

روش کدرسنجی برای برآورد آلودگی ذره‌ای هوا از راه دور

اصغر صدیق زاده، فرشته باری منیری*
آزمایشگاه جابربن حیان، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در این مقاله نتایج تجربی و سنجه‌بندی (کالیبراسیون) دستگاه کدرسنج برای تعیین غلظت آئروسل‌ها^(۱) در هوا عرضه می‌شود. در این بررسی از ذرات آئروسل، کروی شکل تک توزیعی مایع دی‌اکتیل فتالات (DOP) برای سنجه‌بندی دستگاه استفاده شده و گستره ذرات بکار رفته از ۰/۰۷ تا ۱ میکرون بوده است. دامنه غلظت ذرات مورد بررسی عملاً بین صفر و ۴ میلیون ذره در سانتی متر مکعب بوده است. چشمه نور مورد استفاده یک لیزر هلیوم - نئون با طول موج ۶۳۲۸ آنگستروم است. توان خروجی اندازه‌گیری شده لیزر از صفر تا ۲/۴۵ میلی‌وات متغیر بوده است که بستگی به غلظت و قطر ذرات و فاصله چشمه نور تا آشکارساز، یعنی ضخامت ابر آئروسل دارد. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهند که شدت نور ضمن عبور از یک ابر آئروسل، با افزایش غلظت ذرات به طور نمایی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت ابر آئروسل در غلظت ثابت، نوری که از آن می‌گذرد شدت کاسته می‌شود. اثر قطر ذرات آئروسل بر نوری که از ابر آئروسل عبور می‌کند نیز بررسی شده است.

۱- مقدمه

ذرات آئروسل جزو آلاینده‌های محیط زیست هستند؛ چنانچه تراکم آنها در محیط زیادتر از حد مجاز باشد برای حیات انسان و سایر موجودات زنده خطرناک است. روشهای سنجش آلودگی ذره‌ای هوا بر پایه خواص فیزیکی آنها، از جمله اینرسی، گرانس، خواص اپتیکی استوارند.

روش اپتیکی یکی از بهترین و دقیق‌ترین این روشها است. دستگاههایی مانند شمارنده ذرات^(۲)، شمارنده هسته‌های تراکم^(۳) و لیدار^(۴) براساس خواص اپتیکی ذرات ساخته شده‌اند. تعیین غلظت ذره‌ای در هوای آلوده شهرها و کارخانه‌ها از راه دور براساس کدرسنجی امکان‌پذیر است؛ براین اساس می‌توان میزان آلودگی ناشی از حوادث هسته‌ای را از راه دور نیز برآورد کرد.

۲- بررسی نظری

در برخورد باریکه نور با ماده، مانند برخورد نور لیزر، که خود موج تناوبی است، با یک ذره آئروسل باعث نوسان واداشته بارهای آزاد یا مقید مولکولهای ذره می‌شود؛ نوسان واداشته این بارها هماهنگ با تناوب میدان الکترومغناطیسی نور است و سبب می‌شود که میدان ثانوی در داخل و خارج ذره ایجاد می‌شود. در

اثر پراکندگی و جذب ناشی از این پدیده، اتلاف انرژی بوجود می‌آید. اتلاف انرژی نورانی در باریکه تابشی به هنگام عبور از یک ترکیب خاص ذرات معلوم، «خاموشی نور» نامیده می‌شود. قانون بوگر^(۵) شار عبوری F و شار تابشی (فرودی) F_۰ را به ضخامت t ابر آئروسل مرتبط می‌کند [۱]:

$$F = F_0 \cdot \exp(-kt) \quad (1)$$

که در آن k ضریب خاموشی محیط، kt تیرگی و F/F_۰ تراکسلی^(۶) نور است.

خاموشی حاصل از یک ذره، با E ضریب خاموشی ذره توصیف می‌شود:

$$E = \frac{\text{شار کلی پراکنده و جذب شده توسط ذره}}{\text{شار فرودی هندسی}}$$

* - دانشگاه آزاد - واحد علوم و تحقیقات

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| ۱- Aerosols | ۲- Counter Particle |
| ۳- Condensation nuclei Counter | |
| ۴- Lidar | ۵- Bouger |
| ۶- Transmittancy | |



«پسل»^(۸) نمایش داد [۲]:

$$I(\theta) = \frac{\alpha^2}{4\pi} \left[\frac{2J_1(\sin\theta)}{a\sin\theta} \right]^2 \quad (۳)$$

که در آن، θ زاویه پراکندگی، $\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}$ و J_1 تابع بسل از مرتبه اول است. بطوری که ملاحظه می‌شود پارامتر اندازه ذره α رابطه مستقیم با d ، قطر ذره، و معکوس با λ طول موج نور فرودی دارد. از رابطه (۳) می‌توان نتیجه گرفت که شدت نور پراکنده در نظریه می‌با توان دوم قطر ذرات نسبت مستقیم دارد.

ب- پراکندگی ریلی^(۹)

این نظریه درباره ذراتی که دارای قطر کوچکتر یا مساوی با 0.5μ میکرون هستند اعتبار دارد. شدت نور پراکنده در راستای θ ناشی از برخورد باریکه نور فرودی با طول موج λ و شدت I_0 به یک ذره کروی به قطر d از رابطه زیر بدست می‌آید [۳]:

$$I(\theta) = \frac{\alpha^4 d^6}{\lambda R^2} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] \cdot (1 + \cos^2 \theta) I_0 \quad (۴)$$

R فاصله آشکارساز از ذره است.

از رابطه ۴ چنین استنباط می‌شود که شدت نور پراکنده در نظریه ریلی (مربوط به ذرات ریز) با توان ۶ قطر ذره رابطه مستقیم دارد.

۲-۲- پراکندگی نور در ابر آئروسول

شدت پراکندگی نوری که از برخورد موج نور با یک جزء حجمی، متشکل از تعداد مشخصی از ذرات آئروسول، در اثر پدیده پراکندگی در تمام جهات منتشر می‌شود بستگی به اثر هریک از ذرات بر این موج دارد. در مورد ذرات تک توزیعی

شار فرودی هندسی شاری است در سطح مقطع باریکه نور و در ناحیه‌ای که ذره در خلاف جهت تابش نور تصویر شده است. اگر در واحد حجم تعلیق (سوسپانسیون)، n ذره در ناحیه a تصویر شود قانون بوگر به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{F}{F_0} = \exp(-naEt) \quad (۲)$$

این رابطه که معمولاً به قانون لامبر - بیر معروف است، اولین بار توسط بوگر ارائه شده است. قانون بوگر شارهای عبوری و تابشی F و F_0 را به ضخامت ابر آئروسول « l » مرتبط می‌کند؛ در این رابطه، $\frac{F}{F_0}$ تراکسیلی نور است که در آزمایشهای تجربی این پژوهش آن را به صورت $\frac{P}{P_0}$ (یعنی نسبت توانهای خروجی و فرودی لیزر) درآورده‌ایم. در مورد ذراتی که جذب نور در آنها قابل اغماض است، E را «ضریب پراکندگی» هم نامیده‌اند. اگر N ذره در واحد حجم تعلیق پراکنده باشد قانون بوگر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{F}{F_0} = e^{-\frac{\pi N d^2 E t}{4}}$$

که در آن d قطر ذره است.

۲-۱- پراکندگی

گوستاف می^(۷) در ۱۹۰۸ معادلات ماکسول درباره پراکندگی نور را با استفاده از کره‌ای به ضریب شکست m بکار برد. او از جمله‌های مربوط به پراکندگی نور روی تمام زاویه‌ها انتگرال‌گیری کرد تا توصیفی برای پراکندگی کامل حاصل از یک ذره بدست آورد. پارامترهای مختلفی در پراکندگی نور مؤثرند که مهمترین آنها قطر ذره است.

الف - پراکندگی می

نظریه می درباره ذرات کروی شکل با قطر بزرگتر از 0.5μ میکرون صادق است. او براساس نتایج آزمایشگاهی خود، شدت پراکندگی نور تحت یک زاویه θ را برحسب تابع مرتبه اول

۷- Mie

۸- Bessel

۹- Rayleigh



متفاوت وجود دارد. در یک سر این لوله، لیزر هلیوم - نئون با طول موج ۶۳۲۸ آنگستروم و توان ماکزیموم ۲/۴۵ میلی وات و در سر دیگر آن آشکارساز نور نصب شده است. ذرات تک توزیعی DOP مورد استفاده در این آزمونها به وسیله یک مولد آئروسول سه مرحله‌ای (TSI) تولید می‌شود: در مرحله اول هوای خروجی کمپرسور خشک شده ذرات آن حذف و فشار آن تثبیت می‌شود. بدین ترتیب، ذرات حاصل از بخار آب موجود در هوای ورودی در توزیع اندازه ذرات تداخل ایجاد نمی‌کنند. در مرحله دوم با استفاده از هوای فشرده، محلول DOP داخل مخزن به صورت ذرات پاشیده می‌شوند. این ذرات چند توزیعی در مرحله سوم از یک دستگاه تک توزیع‌گر عبور می‌کنند که دمای آن بسته به قطر ذرات تنظیم می‌شود. در این دستگاه ذرات چند توزیعی در اثر تبخیر و تراکم به ذرات تک توزیعی تبدیل می‌گردند. یک اسباب رقیق کننده که در آزمایشگاه طراحی و ساخته شده است، امکان تولید غلظت‌های متفاوت را فراهم می‌کند. در خروجی محفظه استوانه‌ای شکل، یک عدسی همگرا برای کانونی کردن باریکه نور به منظور آشکارسازی حداکثر نور تعبیه شده است.

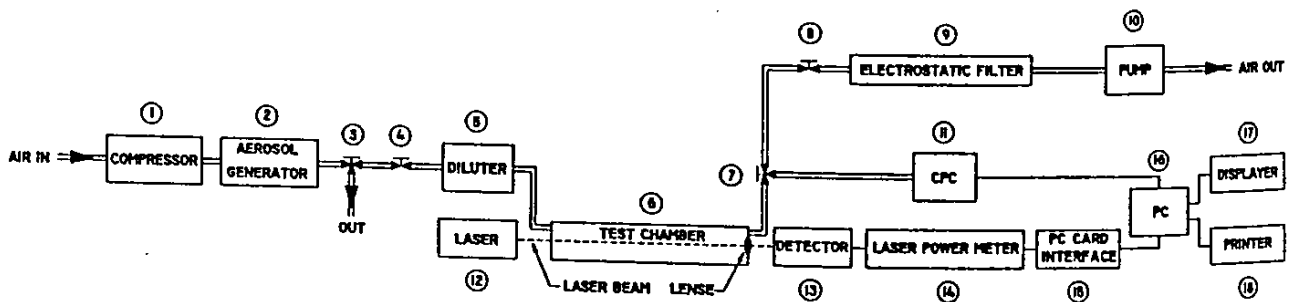
کروی شدت پراکندگی از رابطه زیر حساب می‌شود [۴]:

$$I(\theta) = NCI_0 \frac{\pi^2 d^6}{16\lambda^2 f^2} \left[\frac{2J_1(\pi d \theta / \lambda)}{(\pi d \theta / \lambda)} \right]^2 \quad (5)$$

که در آن I تابع پسل از مرتبه اول، C ضریب تناسب، N تعداد ذرات در جزء حجمی، I_0 شدت نور تابشی، d قطر ذره، λ طول موج نور فرودی، θ زاویه پراکندگی، f فاصله کانونی است. برای یک ابر آئروسول در ابعاد کار آزمایشگاهی هیچ نظریه تدوین شده‌ای وجود ندارد. در این کار تحقیقاتی ما می‌خواهیم کدیری را به صورت تابعی از پارامترهای قطر ذره، فاصله چشمه نور تا آشکارساز (ضخامت ابر آئروسول) و غلظت ذرات تبیین کنیم.

۳- وسایل و سیستم آزمایشگاهی

سیستم مورد استفاده برای مطالعه اثرهای غلظت و اندازه ذرات و ضخامت ابر آئروسول بر تضعیف نور لیزر در ضمن عبور از آن، از یک لوله استوانه‌ای شکل از جنس پیرکس به قطر ۱۰ سانتی‌متر و در سه طول ۱، ۲، ۳ متر تشکیل شده است (شکل ۱)، که در آن امکان تولید ذرات تک توزیعی با غلظتهای

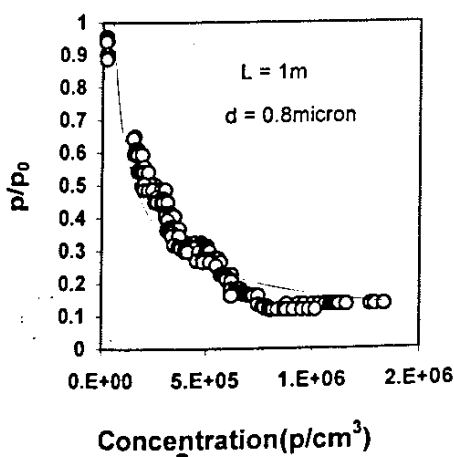


شکل ۱- طرح تجربی سیستم

- ۱- کمپرسور ۲- دستگاه مولد آئروسول ۳- شیر سه راهی ۴- شیر تنظیم غلظت آئروسول در محفظه ۵- رقیق کننده ۶- محفظه آزمایش ۷- شیر سه راهی ۸- شیر تنظیم ۹- نشست دهنده الکتروستاتیک ۱۰- پمپ خلاء ۱۱- شمارنده همنه‌های تراکم ۱۲- لیزر هلیوم-نئون ۱۳- آشکارساز ۱۴- دستگاه توان سنج لیزر ۱۵- اینترفیس ۱۶- کامپیوتر ۱۷ و ۱۸- خروجی از کامپیوتر و چاپگر



در مرحله اول اثر غلظت ذرات بر توان خروجی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، محفظه آزمون را عملاً از صفر تا ۴ میلیون ذره در سانتی‌متر مکعب انباشته و توان خروجی لیزر تابع غلظت را ثبت کرده‌ایم. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش غلظت توان خروجی به طور نمایی کاهش می‌یابد. بعنوان مثال شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات توان خروجی لیزر تابع غلظت ذرات تک توزیعی ابرهای آئروسول متشکل از ذرات ۰/۸ و ۰/۶ میکرون را در عمق ۱ متر نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود در مورد ذره ۰/۶ میکرون نسبت P/P_0 یعنی نسبت توان خروجی از محفظه در حضور ابر آئروسول برای غلظتهای بالاتر از $10^5 \times 2/3$ ذره در سانتی‌متر مکعب عملاً برابر صفر است، ولی این غلظت برای ذره ۰/۸ میکرون در حدود $10^5 \times 7/5$ می‌باشد. برای غلظتهای عددی کمتر از $10^4 \times 1/5$ ذره در سانتی‌متر مکعب، سیستم اندازه‌گیری ما عملاً تغییرات محسوسی را با کاهش غلظت نشان نمی‌دهد. همه این آزمایشها که بارها تکرار شده‌اند صحت قانون برگر را تأیید و از الگوی آن پیروی می‌کنند.



شکل ۲- تغییرات توان نسبی لیزر بر حسب غلظت ابر آئروسولی برای ذرات ۰/۸ میکرون در طول ۱ متر با ثبت خودکار (استفاده از نرم‌افزار طراحی شده در آزمایشگاه برای ثبت خودکار خروجی دستگاههای بکار گرفته شده)

غلظت عددی ذرات در محفظه آزمایش به وسیله شمارنده هسته‌های تراکم از نوع TSI در مدت آزمایش تعیین می‌گردد. برای اطمینان از اندازه ذرات مورد آزمایش از یک دستگاه برخورددهنده بهمشار^(۱۱) هشت مرحله‌ای مدل اندرسن^(۱۱) استفاده شد. چرخش هوا در داخل سیستم آزمایش به منظور دستیابی به نمونه همگن، با یک پمپ خلاء انجام می‌گیرد، یک نشست‌دهنده الکتروستاتیک در مسیر جریان ورود به پمپ تخلیه نصب شده است تا ذرات آئروسول از جریان هوای خروجی حذف شوند. در این آزمایشها ذرات با قطرهای معین در گستره ۰/۰۷ تا ۱ میکرون تولید شده پس از عبور از دستگاه رقیق‌کننده و اختلاط اولیه وارد محفظه آزمون می‌شوند. با بالا رفتن غلظت و ایجاد تراکم در طول لوله، شدت نور لیزر تضعیف می‌شود تا این که در غلظت بیشینه معینی به کمترین مقدار خود برسد. در اثر پدیده‌های پخش و نشست ذرات، به ویژه مکش پمپ شمارنده و وارد کردن هوای عاری از ذرات به داخل محفظه آزمایش، غلظت ذرات در محفظه کاهش و در نتیجه توان خروجی لیزر افزایش می‌یابد. تغییرات توان خروجی لیزر خارج شونده از ابر آئروسول تابع غلظت ذرات است و با اتصال آشکارساز لیزر و شمارنده به رایانه به طور خودکار ثبت می‌شود.

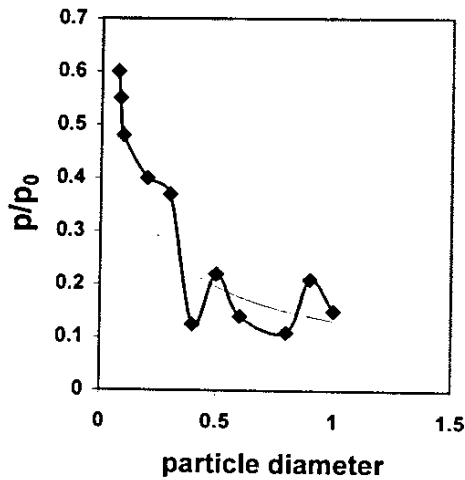
۴- روشها و یافته‌ها

روش آزمایشگاهی تعیین اثر هر یک از پارامترهای اندازه، غلظت و همچنین ضخامت ابر آئروسول بر تضعیف نور لیزر به شرح زیر است:

با بکار انداختن پمپ خلاء که در انتهای سیستم آزمایشگاهی تعبیه شده است ذرات آئروسول وارد دستگاه رقیق‌کننده شده و مخلوطی از ذرات آئروسول و هوای تمیز فراهم و وارد محفظه استوانه‌ای می‌شود. در اثر افزایش غلظت ذرات، توان خروجی نور لیزر از ابر آئروسول بتدریج کاهش می‌یابد و به کمترین مقدار خود می‌رسد. لازم به یادآوری است که مقدار بیشینه توان لیزر را هنگامی که محفظه آزمایش به وسیله پمپ تخلیه کاملاً از ذرات آئروسول پاک می‌شود اندازه‌گیری کرده و آنرا مبنای سنجش قرار می‌دهیم.

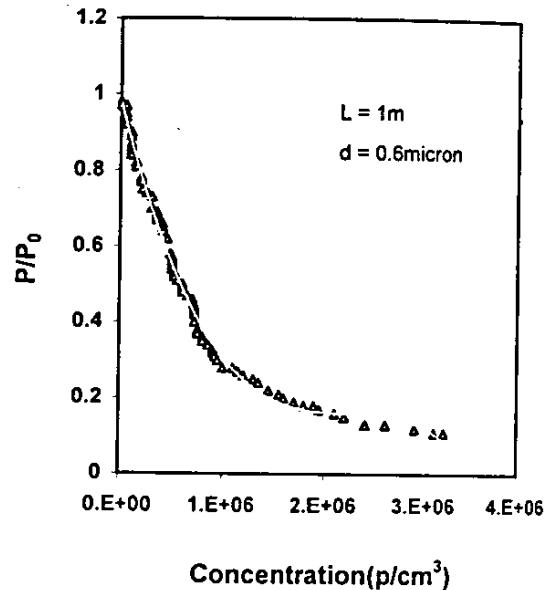
۱۰- Cascade impactor

۱۱- Anderson



شکل ۴- تغییرات توان نسبی لیزر برحسب قطر ذرات ابر آئروسول

توزیعی را در گستره $0.7 - 1 \mu m$ غلظتهای متفاوت وارد محفظه‌های آزمایش با طولهای پیش‌گفته کرده و تغییرات توان خروجی لیزر را سنجیده‌ایم: هر چه ضخامت ابر آئروسولی بیشتر شود، توان خروجی کاهش بیشتری می‌یابد. به عنوان مثال شکل ۵ تغییرات توان خروجی نسبی را برحسب غلظت ذرات تک توزیعی به قطر 0.6 میکرومتر برای ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ متر ابر آئروسول را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت ابر آئروسول، توان خروجی نسبی لیزر بطور محسوسی کاهش می‌یابد. مثلاً در غلظت 3×10^5 ذره در سانتی‌متر مکعب، توان خروجی نسبی برای ضخامت‌های ۱ و ۲ متر به ترتیب برابر 0.696 ، 0.517 ، 0.110 می‌باشد. توان نسبی لیزر در غلظت $2/1 \times 10^5$ ذره در سانتی‌متر مکعب، برای ضخامت‌های ۱ و ۲ و ۳ متر، به ترتیب 0.75 ، 0.653 ، 0.215 می‌باشد. با سیستم آشکارساز آزمایشگاهی ما، تغییرات شدت خروجی در غلظتهای کمتر از 10^4 ذره در سانتی‌متر مکعب قابل ثبت نیستند. تغییرات توان خروجی در غلظتهای بیشتر از 10^1 ذره در سانتی‌متر مکعب برای تمام اندازه‌های ذرات در ضخامت ۳ متری ابر آئروسول عملاً نامحسوس است، در صورتیکه در غلظتهای بالای 2×10^1 ذره در سانتی‌متر مکعب برای طولهای ۱ و ۲ متر تا اندازه‌ای محسوس است.



شکل ۵- کاهش توان نسبی لیزر برحسب غلظت ابر آئروسول برای ذرات 0.6 میکرون در طول ۳ متر

در مرحله دوم، تغییرات توان خروجی لیزر برحسب قطر ذرات ابر آئروسول مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌های ما نشان می‌دهند که با افزایش قطر ذرات، شدت نسبی نور لیزر کاهش می‌یابد. برای مثال شکل ۴ تغییرات P/P_0 برحسب قطر ذرات را در غلظت 3×10^5 ذره در سانتی‌متر مکعب نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود، شدت نسبی نور لیزر برای ذره 0.7 میکرومتر برابر 0.62 است. هر چه قطر ذرات بزرگتر شود توان خروجی لیزر و در نتیجه P/P_0 بیشتر کاهش می‌یابد، به طوریکه برای ذرات 1 میکرومتری مقدار آن به 0.114 می‌رسد. بهترین تابع منطبق بر این نمودارهای توان خروجی برحسب اندازه ذرات، یک تابع نمایی از مرتبه اول است، که فرمول آن به کمک نرم‌افزار مورد استفاده به صورت زیر عرضه می‌شود.

$$\frac{P}{P_0} = 0.08 + 0.05 e^{-0.26 d} \quad (6)$$

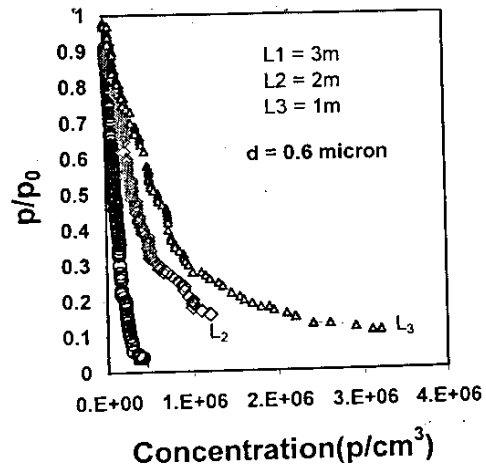
در مرحله سوم، اثر ضخامت ابر آئروسول بر توان خروجی نور لیزر مورد بررسی قرار گرفت. ذرات تک



کارخانه‌های بزرگ و به طور کلی اعلام خطر برای محیط زیست و مردم در مواردی که آلودگی از حد مجاز تجاوز کند به کار برد. با این سیستم می‌توان در سوانح هسته‌ای میزان آلودگی را به خوبی از راه دور برآورد کرده و تمهیدات ایمنی پیش‌بینی شده را بکار برد. همچنین می‌توان با بکارگیری انواع لیزرها، از جمله لیزر CO_2 که توان خروجی بیشتری دارد، به وسیله آشکارسازهای ویژه اندازه‌گیری پراکندگی میزان آلودگی را از فواصل دور برآورد نمود.

نتایج حاصل از کاربرد دستگاه کدرسنج در این پژوهش در زیر خلاصه شده است:

- ۱- توان نسبی دستگاه کدرسنج با افزایش غلظت ذرات آئروسول کاهش می‌یابد و بالعکس
- ۲- اثر غلظت‌های کمتر از ۱۰۰۰۰۰ ذره در سانتی‌متر مکعب بر تغییرات توان نسبی دستگاه با توجه به امکانات آزمایشگاهی ما قابل آشکارسازی نبوده است، یعنی توان خروجی دستگاه سنسج عملاً در حضور و عدم حضور ابر آئروسول در این محدوده غلظت تغییر محسوسی نکرده است.
- ۳- توان نسبی خروجی دستگاه سنسج تابع قطر ذرات آئروسول است و با افزایش قطر کاهش می‌یابد.
- ۴- توان نسبی خروجی تابع عمق ابر آئروسول بوده و با افزایش این عمق کاهش می‌یابد.



شکل ۵- نمودارهای کاهش توان نسبی لیزر تابع غلظت برای ضخامت‌های آئروسولی متفاوت

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی نشان داده‌ایم که روش کدرسنجی را می‌توان برای برآورد آلودگی هوا بکار برد. نتایج آزمایشهای ما نشان دادند که از این روش می‌توان برای تعیین قطر ذرات موجود در نمونه‌ها نیز استفاده کرد. در مورد ضخامت ابر آئروسول با توجه به نتایج حاصل می‌توان این سیستم را در مواردی مانند دستگاه زنگ خطر آتش‌سوزی در جنگلها، برآورد آلودگی هوا از راه دور در شهرهای بزرگ، اندازه‌گیری آلودگی در کارگاهها و



References

1. V.E. Zuev, *Laser Beams in the Atmosphere, Consultants Bureau. (1982)*
2. C.V. Davies, *Aerosol Science, Academic press X. (1966)*
3. Thomas Mercer, *Aerosol technology in hazard Evaluation, Academic press (1977).*
4. E.D. Hinkley, *Laser monitoring of the Atmosphere, Springer - Verlage (1976).*
- ۵- اسولتر، اصول لیزر، مترجم اکبر حریری، حسین گل‌نبی، مرکز نشر دانشگاهی (۱۳۷۱).
- ۶- آجوی گاتاگک، نورشناسی، مترجم ناصر مقبلی، مهرانگیز طالب‌زاده، انتشارات فاطمی (۱۳۷۰).
- ۷- صدیق‌زاده، اثر و سلها در محیط زیست، مجله انرژی هسته‌ای (۱۳۷۲).
8. *Physique des aerosols 2'eme partie par jean Bricard, CEA report (1976).*

Method of air-particles determination, by remote opacity measurement

A. Sadigzadeh, F. Moniri

Ibn Hayan Research Laboratories, AEOI, P.O. Box 14155-4494, Tehran-Iran

Abstract

In this paper, experimental results along with the calibration method used in opacimetry for determining atmospheric aerosol are presented. For our investigation, liquid, spherical mono dispersed particles of dioctyle phalate (DOP) with particle sizes ranging from 0.07 to 1 μm is used. The light source is a He/Ne laser with the wavelength of 6328 \AA . The range of particle concentrations is practically between 0 and 4×10^6 particles per cm^3 . The measured laser output transmitted through the aerosol cloude varies from 0 to 2.45 mw and is a fonction of particle concentration, particle sizes and the depth of aerosol cloud. It is observed that the light transmission decreases exponentially as the particle concentration increases. The effect of particle sizes for the light transmitted through the aerosol was also studied.