



طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری قطر ذرات بر اساس پراکندگی نور لیزر

Mohsen Bonjaki¹, Atefeh Ajami¹, Ebrahim Behroodi^{1,2}, Seyed Mojtaba Barzin¹, Mahboobeh Arabsorkhi¹

¹ مرکز اپتیک، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران

² پژوهشکده لیزر و پلاسمما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – اندازه‌گیری قطر ذرات موجود در هوا یا یک سیال و شمارش تعداد آنها اهمیت زیادی دارد. در این مقاله مراحل طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری قطر ذرات شرح داده شده است. این دستگاه بر مبنای پراکندگی نور لیزر از ذرات کار می‌کند. با توجه به ابعاد ذرات و طول موج استفاده شده، پراکندگی مای نتایج را توصیف می‌کند. طراحی اپتیک و سیالات دستگاه آورده شده است و نتایج بدست آمده از آن با یک دستگاه مرجع مقایسه شده است. بیشینه خطای آن نسبت به دستگاه مرجع ۶/۵۲٪ است که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

کلید واژه- اندازه‌گیری قطر ذرات، شمارش ذرات، پراکندگی نور، شبیه‌سازی اپتیکی.

Design and Manufacture of Particle Sizing System Based on Light Scattering

Mohsen Bonjaki¹, Atefeh Ajami¹, Ebrahim Behroodi^{1,2}, Seyed Mojtaba Barzin¹, Mahboobeh Arabsorkhi¹

¹ Iranian Academic Center for Education, Culture, & Research- Sharif Branch- Tehran

² Laser and Plasma Research Institute - Shahid Beheshti University- Tehran

Abstract- Measuring particle size in air or fluid, and counting particles are very important. In this paper, the design and manufacture of particle sizing system is described. This system is based on measuring light scattering from particles. With respect to the wavelength and size of particles that used in this system, Mie scattering theory can explain the results. Optical and fluid simulation of system is mentioned. The system is tested and its results compared with a reference system. Its error with respect to the reference system is less than 6.52% that is acceptable for this system.

Keywords: Measuring particle size, Particle counting, Light Scattering, Optical simulation.

و طول موج ۵۱۵ نانومتر بکار رفته برای اندازه‌گیری قطر ذرات، شدت پراکندگی با تئوری پراکندگی مای توصیف می‌شود. تئوری مای، سطح مقطع پراکندگی هر ذره را بر مبنای اندازه، ضریب شکست و طول موج نور فروندی محاسبه می‌کند. با استفاده از تئوری مای شدت پراکندگی در زاویه (φ, θ) از روابط ۱-۶ بدست می‌آید: [۴-۱]

$$I_\varphi = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

$$I_\theta = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \varphi. \quad (2)$$

که در آن:

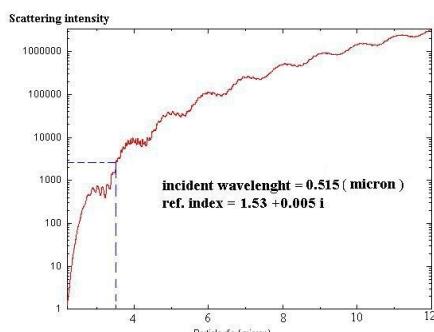
$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \right|^2, \quad (3)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \right|^2, \quad (4)$$

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{P_n^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta}, \quad (5)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \frac{dP_n^{(1)}(\cos \theta)}{d\theta}. \quad (6)$$

تابع وابستگی زاویه‌ای پراکندگی ($P(\theta)$) را، تابع فاز می‌گویند. محاسبات نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شدت نور پراکنده به جلو می‌تواند تقریب خوبی از اندازه ذره تحت تابش باشد. در شکل ۱، شدت نور پراکنده به جلو برای ذرات با ابعاد ۱ تا ۱۲ میکرون نشان داده شده است.



شکل ۱: شدت پراکندگی بر حسب قطر ذرات

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که انرژی سیگنال پراکنده شده در زاویه پراکنش ۲۰ درجه پراکندگی رو به جلو، برای ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر تقریباً ۱۰۰۰۰ برابر انرژی پراکنده شده برای ذرات با قطر ۱ میکرومتر است. برای اندازه‌گیری قطر ذرات می‌توان از سیگنال پراکندگی

۱- مقدمه

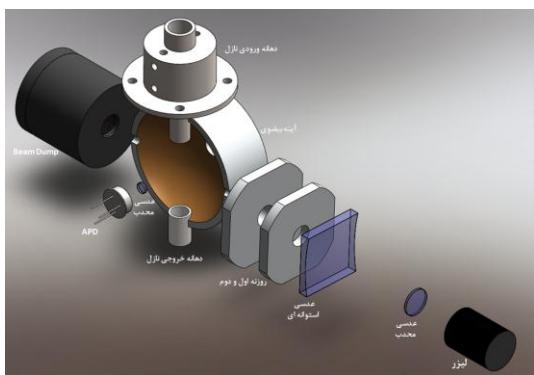
اندازه‌گیری قطر ذرات موجود در یک سیال یا هوا و شمارش تعداد آنها اهمیت زیادی دارد. اندازه‌گیری ذرات موجود در اتاق تمیز و محیط‌های مشابه، مانیتورینگ محلی هوای بیرون و داخل ساختمان، تحقیقات دانشگاهی در زمینه مهندسی، زیستی و بیولوژیکی، اندازه‌گیری توزیع ذرات سیمان و ارزیابی کیفیت هوای محیط کار در کارخانه‌ها مواردی از کاربرد اندازه‌گیری قطر ذرات و توزیع آنها را نشان می‌دهد. اندازه ذرات و توزیع آنها تاثیر بسیاری بر روی چگالی، خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی مواد می‌گذارد. به همین خاطر روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری قطر ذرات توسعه پیدا کرده است که یکی از بهترین روش‌ها، اندازه‌گیری قطر ذرات بر اساس پراکندگی نور لیزر از آنهاست که روشی سریع، نسبتاً ارزان و غیرمخرب است. در این روش نور لیزر به ذرات برخورد کرده و شدت نور پراکنده شده توسط ذره، که با اندازه ذره مناسب است در زوایای مختلف اندازه‌گیری می‌گردد. پس با اندازه‌گیری این شدت در یک موقعیت ثابت می‌توان ذرات در حال عبور از مقابله پرتو لیزر را در اندازه‌های مختلف دسته‌بندی کرد.

در این مقاله مبانی نظری و عملکرد کلی سیستم بررسی می‌گردد و بخش‌های مختلف آن که با نرم‌افزار طراحی و سپس ساخته شده است، توضیح داده می‌شود. در نهایت نتایج آن با یک دستگاه مرجع مقایسه می‌گردد.

۲- مبانی نظری

امواج الکترومغناطیسی دراثر برخورد با ذرات و مولکول‌ها پراکنده می‌شوند. تئوری پراکندگی نور توسط ذرات کروی با اندازه و ضریب شکست دلخواه، توسط مای (Mie) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تئوری ذرات بصورت توزیعی از کرات مستقل از هم در نظر گرفته می‌شوند و فرض می‌گردد که هر پراکنده فقط یکبار تحت تابش فروندی قرار می‌گیرد. در بررسی پراکندگی نور توسط یک ذره کروی شکل، ضریب شکست نسبی ذره و محیط و پارامتر اندازه $a=2\pi r/\lambda$ که در آن r شعاع ذره و λ طول موج فروندی است، مهم هستند. [۱]

با توجه به ابعاد ذرات مورد نظر در این مقاله (1-10 μm)



شکل ۳: چیدمان قطعات سیستم

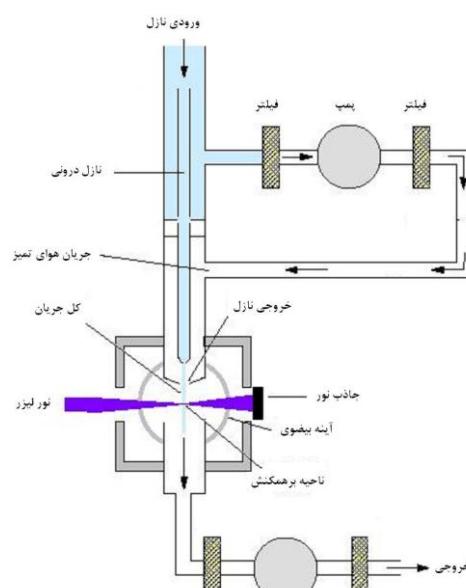
لیزر دیود استفاده شده در این سیستم از نوع پیوسته، با توان ۲۰ میلیوات است. طول موج آن ۵۱۵ نانومتر و دارای مقطع بیضوی ($2/5$ میلیمتر) است. مقطع آن در ناحیه برهمکنش باید به 60×1100 میکرون برسد. عرض پرتو با توجه به مقطع باریکه سیال در محل برهمکنش که 700 میکرون است، تعیین میگردد تا ذرات عبوری شدت یکسانی را دریافت کنند. 60 میکرون نیز با توجه به دبی و سرعت ذرات در محل برهمکنش و مشخصه های الکترونیک انتخاب شده است تا ذرات از هم قابل تفکیک باشند. برای رسیدن به این قطر لکه، شبیه سازی در نرم افزار Zemax صورت گرفت و از یک عدسی کروی با دهانه موثر 11 میلیمتر و فاصله کانونی 150 میلیمتر و یک عدسی استوانه ای با فاصله کانونی 150 - میلیمتر به همراه دو دیافراگم استفاده گردید. برای اینکه نور لیزر پس از عبور از ناحیه برهمکنش دوباره به محیط برنگردد از یک جاذب نور استفاده شد. نور پراکنده از ذرات توسط یک آینه بیضوی که محل برهمکنش، یکی از کانونهای آن است جمع آوری و به سمت آشکارساز هدایت می شود. در این مسیر از دو عدسی کروی با قطر 5 میلیمتر و فاصله کانونی $4/5$ میلیمتر، برای انتقال انرژی پراکنده شده به سطح آشکارساز استفاده شده است.

از طرفی نیاز است تا با یک سیستم مکانیکی، ذرات موجود در سیال در یک ستون باریک، از محل برهمکنش عبور کنند. این کار با استفاده از پمپ، فیلتر و یک سیستم دو نازلی انجام می گیرد که در نرم افزار FLUENT شبیه سازی گردید و سپس ساخته شد. این سیستم بدلیل تمرکز بیشتر ذرات در مرکز جریان، بر سیستم تک نازلی برتری دارد. شکل ۴ سیستم دونازلی را نشان می دهد.

جانبی نیز استفاده کرد.

۳- چیدمان تجربی

محاسبات انجام گرفته و نمودارها نشان می دهند که بین شدت پراکنده شده از ذرات و قطر آنها رابطه مشخصی وجود دارد که می توان با استفاده از آن قطر ذرات را اندازه گیری و آنها را دسته بندی کرد. عملکرد کلی سیستم پیشنهادی به این صورت است که ذرات موجود در هوا توسط پمپ ها به درون سیستم کشیده می شوند. از یک سیستم دو نازلی استفاده می شود تا این ذرات به صورت خطی و تک تک از ناحیه برهمکنش بگذرند. سپس نور لیزر که لکه آن توسط سیستم اپتیکی به شکل و اندازه مناسبی رسیده است به ذرات برخورد می کند. آینه بیضوی نور پراکنده شده در نیم فضا را جمع آوری کرده و به سمت آشکارساز می فرستد. (شکل ۲)



شکل ۲: شماتیک کلی سیستم

آشکارساز، شدت پراکنده شده را دریافت کرده و به سیگنال الکتریکی تبدیل می کند. بخش نرم افزار و کنترل سیستم این سیگنال را پردازش کرده، تعداد و قطر ذرات را بدست آورده و نمایش می دهد.

بر این اساس لازم است که یک سیستم اپتیکی طراحی شود تا لکه لیزر را در ناحیه برهمکنش به ابعاد مورد نظر برساند. چیدمان سیستم در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴- بررسی نتایج و جمع بندی

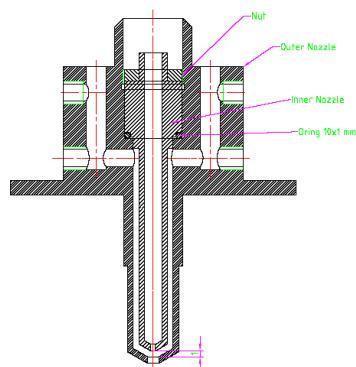
پس از شبیه‌سازی قسمت‌های مختلف و ساخت آنها، سیستم مونتاژ شد. سیستم مذکور دارای ویژگی‌های زیر است: دبی آن ۵ لیتر بر دقیقه است که یک لیتر آن هوای حاوی ذرات و ۴ لیتر آن هوای تمیز است. این سیستم به مدت یک دقیقه ذرات را شمارش می‌کند و سپس تعداد کل ذرات و تعداد ذرات در کانال‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ میکرون را نمایش می‌دهد. اطلاعات به کامپیوتر ارسال می‌گردد و می‌تواند علاوه بر پردازش‌های بعدی، توسط نرم‌افزار، مانیتور و کنترل گردد.

هر تست بر روی سیستم برای ۲۰ بار تکرار شد و میانگین داده‌ها برای هر کانال در سه شرایط محاسبه شد که با استفاده از آن عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت.

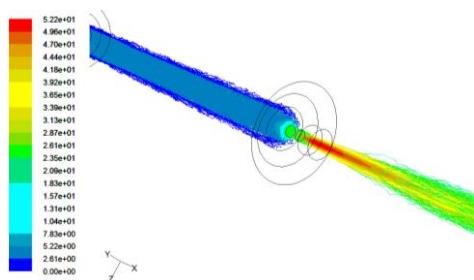
هوای محیط، آب و پودر مرجع که با دستگاه نبولايزر در اطراف نازل پخش می‌شد، برای سیستم مرجع و سیستم ساخته شده، تست گردید که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. حداقل خطا در هر کانال، محاسبه شده که حداقل مقدار آن ۶/۵۲٪ است. این درصد خطا برای دستگاه‌های ذره‌شمار قابل قبول است.

مراجع

- [1] W. Hergert, T. Wriedt, "The Mie Theory: Basics and Applications", Springer, 2012.
- [2] Technical Workshop Series: Introduction to the Latest ANSI/ISO Standard for Laser Particle Size Analysis, "A primer on particle sizing by static laser light scattering", Micrometrics Instrument Corp, 2000.
- [3] C. F. Bohren, D. R. Huffman, "Absorption and scattering of light by small particles", John Wiley & Sons, Inc. 1983.
- [4] David W. Hahn, "Light scattering theory", Department of Mechanical and Aerospace Engineering university of Florida (2009).



شکل ۴: نقشه سیستم دو نازلی



شکل ۵: مسیر حرکت ذرات پس از خروج از نازل

نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار برای مسیر ذرات پس از عبور از نازل در شکل ۵ آورده شده است که نشان می‌دهد توزیع ذرات تا بعد از ناحیه برهمکنش ثابت می‌ماند.

آشکارساز استفاده شده از نوع APD است که شامل تقویت‌کننده نیز می‌باشد. سیگنال دریافت شده پس از تقویت به بخش پردازش فرستاده می‌شود. برای حل مسئله سرعت، پردازشگر به یک واحد سخت افزاری (FPGA) و یک واحد نرم‌افزاری تقسیم شده است بطوری که عملیات اولیه اندازه‌گیری قطر ذرات و ذخیره‌سازی با استفاده از واحد سخت افزاری انجام گرفته و اطلاعات در فواصل زمانی معین به واحد نرم‌افزاری انتقال می‌یابد.

جدول ۱: نتایج تست دستگاه ساخته شده و مرجع در شرایط مختلف

حداکثر خطای دستگاه تحت تست تست نسبت به مرجع	شمارش ذرات در دستگاه تحت تست			شمارش ذرات در دستگاه مرجع			ابعاد (میکرون)
	پودر مرجع	آب	هوای محیط	پودر مرجع	آب	هوای محیط	
٪۳.۸۳	۲۳۶۲۰	۳۴۰۱۴	۳۹۶۶	۲۴۵۶۰	۳۴۳۷۴	۴۰۲۴	۱
٪۳.۹۲	۲۷۲۲۱	۵۴۸۵۶	۱۴۵۱	۲۸۳۳۱	۵۶۰۵۰	۱۵۰۶	۳
٪۵.۰۸	۳۵۰۸۲	۱۱۰۳۵۵	۴۰۶	۳۶۹۵۸	۱۱۴۷۶۹	۴۱۲	۵
٪۶.۵۲	۹۸۷۴	۸۴۰۲۰	۶۱	۱۰۵۶۳	۸۷۳۵۹	۵۹	۷
٪۳.۷۳	۶۱۹	۲۰۶۱۴	۴	۶۴۳	۲۱۲۳۸	۵	۱۰
٪۴.۶	۹۶۴۱۶	۳۰۳۸۵۹	۵۸۸۸	۱۰۱۰۵۵	۳۱۳۷۹۰	۶۰۰۶	مجموع ذرات