



طراحی، شبیه سازی و ساخت سیستم اپتیکی دستگاه شمارنده ذرات میکرونی بر مبنای پراکندگی پرتو لیزر

ابراهیم بحرودی^{۱،۲}، عاطفه عجمی^۱، محسن بنجخی^۱، محبوبه عرب سرخی^۱ و سید مجتبی برزین^۱

^۱ مرکز اپتیک، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

در این مقاله به طراحی اپتیک سیستم شمارنده ذرات با ابعاد یک تا ده میکرون پرداخته می شود. اپتیک سیستم از دو قسمت اپتیک ارسال پرتو لیزر به سمت ناحیه برهم کنش با ذرات و اپتیک جمع آوری و هدایت پرتوهای پراکنده شده از سطح ذرات به سمت آشکارساز تشکیل شده است. در اپتیک ارسال برای شکل دهی پرتو لیزر از یک عدسی محدب و عدسی استوانه ای، و در اپتیک دریافت از یک آینه بیضوی استفاده شد تا حساسیت سیستم افزایش یابد. در انتها با تست سیستم نهایی و مقایسه با یک دستگاه شمارنده مرجع صحت عملکرد اپتیک طراحی شده تایید شد.

کلید واژه- شبیه سازی و طراحی اپتیکی، دستگاه شمارنده ذرات، اندازه گیری قطر ذرات، پراکندگی لیزری

Design, Simulation and Manufacture of Particle Counter Optical System Based on Laser Scattering

Ebrahim Behroodi^{1,2}, Atefeh Ajami¹, Mohsen Bonjakhi¹, Mahboobeh Arabsorkhi¹ and Mojtaba Barzin¹

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

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

In this Article, the system of particle counter based on optical design is described. The optical system consists of two parts. The first part is transmitting of the laser beam to the interaction region. The second part is collecting of light scattered by dust particles and sending it to the detector. To shape the laser beam in the interaction region, a convex lens and cylindrical lens were used. Also in the second part an elliptical mirror is applied to increase the sensitivity of designed system. Finally our system was compared with a reference system and its optical performance was verified.

Keywords: Simulation and optical design, Particle counter, Measurement particle size, Laser scattering

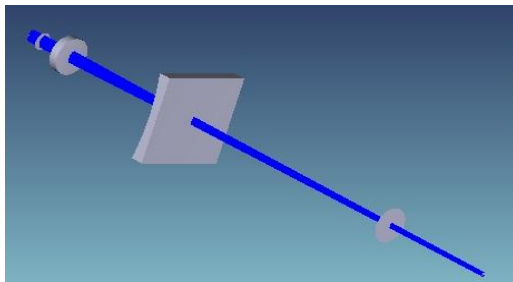
۱- مقدمه

یکی از روشهایی که برای شمارش و آنالیز ابعادی ذرات میکرونی معلق در یک سیال گازی در دستگاه‌های ذره شمار مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشخصه یابی پراکندگی حاصل از پرتو لیزر از سطح ذرات می‌باشد. [1] این دستگاه‌ها در اندازه‌گیری و شمارش تعداد ذرات موجود در اتاق‌های تمیز، مانیتورینگ محلی هوای داخل ساختمان، ارزیابی کیفیت هوای کارخانه‌ها و کاربری‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختار کلی این نوع سیستمها از چهار بخش مکانیک سیالات، طراحی جامدات، اپتیک و الکترونیک تشکیل شده است. در این مقاله به تفصیل بخش اپتیک سیستم طراحی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. اپتیک این سیستم از دو قسمت اپتیک مسیر ارسال پرتو لیزر به سمت ناحیه برهم کنش با سیال گازی و اپتیک جمع آوری و ارسال پرتوهای پراکنده شده حاصل از برهم کنش لیزر با ذرات معلق در سیال گازی به سمت آشکار ساز می‌باشد. برای هدایت سیال گازی و همگرا سازی ذرات میکرونی معلق در سیال در ناحیه برهم کنش از یک نازل که به این منظور طراحی و ساخته شده است استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی اپتیک سیستم طراحی شده پرداخته می‌شود.

۲- اپتیک مسیر ارسال

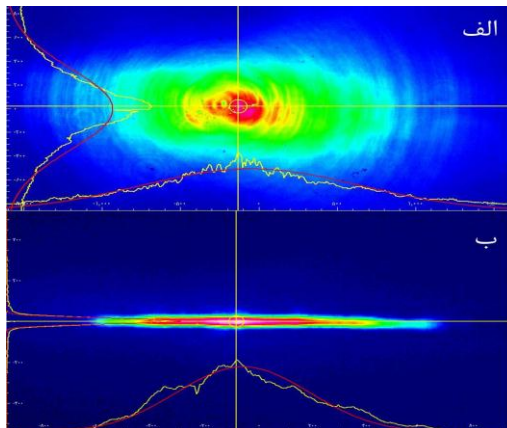
اپتیک مسیر ارسال وظیفه هدایت پرتو لیزر به سمت ناحیه برهم کنش با ذرات معلق در سیال گازی و تغییر ابعاد مقطع پروفایل شدتی پرتو لیزر با توجه به ابعاد مقطع سیال حاصل از ذرات میکرونی همگرا شده در این ناحیه را بر عهده دارد. مقطع سیال در این ناحیه برابر با ۷۰۰ میکرون می‌باشد. با توجه به شبیه سازی های انجام شده پهنای پرتو لیزر در این ناحیه بین ۱۱۰۰ تا ۱۱۵۰ میکرون در نظر گرفته شد تا ذرات عبوری شدت یکسانی از پرتو لیزر را دریافت کنند و بدین سبب شدت پرتوهای پراکنده شده از سطح این ذرات فقط به شکل و ابعاد ذرات بستگی داشته باشد. عرض پرتو لیزر در این ناحیه نیز با توجه به دبی سیال، سرعت آماری ذرات عبوری و محدودیت های موجود در الکترونیک و آشکارساز حدود ۶۰ میکرون محاسبه شد تا ذرات عبوری از هم قابل تفکیک

باشند. لیزر مورد استفاده در این سیستم لیزر دیود با طول موج ۵۱۵ نانومتر، توان ۲۰ میلی وات با مقطع پروفایل شدتی بیضی به ابعاد ۴ در ۲/۵ میلیمتر برای $1/e^2$ شدت ماکزیمم و دارای زاویه واگرایی کمتر از ۰/۵ میلی رادیان می‌باشد. برای رسیدن به ابعاد مطلوب لکه لیزر در ناحیه برهم کنش، پهنای و عرض پرتو لیزر به ترتیب باید به نسبت ۳/۶ و ۴۱/۵ برابر کوچکتر شود. بدین منظور از یک عدد عدسی محدب با فاصله کانونی ۱۵۰ میلیمتر و یک عدد عدسی استوانه ای مقعر با فاصله کانونی منفی ۱۵۰ میلیمتر استفاده شد. فاصله بین دو عدسی برابر با ۵۵ میلیمتر محاسبه شد و فاصله ناحیه برهم کنش با عدسی استوانه ای نیز برابر با ۸۹ میلیمتر بدست آمد. شکل ۱ چیدمان اپتیک طراحی شده را نشان می‌دهد. تمام شبیه سازی ها توسط نرم افزار طراحی اپتیک Zemax انجام شده است. [2-6]

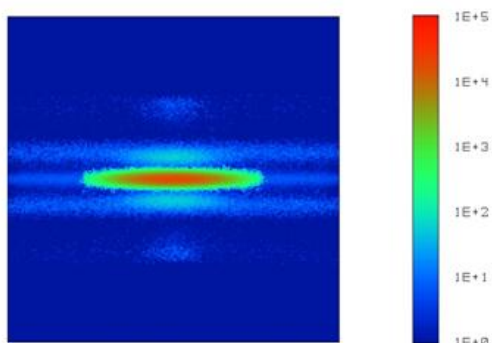


شکل ۱: چیدمان اپتیک مسیر ارسال

بعد از ناحیه برهم کنش و در فاصله ۴۲/۵ میلیمتری از آن یک عدد جاذب نور (Metric Beam Dump) با دهانه ورودی ۱۰ میلیمتر قرار داده شد تا پرتو لیزر به محیط اندازه گیری باز نگردد. شکل ۲ الف و ب به ترتیب پروفایل دو بعدی شدت پرتو لیزر را بدون اپتیک و بعد از اپتیک در ناحیه برهم کنش نشان می‌دهد.



شکل ۲: پروفایل دو بعدی شدت پرتو لیزر. الف: بدون اپتیک، ب: در ناحیه برهم کنش

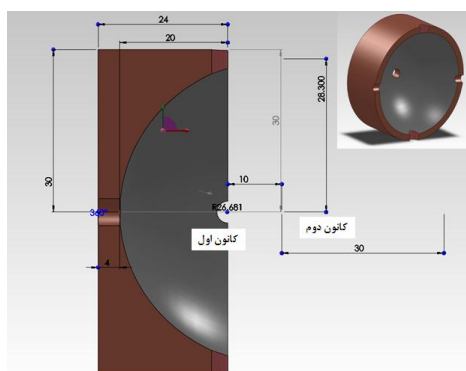


شکل ۵: پروفایل دوبعدی شدت پرتو لیزر در ناحیه برهم‌کنش با فرض جاذب نبودن بدنه روزنه‌ها و دیواره نگه دارنده قطعات اپتیکی مسیر ارسال

در شکل ۲ ب تمام ملاحظات و تصحیحاتی که بدان اشاره شد در اپتیک اعمال شده است.

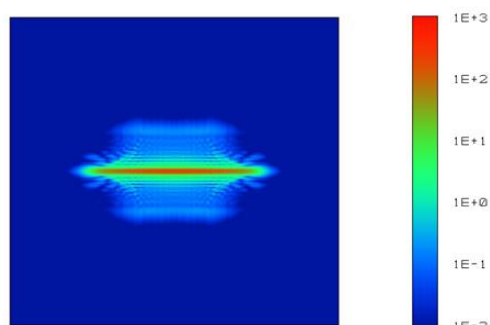
۳- اپتیک مسیر دریافت

پس از طراحی اپتیک مسیر ارسال و تعیین مکان و ابعاد پرتو لیزر در ناحیه برهم‌کنش نیاز به طراحی سیستم اپتیکی است که پراکندگی حاصل از برهم‌کنش ذرات با نور لیزر را جمع‌آوری و به سمت آشکارساز هدایت نماید. بدین منظور در اپتیک مسیر دریافت از یک عدد آینه بیضوی استفاده شد. طراحی به گونه ای انجام شد که کانون اول آینه در ناحیه برهم‌کنش قرار بگیرد و آینه پرتوهای پراکنده شده در نیم فضا را جمع‌آوری نموده و به سمت کانون دوم خود هدایت کند موقعیت قرار گیری آینه به گونه ای است که محور کانونی آینه عمود بر محور اپتیکی اپتیک مسیر ارسال باشد. محور نازل و سیال عبوری نیز عمود بر این دو محور می باشد. در شکل ۶ مشخصات آینه طراحی شده آورده شده است. جنس آینه آلومینیوم می باشد.



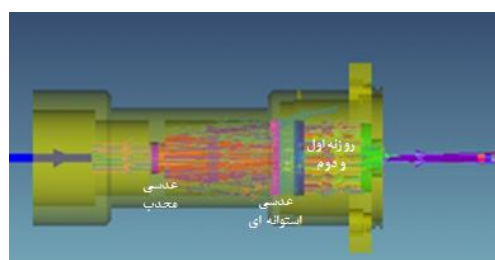
شکل ۶: مشخصات آینه بیضوی طراحی شده

توان لیزر در این ناحیه نیز ۱۳ میلی وات بدست آمد. نکته دوم که در طراحی باید به آن اشاره شود حذف پرتوهای مزاحم حاصل از بازتاب‌های داخلی پرتو لیزر از سطوح عدسی‌ها و دیواره نگه دارنده اپتیک مسیر ارسال می باشد که در اطراف پرتو اصلی در ناحیه برهم‌کنش وجود دارند. لذا به منظور حذف این نورهای مزاحم، بعد از عدسی استوانه‌ای از دو عدد روزنه مربعی استفاده شد. مکان قرارگیری و ابعاد روزنه‌ها مهم بوده و با توجه به طراحی اپتیک مسیر ارسال تعیین می‌گردد. همچنین بر روی دیواره نگه دارنده اپتیک مسیر ارسال نیز از مواد جاذب استفاده می‌شود. به علت محدودیت‌های اپتیکی حاصل از اثر پراش، نمی‌توان ابعاد روزنه‌ها را تا حد کافی کوچک نمود و این ابعاد دارای مقدار بهینه می‌باشد. برای نمونه شکل ۳ شبیه سازی اثر پراش ایجاد شده ناشی از کوچک نمودن بیش از حد روزنه دوم را در ناحیه برهم‌کنش نشان می دهد.

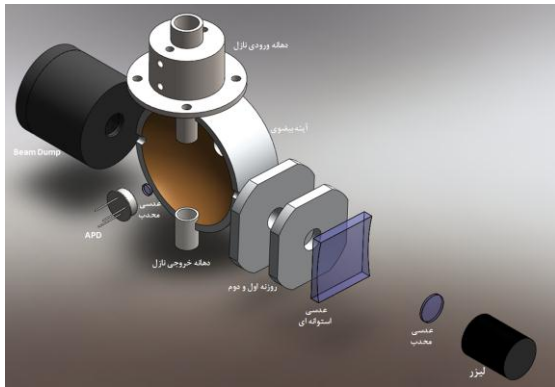


شکل ۳: اثر پراش ایجاد شده ناشی از کوچک نمودن روزنه دوم

شکل ۴ نحوه پراکندگی و بازتاب پرتوهای لیزر از سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی در سیستم اپتیک مسیر ارسال همراه روزنه با فرض جاذب نبودن بدنه روزنه‌ها و دیواره نگه دارنده قطعات اپتیکی و شکل ۵ شبیه سازی اثر این پرتوها را در ناحیه برهم‌کنش نشان می دهد.



شکل ۴: نحوه پراکندگی پرتوهای لیزر از سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی در سیستم اپتیک مسیر ارسال همراه روزنه با فرض جاذب نبودن بدنه روزنه‌ها و دیواره نگه دارنده قطعات اپتیکی مسیر ارسال.



شکل ۹: چیدمان کلی از اپتیک مسیر ارسال و دریافت به همراه نازل

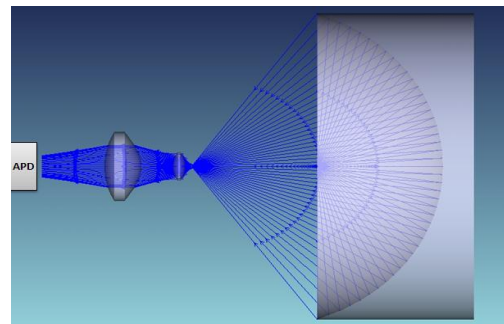
۴- نتیجه گیری

در این مقاله به شبیه سازی و طراحی اپتیک دستگاه شمارنده ذرات با ابعاد یک تا ۱۰ میکرون بر مبنای آنالیز پراکندگی پرتو لیزر از سطح ذرات اشاره شد. طراحی انجام شده از دو بخش اپتیک مسیر ارسال پرتو لیزر به ناحیه برهم کنش و اپتیک مسیر دریافت پرتو لیزر پراکنده شده از سطح ذرات و هدایت آن به سمت آشکارساز تشکیل شده است که هر دو بخش به تفصیل بررسی شد. مشخصه یابی ابعاد و تعداد ذرات عبوری از روی آنالیز دامنه سیگنال و تعداد پالس بدست آمده از آشکارساز به همراه کالیبراسیون دستگاه با یک سیستم شمارنده ذرات مرجع انجام شد. و نتایج مطلوبی بدست آمد که این نتایج صحت عملکرد سیستم اپتیک را تایید نمود.

مراجع

- [1] Adrian Doicu., *Light Scattering by Systems of Particles*, Springer, 2006
- [2] Warren J. Smith., *Modern Optical Engineering. The Design of Optical Systems*, McGraw-Hill, 2000
- [3] Bruce H. Walker., *Optical Engineering Fundamentals*, Second Edition, SPIE, 2008.
- [4] Ray Williamson., *Field Guide to Optical Fabrication*, SPIE, 2011.
- [5] www.zemax.com
- [6] Zemax user manual, 2008

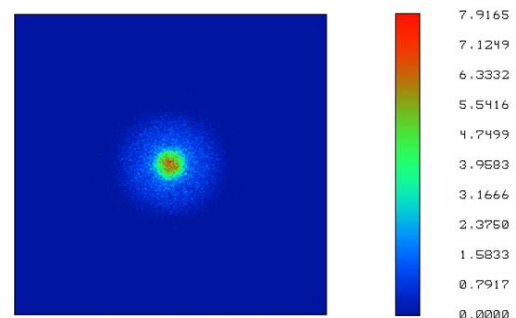
واگرایی پرتوهای کانونی شده در کانون دوم بیضی حدوداً ۱۰۰ درجه می باشد. به منظور کم نمودن این زاویه از دو عدد عدسی محدب با فواصل کانونی ۴/۵ و ۸ میلیمتر در محل کانون دوم بیضی استفاده شد تا قطر لکه جمع آوری شده در محل آشکار ساز به ۵ میلیمتر برسد. در این سیستم از یک عدد آشکارساز (Avalanche photodiode) با دهانه ورودی ۵ میلیمتر استفاده شد. شکل ۷ نحوه جمع آوری پرتوهای پراکنده شده از ناحیه برهم کنش و هدایت آن به سمت آشکار ساز را نشان می دهد.



شکل ۷: سیستم اپتیکی طراحی شده برای جمع آوری سیگنال پراکندگی

شکل ۸ شبیه سازی توزیع دو بعدی شدت جمع آوری شده در سطح آشکارساز را نشان میدهد. نتایج بدست آمده نشان میدهد که بخش اعظم انرژی در ابعادی به قطر ۵ میلیمتر جمع آوری می گردد. در این شبیه سازی سطح آشکار ساز مربعی به طول ۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۹ نیز چیدمان کلی از اپتیک مسیر ارسال و دریافت به همراه نازل و مسیر حرکت سیال گازی نشان داده شده است. در این شکل دیواره نگه دارنده المانهای اپتیکی آورده نشده.



شکل ۸: توزیع دو بعدی شدت جمع آوری شده بر روی آشکار ساز