

طراحی و ساخت سامانه اندازه‌گیر ذره‌ها به روش پویش تحرک برای تعیین توزیع اندازه ذره‌های آئروسل

ابراهیم عابدینی*⁺، کرامت بهمنی قائم، مهدی تاراسی، سید محمد ابطحی، حسین شادمان

دانشکده شیمی کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده: در این پژوهش، سامانه اندازه‌گیر ذره‌ها به روش پویش تحرک ساخته شد و برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره‌های آئروسل زیر میکرون استفاده شد. طیف سنج SMPS به صورت گسترده به عنوان یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه اندازه‌گیری به طور معمول برای اندازه‌گیری دقیق اندازه ذره‌های نانومتری محلول در مایع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. SMPS از اتصال دستگاه‌های اتمایزر، خنثی‌ساز بار ذره‌ها، آنالیزکننده تحرک دیفرانسیلی و ذره‌شمار تراکمی ساخته می‌شود. هر کدام از دستگاه‌های این سامانه به صورت مجزا طراحی و ساخته شد و سپس آزمایش‌های اولیه انجام شد. در مرحله بعد همه دستگاه‌ها به هم متصل شده و سامانه SMPS را تشکیل دادند. در این سامانه، ذره‌های نمونه نخست توسط اتمایزر اسپری شد سپس رطوبت آن‌ها توسط خشک‌کن نفوذی حذف شد و ذره‌های آئروسل اتمیزه شده به درون خنثی‌ساز بار ذره‌ها جریان یافت. ذره‌های آئروسل در زمان عبور از خنثی‌ساز، توزیع بار مشخصی پیدا کردند. سپس جریان آئروسل در یک ولتاژ انتخابی به وسیله DMA جداسازی شده تا ذره‌ها با اندازه مشخص استخراج شود. ذره‌های خروجی از DMA به سمت ذره‌شمار تراکمی هدایت شدند تا به صورت تک تک شمارش شوند و توزیع اندازه ذره‌ها به صورت تعداد بر حسب قطر آن‌ها ترسیم شود. برسنجی SMPS به وسیله ذره‌های تک اندازه ۱۰۰ نانومتری انجام شد. این روش مستقل از ضریب شکست ذره‌ها و مایع حلال می‌باشد و از دقت اندازه‌گیری و تکرارپذیری بالایی برخوردار می‌باشد. تفکیک پذیری بالای داده‌ها تا ۲۵۰ کانال، بازه‌ی گسترده اندازه (از ۱nm تا ۱۰۰۰nm)، اندازه‌گیری سریع (توزیع اندازه کامل در ۱۰ دقیقه) و بازه‌ی غلظت گسترده از ۱ تا 10^7 ذره/cm³ از جمله برتری‌های این دستگاه نسبت به سامانه‌های موجود می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سامانه اندازه‌گیر ذره‌ها به روش پویش تحرک؛ آنالیزکننده تحرک دیفرانسیلی؛ ذره‌شمار تراکمی؛ خنثی‌ساز بار ذره‌ها؛ اتمایزر.

KEYWORDS: Scanning mobility particle sizer; Differential mobility analyzer; Condensation particle counter; Neutralizer; Atomizer.

مقدمه

کشور ما نیز دارای شهرهای صنعتی زیادی است که مشکل آلودگی هوا، یکی از مشکل‌های اساسی مردم این شهرها به شمار می‌رود.

همگام با صنعتی شدن کشورهای ریز آلاینده تولید ذره‌های ریز آلاینده افزایش یافته و باعث آلوده شدن هوای شهرهای صنعتی شده است.

*E-mail: e.abedini@must-es.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

به مخزن بر می‌شود و ذره‌های اتمیزه شده به همراه هوای فشرده مرطوب از خروجی بالای اتمایزر خارج می‌شود. پس از اتمیزه کردن محلول و تبخیر حلال از قطره‌های محلول توسط خشک‌کن نفوذی، آئروسل‌ی از مواد اصلی به دست می‌آید (شکل ۱).

این روش از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است، زیرا هر دو ذره‌های جامد و مایع می‌توانند تولید شوند و اندازه‌ی ذره‌های آئروسل می‌تواند به وسیله تغییر غلظت محلول به آسانی تغییر کند. [۴]

آنالیز کننده تحرک دیفرانسیلی

آنالیز کننده تحرک دیفرانسیلی (DMA) یکی از عمومی‌ترین دستگاه‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری اندازه ذره‌های آئروسل با قطر ۱ nm تا ۱ μm بر پایه تحرک الکتریکی آن‌ها می‌باشد. تحرک الکتریکی (Z_p) به صورت سرعت ثابت و محدود یک ذره باردار (v) در میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی E تعریف می‌شود.

$$Z_p = \frac{v}{E} \quad (1)$$

تحرک الکتریکی به طور عمده تابعی از قطر و تعداد بار ذره می‌باشد. براساس معادله (۲) تحرک الکتریکی با قطر ذره رابطه وارون دارد.

$$Z_p = \frac{neC}{3\pi\mu d} \quad (2)$$

Z_p تحرک الکتریکی، n تعداد بار بر روی ذره، e بار پایه، C ضریب تصحیح کابینگهام^(۱) μ گرانیوی دینامیکی هوا و d قطر ذره می‌باشد. [۵]

DMA از یک پوسته استوانه‌ای که یک میله فلزی در مرکز آن قرار داده شده است تشکیل می‌شود و همان‌گونه که در شکل ۲ نمایش داده شده است هوای تمیز بین پوسته استوانه‌ای و میله فلزی جریان می‌یابد و آئروسل نیز از کنار دیواره وارد می‌شود. [۶]

بین پوسته استوانه‌ای (الکتروود بیرونی) و میله فلزی (الکتروود درونی) اختلاف ولتاژ اعمال می‌شود که باعث ایجاد میدان الکتریکی بین آن‌ها می‌شود. ذره‌های باردار با بار مخالف علامت ولتاژ اعمال شده به میله در اثر میدان الکتریکی منحرف می‌شوند و به میله برخورد می‌کنند. ذره‌ها با تحرک مشخصی از شکاف پایین میله عبور می‌کنند که با تغییر ولتاژ اعمال شده می‌توان ذره‌های با تحرک الکتریکی گوناگون را جدا نمود و اندازه ذره‌ها را با استفاده از معادله (۲) و از روی تحرک الکتریکی آن‌ها محاسبه نمود [۷].

افزون بر این، پدیده دیگری که در چند سال اخیر در کشور مشکل‌ساز شده است پدیده ریزگردها می‌باشد که بسیاری از استان‌ها را دربرگرفته است. افزون بر تأثیرهای آلودگی هوا و ذره‌های معلق روی محیط زیست و فراورده‌های کارخانه‌ای، مهم‌ترین مشکل ناشی از آن‌ها مربوط به رسوب در مجراهای تنفسی انسان می‌باشد که باعث بروز بیماری‌های مزمن و سرطان‌های قلبی و ریوی می‌شود. میزان خطر ناشی از ذره‌های ریز معلق در هوا وابسته به اندازه‌شان می‌باشد و شناسایی و اندازه‌گیری توزیع اندازه آن‌ها ضروری است، همچنین برای کنترل و مدیریت سایر آلودگی‌ها نیز نخست باید شناسایی کیفی و کمی آن‌ها صورت پذیرد [۱، ۲].

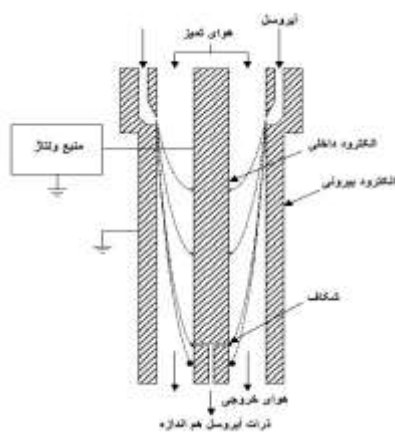
سامانه اندازه‌گیر ذره‌ها به روش پویس تحرک (SMPS) به اندازه‌گیری توزیع اندازه ذره‌ها می‌پردازد و برخلاف فناوری‌های نوری که قادر به شناسایی ذره‌های کوچک‌تر از ۵۰ nm نبوده و خطای اندازه‌گیری ناشی از تغییرهای شکل و ضریب شکست نیز در آن‌ها وجود دارد، سامانه SMPS قادر به اندازه‌گیری ذره‌های بسیار ریز در حدود ۱ nm بوده و به تغییر ضریب شکست نیز حساس نمی‌باشد. این سامانه از اتصال دستگاه‌های اتمایزر، خنثی‌ساز بار ذره‌ها، آنالیزکننده تحرک دیفرانسیلی (DMA) و ذره‌شمار تراکمی (CPC) ساخته می‌شود که در آن توزیع اندازه ذره‌ها با محاسبه اندازه ذره‌ها از روی ولتاژ اعمال شده به DMA و شمارش تعداد آن‌ها از روی سیگنال CPC تعیین می‌شود. دستگاه‌های گوناگون این سامانه طراحی و ساخته شد و پس از انجام تست‌های مربوطه به هم متصل شدند و سامانه SMPS را تشکیل دادند. سپس آزمایش‌های مربوط به این سامانه همان‌گونه که در ادامه بیان می‌شود صورت پذیرفت. [۳]

بخش تجربی

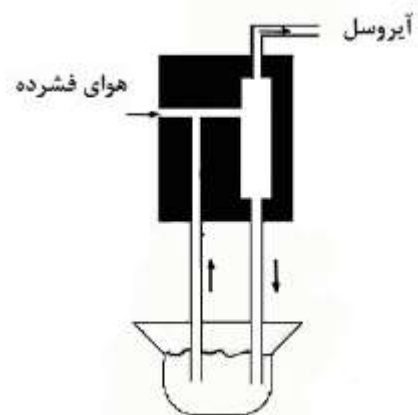
اتمایزر

در این پژوهش اتمایزر هوای فشرده طراحی و ساخته شد. اتمایزر هوای فشرده از انرژی هوای فشرده برای اتمیزه کردن استفاده کرده و سبب پراکندگی ذره‌های جامد و مایع در فاز گاز می‌شود. با عبور هوای فشرده از روزنه ورودی با سرعت زیاد، درون لوله متصل به مخزن دارای محلول نمونه مکش ایجاد می‌شود که باعث پراکندگی ذره‌های جامد و مایع در فاز گاز می‌شود، ذره‌های پخش شده در فاز گازی به همراه هوای فشرده ورودی به دیواره روبرو برخورد کرده و ذره‌ها و قطره‌های با قطر زیاد متراکم شده و

(۱) Cunningham slip correction



شکل ۲- نمای کلی از دستگاه آنالیزکننده تحرک دیفرانسیلی [۶].



شکل ۱- نمای کلی از دستگاه اتمایزر هوای فشرده [۴].

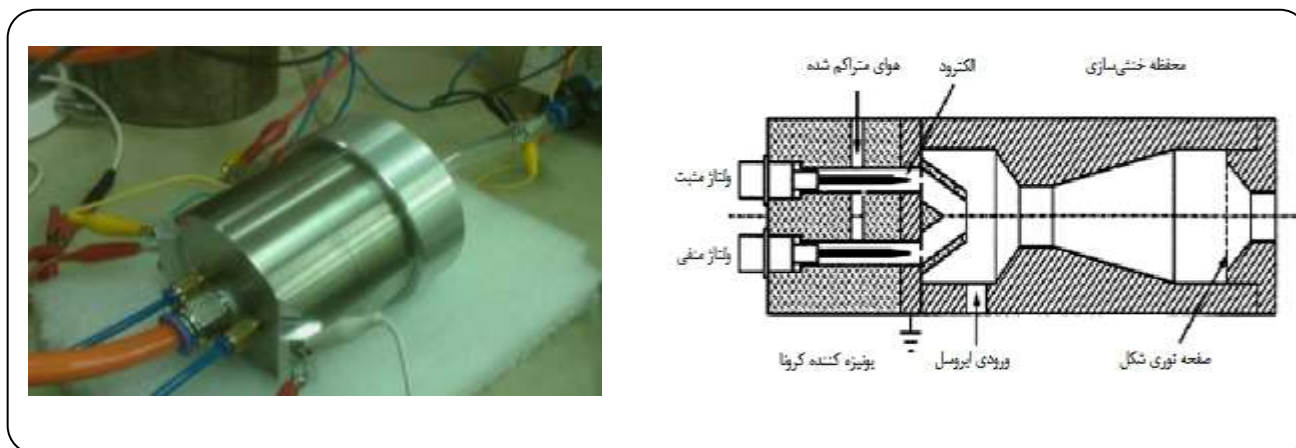
ذره‌ها را دارا می‌باشد. از این رو استفاده از خنثی‌ساز بار ذره‌ها در دستگاه‌هایی که بر اساس تحرک الکتریکی کار می‌کنند امری ضروری است تا افزون بر اعمال توزیع بار مشخص روی ذره‌ها، تعداد ذره‌های چند بار را نیز کاهش داده و از پیچیده شدن محاسبه‌ها جلوگیری نمود. [۸]

در این پژوهش خنثی‌ساز نوع الکتریکی طراحی و ساخته شد که در آن از تخلیه الکتریکی کرونا^(۱) برای تولید یون استفاده شد. در خنثی‌ساز الکتریکی با استفاده از میدان الکتریکی غیریکنواخت بین یک سوزن و یک صفحه یا بین یک سیم و یک لوله هم مرکز، تخلیه کرونا ایجاد می‌شود. شکل ۳ شمای کلی از یک دستگاه خنثی‌ساز الکتریکی نوع سوزن - صفحه را نمایش می‌دهد. زمانی که قدرت میدان زیاد باشد هوا و دیگر گازها تحت شکست الکتریکی قرار گرفته و تولید یون می‌کنند. در صورتی که جریان

خنثی‌ساز بار ذره‌ها

بر اساس معادله (۲) تحرک الکتریکی با تعداد بار روی ذره رابطه مستقیم دارد و هر چه تعداد بار روی ذره افزایش پیدا کند تحرک الکتریکی آن نیز افزایش می‌یابد. ذره‌های بزرگ‌تر به دلیل سطح بیش‌تری که دارند تعداد بار بیش‌تری روی سطح آن‌ها قرار می‌گیرد بنابراین ذره‌های بزرگ‌تر با تعداد بار بیش‌تر، تحرک الکتریکی همانند با ذره‌های کوچک‌تر خواهند داشت که تعداد بار کم‌تری را روی سطح خود می‌پذیرند، این امر باعث پیچیده شدن محاسبه‌های مربوط به تحرک الکتریکی ذره‌ها می‌شود. بنابراین تعیین توزیع اندازه ذره‌ها از روی تحرک الکتریکی آن‌ها مستلزم تعیین توزیع بار آن‌ها می‌باشد تا با تأثیر بار ذره‌ها روی تحرک الکتریکی آن‌ها امکان محاسبه توزیع اندازه آن‌ها ایجاد شود. خنثی‌ساز بار ذره‌ها قابلیت اعمال یک توزیع بار مشخص روی

(۱) Corona discharge



شکل ۳- نمای کلی از دستگاه خنثی‌ساز الکتریکی بار ذره‌ها [۹].

توسط آشکارساز ثبت می‌شود. آشکارساز پراکندگی لحظه‌ای نور را به صورت پیک ولتاژ بر حسب زمان تبدیل می‌کند. تعداد پیک‌ها در واحد حجم گاز عبور کرده، غلظت عددی را نشان می‌دهد [۱۲].

نصب و راه‌اندازی

چیدمان کلی سامانه اندازه‌گیر ذره‌ها به روش پویش تحرک (SMPS) در شکل ۵ نمایش داده شده است. نخست محلول آب و نمک به‌وسیله‌ی اتمایزر هوای فشرده اسپری شد. پس از اتمیزه کردن محلول و تبخیر حلال از قطره‌های محلول توسط خشک‌کن نفوذی، آئروسولی از مواد اصلی به دست آمد. خشک‌کن نفوذی از دو لوله‌ی استوانه‌ای هم‌محور تشکیل می‌شود که لوله داخلی از توری سیمی ساخته‌شده و فضای بین دو لوله از ژل سیلیکا پر شده است. ژل سیلیکا اطراف لوله داخلی، اتمسفر خشکی در دیواره خارجی لوله ایجاد می‌کند که باعث می‌شود بخار آب آئروسول در هنگام عبور از میان لوله داخلی، در اثر نفوذ جذب شود.

ذره‌ها پس از اتمیزه شدن توسط اتمایزر هوای فشرده و عبور از خشک‌کن نفوذی و زمان رطوبت آن‌ها، به سمت خنثی‌ساز جریان می‌یابند. ذره‌ها در حین عبور از خنثی‌ساز، توزیع بار مشخصی پیدا کرده و از DMA عبور می‌کنند تا پس از جدا نمودن ذره‌ها با اندازه‌های گوناگون، شمارش آن‌ها به وسیله ذره‌شمار تراکمی صورت پذیرد. اندازه ذره‌ها از روی ولتاژ اعمال شده به DMA محاسبه می‌شود و تعداد پیک‌های ذره‌شمار تراکمی، غلظت عددی ذره‌ها را نشان می‌دهد. سرانجام پس از معادل‌سازی داده‌ها و تصحیح تعداد بار، توزیع اندازه ذره‌ها به‌صورت غلظت عددی بر حسب قطر آن‌ها رسم می‌شود.

ذره‌های آئروسول به سمت ناحیه تخلیه کرونا هدایت شود، با اتصال یون‌ها به ذره‌ها، ذره‌های باردار به دست می‌آید. میزان باردار شدن ذره‌ها به شکل و اندازه ذره‌ها، غلظت یون، زمان اقامت ذره در محفظه دارای یون و میدان الکتریکی خارجی وابسته است [۹]. با توجه به این‌که روش تخلیه الکتریکی به‌طور ذاتی تک قطبی است هم‌زمان از دو یونیزه‌کننده کرونا با ولتاژهای متفاوت استفاده می‌شود تا یون‌هایی با هر دو قطبیت تولید شود. یون‌های تولید شده با هر دو قطبیت مثبت و منفی تحت تأثیر هوای فشرده به محفظه خنثی‌سازی منتقل شده و پس از ایجاد توزیع بار تعادلی درون محفظه خنثی‌سازی فرایند خنثی‌سازی ذره‌ها صورت می‌پذیرد. توزیع بار روی ذره‌ها از روابط فاخس^(۱) و بولتزمن^(۲) پیروی می‌کند [۱۰].

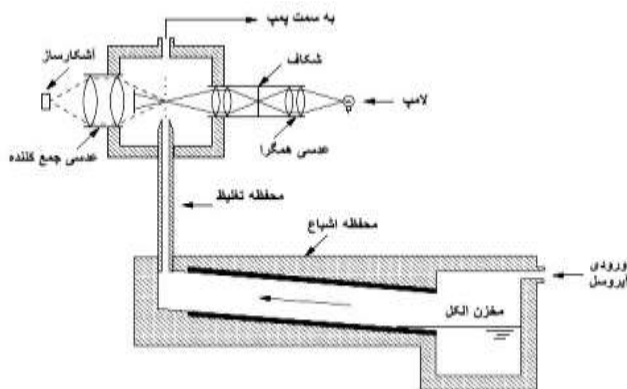
ذره‌شمار تراکمی

دستگاه ذره‌شمار تراکمی (CPC) ذره‌های بسیار کوچک را تا حد قابل تشخیص نوری بزرگ کرده و سپس با استفاده از پراکندگی نور ذره‌ها را شمارش می‌کند. در ذره شمار تراکمی، ذره‌های آئروسول از میان یک لوله گرم دارای نمک و مواد متخلخل در تماس با مایع عبور می‌کند، با عبور ذره‌ها از میان لوله، جریان هوا با بخار مایع اشباع می‌شود [۱۱].

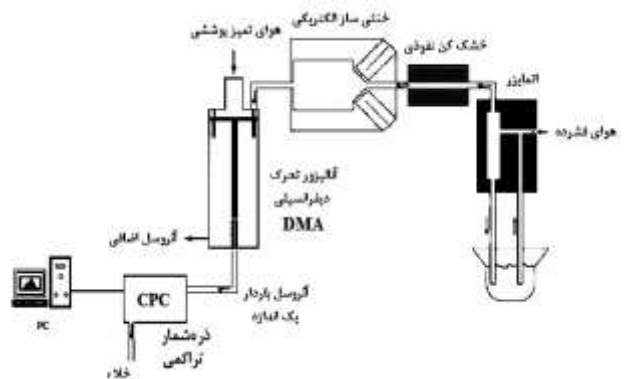
سپس ذره‌ها از یک لوله سرد عبور می‌کنند و کاهش دمای هوای اشباع، موجب فوق‌اشباع شدن جریان هوا و تشکیل قطره‌های مایع بر روی ذره‌ها می‌شود. قطره‌ها در طول لوله سرد رشد می‌کنند. ذره‌های بزرگ شده به صورت جداگانه از مقابل نور لیزر عبور می‌کنند و موجب پراکندگی لحظه‌ای نور می‌شوند. این پراکندگی

(۱) Fuchs

(۲) Boltzman



شکل ۴- نمای کلی از یک دستگاه ذره شمار تراکمی [۱۱].



شکل ۵ - نمای کلی از چیدمان SMPS.

نتیجه‌ها و بحث

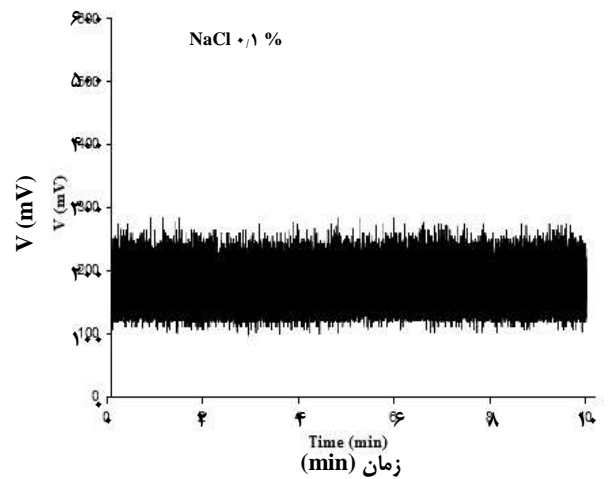
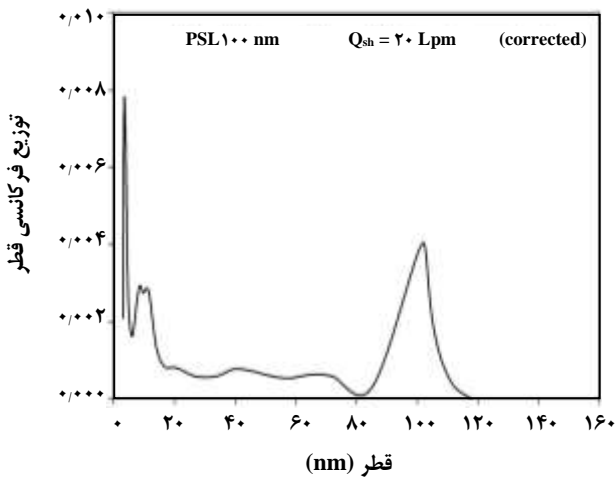
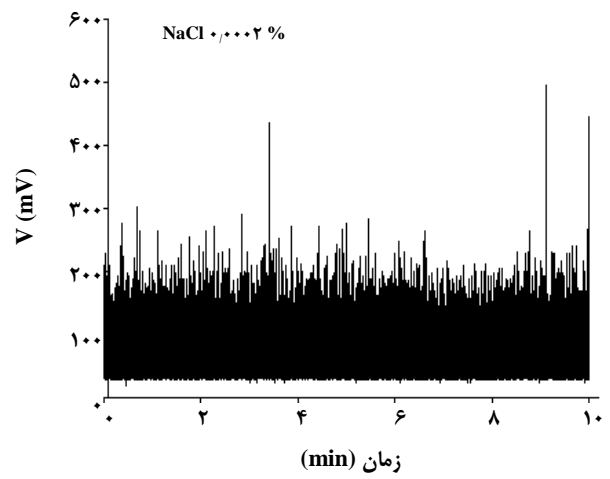
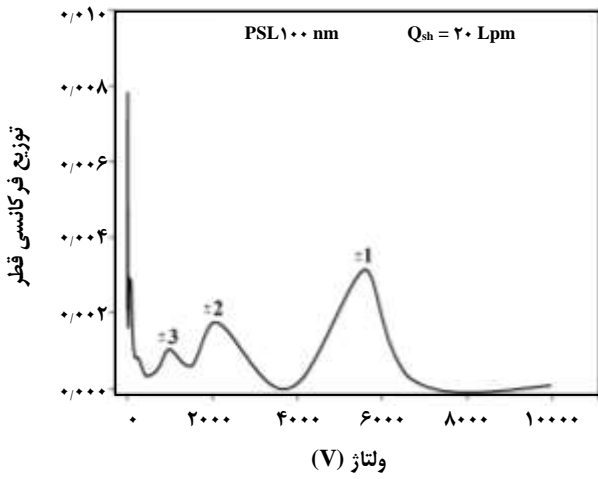
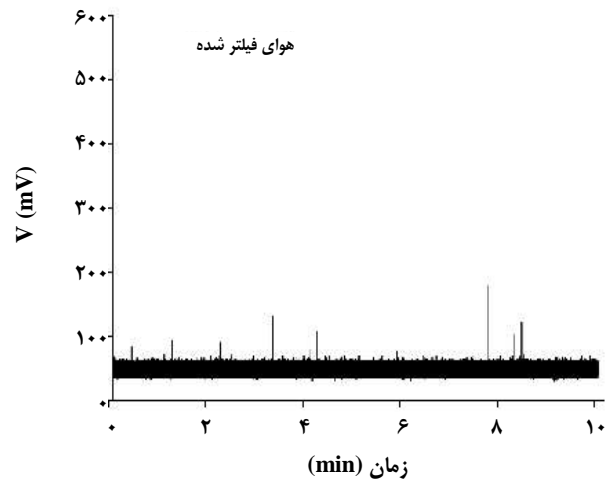
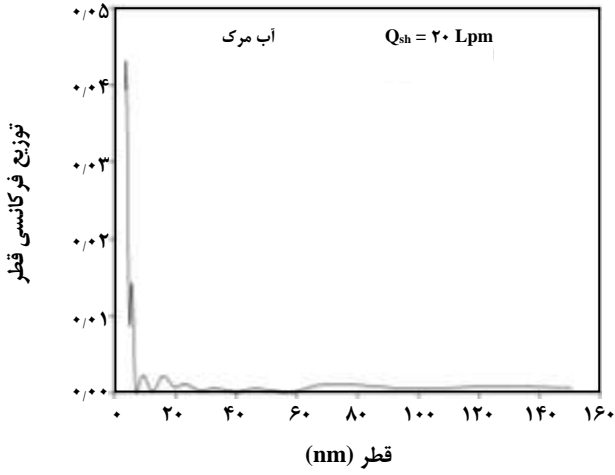
نشان داده شده است و همان‌گونه که دیده می‌شود در این غلظت پیک‌ها از هم مجزا بوده و قابل شمارش می‌باشد و دستگاه به صورت شمارشگر تک ذره عمل می‌کند و خط زمینه جابه‌جا نشده است. در حالی که برای غلظت‌های بیش‌تر از ۰/۱ درصد پیک‌ها از هم مجزا نبوده و قابل شمارش نمی‌باشد و دستگاه به صورت فتومتر کار می‌کند. به عبارت دیگر خط زمینه جابه‌جا شده است.

پودر تک اندازه^(۱) پلی استایرن لاتکس (شرکت fluka) برای برسنجی سامانه مورد استفاده قرار گرفت و چون از آب مقطر مرک^(۲) به عنوان حلال استفاده شد نخست نمودار آب مقطر مرک رسم شد. توزیع فرکانسی بر حسب قطر ذره‌ها برای آب مقطر مرک و توزیع فرکانسی بر حسب ولتاژ (ولتاژ DMA) پودر تک اندازه ۱۰۰ نانومتری در شکل ۷ رسم شد و پس از معادل‌سازی داده‌ها و

هوای صاف شده و نمک با غلظت‌های گوناگون برای اندازه‌گیری بیش‌ترین غلظت قابل اندازه‌گیری وارد سامانه شد. پاسخ آنالیزکننده تحرک دیفرانسیلی برای این غلظت‌ها مناسب بود و بیش‌ترین غلظت قابل اندازه‌گیری سامانه توسط ذره‌شمار تراکمی تعیین شد. پاسخ‌های CPC برای هوای صاف شده و نمک با غلظت‌های ۰/۰۰۰۲ درصد و ۰/۱ درصد در شکل ۶ نشان داده شده است. خروجی CPC برای هوای صاف شده به عنوان خط زمینه‌ی دستگاه در نظر گرفته شد. خط زمینه حدود ۴۰ mV بوده و بر اساس شکل ۶ این مقدار بیش‌ترین تا حدود ۱۶۰ mV بالا رفته است. این مقدار خروجی در مقایسه با جواب دستگاه برای نمونه‌های حقیقی بسیار ناچیز است. نمک ۰/۰۰۰۲ درصد به عنوان نمونه‌ای از غلظت‌های قابل اندازه‌گیری دستگاه در شکل ۶

(۱) Monodispersed

(۲) Merk



شکل ۷ - توزیع فرکانسی بر حسب قطر ذره‌ها برای الف) آب مقطر مرک، ب) پودر تک اندازه ۱۰۰ نانومتری و ج) پودر تک اندازه اصلاح شده.

شکل ۶ - پاسخ CPC برای الف) هوای فیلتر شده، ب) ۰.۰۰۰۲ درصد و ج) نمک با غلظت ۰/۱ درصد.

تصحیح شده پودر تک سایز نیز تنها دارای یک پیک روی قطر حدود ۱۰۰ نانومتر می‌باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، دستگاه‌های گوناگون سامانه اندازه‌گیر ذره‌ها به روش پویش تحرک یا SMPS طراحی و ساخته شد و پس از انجام آزمایش‌های اولیه مربوط به هر کدام، به هم متصل شده و سامانه SMPS را تشکیل دادند. از برتری‌های این سامانه می‌توان به قابلیت اندازه‌گیری و شمارش ذره‌های فوق ریز، اتمیزه کردن ذره‌های نمونه توسط اتمایزر هوای فشرده ساخته شده به صورت ریز و به طور کامل پایدار، قابلیت خنثی‌سازی بار ذره‌ها با غلظت‌های بالا توسط خنثی‌ساز الکتریکی ساخته شده، جداسازی ذره‌ها با اندازه‌های گوناگون با تفکیک پذیری بالا به وسیله DMA و قابلیت شمارش ذره‌ها توسط CPC به صورت تک تک اشاره نمود.

تصحیح تعداد بار، توزیع فرکانسی تصحیح شده پودر تک سایز ۱۰۰ نانومتری بر حسب قطر ذره‌ها نیز ترسیم شد. معادل‌سازی داده‌ها بدین گونه صورت پذیرفت که ذره‌های ۱۰۰ نانومتری دو بار و سه بار به دلیل تحرک بیش‌تری که نسبت به ذره‌های ۱۰۰ نانومتر تک بار پیدا کرده بودند همراه با ذره‌های کوچک‌تر شناسایی شدند که پس از تعیین تعداد آن‌ها با استفاده از نسبت ذره‌ها با بارهای گوناگون خروجی از خنثی ساز، مقدار مربوطه به تعداد ذره‌های ۱۰۰ نانومتری تک بار افزوده شد و سرانجام تعداد ذره‌های ۱۰۰ نانومتری با استفاده از تعداد ذره‌های ۱۰۰ نانومتری تک بار و نسبت ذره‌های تک بار خروجی از خنثی ساز محاسبه شد. همان‌گونه که دیده می‌شود برای آب مقطر مرک از قطر ۲۰ نانومتر به بالا پیکی دیده نشد و پیک‌های زیر ۲۰ نانومتر افزون بر آب مقطر مرک مربوط به نفوذ ذره‌ها در DMA می‌باشد. بنابراین نمودار مربوط به پودر تک اندازه دارای سه پیک به ترتیب مربوط به ذره‌های تک بار، دو بار و سه بار می‌باشد و نمودار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱۱

مراجع

- [1] Hinds W.C., "Aerosol Technology", John Wiley & Sons, New York, (1999).
- [2] Colbeck I.; "Physical and Chemical Properties of Aerosols", Chapman & Hall; Cholester – UK, (1998).
- [3] Keady P.B., F.R. Quant, Sem G.J., "Differential Mobility Particle Sizer: A New Instrument for High-Resolution Aerosol Size Distribution Measurement Below 1 μm ", TSI Incorporated, St. Paul, MN, (1983).
- [4] Liu B.Y.H., Lee K.W., An Aerosol Generator of High Stability, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **36**: 861–865 (1975).
- [5] Alofs D.J., Balakumar P., Inversion to Obtain Aerosol Size Distributions From Measurements with a Differential Mobility Analyzer, *L Aerosol Sci*, **13**(6): 513-527 (1982).
- [6] Intra P. Tippayawong N., An Overview of Differential Mobility Analyzers for Size Classification of Nanometer-Sized Aerosol Particles, *Songklanakarinn J. Sci. Technol.*, **30**(2): 243-256 (2008).
- [7] Chen D.R., Pui D.Y.H., Numerical Modeling of the Performance of Differential Mobility Analyzers for Nanometer Aerosol Measurement, *Journal of Aerosol Science*, **28**(6): 985-1004 (1997).
- [8] Stommel Y.G., Riebel U., A Corona-Discharge-Based Aerosol Neutralizer Designed for Use with the SMPS-System, *Journal of Electrostatics*, **63**: 917–921 (2005).

- [9] Romay F.J., Liu B.Y.H., Pui D.Y.H., [A Sonic Jet Corona Ionizer for Electrostatic Discharge and Aerosol Neutralization](#), *Aerosol Sci. Technol.*, **20**: 31-41 (1994).
- [10] Adachi M., Pui D.Y.H., Liu B.Y.H., [Aerosol Charge Neutralization by a Corona Ionizer](#), *Aerosol Sci. Technol.*, **18**: 48-58 (1993).
- [11] Agarwal J.K., Sem G.J., [Continuous Flow Single-Particle-Counting Condensation Nucleus Counter](#), *J. Aerosol Sci.*, **11**: 343-357 (1980).
- [12] Marti J.J., Weber R.J., Saros M.T., Vasilou J.G., McMurry P.H., [Modification of the TSI 3025 Condensation Particle Counter for Pulse Height Analysis](#), *Aerosol Sci. Technol.*, **25**: 214-218 (1996).