بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

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

محسن بنجخی[۱]، عاطفه عجمی[۱]، ابراهیم بحرودی[۱،۲]، سید مجتبی برزین[۱] و محبوبه عرب‌سرخی[۱]

[۱] مرکز اپتیک، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران

[۲] پژوهشکده لیزر و پلاسما، 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 Bonjakhi[1], Atefeh Ajami[1], Ebrahim Behroodi[1,2], Seyed Mojtaba Barzin[1], Mahboobeh Arabsorkhi[1]

[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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

اندازه گیری قطر ذرات موجود در یک سیال یا هوا و شمارش تعداد آنها اهمیت زیادی دارد. اندازه گیری 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 متناسب است در زوایای مختلف اندازه‌گیری می‌گردد. پس با اندازه‌گیری این شدت در یک موقعیت ثابت می‌توان ذرات در حال عبور از مقابل 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 پراکننده فقط یکبار تحت تابش فرودی قرار می‌گیرد. در بررسی پراکندگی نور توسط یک ذره کروی شکل، ضریب شکست نسبی ذره و محیط و پارامتر اندازه $\alpha=2\pi r/\lambda$ که در آن r شعاع ذره و λ طول موج فرودی است، مهم هستند. [۱]

با توجه به ابعاد ذرات مورد نظر در این مقاله (1-10μm) و طول موج ۵۱۵ نانومتر بکار رفته برای اندازه‌گیری قطر ذرات، شدت پراکندگی با تئوری پراکندگی مای توصیف می شود. تئوری مای، سطح مقطع پراکندگی هر ذره را بر مبنای اندازه، ضریب شکست و طول موج نور فرودی محاسبه می‌کند. با استفاده از تئوری مای شدت پراکندگی در زاویه (θ, φ) از روابط ۱-۶ بدست می‌آید: [۱-۴]

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \varphi, \qquad (۱)$$

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \varphi. \qquad (۲)$$

که در آن:

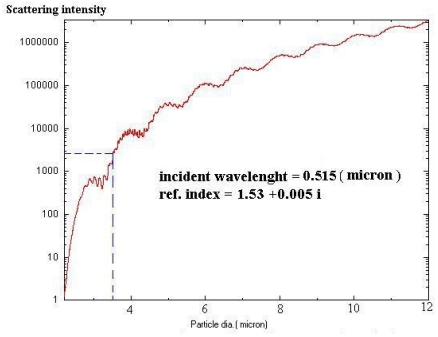
$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta) \right] \right|^2, \qquad (۳)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta) \right] \right|^2, \qquad (۴)$$

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{P_n^{(1)}(\cos\theta)}{\sin\theta}, \qquad (۵)$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{dP_n^{(1)}(\cos\theta)}{d\theta}. \qquad (۶)$$

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 برحسب قطر ذرات

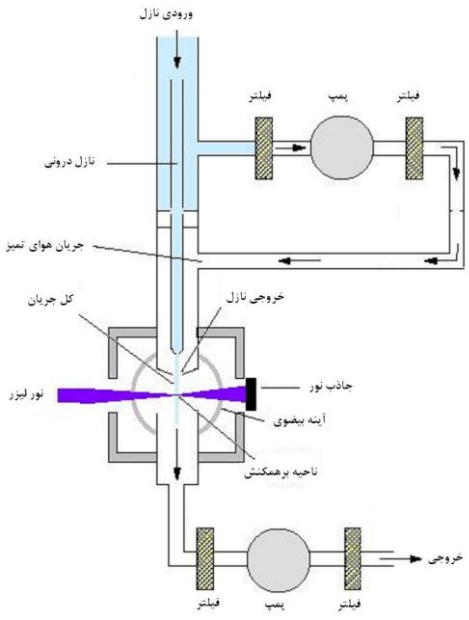
با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که انرژی سیگنال پراکنده شده در زاویه پراکنش ۲۰ درجه پراکندگی رو به جلو، برای ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر تقریبا ۱۰۰۰۰ برابر انرژی پراکنده شده برای ذرات با قطر ۱ میکرومتر است. برای اندازه‌گیری قطر ذرات می‌توان از سیگنال پراکندگی

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

جانبی نیز استفاده کرد.

۳- چیدمان تجربی

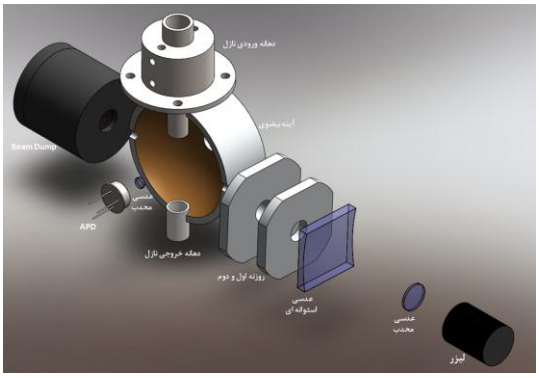
محاسبات انجام گرفته و نمودارها نشان می‌دهند که بین شدت پراکنده شده از ذرات و قطر آنها رابطه مشخصی وجود دارد که می‌توان با استفاده از آن قطر ذرات را اندازه‌گیری و آنها را دسته‌بندی کرد. عملکرد کلی سیستم پیشنهادی به این صورت است که ذرات موجود در هوا توسط پمپ‌ها به درون سیستم کشیده می‌شوند. از یک سیستم دو نازلی استفاده می‌شود تا این ذرات به صورت خطی و تک‌تک از ناحیه برهمکنش بگذرند. سپس نور لیزر که لکه آن توسط سیستم اپتیکی به شکل و اندازه مناسبی رسیده است به ذرات برخورد می‌کند. آینه بیضوی نور پراکنده شده در نیم فضا را جمع‌آوری کرده و به سمت آشکارساز می‌فرستد.(شکل ۲)



شکل ۲: شماتیک کلی سیستم

آشکارساز، شدت پراکنده شده را دریافت کرده و به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. بخش نرم‌افزار و کنترل سیستم این سیگنال را پردازش کرده، تعداد و قطر ذرات را بدست آورده و نمایش می‌دهد.

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

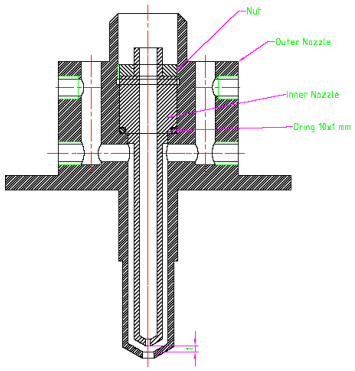


شکل ۳: چیدمان قطعات سیستم

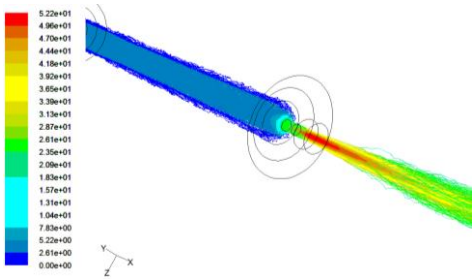
لیزر دیود استفاده شده در این سیستم از نوع پیوسته، با توان ۲۰ میلی‌وات است. طول موج آن ۵۱۵ نانومتر و دارای مقطع بیضوی (۲/۵ *۴ میلیمتر) است. مقطع آن در ناحیه برهم‌کنش باید به ۱۱۰۰*۶۰ میکرون برسد. عرض پرتو با توجه به مقطع باریکه سیال در محل برهم‌کنش که ۷۰۰ میکرون است، تعیین می‌گردد تا ذرات عبوری شدت یکسانی را دریافت کنند. ۶۰ میکرون نیز با توجه به دبی و سرعت ذرات در محل برهمکنش و مشخصه‌های الکترونیک انتخاب شده است تا ذرات از هم قابل تفکیک باشند. برای رسیدن به این قطر لکه، شبیه‌سازی در نرم‌افزار Zemax صورت گرفت و از یک عدسی کروی با دهانه موثر ۱۱ میلیمتر و فاصله کانونی ۱۵۰ میلیمتر و یک عدسی استوانه‌ای با فاصله کانونی ۱۵۰- 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 جمع‌آوری و به سمت آشکارساز هدایت می‌شود. در این مسیر از دو عدسی کروی با قطر ۵ میلیمتر و فاصله کانونی ۴/۵ 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 می‌گیرد که در نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی 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 می‌دهد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]



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 بطوری‌که عملیات اولیه اندازه‌گیری قطر ذرات و ذخیره‌سازی با استفاده از واحد سخت‌افزاری انجام گرفته و اطلاعات در فواصل زمانی معین به واحد نرم‌افزاری انتقال می‌یابد.

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 نبولایزر در اطراف نازل پخش می‌شد، برای سیستم مرجع و سیستم ساخته شده، تست گردید که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. حداکثر خطا در هر کانال، محاسبه شده که حداکثر 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).

جدول۱: نتایج تست دستگاه ساخته شده و مرجع در شرایط مختلف

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]