

اندازه‌گیری میزان جذب نور ذرات جامد با آنالیزکننده جذبی به‌روش نوری چند طول موجی

امیر امینی^۱، استادیار؛ سید سجاد محمودی^۲، دانش آموخته کارشناسی ارشد

۱- گروه مهندسی برق - واحد تهران-غرب، دانشگاه آزاد اسلامی- تهران، ایران - amini@wtiau.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - واحد تهران-غرب، دانشگاه آزاد اسلامی- تهران، ایران - ss_mahmoudi@yahoo.com

چکیده: به‌منظور پایش ذرات معلق با روش نوری، نیاز است میزان جذب نور ذرات جامد با استفاده از تجهیزات ساده و ارزان اندازه‌گیری شود. در این پژوهش، یک سامانه نوری خودکار و غیرمخرب مبتنی بر روش چند طول موجی طراحی و ساخته شده است که طیف جذبی ذرات جامد را تعیین می‌کند. کالیبراسیون پاسخ‌های سامانه ساخته‌شده با دستگاه اسپکترومتر مرجع انجام، ضرایب تصحیح مورد نیاز به‌دست آمدند. با توجه به محدودبودن تعداد داده‌های نمودار شدت نور بر حسب طول موج، داده‌ها با روش درون‌یابی هرمیت افزایش داده شدند. بر خلاف روش‌های مرسوم، به‌جای منابع مختلف تولیدکننده نوری از یک منبع استفاده شده است که در آن طیف‌های مختلف نوری با فیلترهای نوری ایجاد گردید. سامانه طراحی شده قادر است طیف جذبی مواد مختلف را در گستره طول موجی $1000\text{ nm} < \lambda < 250\text{ nm}$ با دقت حدود 1 nm اندازه‌گیری کند. طیف جذبی سه نمونه از مواد با این سامانه اندازه‌گیری شده است که پاسخ‌های مشابهی در مقایسه با دستگاه مرجع نشان می‌دهد. روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های مشابه، علاوه بر دارابودن دقت بالای اندازه‌گیری، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در هزینه‌های ساخت دارد و می‌تواند به‌عنوان آنالیزکننده جذبی قابل‌حمل استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: جذب نور، ذرات جامد، طیف‌سنجی، روش چند طول موجی، حسگر ذرات معلق.

Light Absorption Measurement of Solid Particles by Absorption Analyzer using Multi-Wavelength Optical Method

A. Amini¹, Assistant Professor; S.S.Mahmoudi², MSc

1- Department of Electrical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, E-mail: amini@wtiau.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
E-mail: ss_mahmoudi@yahoo.com

Abstract: In order to monitor the particulates by optical sensor, the amount of absorbed light by particles should be measured simply and cheaply. In this research, an automated, nondestructive system is designed and fabricated using multi-wavelength method that can measure absorption spectrum of solid particles. Calibration of proposed system was also carried out by reference spectrometer and the correction coefficients were obtained. Due to scarcity of data in resulted spectrograph, Hermit interpolation was applied to improve graph resolution. Moreover, instead of utilizing different light sources with different spectrum which is currently common in this field, a wide range of light source was used with various optical filters. The proposed system can measure absorption spectrum of materials in the range of $250\text{ nm} < \lambda < 1000\text{ nm}$ with the accuracy of 1 nm . The absorption spectrum of three different samples were measured that the results show the similarity with the reference system. Comparing this high accurate optical sensing method with other similar methods reveals that the proposed system is cost-effective and can be utilized as a portable absorption analyzer.

Keywords: Light absorption, Solid particle, Spectrometry, Multi-Wavelength, Particle sensor.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۰۸، ۱۳۹۸/۰۲/۲۲ و ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

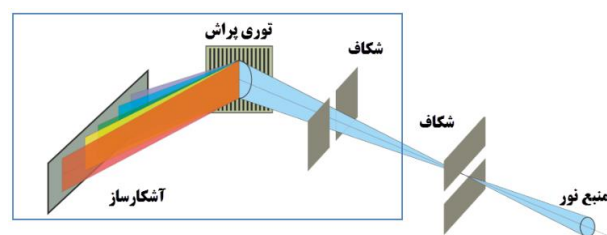
نام نویسنده مسئول: امیر امینی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - بزرگراه آیت الله اشرفی اصفهانی - خیابان آذری - دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-غرب آزمایشگاه پژوهشی حسگر.

۱- مقدمه

طیف‌سنجی^۱، اندازه‌گیری جذب و انتشار نور در طول موج‌های مختلف توسط ماده است که تکنیک‌های آن تقریباً در اکثر زمینه‌های مهندسی و پزشکی کاربرد دارد. روش‌های نوری یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تراکم ذره به‌شمار می‌رود. در این روش‌ها، تعامل ذرات با نور مثل جذب و پراکنش، به‌عنوان مبنایی برای سنجش استفاده می‌شود [۱]. ذرات کربنی بخش مهمی از ذرات معلق^۲ را تشکیل می‌دهند، برای تعیین مشخصات کمی کربن از طیف‌سنجی استفاده می‌کنند [۲، ۳]. در کاربردهای پزشکی، در روش تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI)^۳ برای تجسم بافت با تکنیک رادیویی هسته‌ای [۴]، تشخیص تومور سرطانی هیپوگسیا^۴ [۵] و اندازه‌گیری غلظت پروتئین^۵ محلول در محدوده UV از طیف‌سنجی استفاده می‌شود [۶]. طیف‌سنجی جرمی^۶ برای تعیین ساختارهای هسته‌ای در پژوهش‌های فیزیک نجوم^۷ به‌کار می‌رود [۷]. طیف‌سنجی نوری برای شناسایی ترکیب شیمیایی ماده، تعیین تراکم ذرات جامد و تعیین ساختار مولکول‌ها یا ترکیبات آلی استفاده می‌گردد [۳، ۸].

در تمامی دستگاه‌های طیف‌سنجی، نورها باید در طول موج‌های مختلف تولید شوند برای این کار چندین روش وجود دارد، می‌توان منبع نور را با استفاده از یک منشور^۸ به طیف‌های مختلف تبدیل کرده و با استفاده از یک آشکارساز انتشار نور در طیف‌های مختلف را اندازه‌گیری کرد. شایان ذکر است ساخت منشور و کالیبراسیون آن نیازمند تکنولوژی بالا و صرف هزینه زیاد است [۹، ۱۰]. روش دیگر برای تولید طیف‌های مختلف نوری استفاده از توری پراش^۹ است. چگونگی کار این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. این روش در ابزارهای اندازه‌گیری چند طول موجی مثل رادیومتر استفاده شده است. برای اندازه‌گیری طیف از فوتودیودهای مختلف استفاده شده است. در این دستگاه اندازه‌گیری، ساخت توری پراش پیچیدگی‌های زیادی دارد [۱۱، ۱۲].



شکل ۱: استفاده از توری پراش برای تولید طیف‌های نوری.

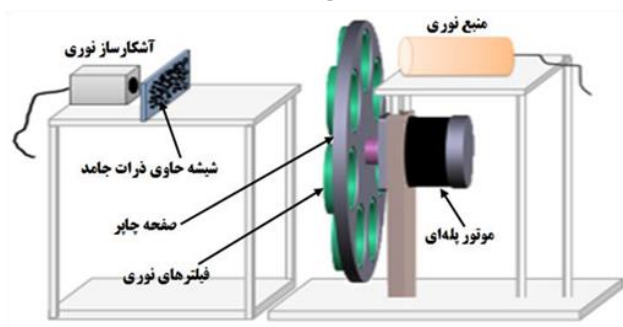
در روش سوم برای اندازه‌گیری تراکم ذرات جامد از روش اتالومتری^{۱۰} و یا نوری/حرارتی^{۱۱} استفاده می‌شود که در این روش‌ها برای تولید هر طیفی از دیود لیزر تولیدکننده همان طیف استفاده می‌شود و بنابراین چندین منبع مجزا نور مورد نیاز است. در این روش یک فیلتر فیبر کوارتز جهت انباشت ذرات جامد بین منبع و آشکارساز آرایه‌ای^{۱۲} قرار دارد که با اندازه‌گیری مقدار جذب حاصل از برخورد پرتو

با ذرات جامد روی فیلتر در هر طیف، مقدار تراکم ذرات جامد به‌دست می‌آید [۱۳، ۱۴].

در این پژوهش، برای اولین بار به‌جای استفاده از منابع متعدد نوری و یا سامانه تفکیک نوری پیشرفته، یک منبع نوری با توان یک وات به‌همراه فیلترهای نوری طراحی و ساخته شده است و همچنین از یک آشکارساز دقیق سیلیکونی در گیرنده استفاده شده است. این طراحی در بخش‌های الکترونیکی، مکانیکی، نوری و نرم‌افزاری ارائه شده است. سامانه طراحی شده قادر است طیف جذبی ذرات جامد را با دقت بالایی اندازه‌گیری نماید و دقت دستگاه با دستگاه اسپکترومتر مرجع C10083MD ساخت شرکت هماتسو^{۱۳} ژاپن مقایسه شده است [۱۵].

۲- سامانه آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش

شماتیک سامانه آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده است، این سامانه از چهار بخش کلی سخت‌افزاری منبع نوری، سیستم تفکیک نوری، شیشه حاوی ذرات جامد، آشکارساز نوری تشکیل شده است. برای تنظیم دقیق قرارگیری فیلتر نوری در مسیر پرتو نور از یک سامانه شامل موتور پله‌ای و چاپر به‌همراه قطعات جانبی استفاده گردید.



شکل ۲: شماتیک از سامانه ساخته شده.

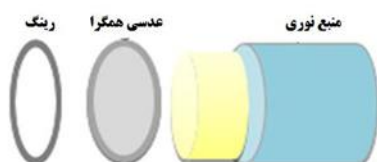
۲-۱. منبع نوری

لامپ کوارتز-هالوژن-تنگستن^{۱۴} به‌عنوان منبع نور انتخاب شده است که شدت مناسب در تمامی طیف‌های نور مرئی و مادون قرمز دارد (۲۰۰ nm تا ۳۰۰۰ nm) در شکل ۳ خروجی تابش طیفی این لامپ که در همین پژوهش توسط دستگاه رادیومتری مدل 740 ساخت شرکت آمریکائی OpTronic Laboratories Inc اندازه‌گیری شده است، نشان داده شده است. این دستگاه برای طیف‌سنجی از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر از آشکارساز سیلیکونی و برای محدوده‌های بالاتر از آشکارسازهای ژرمانیومی استفاده می‌کند. به‌منظور تابش یکنواخت منبع نور، منبع تغذیه این لامپ در ولتاژ ۴۷ و جریان ۲۵۰ mA تنظیم شده است. لذا با توجه به توان مصرفی یک وات، این منبع نوری مصرف انرژی و تولید حرارت کمی دارد.

شکل ۴ طراحی منبع نوری را نشان می‌دهد. برای طراحی این قسمت از روابط هندسه نوری استفاده شده است.

$d_2=20\text{mm}$ شدت نور کافی برای اندازه‌گیری میزان جذب ذرات به آشکارساز نوری می‌رسد.

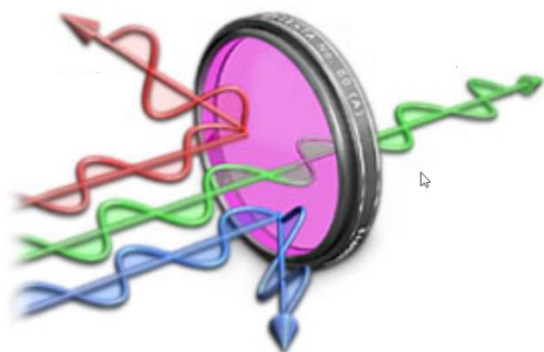
شکل ۵ اجزای منبع نور ساخته‌شده را به صورت شماتیکی و واقعی نشان می‌دهد. منبع نور در یک محفظه مخصوص فلزی از جنس آلومینیوم قرارداده شده و از عدسی همگرا شکل ۴ جهت متمرکز کردن پرتوهای نور تولیدی استفاده شده است.



شکل ۵: شماتیک اجزای منبع نور ساخته‌شده و تصویر واقعی منبع نور.

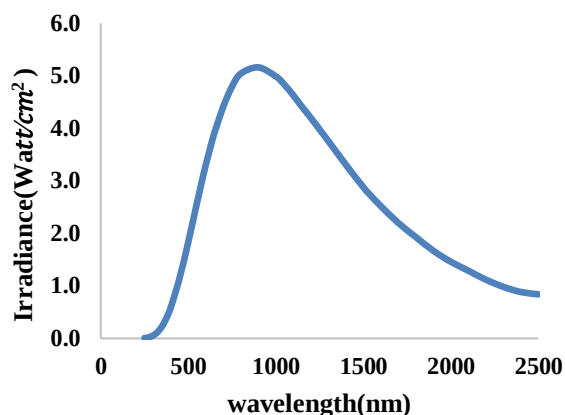
۲-۲. سیستم تفکیک نوری

برای تفکیک نور تولیدشده، از محدوده بنفش تا مادون قرمز، یک سامانه با فیلترهای نوری دوشاخه‌ای^{۱۵} یا فیلترهای تداخل^{۱۶} طراحی و ساخته شده است. طبق شکل ۶، فیلتر نوری با رد تمام طول موج‌های ناخواسته، اجازه می‌دهد تا طول موج‌های انتخاب‌شده از طریق فیلتر عبور کنند. تعداد هفت فیلتر نوری ساخت شرکت HOYO کشور ژاپن [۱۸] که شامل پنج فیلتر در محدوده طیف مرئی و دو فیلتر برای طیف‌های مادون قرمز می‌باشد، استفاده شده است. قطر این فیلترهای مرئی ۴۶mm و فیلترهای غیر مرئی کمتر می‌باشند. برای بهینه‌کردن عملکرد فیلتر برای محدوده آبی از ترکیب دو فیلتر استفاده شده است.

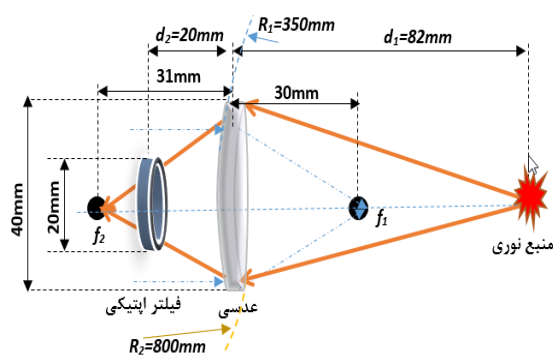


شکل ۶: شماتیکی از نحوه عملکرد یک فیلتر رنگ سبز [۱۹].

مطابق شکل ۲ در سیستم تفکیک نوری، یک صفحه چار وجود دارد که هفت فیلتر هر کدام با یک نگهدار به این صفحه متصل شده و کل صفحه توسط یک موتور پله‌ای چرخانده می‌شود و در هر لحظه یک فیلتر در مسیر پرتو منبع نور قرار می‌گیرد. موتور پله‌ای مورد استفاده، از نوع موتورهای ۶ سیمه با شماره فنی "STM-S3D204" است. این موتور در ولتاژ ۲۰V با جریان ۳A و با زاویه گام ۱/۸ درجه کار می‌کند.



شکل ۳: خروجی تابشی طیفی برای لامپ‌های رشته‌ای هالوژن-تنگستن.



شکل ۴: شماتیک نحوه طراحی منبع نوری.

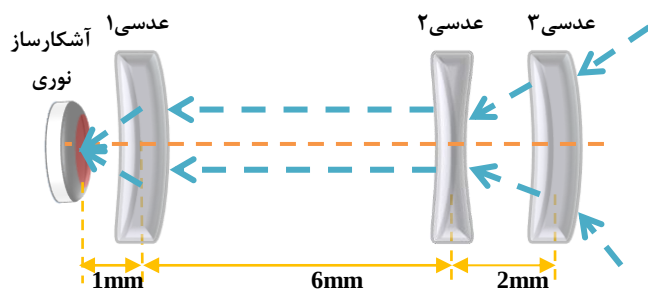
عدسی مورد استفاده یک عدسی ضخیم از جنس SF6 دارای ضریب شکست $n=1/8$ و ضخامت $t=1\text{mm}$ و شعاع $R_{R2}^{R1}=R_{80}^{35}$ می‌باشد. پارامترهای مجهول در طراحی این پیکره بندی یافتن فاصله‌های مجاز منبع نوری از عدسی و همچنین فاصله عدسی تا فیلتر نوری بوده است. برای یافتن این فاصله‌ها ابتدا بایستی نقطه‌های کانونی این عدسی را به دست آورد و برای این کار در عدسی‌های ضخیم از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۶، ۱۷]:

$$\frac{1}{f_1} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)t}{R_1 R_2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{f_2} = (n-1) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{(n-1)t}{R_1 R_2} \right) \quad (2)$$

با قراردادن مقادیر معلوم در روابط (۱) و (۲) فاصله‌های کانونی f_1 و f_2 بدست می‌آید. اگر منبع نوری دقیقاً در نقطه کانونی قرار بگیرد پرتوهای وارد شده به عدسی به صورت موازی از آن خارج می‌گردند، اما در این سامانه نیاز است پرتوهای منتشرشده از منبع نور، پس از برخورد به عدسی از کوچکترین فیلتر نوری که شعاع دهانه آن ۲۰ میلی‌متر است خارج گردند. لذا با توجه به شکل ۴، منبع نوری باید در فاصله دورتر از نقطه کانونی f_1 استقرار یابد ($d_1 > f_1$) و فیلتر نوری در فاصله نزدیکتر از نقطه کانونی f_2 قرار بگیرد ($d_2 < f_2$). برای یافتن عدد دقیق d_1 و d_2 آزمایشات تجربی انجام شد و مشاهده گردید در $d_1=82\text{mm}$ و

شده است تا با ثابت ماندن میزان تقویت، به یکنواختی آزمایش‌ها کمک کند.



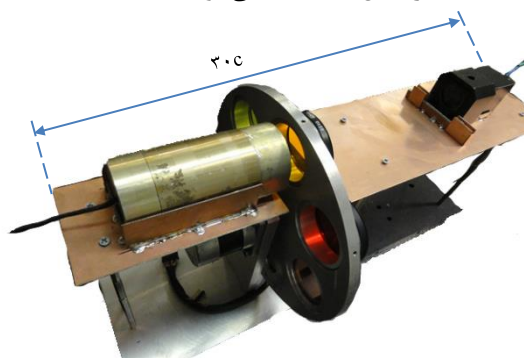
شکل ۸: شماتیک طراحی سیستم آشکارساز نوری.

۴-۲. نرم‌افزار

برای انتقال ولتاژهای خروجی آشکارساز به رایانه از یک برد میکروکنترلر آردینو مدل UNO مجهز به میکروکنترلر AVR مدل ATMEGA328P-PU با ۶ کانال ADC (مبدل آنالوگ به دیجیتال) با دقت ۱۰ بیت، استفاده شده است. ولتاژ کاری میکروکنترلر ۵ ولت بوده و محدوده ولتاژ ورودی مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال بین صفر تا ۵ ولت می‌باشد. پس از برنامه ریزی میکروکنترلر، داده‌ها با استفاده از ارتباط سریال UART از طریق پورت USB به رایانه منتقل شدند. این کار با استفاده از دستورات زیر در MATLAB قابل انجام است.

```
s = serial('COM1','BaudRate', 9600);
fopen(s);
VD = fscanf(s);
fclose(s);
```

برای تحلیل داده‌ها و کسب نتایج از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. تصویر واقعی سامانه آزمایشگاهی ساخته‌شده شامل چهار بخش توضیح داده شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود:



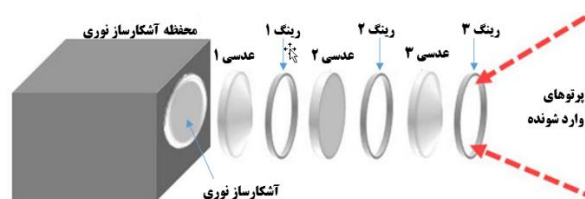
شکل ۹: تصویری از سامانه ساخته‌شده.

نحوه عملکرد این سامانه به این صورت است که ابتدا از یک منبع نوری، یک پرتو همگرا شده نور تابیده می‌شود و این نور با عبور از فیلترهای نوری از نظر طیفی تفکیک شده و در نهایت با عبور از نمونه حاوی ذرات جامد، توسط آشکارساز نوری به ولتاژ الکتریکی و با تبدیل به شدت نور به صورت I_x یا I_0 ذخیره می‌شود.

برای راه‌اندازی موتور پله‌ای از یک برد الکترونیکی که می‌تواند تعداد پله‌ها، سرعت چرخش و جهت چرخش به چپ یا راست را تنظیم کند، استفاده شده است [۲۰].

۳-۲. آشکارساز نوری

در گیرنده از یک فتودیود سیلیکونی با سطح حساس به نور $1/13 \text{ mm}^2$ ، جریان تاریکی 2 nA و محدوده طیفی 330 nm تا 1100 nm استفاده شده است [۲۱]. این آشکارساز نوری به همراه ملحقات نوری شامل سه عدسی و رینگ‌های نگهدارنده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: آشکارساز نوری به همراه ملحقات نوری.

عدسی‌های مورد استفاده در سامانه آشکارساز نوری از نوع ضخیم بوده و هر کدام دارای دو فاصله کانونی بوده و این نقاط کانونی به‌طور مشابه از روابط (۱) و (۲) به‌دست می‌آیند. در جدول ۱ مشخصات عدسی‌های $R_{33}^{15.3}$ و R_{37}^{-85} و R_{30}^{110} آمده است.

جدول ۱: مشخصات عدسی‌های مورد استفاده در سامانه آشکارساز نوری.

شماره عدسی	عدسی ۱	عدسی ۲	عدسی ۳
شعاع ۱ (mm)	۱۵۳	۸۵۰	۱۱۰۰
شعاع ۲ (mm)	۳۳۰	۳۷۰	۳۰۰
جنس	BK7	BK7	BK7
ضخامت (mm)	۴/۵	۳	۴
ضریب شکست	۱/۵	۱/۵	۱/۵
فاصله کانونی ۱ (mm)	۵۰/۶	-۱۳۵/۳	۸۵/۱
فاصله کانونی ۲ (mm)	-۶۵/۴	۱۲۷/۱	-۹۰/۴

در صورت ترکیب چند عدسی با همدیگر، فاصله کانونی دو عدسی کنار هم با کانون f_1 و f_2 و با فاصله d از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۷]:

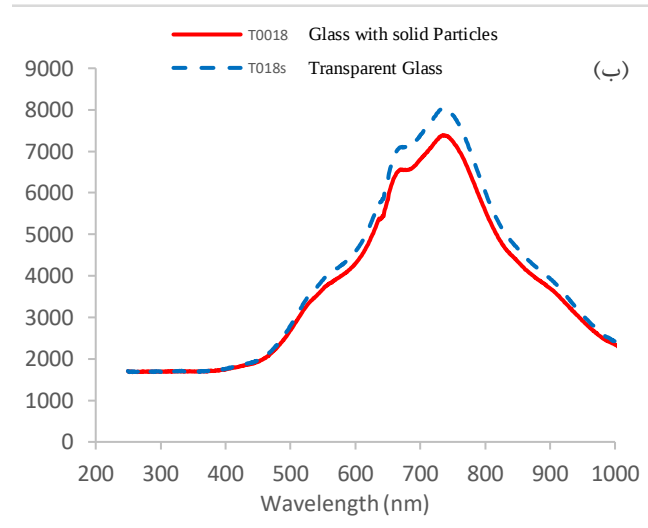
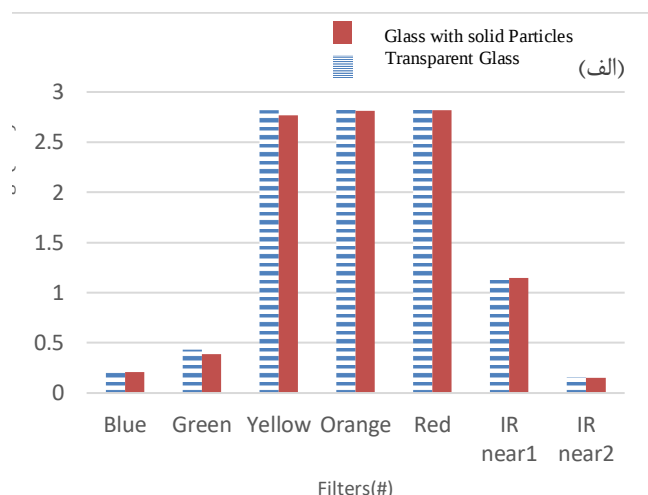
$$f_{\text{combination}} = \left[\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \right]^{-1} \quad (3)$$

با محاسبه نقاط کانونی هر عدسی و ترکیب دو عدسی بهترین حالت ممکن برای جاگذاری این سه عدسی مقابل آشکارساز نوری به‌دست می‌آید. برای جاگذاری عدسی‌ها، فاصله اندازه که همان رینگ‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۷ هستند، طراحی و ساخته شده است. در شکل ۸ نتایج این طراحی برای سامانه آشکارساز نوری آمده است.

مدار تقویت‌کننده آشکارساز (فتودیود) از یک تقویت‌کننده عملیاتی ابزار دقیق با بهره یک میلیون با مصرف جریان پایین $60 \mu\text{A}$ استفاده

۳- نمونه‌گیری

به‌منظور کالیبراسیون این پاسخ‌ها با دستگاه اسپکترومتر مرجع، در این مرحله از جدول ۲ که ضرایب آن با روش سعی و خطا به‌دست آمده، استفاده شد. به این منظور، ولتاژ خروجی تقویت‌کننده آشکارساز V_D که برای نمونه شیشه‌ای بدون حضور ذرات جامد به‌دست آمده است، با یک سری ضرایب ساده خطی مطابق جدول ۲ به پارامتر شدت نور با واحد دلخواه در اسپکترومتر مرجع تبدیل می‌شوند. ضرایب به‌گونه‌ای انتخاب شدند که پاسخ‌های سامانه در طول موج‌های مختلف به پاسخ اسپکترومتر مرجع منطبق شوند. انتخاب طول موج‌ها با استفاده از محدوده‌های طیفی هر رنگ انجام شده است.



شکل ۱۰: (الف) پاسخ آشکارساز سامانه طراحی‌شده به نمونه شیشه‌ای شفاف و حاوی ذرات جامد ناشی از دود خودروی دیزلی، (ب) مشابه الف اندازه‌گیری‌شده با دستگاه اسپکترومتری مرجع.

محدوده طیفی رنگ آبی از ۴۵۰ nm تا ۴۹۰ nm است. این محدوده برای رنگ سبز ۵۰۰ nm تا ۵۶۰ nm، رنگ زرد ۵۷۰ nm تا ۵۹۰ nm، رنگ نارنجی ۶۰۰ nm تا ۶۲۰ nm، رنگ قرمز ۶۶۸ nm تا ۷۳۷ nm، محدوده R1 ۷۹۰ nm تا ۱۰۰۰ nm و در نهایت محدوده IR2 از ۹۴۰ nm تا ۱۰۲۰ nm

برای نمونه‌گیری از شیشه‌های فیبر کوارتز که هیچ جذب نوری از خود ندارند استفاده شده است، ابعاد نمونه شیشه‌ای $8 \times 2/5 \text{ cm}^2$ با ضخامت ۱ mm است. این شیشه‌های تمیز در شرایط یکسانی در معرض ذرات معلق یا جامد ناشی از منابع مختلف آلاینده قرار می‌گیرد و ذرات روی آن انباشته می‌شود. سپس در جای مخصوص خود در سامانه در مسیر پرتو بین فیلترهای نوری و آشکارساز قرار داده می‌شود. با قراردادن هر نمونه شیشه‌ای حاوی ذرات جامد در مسیر پرتو نور در تمامی هفت گستره طیفی، مقادیر ولتاژ خروجی گیرنده آشکارساز به‌صورت آرایه‌ای با هفت درایه پس از انجام پردازش با نام I_{λ} ذخیره می‌شود. بنابراین با تکرار آزمایش مذکور با نمونه شیشه‌ای تمیز (بدون ذرات جامد) $I_{\lambda 0}$ به‌دست‌آمده و نهایتاً داده‌های I_{λ} و $I_{\lambda 0}$ در یک ماتریس 2×7 قرار می‌گیرند. در صورت تکرار N آزمایش برای نمونه‌های شیشه‌ای با ذرات جامد گوناگون، به‌همراه آزمایش بدون حضور ذرات جامد، تعداد $N+1$ آزمایش انجام می‌شود که ماتریس $(N+1) \times 7$ را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش سه نمونه ذرات جامد ناشی از سوخت موتور دیزلی، سوخت استات و ذرات جامد ناشی از سوختن یک نوع چائی تجاری مورد طیف‌سنجی و تحلیل جذبی قرار گرفته است.

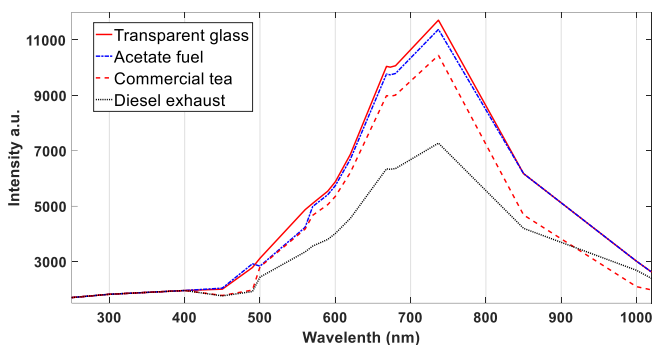
۴- نتایج و بحث

در شکل ۱۰-الف پاسخ اولیه سامانه برای آزمایش نمونه شیشه‌ای حاوی ذرات جامد ناشی از دود یک خودرو دیزلی مشاهده می‌شود که به‌ازای هر گستره طیفی که متناظر با قرارگیری یک فیلتر در مسیر نور منبع است، دو مقدار ولتاژ آشکارساز ثبت شده است. ولتاژ بیشتر برای تست بدون وجود ذرات جامد روی نمونه شیشه‌ای و ولتاژ کمتر برای تست با وجود ذرات جامد ثبت شده است. به‌طور مشابه، با استفاده از دستگاه مرجع اسپکترومتری برای همان نمونه دود خودروی طیف‌سنجی انجام شد که در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است.

طیف منبع نور اندازه‌گیری‌شده با دستگاه رادیومتر و دستگاه اسپکترومتر مرجع به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۱۰-ب نشان داده شده است. این اختلاف به حساسیت آشکارساز دستگاه‌ها مرتبط است. در دستگاه رادیومتر از چندین آشکارساز از جنس‌های سیلیکن و ژرمانیوم و ... استفاده شده است که محدوده طیفی ۲۵۰ nm تا ۲۵۰۰ nm را می‌توانند آشکارسازی کنند. در دستگاه اسپکترومتر تنها یک آشکارساز ثابت سیلیکونی وجود دارد که محدوده آن از ۲۵۰ nm تا ۱۰۰۰ nm می‌باشد. هدف از ارائه گراف طیفی شکل ۳ نمایش گستره طیفی منبع نوری بود. با مقایسه دو شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب، ملاحظه می‌گردد که خروجی سامانه آزمایشگاهی تا حدودی مشابه خروجی اسپکترومتر مرجع است و اندکی نیاز به اصلاح دارد. این اختلاف به‌دلیل استفاده از فیلترهای تجاری در سامانه پیشنهادی می‌باشد که دارای باند طیفی خیلی باریک نیستند.

۵۶۰	۴۲۳۸	۴۱۱۲	۳۹۲۱
۵۷۰	۴۹۸۸	۴۶۱۴	۴۵۳۴
۵۹۰	۵۴۱۳	۴۹۹۱	۴۹۰۱
۶۰۰	۵۷۳۹	۵۲۹۳	۵۰۴۲
۶۲۰	۶۶۹۵	۶۱۴۴	۵۸۳۴
۶۶۸	۹۷۶۸	۸۸۷۸	۷۵۴۲
۶۷۳	۹۷۴۰	۸۸۵۳	۷۵۲۲
۶۸۰	۹۷۹۰	۸۸۹۷	۷۵۵۸
۷۳۷	۱۱۳۸۰	۱۰۳۱۲	۸۷۱۰
۸۵۰	۶۱۷۵	۵۲۰۵	۴۶۸۳
۱۰۰۰	۳۰۱۲	۲۰۹۴	۲۶۸۴
۱۰۲۰	۲۶۲۱	۱۹۷۶	۲۳۹۱

در شکل ۱۱ نتایج نمونه‌های ذکر شده بعد از اعمال ضرایب تصحیح نشان داده شده است.



شکل ۱۱: طیف دریافت‌شده در گیرنده سامانه آزمایشگاهی برای سه نمونه شیشه‌ای حاوی ذرات جامد مختلف بعد از اعمال ضرایب تصحیح.

پس از این مرحله، برای هر نمونه در ۱۸ طول موج، میزان شدت نور به‌دست آمده است. سپس برای افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، با استفاده از روش درون‌یابی و یافتن تابع ریاضی برازش‌شده به ۱۸ نقطه می‌توان تعداد نقاط را به‌صورت دلخواه افزایش داد. در این پژوهش برای رسیدن به دقت اسپکترومتر مرجع، تعداد نقاط از ۱۸ به ۱۰۲۴ افزایش داده شده تا یک گراف طیفی با دقت حدود یک نانومتر به‌دست آید. روش درون‌یابی که در این پژوهش استفاده گردید، روش درون‌یابی چند جمله‌ای تکه‌ای مکعبی هرمیت^{۱۸} است [۲۱، ۲۲].

در روش درون‌یابی هرمیت، فرض می‌شود مقدار تابع شدت نور I بر حسب طول موج‌های $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{17}$ به‌دست آمده است. برای درون‌یابی این تابع، باید تابع چندجمله‌ای p را طوری پیدا کرد که برای هر طول موج $\lambda_0 \leq \lambda_i \leq \lambda_{17}$ شرایط زیر برقرار باشد:

$$p(\lambda_i) = I(\lambda_i) \quad \text{و} \quad p'(\lambda_i) = I'(\lambda_i) \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۴)، در مجموع $36 = 18 \times 2$ شرط وجود دارد، لذا باید درجه p حداقل برابر ۳۵ باشد. بنابراین چندجمله‌ای p به‌صورت رابطه (۵) خواهد بود که در آن A_i و B_i چندجمله‌ای‌هایی از درجه حداکثر ۳۵ هستند:

$$p(\lambda) = \sum_{i=0}^{17} A_i I(\lambda_i) + \sum_{i=0}^{17} B_i I'(\lambda_i) \quad (5)$$

که A_i و B_i می‌بایست در شرایط (۶) و (۷) صدق کنند:

$$p(\lambda) = I(\lambda_i) = \begin{cases} A_i(\lambda_j)=1 & i=j \\ A_i(\lambda_j)=0 & i \neq j \end{cases} \quad B_i(\lambda_j) = 0 \quad (6)$$

می‌باشد. از گراف استاندارد دستگاه مرجع (شکل ۱۰-ب) اطلاعات شدت نور در طول موج‌های مذکور، استخراج می‌گردد.

جدول ۲ در واقع تعداد ۱۸ طول موجی را نشان می‌دهد که داده‌های شدت نور اسپکترومتر مرجع برای آنها استخراج شده است. علت زیادبودن تعداد طول موج‌های طیف رنگ قرمز (۶۶۸nm تا ۷۳۷nm) در جدول ۲، وجود تغییرات زیاد منحنی در این محدوده می‌باشد. با در نظرگرفتن مقدار شدت نور شکل ۱۰-ب در ۱۸ طول موج و مقادیر ولتاژهای آشکارساز برای هفت فیلتر، ضرایبی برای تبدیل خروجی سامانه آزمایشگاهی به مقادیر شدت نور استخراج شده، به‌دست آمد. جدول ۲ این ضرایب تصحیح را برای هر طول موج مشخص کرده است.

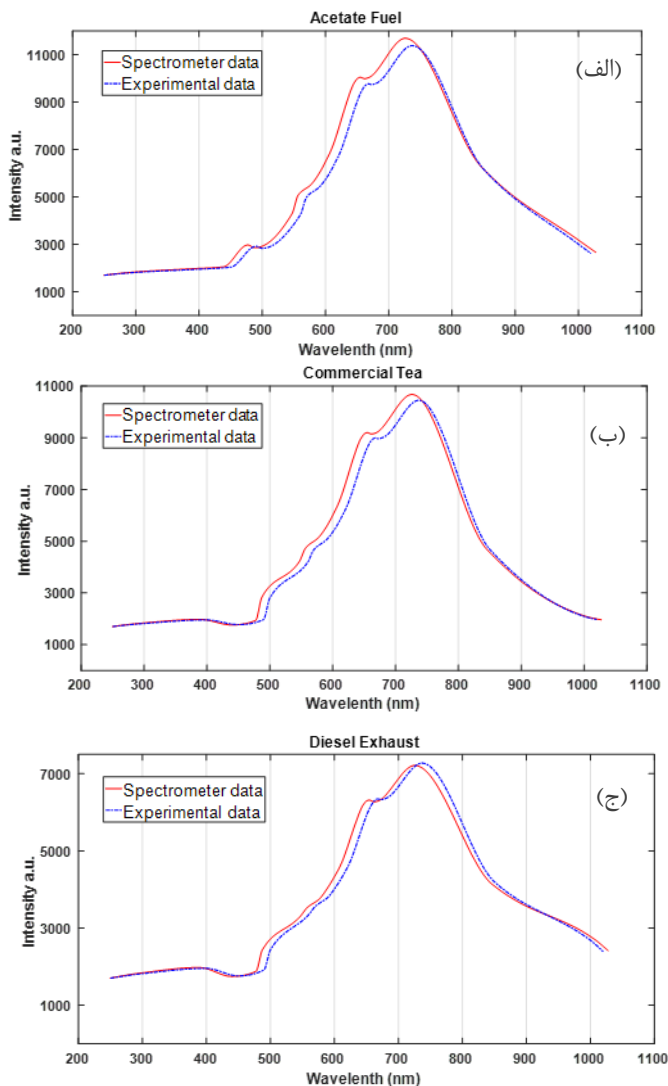
جدول ۲: ضرایب تصحیح مقادیر خروجی آشکارساز جهت تبدیل به شدت نور اندازه‌گیری‌شده با دستگاه مرجع برای نمونه شیشه‌ای بدون حضور ذرات جامد.

$\lambda(\text{nm})$	Intensity		
۲۵۰	۰	+	۱۷۰۰
۳۰۰	۱۱۹	+	۱۷۰۰
۴۰۰	۲۵۵	+	۱۷۰۰
۴۵۰	$1122 \times V_D(b)$	+	۱۷۰۰
۴۹۰	$4015 \times V_D(b)$	+	۱۷۰۰
۵۰۰	$2838 \times V_D(g)$	+	۱۷۰۰
۵۶۰	$6346 \times V_D(g)$	+	۱۷۰۰
۵۷۰	$1134 \times V_D(y)$	+	۱۷۰۰
۵۹۰	$1280 \times V_D(y)$	+	۱۷۰۰
۶۰۰	$1393 \times V_D(o)$	+	۱۷۰۰
۶۲۰	$1722 \times V_D(o)$	+	۱۷۰۰
۶۶۸	$2782 \times V_D(r)$	+	۱۷۰۰
۶۷۳	$2772 \times V_D(r)$	+	۱۷۰۰
۶۸۰	$2790 \times V_D(r)$	+	۱۷۰۰
۷۳۷	$3338 \times V_D(r)$	+	۱۷۰۰
۸۵۰	$3729 \times V_D(IR1)$	+	۱۷۰۰
۱۰۰۰	$6560 \times V_D(IR2)$	+	۱۷۰۰
۱۰۲۰	$4605 \times V_D(IR2)$	+	۱۷۰۰

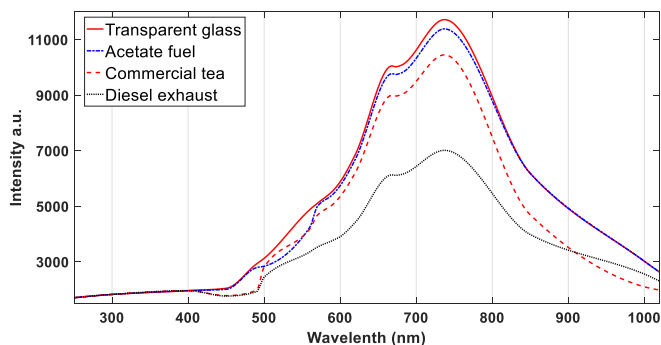
ضرایب تصحیح‌کننده برای سه نمونه شیشه‌ای حاوی ذرات جامد ناشی از سوخت موتور دیزل، سوختن چای تجاری و سوخت استات مشابه جدول ۲ می‌باشند. با تغییر مقدار ولتاژ آشکارساز V_D در طیف‌های مختلف در این نمونه‌ها، نتایج جدول ۳ به‌دست می‌آید.

جدول ۳: مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سامانه آزمایشگاهی پس از اعمال ضرایب تصحیح برای سه نمونه شیشه‌ای حاوی ذرات جامد مختلف.

$\lambda(\text{nm})$	Intensity a.u.		
	Acetate Fuel	Commercial Tea	Diesel Exhaust
۲۵۰	۱۷۰۰	۱۷۰۰	۱۷۰۰
۳۰۰	۱۸۱۹	۱۸۱۹	۱۸۱۹
۴۰۰	۱۹۵۵	۱۹۵۵	۱۹۵۵
۴۵۰	۲۰۴۱	۱۷۷۲	۱۷۷۶
۴۹۰	۲۹۲۰	۱۹۵۸	۱۹۷۱
۵۰۰	۲۸۳۵	۲۷۷۸	۲۶۹۳



شکل ۱۲- مقایسه گراف طیفی دستگاه اسپکترومتر مرجع و سامانه آزمایشگاهی پس از اعمال مراحل پردازش داده روی ولتاژ آشکارساز برای نمونه شیشه‌ای حاوی ذرات جامد ناشی از الف: سوخت استات، ب- دود سوختن چای تجاری، ج- دود سوخت موتور دیزل.



شکل ۱۳: مقایسه میزان جذب سه نمونه مختلف ذرات جامد پس از اعمال مراحل پردازش روی ولتاژ آشکارساز.

$$p'(\lambda_i) = I'(\lambda_i) = \begin{cases} B_i(\lambda_j)=1 & i=j \\ B_i(\lambda_j)=1 & i \neq j \end{cases} A'_i(\lambda_j) = 0 \quad (7)$$

می‌توان B_i و A_i ها را به کمک چند جمله‌ای‌های لاگرانژ، به صورت روابط (۸) و (۹) در نظر گرفت:

$$A_i(\lambda) = \gamma_i(\lambda)L_i^2(\lambda) \quad (8)$$

$$B_i(\lambda) = \delta_i(\lambda)L_i^2(\lambda) \quad (9)$$

چون درجه $L_i^2(\lambda)$ برابر ۳۴ است، لذا $\gamma_i(\lambda)$ و $\delta_i(\lambda)$ درجه یک هستند. فرض کنیدکه:

$$\gamma_i(\lambda) = a_i(\lambda) + b_i \quad (10)$$

$$\delta_i(\lambda) = c_i(\lambda) + d_i \quad (11)$$

با توجه به شرایط و روابط (۴) و (۵) می‌توان دید که:

$$a_i = -2L'_i(\lambda_i) \quad (12)$$

$$b_i = 1 + 2\lambda_i L'_i(\lambda_i) \text{ و } c_i = 1 \text{ و } d_i = -\lambda_i$$

$$(13)$$

با جای‌گذاری روابط اخیر، $p(\lambda)$ در رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$p(\lambda) = \sum_{i=0}^{17} [1 - 2(\lambda - \lambda_i)L'_i(\lambda_i)]L_i^2(\lambda)I(\lambda_i) + \sum_{i=0}^{17} (\lambda - \lambda_i)L_i^2(\lambda)I'(\lambda_i) \quad (14)$$

همان $p(\lambda)$ چند جمله‌ای درون‌یاب هرمیت می‌باشد که می‌توان از آن به تعداد دلخواه مقادیر $I(\lambda)$ استخراج نمود. این محاسبات با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با دستورات زیر انجام گردید.

$$\lambda_{new} = \text{linspace}(250, 1020, 1024); \quad (15)$$

$$p(\lambda) = \text{interp1}(\lambda, I(\lambda), \lambda_{new}, 'pchip'); \quad (16)$$

بنابراین با دریافت پایگاه داده با ۱۸ طول موج، می‌توان شدت طیف خروجی را با ۱۰۲۴ طول موج نشان داد و به دقت کمتر از ۱nm رسید. به‌منظور نمایش میزان تطابق خروجی ولتاژ آشکارساز سامانه آزمایشگاهی پس از اعمال ضرایب تصحیح و روش درون‌یابی مطرح‌شده با خروجی دستگاه اسپکترومتر مرجع، میزان جذب هر سه نمونه در شکل ۱۲ مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، پاسخ‌های به‌دست آمده دارای مشابهت بسیار زیادی با گراف‌های دستگاه مرجع دارد و طیف ذرات جامد با دقت یک نانومتر به‌دست آمده است و می‌توان با استفاده از این روش و با همین ضرایب تصحیح، طیف سایر ذرات جامد را نیز به‌دست آورد.

شکل ۱۳ خروجی آشکارساز پردازش‌شده سامانه پیشنهادی را برای سه نمونه مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده است تا تفاوت در میزان جذب ذرات جامد مختلف را نشان دهد.

سامانه ساخته‌شده قادر است طیف جذبی مواد مختلف را در گستره طول موجی $1000\text{ nm} > \lambda > 250\text{ nm}$ با دقت حدود 1 nm اندازه‌گیری کند. این دستگاه فقط یک‌بار نیاز دارد تا توسط دستگاه کالیبراسیون مرجع با نمونه شیشه‌ای بدون ذرات جامد کالیبره شود و پس از آن، می‌تواند میزان جذب ذرات جامد را نشان دهد. برای نمایش عملکرد صحیح سامانه، طیف جذبی سه نمونه از مواد مختلف اندازه‌گیری شد که پاسخ‌های مشابهی در مقایسه با دستگاه مرجع نشان می‌دهد. این سامانه در مقایسه با دستگاه‌های مشابه علاوه بر داشتن دقت زیاد اندازه‌گیری، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در هزینه‌های ساخت دارد و می‌تواند در آینده به‌عنوان طیف‌سنج قابل حمل استفاده گردد. همچنین با توجه به گستره طیفی منبع نور یک واتی مورد استفاده، در صورت اضافه کردن چند آشکارساز ژرمانیومی و فیلترهای محدوده مادون قرمز که در داخل کشور قابل دسترس و یا حتی قابل ساخت است، گستره اندازه‌گیری طیفی این سامانه می‌تواند تا ۳۰۰۰ نانومتر نیز افزایش پیدا کند.

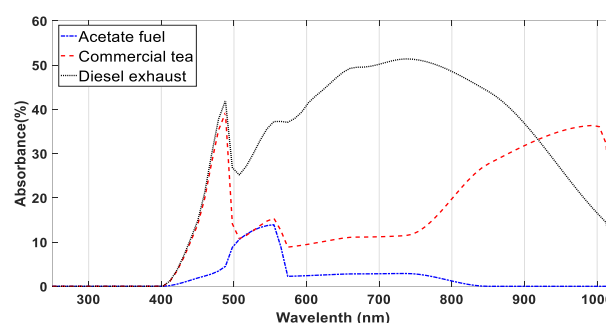
مراجع

- [1] B. Giechaskiel, M. Maricq, L. Ntziachristos, C. Dardiotis, X. Wang, H. Axmann, A. Bergmann and W. Schindler, "Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number", Journal of Aerosol Science., vol. 67, pp. 48–86, 2014.
- [2] D. Massabò, V. Bernardoni, M. C. Bove, A. Brunengo, E. Cuccia, A. Piazzalunga, P. Prati, G. Valli, and R. Vecchi, "A multi wavelength optical setup for the characterization of carbonaceous particulate matter". Journal of Aerosol Science., vol. 60, pp.34–46, 2013.
- [3] راستی، مطلوب و رستمی، «مدل‌سازی و امکان‌سنجی شناسایی ریزگردهای آلاینده هوا مبتنی بر طیف‌سنجی تهراتر در حوزه زمان»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، صفحات ۱۴۳۰–۱۴۲۲، زمستان ۹۶.
- [4] اکبرپور و دانشور، «افزایش کیفیت ادغام تصاویر PET و MRI با استفاده از ترکیب موجک گابور و مدل شبکه‌ای»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، صفحات ۸۵–۷۴، زمستان ۹۴.
- [5] S. Dadgar, J. R. Troncoso and N. Rajaram, "Optical spectroscopic sensing of tumor hypoxia", Journal of Biomedical Optics, vol. 23, Issue 67, pp. 1-6, 2018.
- [6] J. M. Antosiewicz and D. Shugar, "UV-Vis spectroscopy of tyrosine side-groups in studies of protein structure. Part 2: selected applications", Biophysical Reviews, vol.8, Issue 2, pp. 163–177, 2016.
- [7] Y. H. Zhang, Y. Litvinov, T. Uesaka and H. S. Xu, "Storage ring mass spectrometry for nuclear structure and astrophysics research", Physica Scripta, vol.91, pp. 1-21, 2016.
- [8] A. M. Kellerman, D. N. Kothawala and T. Dittmar, "Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics", Nature Geoscience, pp.454-457, 2015.
- [9] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*, Wiley, 2008.
- [10] R. Zhang, A. Bayaneshig, L. Yin, X. Li, J. Cui, J. Yang and C. Sun, "Wavelength calibration model for prism-type echelle spectrometer by reversely solving prism's refractive index in real time", Applied Optics vol. 55, Issue 15, pp. 4153-4158, 2016.
- [11] C. Palmer, *Diffraction grating handbook*, Newport Corporation, New York, USA, 2005.
- [12] M. Makita, P. Karvinen, V.A. Guzenko, N. Kujala, P. Vagovic and C. David, "Fabrication of diamond diffraction gratings for experiments with intense hard x-rays", Microelectronic Engineering, vol. 176, pp. 75-78, 2017.

میزان جذب نور توسط ذرات اغلب با پارامتری بنام تضعیف^{۱۹} اندازه‌گیری می‌شود. اگر I_0 و I_λ به ترتیب به‌عنوان شدت نور انتقال یافته قبل و بعد از حضور ذرات جامد در مسیر انتقال نور در سامانه در نظر گرفته شود، به‌عنوان تضعیف نوری و به‌منظور محاسبه میزان جذب نوری مطابق رابطه (۱۷) تعریف می‌شود.

$$ATN = 100 * \ln(I_0/I_\lambda) \quad (17)$$

به‌منظور بهبود راحتی مقایسه و افزایش اختلاف شدت نور بین فیلتر پر و خالی از ذرات جامد ضریب ۱۰۰ در این رابطه برای اندازه‌گیری چگالی نوری انتقال اعمال شده است [۱۳، ۱۴]. مقدار جذب برای سه نمونه مورد آزمایش در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: درصد جذب اندازه‌گیری‌شده برای سه نمونه حاوی ذرات جامد مورد آزمایش.

برای مقایسه سامانه ساخته‌شده با سایر نمونه‌های مشابه که قابلیت تحلیل داشته باشند در جدول ۴ سه نمونه از دستگاه‌های مشابه چینی آمده است.

جدول ۴: مقایسه ابعاد و هزینه سامانه با دستگاه‌های مشابه [۲۳].

نام مدل	کارخانه و کشور سازنده	قیمت (دلار)	محدوده طیفی (نانومتر)	ابعاد (سانتی متر)
سامانه ساخته شده	Iran	۱۰۰۰	۲۵۰-۱۰۰۰	۲۳×۲۳×۳۰
Portable Spectrometer UV-6300 color	Shaanxi Roctec Technology, China	۸۰۰۰-۱۰۰۰۰	۱۹۰-۱۱۰۰	۲۰×۴۵×۶۰
Digital Single-Beam UV-VIS Spectrometer	A & E Lab Instruments (Guangzhou) China	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۱۹۰-۱۱۰۰	۴۶×۶۶×۸۶
Optical emission spectrometer advantage	Wuxi Jiebo Electrical Technology, China	۱۵۰۰۰-۳۵۰۰۰	۱۳۰-۶۵۰	۹۲×۷۵×۱۱۲
HOPOO spectrometer HP8000S	Hangzhou Hopoo Optoelectronics Technology, China	۳۱۰۰-۳۸۰۰	۲۰۰-۱۰۵۰	۲۸×۵۳×۵۷

۵- نتیجه‌گیری

- [17] Borernan, Glenn. D, *Basic electro-optics for electrical engineers*, Spie optical engineering press, 1998.
- [18] Optical Filters, <http://www.hoya.co.jp>.
- [19] H. A Macleod, *Thin-Film optical filters*, Thin Film Center Inc. Tucson, Arizona, Taylor and Francis Group, New York, 2010.
- [20] Hamamatsu Photonics. <https://www.hamamatsu.com>.
- [21] F. N. Fritsch and R. E. Carlson, "Monotone Piecewise Cubic Interpolation", *J. Siam Numerical Analysis*, vol. 17, pp. 238-246, 1980.
- [22] D. Kahaner, C. Moler and S. Nash, *Numerical methods and software*, Prentice Hall, 1989.
- [23] Global Trade, <https://www.alibaba.com>
- [13] A. D. Hansen, *The aethalometer*, Magee Scientific Company Berkeley, California, USA, 2005.
- [14] L. Chen, J. Chow, X. L. Wang, J. A. Robles, B. Sumlin, D. Lowenthal, R. Zimmermann and J. G. Watson, "Multi-wavelength optical measurement to enhance thermal/optical analysis for carbonaceous aerosol". *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 8, pp. 451-461, 2015.
- [15] Mini-Spectrometer Series, C10083MD, <https://www.hamamatsu.com>
- [16] F. G. Smith, T. A. King and D. Wilkins, *Optics and photonics: An Introduction*, Wiley, 2009.

زیرنویس‌ها

- 1 Spectrometry
- 2 Particle matter
- 3 Magnetic resonance imaging (MRI)
- 4 Hypoxia
- 5 Protein concentration
- 6 Mass spectrometry
- 7 Astrophysics research
- 8 Prism
- 9 Diffraction-grating
- 10 Aethalometer
- 11 Thermal/optical analysis
- 12 Detector array
- 13 Hamamatsu
- 14 Quartz-halogen-tungsten
- 15 Dichroic band pass filters
- 16 Interference filter
- 17 Dark current
- 18 Piecewise cubic Hermite interpolating polynomial (PCHIP)
- 19 Attenuation