# بررسی کارایی جمع‌آوری فیلتر اولپا در ربایش نانو ذرات آئروسلی

غلامرضا مرادی[۱]، اصغر صدیق‌زاده[۲]، رسول یاراحمدی[۳]، شهناز باکند[۴]، علی اصغر فرشاد[۵]، بهزاد رضایی فرد[۶]، سعید موسوی[۷]، مهناز صلحی[۸]

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۳/۱۶ تاریخ ویرایش: ۹۱/۰۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۷/۰۹


## چکیده

**زمینه و هدف:** به دلیل پیشرفت تکنولوژی نانو نگرانی ناشی از پیامدهای منفی این ذرات منتشره در مواجهه انسانی و زیست محیطی دو چندان شده است. از جمله مهم‌ترین مدیای شناخته شده جهت کنترل نانو ذرات فیلترهای الیافی با نفوذپذیری خیلی پایین (ULPA) می‌باشند. در این مطالعه افت فشار و کارایی بستر الیافی ULPA جهت جمع‌آوری و حذف نانو ذرات آئروسلی مورد بررسی قرار گرفت.

**روش بررسی:** کارایی و افت فشار صافی ULPA با استفاده از ذرات آئروسل نانو مقیاس ساکاروز در گستره‌ی سایزی ۷۰۰nm –۷۰ و در سرعت جریان‌های مختلف ۱.۵۸–۵cm.s-1 اندازه‌گیری شد. فیلتر مورد استفاده دارای ضخامت ۰/۴ mm بود. سیستم آزمون به صورت استوانه‌ای شکل از جنس فولاد ضد زنگ با سطح فیلتراسیون ۱۳ سانتی‌متر ساخته شد. ذرات مورد نظر با استفاده از مولد الکترواسپری ذرات مدل ۳۴۸۰ تولید شد. از شمارشگر ذرات مدل CPC Models 5.410 ساخت شرکت Gream برای اندازه‌گیری غلظت عددی ذرات قبل و بعد از فیلتر و محاسبه کارائی بستر استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج تحقیق نشان می‌دهد که، میزان نفوذپذیری بستر اولپا (مستقل از سرعت عبوری) برای ذرات ۱۰۰ نانومتردر میان سایر اندازه‌های مورد مطالعه از حداکثر ممکن برخوردار بوده و به عنوان ناحیه MPPS در این مدیا تعیین شد. از طرفی آنالیز داده‌ها بیانگر ارتباط مشخصی بین پارامترهای قطر و راندمان قبل از MPPS (منفی) و بعد از MPPS (مثبت) می‌باشد. در تحقیق حاضر شواهد نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان، میزان نفوذپذیری و افت فشار در گستره اندازه ذرات مورد بررسی افزایش و فاکتور کیفیت کاهش می‌یابد.

**نتیجه گیری:** مدیای ULPA مورد بررسی در تحقیق حاضر دارای ناحیه MPPS ذرات ۱۰۰ نانومتر در میان ذرات مورد مطالعه بوده و در شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر به عنوان یک بستر کنترلی ذرات معرفی می‌گردد.


**کلیدواژه‌ها:** نانو ذرات، فیلتر اولپا، کارایی، MPPS.

## مقدمه

نانو ذرات به ذراتی اطلاق می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها کمتر از ۱۰۰ nm باشد. این ذرات دارای خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به‌فردی همچون نسبت سطح به حجم زیاد و فعالیت فیزیکی و شیمیایی بیشتر نسبت به ذره معمول را دارند [۱] اندازه، شکل، سطح، خواص شیمیایی، قابلیت انحلال، اکسیداسیون و میزان تراکم پذیری بر روی سمیت نانو ذرات تأثیر گذار می‌باشند [۲] راه‌های نفوذ ذرات به بدن از طریق پوست، استنشاق و بلع می‌باشد. اثرات نانو ذرات بر سلامت افراد به غلظت و مدت زمان مواجهه بستگی دارد. بعضی از ریسک‌های مرتبط با این ذرات شناسایی شده‌اند، اما ارزیابی سمیت نانو ذرات، نیازمند درک بیشتر از مسیر و میزان مواجهه افراد می‌باشد [۱, ۳] اکنون نقش نانو ذرات به عنوان یک چالش در بسیاری از جنبه های بهداشت شغلی و سم شناسی مطرح است. بدین لحاظ بسیاری از آژانس‌های معتبر مانند EPA(Protection Agency Environmental)،


۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیارگروه پژوهشی شیمی، پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

۳-(نویسنده مسئول) عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، استادیار گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران. rasoulpch@yahoo.com

۴- عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، استادیار گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۵- – عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشیارگروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۶- کارشناسی بهداشت محیط، مسئول آزمایشگاه مهندسی محیط زیست، سازمان انرژی اتمی ایران.

۷- دانشجوی دکتری آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۸-دانشیار گروه آموزش و ارتقاء سلامت، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران


[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

DE (Department of Energy)، National Institute for Occupational (NIOSH) Safety and Health) فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی را در مورد کنترل مواجهه با نانو ذرات آغاز نموده‌اند [۴].

در دهه اخیر کارهای متنوع و فراوانی در زمینه تولید، استفاده و شناسایی نانو ذرات به عمل‌آمده است. بدین لحاظ بررسی پیامدهای احتمالی نانو ذرات بر محیط زیست و همچنین روش‌های صنعتی فیلتراسیون نانو ذرات توسعه یافته است[۵-۷]

مکانیسم‌های عمده ربایش ذرات در یک بستر الیافی عبارتند از: انتشار، برخورد مستقیم، برخورد، الکترواستاتیک، گرانش و غربالی است[۸] بر اساس یافته‌های نظری Eninger و همکاران مکانیسم‌های موثر ربایش ذرات برای اندازه‌های بزرگ‌تر از ۳۰۰ nm شامل برخورد، برخورد مستقیم و نشست گرانشی و برای ذرات کوچک‌تر از ۲۰۰nm مکانیسم انتشار و جذب الکترواستاتیک است[۹, ۱۰] در این میان منطقه حد واسط اندازه ذرات وجود دارد که در آن جمع احتمال ربایش ذرات با مکانیسم‌های مرتبط در حداقل مقدار خود قرار دارد. این گستره اندازه بنام بیشترین اندازه نفوذ ذرات (most-penetrating particle size) MPPS شناخته می‌شود. به عنوان مثال یافته‌های اخیر محققین بر روی مدیای فیلتر ماسک‌های تنفسی بیانگر این حقیقت است که ناحیه MPPS برای ذرات با قطر کمتر از ۲۰۰ نانومتر از احتمال بالاتری برخوردار می‌باشد [۱, ۱۱].

در کلیه روش‌های آزمون فیلتر از نفوذپذیری یا کارایی ربایش ذرات تک توزیعی (mono disperse) و یا چند توزیعی (poly disperse) جهت تعیین کارایی فیلتر استفاده می‌شود. ذرات تک توزیعی به ذرات هم اندازه که ترکیب شیمیایی مشابه دارند اطلاق می‌شود. در عمل به آن دسته از ذرات معلق در هوا تک توزیعی گفته می‌شود که انحراف معیار نسبی قطر آن‌ها کمتر از ۰.۲ باشد [۱۲] در فرآیند ربایش با کمک بستر الیافی، ذرات در اثر مکانیسم‌های مختلف و توسط نیروی واندروالسی بر روی الیاف می‌نشینند.

عمده‌ترین پارامترهای موثر بر فرایند فیلتراسیون عبارتند از: مشخصه های جریان (سرعت و دما)، مشخصه‌های فیزیکی ذرات (توزیع اندازه، غلظت و چگالی)، ویژگی‌های بستر صافی (قطر الیاف، فشردگی و ضخامت بستر صافی) [۱۰, ۱۲].

ذرات معلق در هوای عبوری از یک بستر الیافی اساساً در اثر سازوکارهای انتشار، برخورد مستقیم و برخورد لختی روی بستر الیافی گیر می‌کنند. کارایی E بستر الیافی به وسیله رابطه ۱ حساب می‌شود [۱۲, ۱۳].

(۱)
$$E = 1 - exp\left(\frac{-4L(1-\varepsilon)\varphi_t}{D_f \pi \varepsilon}\right)$$

که در آن $\varepsilon$ و L به ترتیب میزان تخلخل و ضخامت صافی، $D_f$ و $\varphi_t$ به ترتیب قطر و احتمال ربایش کل ذرات توسط هر یک از تارهای الیافی تشکیل‌دهنده بستر فیلتر می‌باشند. با فرض قابل اغماض بودن ربایش ذرات در اثر مکانیسم‌های گرانش، الکترواستاتیک و غربالی، $\varphi_t$ از جمع سه احتمال گیر اندازی ذرات در اثر سازوکارهای ذکر شده حاصل می‌شود.

(۲)
$$\varphi_t = \varphi_i + \varphi_D + \varphi_R$$

### ۱-۱: اینرسی $\varphi_i$

احتمال برخورد یک ذره و گیر افتادن آن تابعی از عدد استوکس (St (Stokes) می‌باشد. چنانچه در رابطه (۳) ملاحظه می‌شود؛ ذرات بزرگ و یا با سرعت بالا با این مکانیسم توسط فیلتر ربایش و حذف می‌شوند.

(۳)
$$St = C\frac{P_p U_0 D_P}{9\mu_g D_f}$$

### ۱-۲: برخورد مستقیم $\varphi_R$

احتمال برخورد یک ذره و گیر افتادن آن تابعی از عدد بدون بعد برخورد مستقیم است. از این رابطه



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

نتیجه می‌شود که کارایی فیلترها با این فرایند برای ذرات بزرگ موثرتر است.

(۴)
$$R = \frac{D_P}{D_F}$$

### ۱-۳: انتشار $\varphi_D$

احتمال برخورد یک ذره گیر افتادن آن تابع معکوسی از عدد بدون بعد Pe می‌باشد. به این ترتیب ذرات ریز، یا کم سرعت، با این مکانیسم ربایش و حذف می‌شوند.

(۵)
$$Pe = \frac{U_O D_f}{D_B}$$

در این روابط C، $\mu_g$، $P_p$ و $D_P$ به ترتیب ضریب تصحیح کانینگهام (Cunningham)، چگالی ذره، چسبندگی و یا ویسکوزیته دینامیکی و قطر ذرات هوا هستند؛ و $U_O$ و $D_B$ به ترتیب سرعت ورودی جریان به بستر الیافی و ضریب پخش براونی هستند[۱۴]در عمل کارایی فیلتر الیافی، نسبت ذرات به دام افتاده در فیلتر به ذرات ورودی است.

(۶)
$$E = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - P$$

که در آن $n_1$ و $n_2$ به ترتیب غلظت ذرات قبل از ورود به فیلتر و بعد از آن می‌باشد[۱۲, ۱۵, ۱۶].

الیاف فیلتر، فشردگی، غلظت آئروسل و میزان جریان عبوری بر روی افت فشار عبوری از بستر بیشترین تأثیر را دارند؛ بنابراین می‌توان کیفیت فیلتر مورد استفاده را با استفاده از نفوذ پذیری ذرات و افت فشار تعیین کرد. کیفیت فیلتر معمولاً به صورت فاکتور کیفیت (Quality Factor) $q_f$ بیان می‌شود. این فاکتور توسط میزان نفوذ و افت فشاری عبوری از فیلتر تعیین می‌شود. فاکتور کیفیت ($q_f$) معمولاً نشان دهنده میزان کارایی فیلتر است و توسط معادله زیر تعیین می‌شود.

(۷)
$$q_f = \frac{ln\frac{1}{P}}{\Delta P}$$

در این معادله P نفوذی پذیری فیلتر و $\Delta P$ افت فشار عبوری از بستر فیلتر اولپا می‌باشد. فیلتری با کارایی بالا و افت فشار پایین، بالاترین فاکتور کیفیت را نشان خواهد داد [۱۷].

برای ذرات با مقیاس نانو که انتشار براونین مکانیسم غالب در جمع آوری ذرات است، تعامل بین ذره و فیبر شدیداً وابسته به قطر فیبر می‌باشد؛ بنابراین در پیش بینی کارایی فیلتراسیون توزیع اندازه فیبر اهمیت زیادی دارد [۱۸].

با توجه به تولید ذراتی با مقیاس نانو در فرایندهای مختلف و با عنایت به پیامدهای احتمالی این ذرات در رابطه با سلامتی انسان و محیط زیست، اطمینان از کارایی و صحت عملکرد فیلترها جهت به دام اندازی ذرات بسیار ریز (Ultrafine) بسیار مهم و غیرقابل انکار است. این مطالعه با هدف تعیین کارایی بستر الیافی اولپا در حذف نانو ذرات تولیدی صورت گرفت.

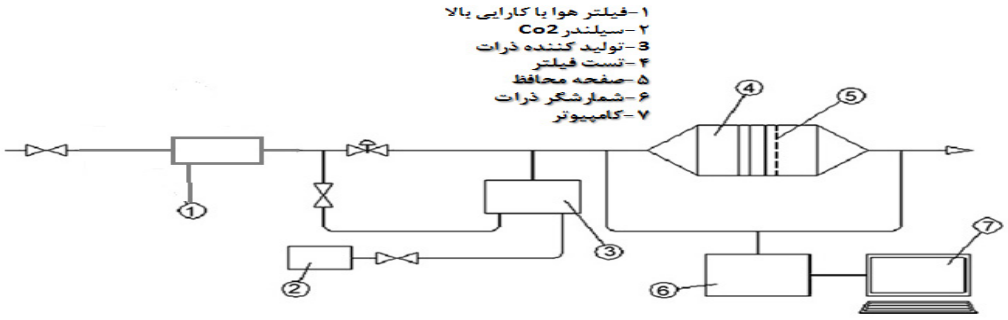
### ۲-۲: مواد و تجهیزات مورد استفاده

در بخش آزمایشگاهی، به منظور مطالعه و ارزیابی بستر ULPA سیستم آزمونی طراحی و اجرا شد. صافی اولپا مورد آزمون با سطح فیلتراسیون $۰.۰۱۳m^2$ از جنس سلولز و با ضخامت ۰.۴mm انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. تصویر سطح مقطعی از فیلتر به روش میکروسکوپی (scanning electron microscope) SEM ) تهیه و توسط نرم افزار Pro plus Imageمورد آنالیز قرار گرفت. توزیع قطر فیبر از طریق آنالیز تصویر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

سیستم آزمون به صورت استوانه‌ای شکل از جنس فولاد ضد زنگ بود. این سیستم همچنین به یک صافی با کارایی بالا جهت تهیه هوای خالص و یک دستگاه مولد نانو ذرات (TSIESP-3480) مجهز شده است. مکانیسم کارکرد دستگاه بدین صورت است که محلول نمونه در یک ویال مخروطی شکل ذخیره شده و در محفظه فشار دستگاه قرار می‌گیرد. این محفظه دارای یک کاپیلاری و سیم پلاتینیم ولتاژ بالا است



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]




شکل ۱- نمایی از سیستم آزمون فیلتر

که هردو در داخل محلول غوطه‌ور هستند. اختلاف فشار باعث می‌شود محلول به صورت اسپری از کاپیلاری خارج شود. میدان الکتریکی باعث خارج شدن محلول شارژ شده از خروجی کاپیلاری می‌شود. قطره تشکیل شده با هوای تمیز و $co_2$ مخلوط می‌شود. قطرات باردار از طریق یک یونیزه کننده رادیو اکتیو (Polonium-210) خنثی سازی شده و مایع تبخیر می‌شود؛ و ذرات به صورت آئروسل از دستگاه خارج می‌شود. همچنین برای اندازه گیری تراکم عددی ذرات در دو طرف بستر الیافی اولپا، از یک دستگاه شمارنده ذرات مدل ۵.۴۱۰ ساخت کارخانه GRIMM آلمان استفاده شده است. شمارنده ذرات متراکم از یک منبع نوری، دیود لیزری، ریزپردازنده کنترل سیستم داخلی، پمپ مکنده هوای نمونه برداری با دبی ثابت و صفحه دیجیتال جهت تعیین غلظت ذرات و پارامترهای دستگاه تشکیل شده است. همچنین به منظور سنجش فلو و فشار دستگاه مورد تست از دبی سنج مدل TA2 و میکرومانومتر مدل APM50K، استفاده شد. نمای کلی از سیستم آزمون صافی در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ۲-۳: شیوه اجرای تست فیلتر

تحقیق حاضر یک مطالعه از نوع توصیفی تحلیلی است. جامعه پژوهش این مطالعه، ذرات در گستره سایزی نانو می‌باشند که جهت کارایی بستر الیافی اولپا استفاده می‌شود. آزمایش‌هایی به منظور بررسی اثرمتغیرهای سرعت، قطر و بستر الیافی اولپا به منظور تعیین راندمان حذف و همچنین تعیین اختلاف فشار مربوط به هرمرحله طراحی شد. متغییر سرعت در ۸ سطح، قطرذرات تولیدی در ۱۰ سطح و نمونه‌برداری از دو قسمت قبل و بعد از بستر الیافی بررسی شد و در هر ترکیب آزمایش ۱۰ بار تکرار شد. با توجه به توضیحات ۱۶۰۰ =۱۰×۲×۸×۱۰ آزمایش انجام شد.

جهت تعیین پایایی دستگاه شمارشگر ذرات از روش باز آزمایی (test- retest) استفاده شده است در این روش پایایی دستگاه برای هر اندازه مشخص از ذره حدود ۱۰ بار تکرار شد. ضریب همبستگی بین اعداد بدست آمده از ۱۰ بار اجرا آزمون حدود $R^2$=0.94 بدست آمد.

پس از تکمیل سیستم آزمون، کارایی و افت فشار صافی ULPA با استفاده از ذرات ساکاروز در گستره‌ی اندازه‌ی ۷۰ تا ۷۰۰ نانومتر و در سرعت جریان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. ذرات با استفاده از مولد ذرات الکترواسپری مدل ۳۴۸۰ تولید شد. این دستگاه قابلیت تولید نانو ذرات مونودیسپرس با غلظت $10^7$ P/cm$^3$ تحت فلوی ۲.۵ -۰.۲ لیتر بر دقیقه را دارا می‌باشد. کارایی فیلتر از طریق شمارش ذرات قبل و بعد از فیلتر با استفاده از شمارشگر ذرات مدل CPC Models 5.410 مورد بررسی قرار گرفته است. تست‌ها در سرعت جریان گازی ۱.۵۸ تا



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

موجود در هوای ورودی به سیستم، توسط یک صافی ULPA گرفته شده و سپس ذرات تک توزیعی ساکاروز به وسیله یک مولد آئروسل در جریان هوای تونل تست تزریق شد. غلظت ذرات قبل و بعد از گذر از بستر به وسیله شمارنده ذرات متراکم شمارش به طور همزمان افت فشار در صافی نیز اندازه‌گیری شد.

## یافته‌ها

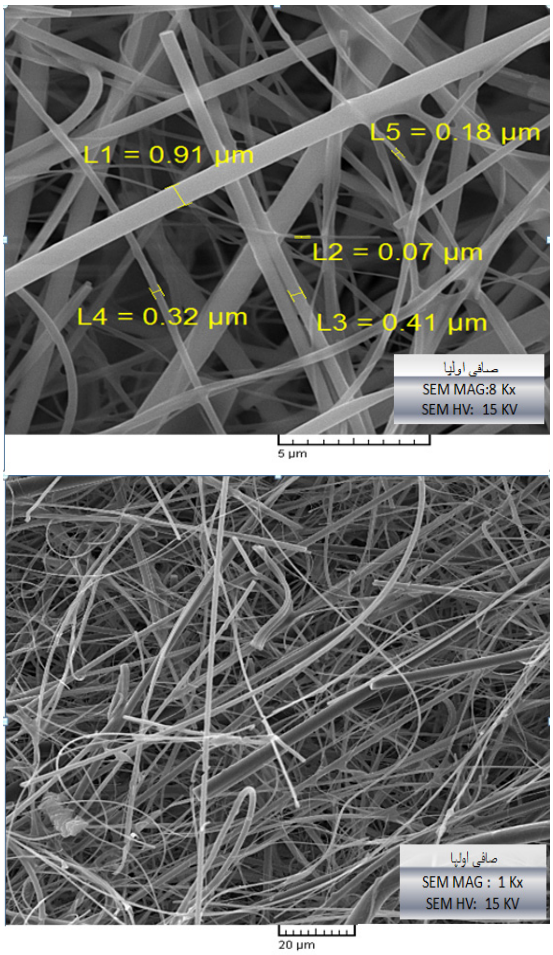
نتایج حاصل از بررسی ساختار فیلتر اولپا به شکل نتایج کمی و کیفی (برش سطح مقطع) توسط روش میکروسکوپی SEM در شکل ۲ و به همراه آنالیز توزیع قطر فیبر توسط نرم افزار تصویر پرو پلاس (Software Image Pro plus) در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده شده است.

نفوذ نانو ذرات در گستره اندازه‌ی ۷۰ تا ۷۰۰ نانومتر در صافی الیافی اولپا با سرعت جریان cm/s ۲.۲۲ در شکل ۴ نشان داده شده است.

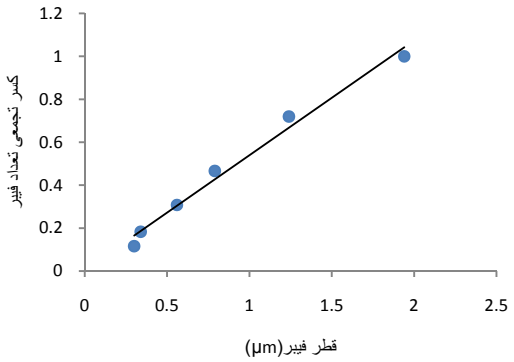
نتایج مربوط به کارایی جمع‌آوری ذراتی با اندازه‌های مختلف در سرعت جریان گازی ۱.۵۴cm/s تا ۵ در شکل ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۶ آنالیز افت فشار صافی تست شده بر حسب سرعت سطحی $2.22 cm.s^{-1}$ نشان داده شده است.

شکل ۷ مقایسه فاکتور کیفیت صافی اولپا را به تفکیک ذرات با قطر ۷۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. فاکتور کیفیت نسبت هزینه به سود در یک فیلتر می‌باشد. «سود» مربوط به کارایی فیلتراسیون که به صورت ln1/p نشان داده می‌شود. «هزینه» مربوط به افت فشار فیلتر که به صورت ΔP نمایش داده می‌شود. داشتن فاکتور کیفیت بالا نشان دهنده کارایی بهتر فیلتر می‌باشد.




شکل ۲- تصاویر SEM از بستر اولپا استفاده شده. تصویر سمت چپ: نمای کلی از سطح صافی تصویر سمت راست: سطح مقطع از صافی تهیه شده، به همراه آنالیز و اندازه گیری قطر فیبر توسط نرم افزار Image pro plus.




شکل ۳- توزیع قطر فیبر

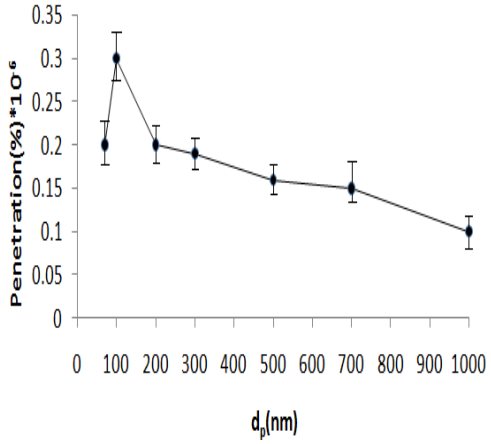
۵ $cm.s^{-1}$ انجام شد. در جریان آزمون ابتدا تمام ذرات



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

جدول ۱: توزیع قطر فیبر

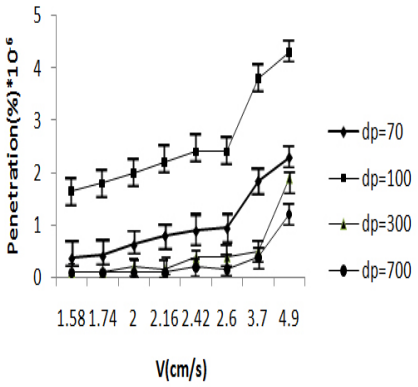
| قطر فیبر(µm) | تعداد فیبر | کسر تجمعی |
|---|---|---|
| ۰.۰۷۵–۰.۳ | ۲۴ | ۰.۱۲ |
| ۰.۳–۰.۳۴ | ۲۸ | ۰.۲۶ |
| ۰.۳۴–۰.۵۶ | ۴۱ | ۰.۴۶۵ |
| ۰.۵۶–۰.۷۹ | ۷۴ | ۰.۸۳۵ |
| ۰.۷۹–۱.۲۴ | ۱۹ | ۰.۹۳ |
| ۱.۲۴–۱.۹۴ | ۱۱ | ۰.۹۸۵ |
| ۱.۹۴–۲ | ۳ | ۱ |



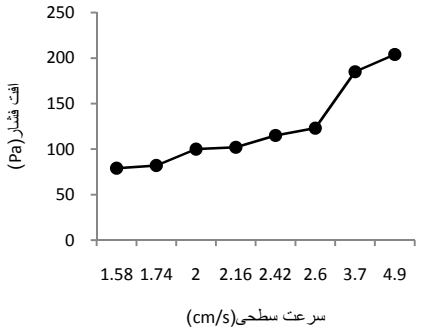

شکل ۴– تغییرات کارایی بستر اولپا بر حسب قطر ذرات در سرعت جریان ۲.۲۲ cm/s

## بحث و نتیجه‌گیری

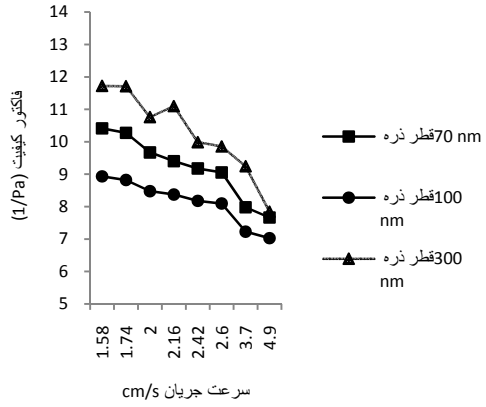
تغییرات نفوذپذیری صافی ULPA بر حسب قطر ذره با سرعت جریان ۲.۲۲ سانتی متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. میزان نفوذپذیری صافی برای ذرات ۱۰۰ نانومتر از میان سایر اندازه‌های مورد مطالعه از حداکثر ممکن برخوردار می‌باشد. به عبارتی کارایی جمع‌آوری صافی اولپا به منظور پالایش ذرات ۱۰۰ نانومتر ضمن اینکه از حداقل ممکن برخوردار بوده به عنوان ناحیه MPPS در این مدیا تعیین شد. نفوذپذیری بستر الیافی اولپا در نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش قطر ذرات از ۷۰ تا ۱۰۰ نانومتر، میزان نفوذپذیری افزایش می‌یابد. نفوذپذیری بعد از گذر از یک ماکزیمم برای ذرات ۱۰۰ نانومتر دوباره کاهش می‌یابد؛ زیرا در این محدوده تأثیر




شکل ۵–تغییرات نفوذپذیری صافی اولپا بر اساس قطر ذرات و سرعت جریان هوا




شکل ۶– تغییرات افت فشار صافی، بر حسب سرعت جریان هوا




شکل ۷– فاکتور کیفیت (QF) صافی اولپا برای ذرات در گستره ۷۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ نانومتر در سرعت جریان ۱.۵۸ تا $cm.s^{-1}$۵



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

مکانیسم‌های اینرسی و به خصوص برخورد مستقیم افزایش می‌یابد. تحت شرایط معمولی، آئروسل‌ها دارای حرکت براونی می‌باشند. با کاهش سایز ذره، حرکت براونی ذرات شدت یافته، در این حالت با کاهش اندازه ذرات مکانیسم انتشاری جهت جمع‌آوری ذرات غالب می‌شود. برای ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر، مکانیسم غالب در جمع‌آوری ذرات مکانیسم انتشاری است [۱۹] بنابراین انتظار می‌رود که با کاهش اندازه ذرات شاهد کارایی جمع‌آوری بالا برای ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشیم. هر چه قطر ذرات بزرگ‌تر می‌شود، به همان اندازه میزان کارایی، در رابیش ذرات توسط مکانیسم انتشار کاهش می‌یابد. جی ای استونس (G. A. Sterens) و همکاران بیان داشتند که حداقل کارایی فیلترهای الیافی برای ذرات با قطر ۱۲۰ نانومتر می‌باشد [۲۰] ارتیز در سال ۱۹۹۲ نشان داد که حداکثر نفوذپذیری فیلترهای اولپا برای ذرات به بزرگی ۱۰۰ نانومتر و ۱۷۰ نانومتر می‌باشد که با نتایج بدست آمده در این مطالعه هم‌خوانی داد [۲۱] مطالعه جی آر کوری در سال ۲۰۰۷ بر روی کارایی جمع‌آوری ذرات توسط فیلترهای فیبروزی نشان داده است که ماکزیمم کارایی جمع‌آوری برای ذرات در گستره اندازه‌ی کمتر از ۳۰ نانومتر و حداقل کارایی برای ذرات با قطر بزرگ تراز ۸۰ نانومتر بدست آمد[۸] اشباگو و همکاران در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای جهت تعیین کارایی سیستم رسپیراتوری مدل P110 انجام دادند. نتایج مطالعه فوق نشان داد که MPPS برای این مدیاها در گستره ۵۰ nm تا ۲۰۰ قرار داد [۱۱] کلیات نتایج ارائه شده با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. در مرحله بعد نفوذپذیری صافی بر حسب سرعت جریان عبور گاز مورد بررسی قرار گرفت. سرعت جریان عبوری از بستر، تأثیر مستقیم بر کارایی بستر دارد. چنانکه قبلاً هم اشاره شد با تغییر سرعت عبوری از بستر، تأثیر مکانیسم‌های رابیش ذرات تغییر می‌کند. مکانیسم‌های اینرسی و انتشار با ازدیاد سرعت به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. از لحاظ نظری، احتمال برخورد یک ذره و گیر افتادن آن، تابع معکوسی از عدد بدون بعد (Peclet Number) Pe) می‌باشد (معادله شماره ۵). با توجه به اینکه ارتباط بین عدد پکلت با سرعت جریان ارتباط خطی است بنابراین افزایش در سرعت جریان منجر به افزایش نفوذپذیری شده و کارایی کاهش می‌یابد، بنابراین کارایی جمع‌آوری توسط مکانیسم انتشاری با افزایش عدد پکلت (افزایش سرعت جریان) کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این تحقیق تأییدی بر نتایج نظری است. در مطالعه حاضر بین سرعت جریان عبوری با میزان نفوذپذیری در بسترهای انتخابی ارتباط مستقیم و معنی‌داری به دست آمد. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش سرعت جریان، میزان نفوذپذیری صافی بر اساس قطر ذرات افزایش می‌یابد همچنین در محدوده سرعت مورد ارزیابی (1.58-5 cm/s)، حداکثر میزان نفوذپذیری بستر اولپا، برای ذرات به بزرگی ۱۰۰ نانومتر بدست آمد. نتایج تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که مکانیسم‌های موثر در حذف ذرات زیر میکرون به ویژه در سرعت‌های کم، انتشار و برخورد مستقیم می‌باشد [۲۱] در فرایند فیلتراسیون، هنگامی که قطر ذره کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر و سرعت جریان هوای عبوری از فیلتر کم باشد می‌توان از تاثیر مکانیسم‌های اینرسی و برخورد مستقیم صرف نظر کرد [۱۹] لذا با افزایش قطر و سرعت جریان تأثیر مکانیسم انتشاری برای ذرات نانوکاهش یافته، لذا کارایی بسترهای انتخابی با افزایش سرعت جریان کاهش می‌یابد. یوشیو در سال ۲۰۰۷ نشان داده است که کارایی فیلتراسیون ذرات در محدوده ۱۰-۱۰۰ نانومتر، تابع تغییرات سرعت در جریان سطحی سیال می‌باشد. همچنین سرعت سطحی پایین فیلتراسیون (۰.۰۵ m/s) با افزایش اندازه ذرات باعث کاهش کارایی جمع آوری ذرات مونودیسپرس شده است. همچنین با افزایش سرعت فیلتراسیون، با کاهش اندازه ذرات کاهش کارایی جمع‌آوری اثبات شد [۲۱].

یکی از عوامل مهم و تعیین کننده در انتخاب و به‌کارگیری دستگاه پالایش هوا، میزان مصرف انرژی و هزینه راهبری سامانه تصفیه کننده است. در فرآیند



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

پالایش، میزان مصرف انرژی با افت فشار رابطه مستقیمی دارد. از طرفی با افزایش سرعت عبور جریان گاز از صافی افت فشار نیز افزایش می‌یابد افت فشار صافی اولپا بر حسب سرعت جریان عبور هوا در شکل ۶ نشان داده شده است. بستر صافی ULPA به سبب دارا بودن الیاف باریک و فشردگی زیاد، در عبور هوا با سرعت ثابت افت فشار بیشتری دارد. نتایج این مطالعه با نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد [۱۷, ۲۱-۲۳].

هنگامی که راندمان صافی‌ها مطرح می‌شود دو عامل نفوذ ذرات از فیلتر و همچنین مقاومت فیلتر در مقابل عبور جریان هوا به دلیل اهمیت‌شان نیاز به توجه خاصی داشته و جهت‌گیری بحث در مورد کیفیت صافی را بخود اختصاص می‌دهند. در این پژوهش نظر به اهمیت هر دو عامل فوق نه تنها این به تفکیک مورد تحقیق قرار گرفته‌اند بلکه با هم ادغام و کیفیت فیلتر با استفاده از رابطه $q_f = Ln\ (1/p)/\Delta P$ که در آن P میزان نفوذ و$\Delta P$ افت فشار صافی است تعیین گردید. فاکتور کیفیت (QF) وابسته به نفوذپذیری و افت فشار است. به بیان دیگر می‌توان گفت فاکتور کیفیت تابع میزان جریان است و با افزایش میزان جریان، فاکتور کیفیت فیلتر کاهش می‌یابد. فاکتور کیفیت صافی اولپا برای ذرات در گستره ۷۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ نانومتر در سرعت جریان ۱.۵۸ تا ۵ $cm.s^{-1}$ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۷ می‌توان دید که بیشترین فاکتور کیفیت مربوط به ذرات ۳۰۰nm و کمترین فاکتور کیفیت مربوط به ذرات ۱۰۰nm می‌باشد. می‌توان دید که با افزایش سرعت جریان، فاکتور کیفیت برای ذراتی با اندازه‌های مختلف کاهش می‌یابد. فاکتور کیفیت برای ذره ۱۰۰ نانومتری در حداقل سرعت جریان (cm/s۱.۵۸) حدود ۸.۹۳ و در ماکزیمم سرعت، حدود ۷.۰۲ نشان داده شد. به طوری که فاکتور کیفیت در صافی اولپا برای ذره ۱۰۰ نانومتری کمتر از ذره ۷۰ نانومتر به دست آمد. فاکتور کیفیت برای ذره ۷۰ nm در پایین‌ترین سرعت حدود ۱۰.۴۱ و در سرعت جریان بالا حدود ۷.۶۶ تعیین شد.

نتایج شکل ۷ گویای این مطلب است که با افزایش قطر از ۷۰ تا ۱۰۰ nm فاکتور کیفیت کاهش و با افزایش قطر ذرات تا ۳۰۰nm، فاکتور کیفیت افزایش می‌یابد. نتایج مطالعه دون هال (Don –Hee Hah) نشان داد که با افزایش میزان جریان، فاکتور کیفیت صافی الیافی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیق فوق نشان داد که با افزایش میزان جریان، درصد نفوذپذیری و افت فشار عبوری از بستر افزایش می‌یابد[۲۴] به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش اندازه ذرات تا ناحیه MPPS نفوذپذیری کم و در ناحیه MPPS نفوذپذیری بیشتر و بعد از این مرحله مجدداً نفوذپذیری کاهش یافته و بدین ترتیب فاکتور کیفیت صافی الیافی افزایش پیدا می‌کند.

در این پژوهش کیفیت یک بستر الیافی با کارایی بالا تابع اندازه ذرات و دبی گاز حامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که:

- در ناحیه احتمال ربایش با مکانیسم انتشار (جریان پایین و ذرات ریز)، بستر دارای کارائی بسیار بالای می‌باشد.
- بستر در ناحیه اندازه ذرات ۱۰۰ نانومتر (MPPS) دارائی حداقل کارائی است. مقدار کارائی در ناحیه MPPS برابر ۰.۹۹۹۹۹۹۷ بدست آمد.
- افت فشار صافی ULPA با سرعت سطحی جریان ارتباط معکوس دارد. حداقل و حداکثر افت فشار در گستره جریان مورد مطالعه به ترتیب برابر ۷۹ و ۲۰۴ می‌باشد.
- فاکتور کیفیت صافی اولپا با افزایش سایز ذره از ۷۰ تا ۱۰۰ نانومتر، کاهش و ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر، افزایش یافت.
- شیب فاکتور کیفیت در صافی اولپا در ناحیه پایین‌تر از MPPS منفی و در ناحیه بالاتر از MPPS مثبت ارزیابی شده است.
- نتایج این بررسی نشان داد که فیلترهای ULPA دارای کارائی بالا حتی در ناحیه اندازه ذرات MPPS دارند. بدین لحاظ پیشنهاد می‌شود در سیستم‌های فیلتراسیون صنایع دارای پتانسیل بالای ریسک



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

آلاینده‌های مضر مانند صنایع هسته‌ای از این نوع فیلتر استفاده شود.

## منابع


1. Shaffer RE, Rengasamy S. Respiratory protection against airborne nanoparticles: a review. Journal of nanoparticle research. 2009;11(7):1661-72.
2. Hayes A, Bakand S. Inhalation toxicology. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. 2010: 461-88.
3. Bakand S, Farshad A, Review of nanotechnology and nanoparticle toxicology, J. of Iran Occupational Health, 2006; Volume 4(1,2), 1-3.
4. Aitken R, Creely K, Tran C. Nanoparticles: An occupational hygiene review. Research Report. 2004; 274.
5. Friedlander SK, Pui DYH. Emerging issues in nanoparticle aerosol science and technology. Journal of nanoparticle research. 2004;6(2):313-20.
6. Liu BYH. Advances In Aerosol Filtration. Research Development 5 Engineering Center. 1992:11.
7. Kim S, Harrington M, Pui D. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. Nanotechnology and Occupational Health. 2007:117-25.
8. Steffens J, Coury J. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: II. Heterogeneous fibers. Separation and purification technology. 2007; 58(1):106-12.
9. Eninger RM, Honda T, Adhikari A, Heinonen-Tanski H, Reponen T, Grinshpun SA. Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. Annals of Occupational Hygiene. 2008;52(5):385-96.
10. BaŁazy A, Toivola M, Reponen T, Podgórski A, Zimmer A, Grinshpun SA. Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. Annals of Occupational Hygiene. 2006;50(3):259-69.
11. Eshbaugh JP, Gardner PD, Richardson AW, Hofacre KC. N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow. Journal of occupational and environmental hygiene. 2008;6(1):52-61.
12. Sadighzadeh A. M. Aliebrahimi M. Sarkari S. Appropriate Mask Selection Study for Nuclear Industries Activities, J. of Nuclear Sci and Tech, 2008; 41: 26-30
13. VanOsdell DW, Liu BYH, Rubow KL, Pui DYH. Experimental study of submicrometer and ultrafine particle penetration and pressure drop for high efficiency filters. Aerosol science and technology. 1990;12(4):911-25.
14. Sadighzadeh A. M. Aliebrahimi M. Sarkari S. Appropriate Mask Selection Study for Nuclear Industries Activities, J. of Nuclear Sci and Tech, 2008; 41: 26-304(42):30-26.
15. Leung WWF, Hung CH, Yuen PT. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. Separation and purification technology. 2010;71(1):30-7.
16. Davies CN. Air filtration: Academic Press London; 1973.
17. Hung CH, Leung WWF. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. Separation and purification technology. 2011.
18. Steffens J, Coury JR. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I—Homogeneous fibers. Separation and purification technology. 2007;58(1):99-105.
19. Kulkarni P, Baron PA, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications: Wiley; 2011.
20. Gregory AS, Ernest SM. "Worst case" aerosol testing parameters: I. Sodium chloride and dioctyl phthalate aerosol filter efficiency as a function of particle size and flow rate. The American Industrial Hygiene Association Journal. 1989;50(5):257-64.
21. Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N, Tekasakul P. Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters. Aerosol and Air Quality Resarch. 2007;7(3):343-52.
22. Leung WW-F, Hung C-H, Yuen P-T. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. Separation and purification technology. 2010;71(1):30-7.
23. Yun KM, Suryamas AB, Iskandar F, Bao L, Niinuma H, Okuyama K. Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration. Separation and purification technology. 2010;75(3):340-5.
24. Don-Hee H. Performance of respirator filters using quality factor in Korea. Industrial health. 2000;38:380-4.




[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]

# Investigating the collection efficiency of ULPAfilters for the removal of nano-sized aerosols

Gh.R Moradi[1], A. Sadighzadeh[2], R. Yarahmadi[3], Sh.Bakand[4], A.A Farshad[5], B. Rzaiipour[6] S. Musavi[7], M.Solhi[8]

Received: 2012/06/05 Revised: 2012/09/18 Accepted: 2012/09/30

## Abstract

**Background and aims**: With the increasing application of nanotechnology concerns about the negative effects of human exposure and environmental releases of these particles is also doubled. Among the most well-known media, ULPA filters are used to control nanoparticles. In this study, the efficiency and pressure drop of ULPA fiber bed for collection and removal of nanoparticles were investigated.

**Methods:** ULPA filter efficiency and pressure drop was measured by using nano-scale aerosol particle size range 70 -700 nm sucrose at different flow rates 1.58- 5 cm.s $^{-1}$. The ULPA filter used had a thickness of 0.4 mm. A cylindrical test system was constructed as a form of stainless steel with a filtration surface of 0.013m$^2$. Desired particles were generated using Electrospray 3480 model particle generator. Condensation particle counter CPC Models 5.410 Gream Company was implemented to measure particle number concentration before and after filter bed and to calculate the performance**.**

**Results:** Results showed that the maximum amount of substrate permeability of ULPA media (independent of the velocity rate) was for the particles of 100 nm and it was determined as the MPPS in this media. However, data analysis revealed a significant relationship between diameter and efficiency parameters of the MPPS (negative), and the MPPS (positive).

**Conclusion**: The ULPA media used in this study with the MPPS particles of 100 nm can be introduced as a particles control substrate for experimental conditions presented in the study.

**Keywords**: nanoparticles, ULPA filter, performance, MPPS.

1. Msc Student of Occupational health, School of public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
2. Associate Prof Chemistry Research Group, Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Institute, Tehran, Iran.
3. (**Corresponding author**) Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. rasoulpch@yahoo.com
4. Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of Medical Sciences,Tehran, Iran.
5. Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of public Health, Iran University of Medical Sciences,Tehran, Iran.
6. Bachelor, Enviromental health, The Environmental Engineering Laboratory, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.
7. PhD student in Biostatistics, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.
8. Associate Professor, Education and Health Promotion Department, School of Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.



[ Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-17 ]