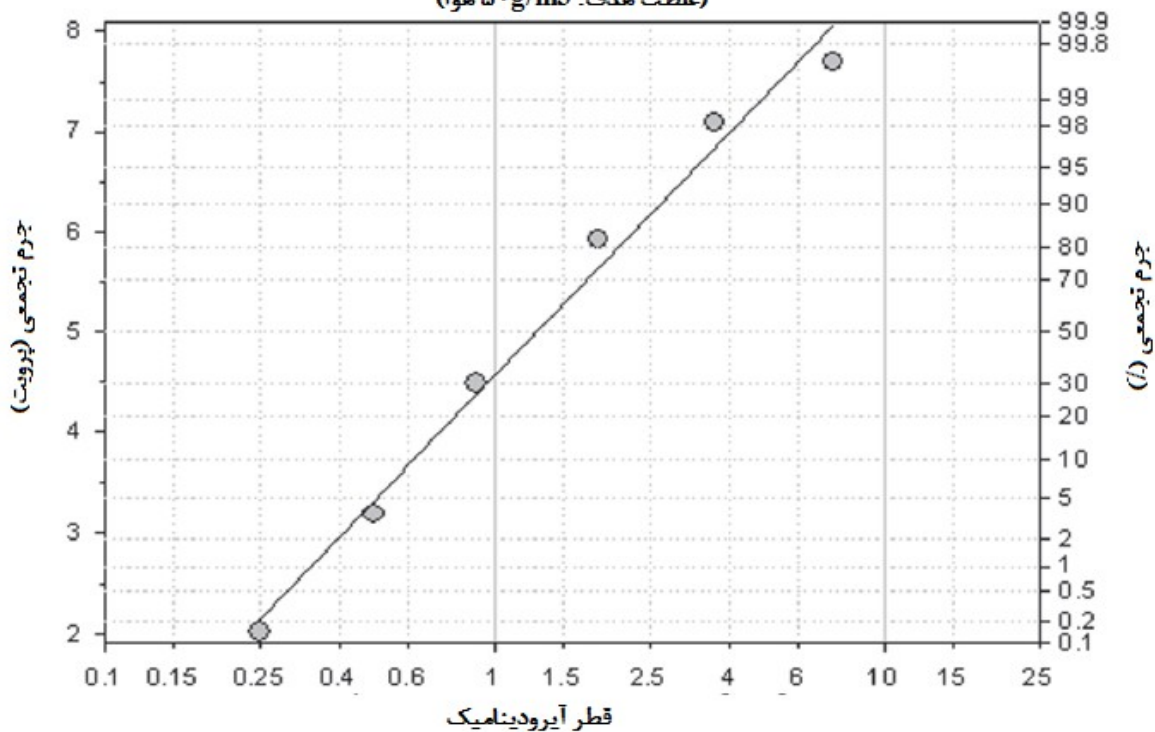
۱- جرم وابسته:

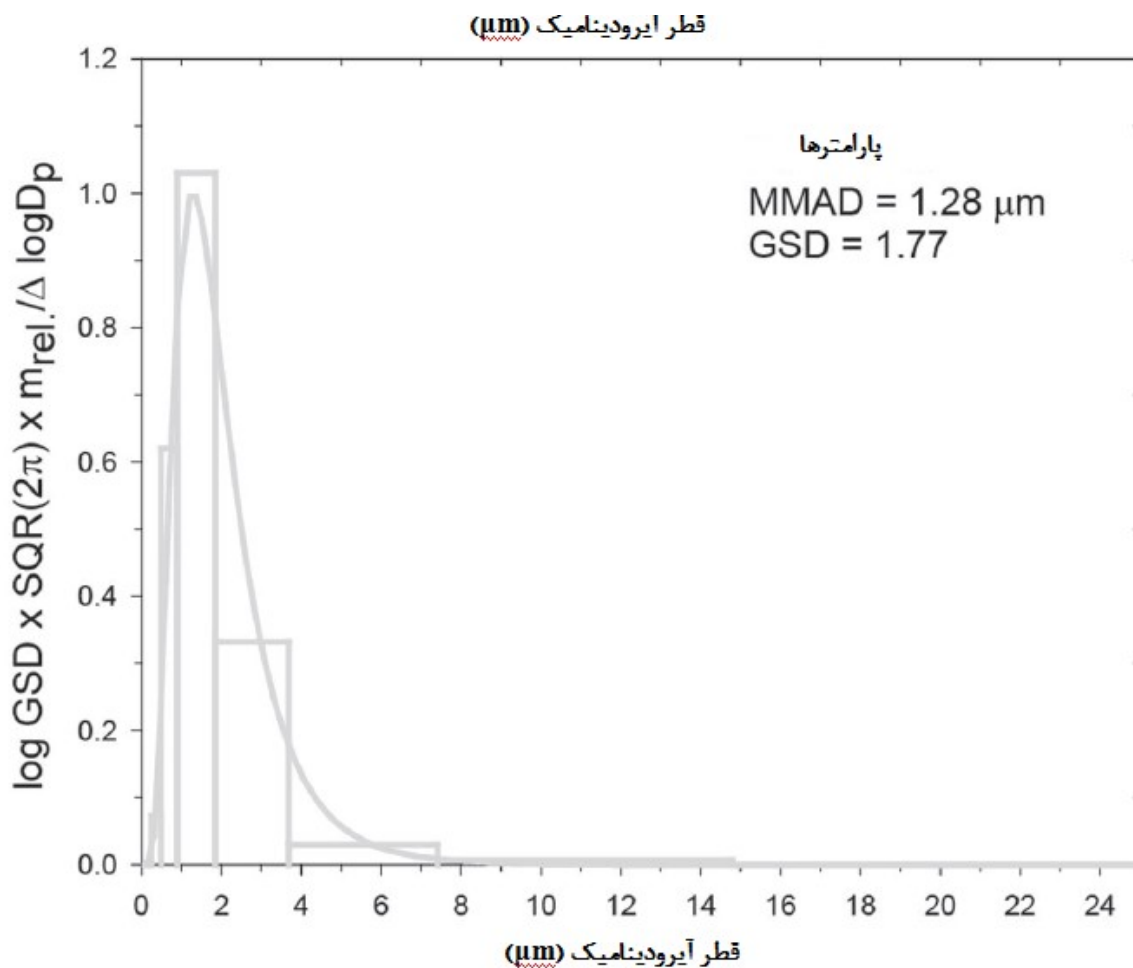
۹۹٫۹٪ (نموداری)

۲- عدد وابسته:

تجزیه اندازه ذره

(غلظت هدف:  $50\text{g}/\text{m}^3$  هوا)





### کتاب نامه

- [1] Ouf F.X. Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie, PhD Thesis, University of Rouen, 2006, ISRN IRSN-2006/62-FR.
- [2] Renoux A., & Boulaud D. Les aérosols – Physique et métrologie – Editions Lavoisier Tec & Doc – Paris. ISBN 2-7430-0231.
- [3] Willeke K., & Baron P.A. Aerosol Measurement. Principles, Techniques and Applications. J. Wiley & Sons, 1993
- [4] Blomqvist P. Emissions from Fires – Consequences for Human Safety and the Environment, PhD thesis, Report 1030, Lund University, 2005.
- [5] Levin B.C., & Kuligowski E.D. Toxicology of Fire and Smoke. in Inhalation Toxicology. 2nd Edition. Chapter 10, pp. 205-228. CRC Press (Taylor and Francis Group), Boca Raton, FL, Salem, H.; Katz, S. A., Editor(s), 2005.
- [6] Pauluhn J. Retrospective Analysis of Acute Inhalation Toxicity Studies: Comparison of Actual Concentrations obtained by Filter and Cascade Impactor Analyses. Regul. Toxicol. Pharmacol. 2005, **42** pp. 236–244
- [7] USDA. 1991, Health Hazards of Smoke, USDA Forest Service, Missoula Technology and Development Center, 9167-2809-MTDC, 8 p.
- [8] Harvey R.G. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Chemistry and Carcinogenicity. Cambridge University Press, 1991, pp. 11–15.
- [9] Witten T.A., & Sanders J.M. Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon. Phys. Rev. Lett. 1981, **47** pp. 1400–1403

- [10] Jullien R., & Botet R. Aggregation and fractal aggregates. World Scientific Pub Co Inc. 1987
- [11] Putorti A.D. Design parameters for stack-mounted light extinction measurement devices, NISTIR 6215. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1999
- [12] Van Hulle P. Caractérisation des aérosols émis par la combustion des hydrocarbures: Application a la mesure de l'indice de réfraction des suies. PhD Thesis, University of Rouen, 2002.
- [13] Wu J.S., Krishnan S.S., Faeth G.M. Refractive indices at visible wavelengths of soot emitted from buoyant turbulent diffusion flames. *J. Heat Transfer*. 1997, **119** pp. 230–237
- [14] Bushell G.C., Yan Y.D., Woodfield D., Raper J., Amal R. On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2002, **95** pp. 1–50
- [15] Sorensen C.M. Scattering and absorption of light by particles and aggregates. In: *Handbook of Surface and Colloid Chemistry*, (Birdi K.S.ed.). CRC Press, 1997, pp. 533–558.
- [16] Green H.L., & Watson H.H. Medical Research Council Special Report, 199 HMS. HMSO, London, 1935
- [17] Dobbins R.A., & M egaridis C.M. Morphology of flame-generated soot as determined by thermophoretic sampling. *Langmuir*. 1987, **3** pp. 254–259
- [18] K?ylü U.?., McEnnaly C.S., Rosner D.E., P fefferle L.D. Simultaneous measurements of soot volume fraction and particle size/microstructure in flames using a thermophoretic sampling technique. *Combust. Flame*. 1997, **110** (Issue 4) pp. 494–507
- [19] Thomassen Y., Koch W., Dunkhorst W., Ellingsen D.G., Skaugset N., Jordbekken L. et al. Ultrafine Particles at Workplaces of a Primary Aluminium Smelter. *J. Environ. Monit.* 2006, **8** pp. 127–133
- [20] Model 3089 Nanometer Aerosol Sampler, TSI Manual
- [21] Spurny K.R. Physical and Chemical characterization of Individual Airborne Particles. John Wiley & Sons Inc, New York, 1986, pp. 40–71.
- [22] K?ylü U.?., Faeth G.M., Farias T.L., Carvalho M.G. Fractal and projected structure properties of soot aggregates. *Combust. Flame*. 1995, **100** pp. 621–633
- [23] K?ylü U.?., Xing Y., Rosner D.E. Fractal morphology analysis of combustion-generated aggregates using light scattering and electron microscope images. *Langmuir*. 1995, **11** pp. 4848–4854
- [24] Sorensen C.M., & Feke G.D. The morphology of macroscopic soot. *Aerosol Sci. Technol.* 1996, **25** pp. 328–337
- [25] Van Gulijk C., Marijnissen J.C.M., Makkee M., Moulijn J.A., Schmidt-Ott A. Measuring diesel soot with a scanning mobility particle sizer and an electrical low-pressure impactor: performance assessment with a model for fractal-like agglomer. *J. Aerosol Sci.* 2004, **35** pp. 633–655
- [26] Fardell P., & Guillaume E. Sampling and analysis of fire effluents, in *Fire Toxicity* (chapter 11) 1st edition, ISBN 1 84569 502 X, Woodhead publishers / CRC ed., April 2010.
- [27] Rasbash. D.J., Philips R.P., Quantification of smoke produced by fires. *Fire Mater.* 1978, **2** pp. 102–109
- [28] Durst F., & Zare N. Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows. Proceedings of LDA75, University of Denmark, 1975.
- [29] Grehan G., G ouesbet G., N aqwi A. Trajectory Ambiguities in Phase Doppler Systems: Use of Polarizers and Additional Detectors to Suppress the Effect, International Symposium on application of laser techniques to fluid mechanic, Lisboa, 12.1. 1992.
- [30] Wiener B.B. Particles Sizing Using Photon Correlation Spectroscopy. In: *Modern Method of Particle Size Analysis*, (Barth H.G.ed.). Wiley, New York, 1984, pp. 93–116.

- [31] Crane R.I., & Evans R.L. Inertial deposition of particles in a bent pipe. *J. Aerosol Sci.* 1977, **8** (3) pp. 161–170
- [32] Pui D.Y.H., Romay-Novas F., Liu B.Y.H. Experimental Study of Particle Deposition in Bends of Circular Cross Section. *Aerosol Sci. Technol.* 1987, **7** (3) pp. 301–315
- [33] DEKATI. Fine Particle Sampler FPS-4000 documentation, available online at [http://www.dekati.com/cms/fps\\_4000](http://www.dekati.com/cms/fps_4000).
- [34] DEKATI. Diluter DI-1000 documentation, available online at [http://www.dekati.com/cms/dekati\\_diluter](http://www.dekati.com/cms/dekati_diluter).
- [35] MATTER ENGINEERING Rotating disk diluter for Emissions documentation, available online at <http://www.matter-aerosol.ch>.
- [36] Le Tallec Y., Saragoza L., Hertzberg T., Blomqvist P. Particles from Fire: Evaluation of the particulate fraction in fire effluents using the cone calorimeter. Proceedings of Interflam Conference, Edinburgh University, 2004.
- [37] Lall A.A., Seipenbusch M., Rong W., Friedlander S.K. On-line measurement of ultrafine aggregate surface area and volume distributions by electrical mobility analysis: II. Comparison of measurements and theory. *J. Aerosol Sci.* 2006, **37** pp. 272–282
- [38] Leith D., & Peters T.M. Concentration Measurement and Counting Efficiency of the Aerodynamic Particle Sizer 3321. *J. Aerosol Sci.* 2003, **34** (5) pp. 627–634
- [39] May K.R. A multistage liquid impinger. *Bacteriol. Rev.* 1996, (September) pp. 559–570
- [40] Raabe O.G. The dilution of Monodisperse suspension for Aerosolization. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1968, **29** pp. 439–443
- [41] Helsper C., Molter W., Löffler F., Wadenpohl C., Kaufmann S., Wenninger G. Investigations of a New Aerosol Generator for the Production of Carbon Aggregate Particles. *Atmos. Environ.* 1993, **27** pp. 1271–1275
- [42] Bau S. IRSN/DSU/SERAC - Journées des Thèses IRSN, 1-4 October 2007.
- [43] Motzkus C., Chivas-Joly C., Guillaume E., Ducourtieux S., Saragoza L., Lesenechal D. et al. Count size distribution of the aerosol emitted by the combustion of nanocomposites, Posters session, European Aerosol Conference EAC2011, Manchester (UK), 4-9 September 2011.
- [44] Butler K.M., & Mulholland G.W. Generation and Transport of Smoke Components. *Fire Technol.* 2004, **40** (2) pp. 149–176
- [45] Hinds W.C. *Aerosol Technology*, 2nd Ed., A Wiley-Interscience publication, 1999.
- [46] Hertzberg T., & Blomqvist P. Particles from fires – a screening over common materials found in buildings. *Fire Mater.* 2003, **27** pp. 295–314
- [47] Linnermark A., & Blomqvist P. Emissions from an Automobile Fire. *Chemosphere.* 2006, **62** pp. 1043–1056
- [48] Mulholland G.W. Smoke productions and properties, In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (NFPA, Ed.), NFPA, 2.258-2.268, Quincy, MA, USA, 2002.
- [49] O’Shaughnessy P.T., & Raabe O.G. A comparison of cascade impactor data reduction methods. *Aerosol Sci. Technol.* 2003, **37** (2) pp. 187–200
- [50] Dennis R. *Handbook of Aerosols - Technical Information Center*, Energy Research and Development Administration. pp. 110-114, July 1976.
- [51] Marple V.A., & Rubow K.L. *Aerosol Generation Concepts and Parameters*. In: *Generation of Aerosols and Facilities for Exposure Experiments*, (Willeke K.ed.). Ann Arbor Science Publ. Inc, Mich., 1980, pp. 3–29.

- [52] Raabe O.G. Deposition and Clearance of Inhaled Aerosols. In: Mechanisms in Respiratory Toxicology, (Witschi H., & Nettekheim P. eds.). CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida, **Vol. I.**, pp. 27–76.
- [53] Snipes M.B. Long-Term Retention and Clearance of Particles Inhaled by Mammalian Species. *Crit. Rev. Toxicol.* 1989, **20** pp. 175–211
- [54]. Sot-commentary. Recommendations for the Conduct of Acute Inhalation Limit Tests, prepared by the Technical Committee of the Inhalation Specialty Section. Society of Toxicology. *Fundam. Appl. Toxicol.* 1992, **18** pp. 321–327
- [55] Rosiello A.P., Essigmann J.M., Wogan G.N. Rapid and Accurate Determination of the Median Lethal Dose (LD50) and its Error with Small Computer. *J. Toxicol. Environ. Health.* 1977, **3** pp. 797–809
- [56] ISO 7708, Air quality — Particle size fraction definitions for health-related sampling
- [57] Joyeux D. Numerical and experimental assessment of soot formation in Ethylene diffusion flame, PhD Thesis, University of Rouen, 1993.
- [58] Samson R.J., Mulholland G.W., Gentry J.W. Structural analysis of soot agglomerates. *Langmuir.* 1987, **3** pp. 272–281
- [59] K?ylü U.? ., & Faeth G.M. Carbon monoxide and soot emissions from buoyant turbulent diffusion flames. *Fire Safety Science: Proceedings of the Third International Symposium*, pp 625-634, 1991.
- [60] Hu B., Yang B., K?ylü U.? . Soot measurements at the axis of an ethylene/air non-premixed turbulent jet flame. *Combust. Flame.* 2003, **134** pp. 93–106
- [61] Ouf F.X., Coppalle A., Vendel J., Weill M.E., Yon J. Characterization of soot particles in the plume of over-ventilated diffusion flames. *Combust. Sci. Technol.* 2008, **180** (4) pp. 674–698
- [62] Krishnan S.S., Lin K.-C., Faeth G.M. Optical properties in the visible of overfire soot in large buoyant turbulent diffusion flames. *J. Heat Transfer.* 2000, **122** pp. 517–524
- [63] Krishnan S.S., & Faeth G.M. Buoyant turbulent jets and flames: II. Refractive index, extinction and scattering properties of soot, NIST GCR 00-796, 2000.
- [64] Megaridis C.M., & Dobbins R.A. Comparison of soot growth and oxidation in smoking and nonsmoking ethylene diffusion flames. *Combust. Sci. Technol.* 1989, **66** pp. 1–16
- [65] Lee K.B., Thring M.W., Beer J.M. On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame. *Combust. Flame.* 1962, **6** (Issue C) pp. 137–145
- [66] Prado G.P., Lee M.L., Hites R.A., Hoult D.P., Howard J.B. Soot and hydrocarbon formation in a turbulent diffusion flame. *International Symposium on Combustion Vol. 16* (1), pp. 649-661, 1977.
- [67] Zhang H.X., Sorensen C.M., Ramer E.R., Olivier B.J., Merklin J.F. In situ optical structure factor measurements of an aggregating soot aerosol. *Langmuir.* 1988, **4** (4) pp. 867–871
- [68] Prado G., Jagoda J., Neoh K., Lahaye J. A study of soot formation in premixed propane/oxygen flames by in-situ optical techniques and sampling probes. *International Symposium on Combustion, Vol. 18*(1), pp. 1127-1136, 1981.
- [69] Wey C., Powell E.A., Jagoda J.I. The effect on soot formation of oxygen in the fuel of a diffusion flame. *International Symposium on Combustion, Vol. 20*(1), pp. 1017-1024, 1985.
- [70] Jagoda I.J., Prado G., Lahaye J. An experimental investigation into soot formation and distribution in polymer diffusion flames. *Combust. Flame.* 1980, **37** pp. 261–274
- [71] Harris S.J., & Weiner A.M. Detection of Incipient Soot particles in a premixed ethylene flame. *Chemical and Physical Processes in Combustion, Fall Technical Meeting, The Eastern States Section*, pp. 67.1-67.4, 1984.



- [72] Roessler D.M. Diesel particle mass concentration by optical techniques. *Appl. Opt.* 1982, **21** (22) pp. 4077–4086
- [73] Evans D., Baum H., McCaffrey B., Mulholland G., Harkleroad M., Manders W. Combustion of Oil on Water. Proceedings of the Ninth Annual Arctic and Marine Oilspill Program – Technical Seminar.; Edmonton, Alberta, Can; Code 10157, 1986.
- [74] Sorensen C.M., & Feke G.D. The morphology og macroscopic soot. *Aerosol Sci. Technol.* 1996, **25** pp. 328–337
- [75] K?ylü U.? ., & Faeth G.M. Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence times. *Combust. Flame.* 1992, **89** (2) pp. 140–156
- [76] Sorensen C.M., Cai J., Lu N. Light-Scattering measurements of monomer size, monomers per aggregate, and fractal dimension for soot aggregates in flames. *Appl. Opt.* 1992, **31** pp. 6547–6557
- [77] Colbeck I., Atkinson B., Johar Y. The morphology and optical properties of soot produced by different fuels. *J. Aerosol Sci.* 1997, **28** pp. 715–723
- [78] Wentzel M., Gorzawski H., Naumann K.H., Saathoff H., Weinbruch S. Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols. *J. Aerosol Sci.* 2003, **34** pp. 1347–1370
- [79] Matti Maricq M., & Xu N. The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicles. *J. Aerosol Sci.* 2004, **35** pp. 1251–1274
- [80] Cai J., Lu N., Sorensen C.M. Analysis of Fractal cluster morphology parameters : structural coefficient and density autocorrelation function cutoff. *Journal of Colloidal and interface science*, Vol. 171:470-473, 1995.
- [81] Kim H.W., & Choi M. In situ line measurement of mean aggregates size and fractal dimension along the flame axis by planar laser light scattering. *J. Aerosol Sci.* 2003, **34** (12) pp. 1633–1645
- [82] Heyder J., Gebhart J., Rudolf G., Schiller C.F., Stahlhofen W. Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005-15  $\mu\text{m}$ . *J. Aerosol Sci.* 1986, **17** (5) pp. 811–825
- [83] Mahaffey L., & Miller M. Introduction to fire effects RX 340, Chap IV Air Quality. Northern training center, 13 p., 1995.
- [84] Peterson J.L. Air quality, smoke management, and prescribed fire. Proceeding of the 1990 Pacific Northwest Range Management Short Course, Fire in Pacific Northwest Ecosystems, January, 23- 25th 1990, Pendleton, OR, Corvallis, OR, Departement of Rangeland Resources, Oregon State University, pp. 132-136, 1990.
- [85] Mobley H.E., Barden C.R., Bigler Crow A., Fender D.E., Jay D.M., Winkworth R.C. Southern forestry smoke management guidebook. USDA Forest Service general technical report SE-10, 140p, 1976.
- [86] Ward D., & Hardy D.C. Smoke emissions from wildland fires. *Environ. Int.* 1991, **17** pp. 117–134
- [87] Plan régional Qualité de l’air - Généralités sur la pollution de l’air et ses effets sur la santé et l’environnement– DRIRE région Nord Pas de Calais, 2000.
- [88] Sandberg D.V., & Martin R.E. Particle sizes in slash fire smoke. USDA Forest Service research paper PNW-199, 7 p., 1975.
- [89] Schaefer V.J. Some physical relationships of fine particle smoke. Proceedings annual: 13 Tall Timbers Fire Ecology Conference; Tallahassee, Florida, March 22-23rd, 1973, pp. 283-294.
- [90] ISO 19701, Methods for sampling and analysis of fire effluents

- [91] ISO 5660-1:2002, Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)
- [92] ISO 5660-2:2002, Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement)
- [93] ISO 9705:1993, Fire tests — Full-scale room test for surface products
- [94] ISO 13571, Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires