

## تعیین توزیع اندازه ذرات دوده از اگزوز موتورهای دیزلی و طراحی و ارزیابی یک فیلتر الکترواستاتیک برای حذف اینگونه ذرات از جریان اگزوز

علی اصغر حمیدی

استادیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

گیتا معینی

کارشناس ارشد گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علی اصغر صدیق زاده

سازمان انرژی اتمی ایران

(تاریخ دریافت ۷۷/۳/۳۰، تاریخ تصویب ۷۷/۱۰/۸)

### چکیده

یکی از معضلات امروزی شهر و شهرنشینی آلودگی هوا است. از جمله منابع موثر در آلودگی هوای شهرها دود خروجی از اگزوز اتومبیلها می باشد. ترکیبات متعددی از اگزوز اتومبیلها خارج می گردد که یکی از آنها ذرات سیاه دوده ناشی از احتراق ناقص سوخت در موتور خصوصاً موتورهای دیزلی است. در این تحقیق ابتدا با استفاده از یک سیستم نمونه برداری و تعیین اندازه ذرات براساس قوانین مکانیک سیالات دوفازی توزیع اندازه و مقدار ذرات دوده خروجی از اگزوز چند اتومبیل دیزلی دودزا مشخص شده است. اندازه ذرات دوده خروجی کوچکتر از ۱ میکرون می باشد. جهت جداسازی این ذرات نمی توان از تجهیزات مکانیکی مانند سیکلونها و شستشودهنده ها استفاده کرد و تنها روش عملی جهت این جداسازی استفاده از فیلترهای الکترواستاتیک است. در این مطالعه چگونگی جداسازی ذراتی با این اندازه ها از یک گاز جاری با استفاده از فیلتر الکترواستاتیک مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. با استفاده از یک مولد ائروسول ذرات با قطرهای متفاوت تولید و در جریان گازی با سرعت  $1-10 \text{ m/s}$  تزریق شدند. تعداد ذرات قبل و بعد از فیلتر الکترواستاتیک و بنابراین راندمان جداسازی با استفاده از یک دستگاه شمارنده هسته های متراکم مشخص گردید. فیلتر الکترواستاتیک از نوع لوله و سیم با قطر لوله برابر  $5 \text{ cm}$  و طول  $40 \text{ cm}$  طراحی و ساخته شد. اختلاف پتانسیل فیلتر در گستره  $5-12 \text{ KV}$  تغییر داده شد و در نهایت مشخص گردید که با نصب یک فیلتر الکترواستاتیک ساده در مسیر دود خروجی از اگزوز احتمال جداسازی تا  $80$  درصد از ذرات دوده از جریان وجود دارد.

کلید واژه ها: ذرات دوده، اگزوز موتورهای دیزلی، اندازه گیری، جداسازی، فیلتر الکترواستاتیک

### مقدمه

تولید منواکسید کربن و هیدروکربنهای نسوخته مقدار قابل ملاحظه ای دوده نیز از اگزوز اینگونه موتورها که بر روی خودروهای عمومی درون شهری و بارکش نصب شده اند به هوا آزاد می گردد. اینگونه ذرات علاوه بر ایجاد زمینه برای ابتلاء انسان به انواع بیماریها، باعث کم شدن دید و کثیف شدن و ایجاد لکه های ناموزون بر روی ساختمانها و بناهای شهری می گردند. البته سالم بودن و تنظیم صحیح

امروزه آلودگی هوای شهری یکی از مشکلات اصلی جوامع بشری است. عمده آلودگی هوای شهرها به علت احتراق ناقص در موتورهای درون سوز است. از جمله آلاینده های مهم، ذرات دوده خروجی از اگزوز موتورهای دیزلی می باشد. در این موتورها، خصوصاً انواع فرسوده و خارج از تنظیم آنها احتراق قطرات پاشیده شده به درون هوای داغ موتور بطور کامل صورت نمی گیرد و علاوه بر

هدف این مقاله بررسی چگونگی تولید دوده در این موتورها نمی باشد و برای مطالعه بیشتر در این خصوص می توان به مراجع مراجعه کرد [۳-۵]. در اینجا فرض بر این است که ذرات دوده تولید شده اند و وارد لوله آگزوز موتور شده و بنابراین در آستانه ورود به هوای محیط می باشند.

### روشهای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات کوچک

برای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات کوچک یا ابروسلها روشهای مختلفی ابداع شده است. این روشها به روشهای تداخلی و غیرتداخلی تقسیم بندی می گردند. در روشهای غیر تداخلی اغلب از لیزر جهت آشکارسازی حضور و تعیین اندازه ذرات استفاده می گردد. اندازه گیریها براساس پدیده های پراش و پخش نور توسط ذرات معلق در محیط است. این روشها بسیار دقیق و حساس و البته پرهزینه می باشند، کوچکترین قطر قابل اندازه گیری توسط این روشها اندکی بزرگتر از طول موج نور بکار گرفته شده، یعنی در حدود یک میکرومتر است [۶]. در روشهای تداخلی نمونه ای از جریان حاوی ذرات از مسیر اصلی گازها جدا شده و به درون دستگاه اندازه گیری هدایت می گردد. در یکی از این نوع روشها با نشست ذرات بر روی یک صفحه و بررسی آنها زیر میکروسکوپ می توان قطر آنها را تعیین کرد. در وسیله دیگری که براساس اینرسی و یا لختی ذرات پایه گذاری شده است، ذرات جاری در جریان گاز براساس اینرسی آنها تفکیک می شوند، بطوریکه با این روش می توان توزیع اندازه این ذرات را تعیین کرد [۷]. دستگاه که به برخورد دهنده چند مرحله ای معروف است در این تحقیق بکار گرفته شد و بنابراین مورد بحث بیشتری واقع می گردد [۸].

دستگاه برخورد دهنده، شکل ۱ از چند طبقه تشکیل شده است که ذرات از بزرگ به کوچک براساس اینرسی مربوطه از جریان گاز حامل جدا می شوند و در هر طبقه بر روی صفحه برخورد کرده، نشست می کنند. جریان توسط یک مکنده از درون دستگاه مکیده می شود.

صفحه های برخورد دهنده مشبک بوده و از بالا به پایین اندازه سوراخهای آنها کوچکتر می گردد. با ورود گاز به

موتور اثر قابل ملاحظه ای در کاهش تولید آلاینده ها، خصوصاً دوده دارد. اما در هر صورت همانطور که بطور روزمره مشاهده می گردد بسیاری از اینگونه وسایل تقلیه ایجاد دوده و بنابراین آلودگی هوا می نمایند. در مطالعه حاضر هدف تعیین توزیع اندازه ذرات دوده خروجی از آگزوز اینگونه موتورها است تا به این وسیله امکان جداسازی ذرات دوده جاری در لوله آگزوز مورد مطالعه قرار گیرد. در این مقاله ابتدا توضیحات لازم در خصوص ماهیت دوده و ویژگیهای آن ارائه می گردد، سپس به اختصار روشهای موجود برای اندازه گیری توزیع اندازه این گونه ذرات مورد بحث قرار خواهد گرفت و بعد با انجام آزمایشاتی بر روی چند خودرو دودزا توزیع اندازه این ذرات مشخص خواهد شد. در پایان طراحی، ساخت و ارزیابی الکترو فیلتر مناسبی برای دوده زدایی از جریان آگزوز تشریح می گردد [۱].

### موتورهای دیزلی و دوده

در موتورهای دیزلی سوخت بصورت پودر شده به درون هوای داغ و متراکم درون سیلندر پاشیده می شود. با تبخیر و اشتعال سوخت عمل احتراق در موتور صورت می گیرد [۲]. دلایل متعددی برای تولید دوده در این موتورها وجود دارد که مهم ترین آنها عبارتند از:

- ۱ - کیفیت سوخت - سوختهای با درصد بیشتر ترکیبات آروماتیکی تمایل بیشتری به دود کردن دارند.
- ۲ - خواص فیزیکی سوخت - ویسکوزیته و کشش سطحی از اهمیت بیشتری برخوردارند.
- ۳ - فشار تزریق سوخت به درون محفظه احتراق.
- ۴ - قطر نازل سیستم تزریق سوخت.
- ۵ - زمان که باید جهت احتراق کامل کافی باشد.

انحراف از مقادیر بهینه برای هر یک از موارد بالا می تواند به تولید ذرات دوده منجر گردد. در خصوص چگونگی تولید ذرات دوده هنوز نظریه ثابت شده ای وجود ندارد، اما بطور کل فرایند تولید دوده را می توان متشکل از سه مرحله (۱) شکسته شدن مولکولهای سوخت به پاره هائی با وزن مولکولی کمتر، (۲) ترکیب مجدد این پاره مولکولها و (۳) هیدروژن زدایی از این ترکیب جدید در نظر گرفت.

شکل ۲ چگونگی برخورد ذرات درشت بر روی صفحه برخورد دهنده را نمایش می دهد. روابط ریاضی تعیین کننده برای جداسازی ذرات براساس مکانیسم برخورد اینرسی دو عدد استوکس و رینولدز می باشند که تعریف و مفهوم فیزیکی آنها در خصوص عملکرد این دستگاه به قرار زیر است.

۱ - عدد استوکس ( و با توجه به آن پارامتر K (inertial impaction parameter):

$$St = C \frac{\rho_g U_e d_p^2}{9\mu_g D_c} \quad K = C \frac{\rho_g U_e d_p^2}{18\mu_g D_c} \quad K = \frac{St}{2}$$

K برای قطر موثر ۵۰٪ برش تقریباً برابر ۱۴/۰ می شود. برای ذرات کوچک، یک ضریب تصحیح لغزش C معروف به ضریب کانینگهام، نیز مطرح می شود [۹،۱۰].

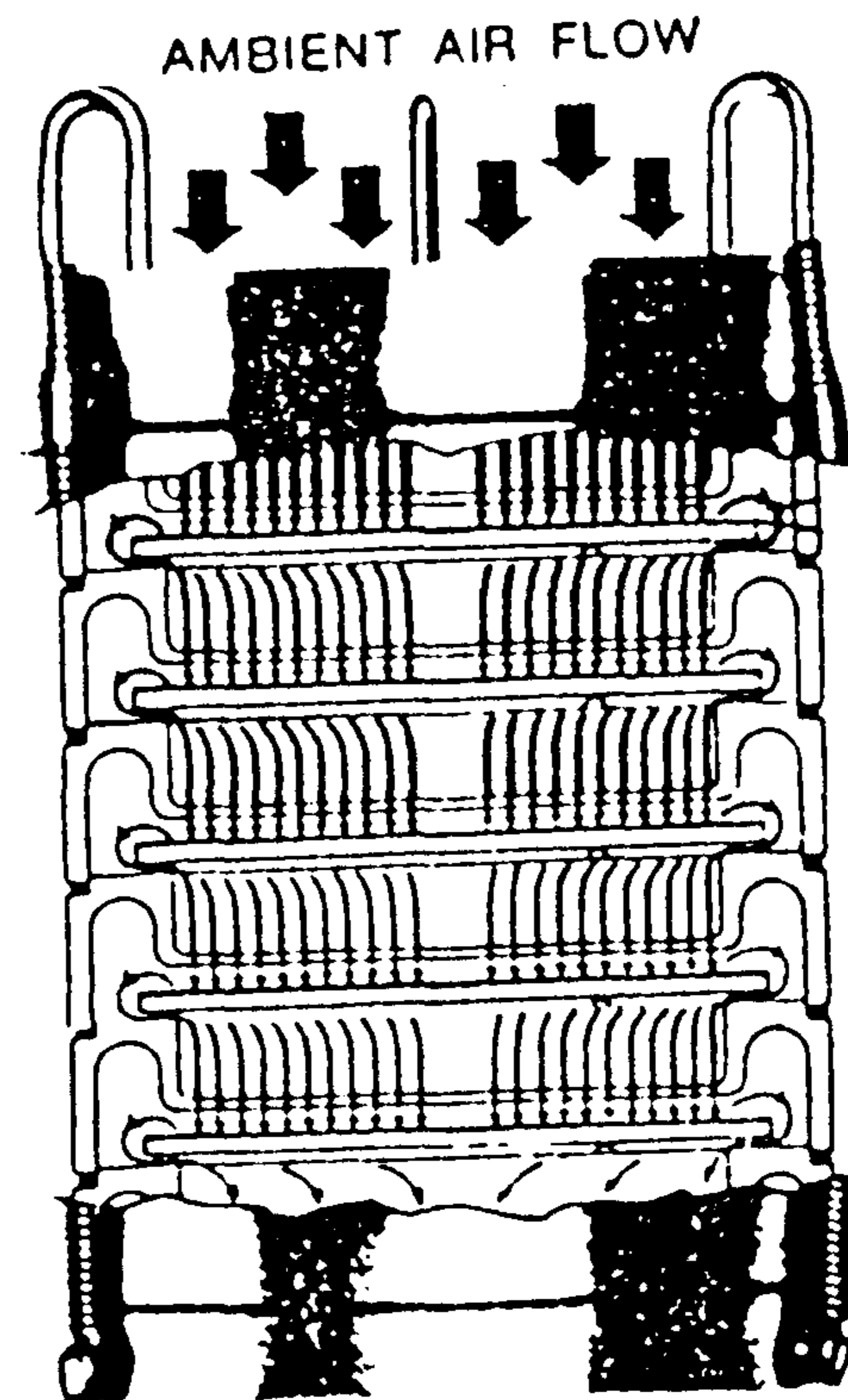
۲ - عدد رینولدز ذره  $Re_p = \frac{\rho_g d_p U_e}{\mu_g}$  برای استفاده صحیح از این دستگاه و تشکیل برشهایی با اندازه مشخص روابط زیر باید برقرار باشند (شکل ۲):

$$\frac{S}{D_c} \geq 1 \quad \frac{H}{D_c} \geq 1 \quad 500 < Re_p < 3000$$

برای  $Re_p < 500$ ، ضخامت لایه آرام بالای صفحه برخورد خیلی بزرگ می شود و باعث اتلاف ذرات درشت می گردد. برعکس اگر لایه آرام خیلی نازک شود یعنی  $Re_p > 25000$ ، مکانیزم برخورد در اثر نفوذ از میان لایه بوجه می آید و ذراتی که قطرشان کوچکتر از قطر برش طبقه باشد روی صفحه برخورد خواهند نشست.

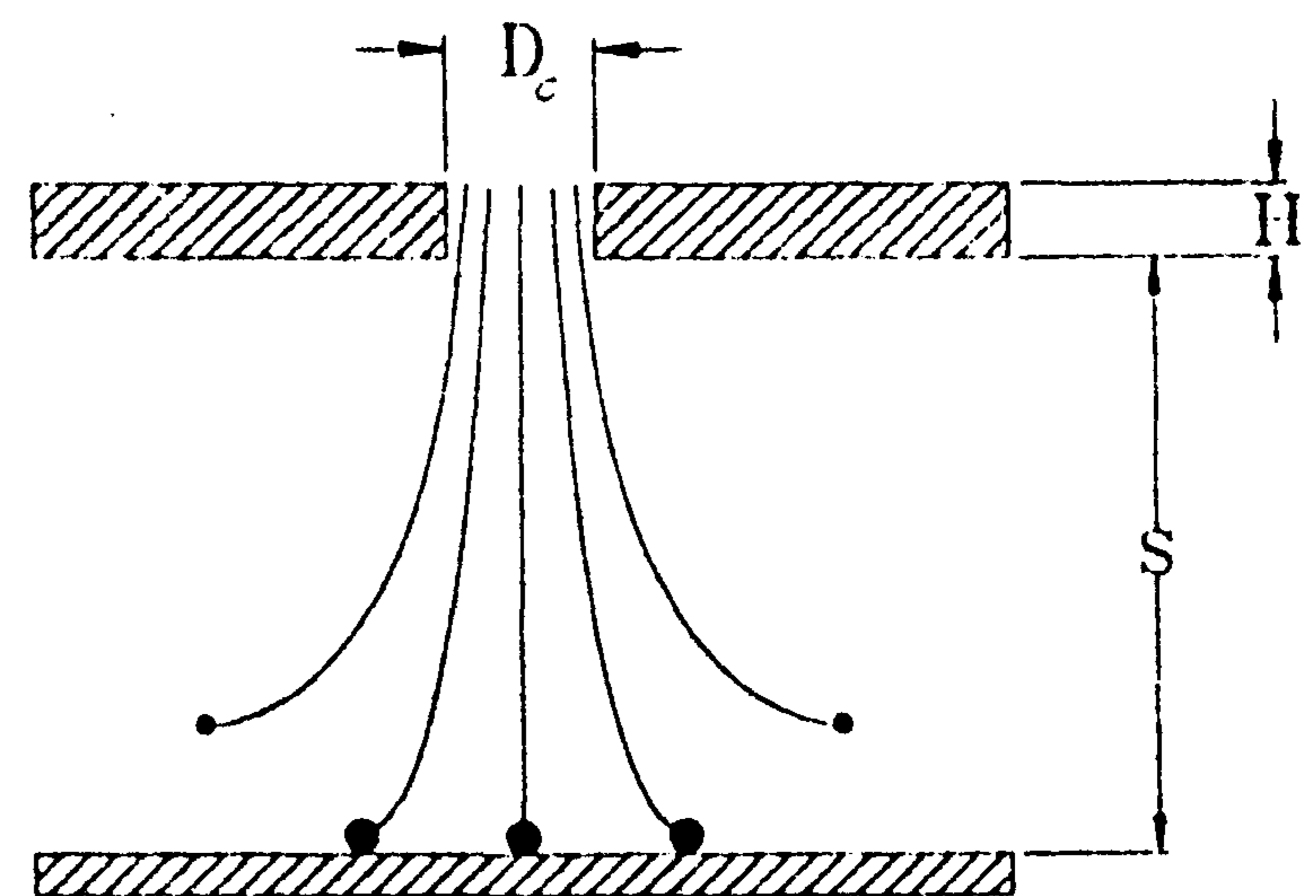
نشان داده شده است که به محض عبور ذرات از میان یک جت، نزدیکی آنها به محور جت یکی از عوامل موثر در رسیدن و نشستن ذره روی سطح است. همچنین به واسطه ویژگیهای طراحی این دستگاه تداخل یا هم پوشانی اندازه ذرات در برشهای مختلف به حداقل می رسد. اگر سرعت بکار گرفته شده در انتقال ذرات از مقدار تعیین شده بیشتر باشد، جریان درهم و ماندگی باعث انتقال توزیع اندازه به سمت انتهای کمتر می شود، یعنی نمایش توزیع اندازه کوچکتر از مقدار واقعی خواهد بود.

بنابراین با استفاده صحیح از دستگاه براساس این روابط



شکل ۱: شمای مقطعی برخورد دهنده چند مرحله ای.

دستگاه و برخورد با اولین صفحه ذرات درشت قادر به دنبال کردن جریان به درون روزنه های صفحه نبوده و بنابراین بر روی آن نشست می کنند. گاز به همراه ذرات باقی مانده از درون روزنه ها عبور کرده، شتاب می گیرد و اندازه حرکت ذرات افزایش می یابد. در نزدیکی به صفحه دوم ذرات با اینرسی بیشتر بر روی صفحه نشست کرده و گاز به همراه ذرات باقی مانده به مراحل بعدی منتقل می شود. اندازه ذرات نشست کرده بر روی هر صفحه تابعی از قطر سوراخهای روی صفحه قبل و سرعت گاز است که توسط توان مکنده نصب شده بر روی سیستم تعیین می گردد و برای عملکرد صحیح دستگاه مقدار آن کاملاً تعریف شده است.



شکل ۲: مکانیسم برخورد.

است با:

$$E(r) = \frac{V}{r \ln \left( \frac{R_0}{R_i} \right)}$$

$V$  اختلاف پتانسیل مستقیم (dc) بین استوانه‌ها است.

در فیلتر الکترواستاتیک،  $R_i$  کوچک است و  $R_0 \gg R_i$  بنابراین شدت میدان در سطح الکتروود مرکزی خیلی بزرگتر از بیرون (بقیه فضای داخل فیلتر) است و با حرکت در جهت شعاع به سمت الکتروود بیرونی، شدت میدان کاهش می‌یابد. ناحیه کوچکی که با یک نور بنفش مشخص می‌شود کرونا یا تخلیه نامیده می‌شود. یونهای هردو قطب درون کرونا وجود دارد اما بیرون آن تنها یونهایی از همان قطب که الکتروود مرکزی باشد، یافت می‌شود. شدت بحرانی میدان در سطح الکتروود برابر است با:

$$E_c = E(R_i, V_c) = \frac{V_c}{R_i \ln \left( \frac{R_0}{R_i} \right)}$$

این فیلترها معمولاً با یک الکتروود مرکزی با ولتاژ منفی کار می‌کنند. اگرچه ولتاژهای مثبت و متغیر نیز استفاده شده‌اند، اما ولتاژ منفی ترجیح داده می‌شود زیرا کرونا منفی در مقدار کمتری از  $E_c$  آغاز می‌شود در نتیجه تولید جریانهای بزرگتری می‌کند و می‌تواند ولتاژهای بالاتری را قبل از رسیدن به ولتاژ جرقه<sup>(۱)</sup> بگیرد. از لحاظ ظاهری این دو نوع کرونا با یکدیگر متفاوتند، کرونا مثبت یک نور (اشعه) یکنواخت در طول الکتروود ایجاد می‌کند، اما کرونا منفی حتی در جریانهای بسیار پائین، منجر به تعدادی نقطه درخشان در طول الکتروود می‌گردد.

نیروی وارد شده بر ذرات از سوی میدان،  $F_E$  که جهت آن به قطبیت بار ذره و جهت میدان الکتریکی بستگی دارد برابر است با:

$$F_E = qE \quad \text{و} \quad q = ne$$

البته اگر ذره باردار نباشد، میدان الکتریکی بکار رفته باعث پلاریزه شدن ذره می‌گردد و تولید یک دو قطبی می‌کند که باعث اعمال نیرویی برابر با  $F_E = \left[ \frac{\xi-1}{\xi+1} \left( \frac{d_p^3}{16} \right) \right] \text{grad} E^2$  بر ذره شده و موجب حرکت آن

مشاهده می‌گردد که به راحتی می‌توان قطر متوسط ذرات نشست کرده بر روی هر صفحه را تعیین کرد.

### جداسازی ذرات ائروسول با استفاده از فیلترهای الکترواستاتیک

برای جداسازی ذرات جامد از جریان هوا از روشهای مکانیکی متعددی از جمله شوینده‌ها، سیکلونها، فیلترهای پارچه‌ای و غیره می‌توان استفاده کرد [۹،۱۰]. این روشها منجر به افت فشار زیاد در جریان گاز شده و اغلب برای ذرات کوچکتر از یک میکرومتر از راندمان جداسازی بسیار کمی برخوردار هستند. فیلترهای الکترواستاتیکی برعکس قادر به جداسازی موثر ذرات کوچک از جریان گازها می‌باشند و افت فشار ناشی از نصب آنها در مسیر گاز بسیار ناچیز است.

نشست دهنده یا فیلتر الکترواستاتیک یک فرآیند دو مرحله‌ای است. در مرحله اول، ذرات موجود در جریان گاز در یک میدان تک قطبی در اثر برخورد یا نفوذ مولکولهای گاز باردار می‌شوند و در کسر بسیار کوچکی از ثانیه (تقریباً یک ده میلیونیم ثانیه) به بار اشباع ذره که بستگی به اندازه دارد می‌رسند. در مرحله دوم، یک میدان الکتریکی قوی با اعمال نیرو باعث جدا شدن ذرات باردار از جریان گاز و مهاجرت آنها به سوی الکتروود جمع آوری می‌شوند. تا در آنجا بار خود را از دست داده، خنثی شوند و روی یک سطح جمع آوری مناسب نشست کنند. در عمل مرحله دوم معمولاً از وقتی آغاز می‌شود که مرحله اول هنوز پایان نیافته است. فرآیند باردار کردن، احتیاج به تولید پیوسته تعداد زیادی یون دارد، که به این منظور غالباً از یک کرونا تخلیه استفاده می‌شود [۱۱،۱۲].

فیلترهای الکترواستاتیکی دارای انواع و طرحهای مختلف و متنوعی هستند. یکی از این انواع طرح دو استوانه هم مرکز است که یکی از استوانه‌ها یک سیم باریک و دیگری لوله‌ای است، که جریان گاز غبارآلود را دربر می‌گیرد.

اگر  $R_0$  و  $R_i$  به ترتیب شعاعهای استوانه‌های داخلی و خارجی باشند، شدت میدان الکتریکی بین دو استوانه هم مرکز در یک فاصله  $r$  از محور الکتروود مرکزی برابر

$$q = \left[ \left(1 + \frac{2\lambda_i}{d_p}\right)^2 + \frac{2(\xi-1)}{1+(\xi+2)} \right] \pi \epsilon_0 E_1 d_p^2$$

برای ذرات بسیار ریز ( $\frac{\lambda_i}{d_p} \gg 1$ ) جمله دوم داخل کروهه بسیار کوچک و قابل صرفنظر می باشد. با ساده سازی بیشتر معادله زیر برای محاسبه بار ذرات بسیار کوچک مناسب است:

$$q_{fine} = 4\pi\lambda_i^2\epsilon_0 E_1$$

برای ذرات با قطر خیلی بزرگتر از مسیر آزاد متوسط یونی ( $\frac{\lambda_i}{d_p} \ll 1$ ) می توان از مقدار  $\frac{2\lambda_i}{d_p}$  در جملات اول و دوم صرفنظر کرد و نوشت:

$$q_{coarse} = \left(1 + 2\frac{(\xi-1)}{(\xi+2)}\right) \pi \epsilon_0 E_1 d_p^2$$

البته معادلات دیگری نیز توسط دیگر محققان و براساس تئوری های مختلف مانند باردار شدن نفوذی و میدانی و ... بیان شده است اما معادله کوچک در عین اینکه از دقت خوبی برخوردار است، ساده نیز می باشد و به پارامترهای کمتری جهت محاسبه نیازمند است.

### بازده جمع آوری فیلترهای الکترواستاتیکی

راندمان جمع آوری ذرات به مقدار نسبی زمان انتقال گاز عبوری از ناحیه جداسازی و زمان لازم برای رسیدن یک ذره باردار به الکتروود بیرونی بستگی دارد. برای جریان آرام در جداکننده بازده جمع آوری  $\eta$ ، برای ذرات با یک اندازه داده شده و با فرض موبیلیته الکتریکی یکسان ذرات عبارت است از:

$$\eta = \left(\frac{R_0^2 - r^2}{R_0^2 - R_i^2}\right) \approx \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)$$

که  $r$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{R_0 - r}{\mu_p E} = \frac{L}{U} \quad \text{برای } r \gg R_0$$

جمله سمت چپ زمان لازم برای حرکت ذره ای با موبیلیته  $\mu_p$  از  $r$  به  $R_0$  در یک میدان الکتریکی با شدت متوسط  $E$  است.

جمله سمت راست زمان انتقال هوا با یک سرعت متوسط خطی  $U$  از دورن جداکننده بطول  $L$  می باشد. در حالت کلی، کمترین مقدار  $\mu_p$  از  $0.001 \text{ cm}^2/\text{Volt Sec}$

در جهت افزایش شدت میدان می گردد. سرعت نهایی  $U_E$  از این نیرو در شرایطی پیش می آید که:

$$Ene = \frac{U_E}{z}$$

$z$  موبیلیته مکانیکی ذرات است. تعریف موبیلیته الکتریکی ذرات همانند تعریف موبیلیته برای یک یون یعنی سرعت در واحد شدت میدان الکتریکی است.

$$\mu_p = \frac{U_E}{E} = nez \propto d_p^{b-1} C$$

$C$  فاکتور لغزش کائینگهام ذرات است.

برای ذرات بزرگ، موبیلیته با افزایش اندازه افزایش می یابد. برای اندازه های کوچکتر، با کاهش قطر موبیلیته به سمت یک مقدار حداقل میل می کند. با توجه به این پدیده در جداکننده های الکترواستاتیک ذرات خیلی کوچکتر که به راحتی باردار می شوند به همراه ذرات خیلی بزرگ، به سرعت نشست می کنند اما ذرات نزدیک  $0.2 \mu\text{m}$  با دشواری جدا می شوند.

ذرات بسیار ریز ممکن است بطور متوسط تنها یک یا دوبار بدست آورند و یا مقدار قابل ملاحظه ای از آنها ممکن است بدون باردار شدن از داخل فیلتر عبور کند.

ذراتی که از جریان گاز حامل جدا شده اند و بسوی الکتروود جمع آوری حرکت می کند دارای یک سرعت نسبی نسبت به جریان گاز می شوند که به آن سرعت مهاجرت  $w_f$  گفته می شود. این سرعت از تساوی دو نیروی اصلی  $F_E$  و  $F_R$  یعنی نیروهای مقاومت و الکتریکی با صرفنظر از نیروهای ثقل و شناوری محاسبه می شود:

$$F_R = 6\pi\mu_g a_p w_f$$

$$w_f = \frac{qE}{6\pi\mu_g a_p}$$

و با اعمال ضریب تصحیح لغزش کائینگهام خواهیم داشت:

$$w_f = \frac{qEC}{6\pi\mu_g a_p}$$

$q$  مقدار بار اشباع گرفته شده توسط ذره است و از معادله کوچت Cochet قابل محاسبه می باشد.

اصولاً جریان گاز آگزوز فاقد این ذرات است و دوم اینکه باتوجه به هدف اصلی تحقیق یعنی استفاده از فیلترهای الکترواستاتیک برای دوده زدائی از گاز آگزوز مشخص است که در فیلتر ساخته شده برای جداسازی ذرات کوچک به سادگی می توان ذرات درشت را نیز جدا کرد. علاوه بر این ذرات درشت در خروجی آگزوز موتور به سرعت ته نشین می گردند و این ذرات کوچک هستند که برای مدتی طولانی هوا برد باقی مانده موجب مشکلات محیط زیست و خصوصاً تنفسی ساکنین شهرها می گردند. بنابراین در موقع نمونه گیری از گاز آگزوز لوله نمونه گیر دستگاه برخورد دهنده چند مرحله ای طوری تعبیه گردید که جریان ورودی به دستگاه عاری از ذرات درشت تر از  $10\mu\text{m}$  باشد. بطور نشان داده شده در شکل ۳ جهت نمونه گیری گاز خروجی از لوله آگزوز ابتدا وارد لوله بزرگتری می گردد تا همانند یک محفظه ته نشینی اجازه کاهش سرعت و امکان ته نشینی ذرات درشت را فراهم کند و تنها ذرات کوچک از طریق لوله نمونه گیری که در نزدیکی سقف محفظه ته نشینی تعبیه شده است به طرف دستگاه برخورد دهنده هدایت می گردند. طبق استانداردهای تعریف شده در کاتالوگ دستگاه میزان مکش گاز از درون دستگاه برابر  $28/3$  لیتر بر دقیقه تنظیم گردید. در آزمایشات انجام شده که بر روی آگزوز دو مینی بوس و یک اتوبوس دودزا اجرا گردید دو هدف مدنظر بود.

(۱) - تعیین توزیع اندازه ذرات (کوچکتر از  $10\mu\text{m}$ )

(۲) - تعیین غلظت کل ذرات دوده (بزرگتر و کوچکتر از  $10\mu\text{m}$ ) در گاز جاری.

بزرگتر و جمع آوری ذرات وقتی کامل خواهد شد که  $\frac{L}{U} > 10^3 \frac{R_0}{E}$  باشد.

بطور تجربی، بازده های جمع آوری برای ابروسلهای با قطر متوسط جرمی  $0.7-0.2\mu\text{m}$  بزرگتر از  $99/9\%$  است.

برای جریان متلاطم بازده با معادله زیر داده می شود.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2\mu_p EL}{R_0 U}\right)$$

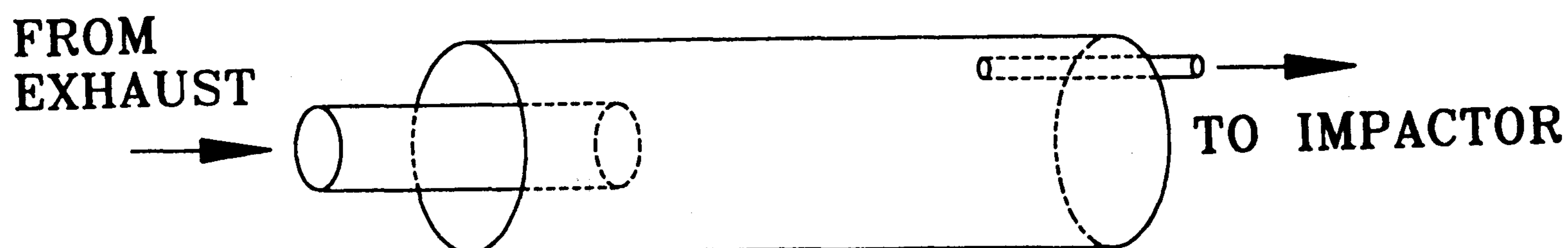
در این حالت، سرعت الکتریکی ذرات  $\mu_p E$  برابر مقدار آن در نزدیکی الکتروود جمع آوری است این معادله شکل دیگری از رابطه دویچ (Deutch) است:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A_c}{Q} w_f\right)$$

### مطالعات تجربی و نتایج

#### الف - تعیین توزیع اندازه

دستگاه برخورد دهنده چند مرحله ای بکار گرفته شده در این تحقیق دارای هفت مرحله نشست دهنده و یک فیلتر الیافی هپا بود که به این ترتیب ذرات ورودی به هشت برش تقسیم بندی شده و امکان تعیین توزیع اندازه ذرات را فراهم می نمایند. این دستگاه برای اندازه گیری ذراتی با قطر کوچکتر از  $10\mu\text{m}$  مناسب است. بنابراین نمونه گیری باید طوری انجام گیرد که جریان ورودی به دستگاه فاقد این اندازه ذرات باشد. در تحقیق حاضر به دو دلیل این ذرات درشت مورد نظر نمی باشند. اول اینکه از مطالعه مراجع و همچنین نتایج مطالعات اولیه مشخص گردید که



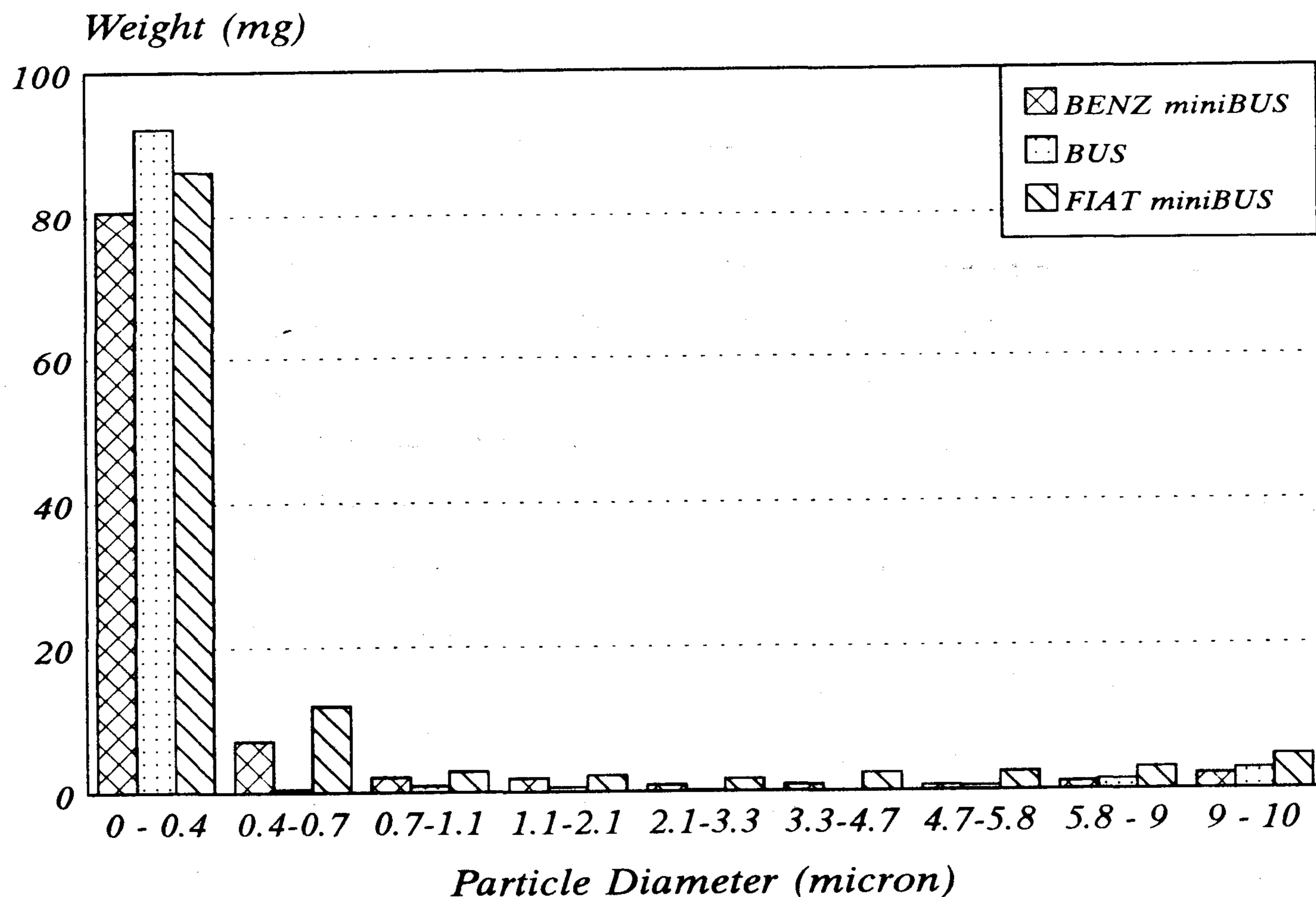
شکل ۳: سیستم حذف ذرات بزرگ.

نوع و شرایط کار موتور مستقل است. برای شرایط مورد آزمایش غلظت کلی ذرات دوده در جریان گاز در حدود 2mg/lit تعیین گردید.

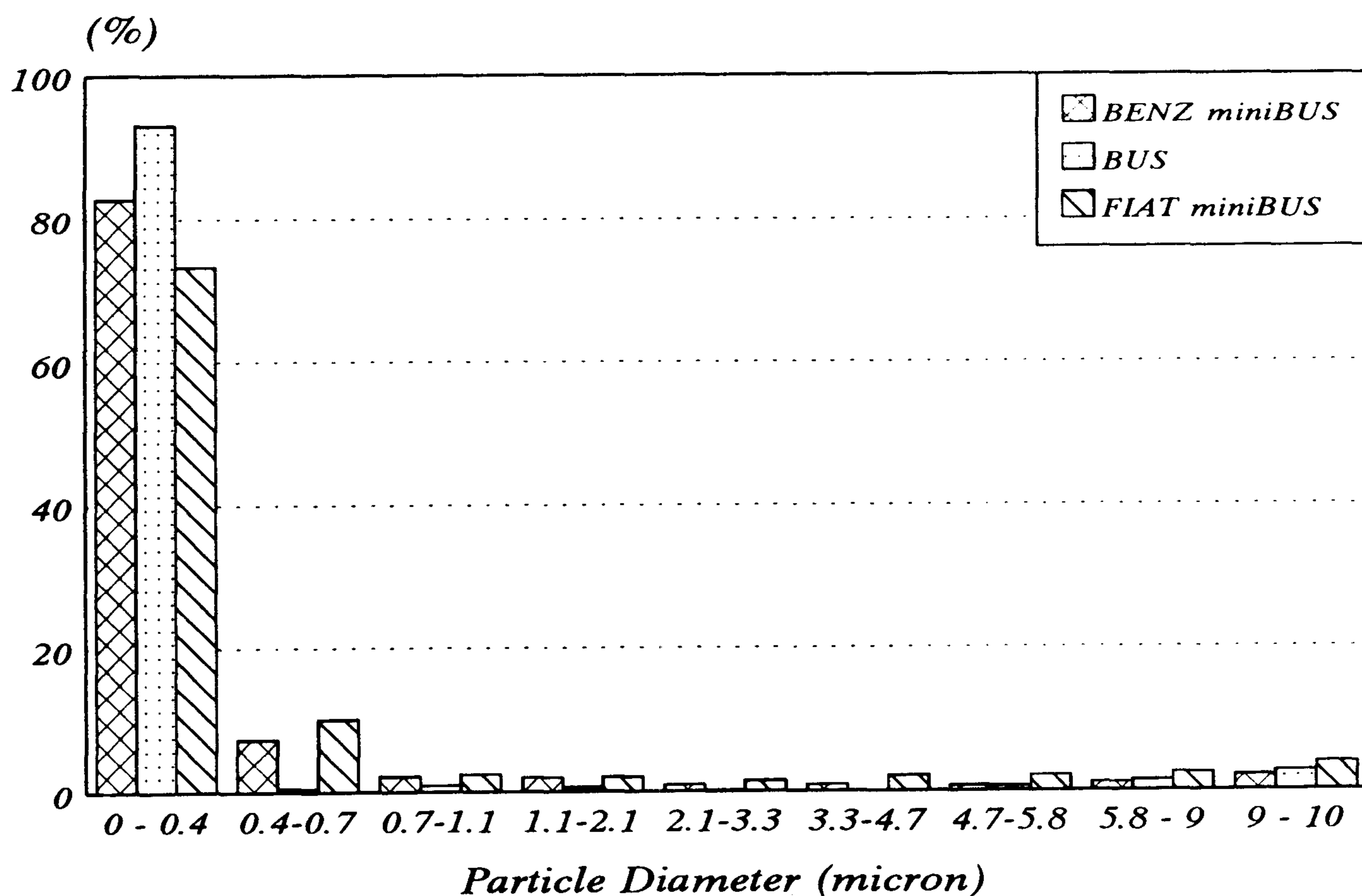
#### ب - ارزیابی یک فیلتر الکترواستاتیک

در این تحقیق برای شبیه سازی ذرات دوده با قطر معلوم و بررسی چگونگی جداسازی آنها توسط یک فیلتر الکترواستاتیک از ذرات تک اندازه مایع DOP (دی اکتیل فتالات) با قطر معلوم تولید شده توسط یک مولد ائروسول سه مرحله‌ای ساخت شرکت TSI استفاده شد. با استفاده از هوای فشرده خشک و فیلتر شده، مایع داخل مخزن (محلول DOP در الکل اتیلیک) پودر می‌شود. ذرات چند اندازه‌ای حاصله، سپس با عبور از لوله‌ای که دمای آن باتوجه به اندازه ذرات مورد نظر تنظیم می‌شود در اثر تبخیر و تراکم به ذرات تک اندازه تبدیل می‌گردند. برای اندازه گیری غلظت عددی ذرات در دو طرف دستگاه نشست دهنده الکترواستاتیک از دستگاه شمارنده هسته‌های متراکم TSI مدل ۳۰۲۲ A استفاده می‌شود. جهت تولید جریان برای شبیه سازی آگروز موتورهای دیزلی نیاز به شدت جریان تا حدود ۱۰۰۰ لیتر در دقیقه بود. از آنجائیکه دستگاه مولد ائروسولها قادر به تولید این

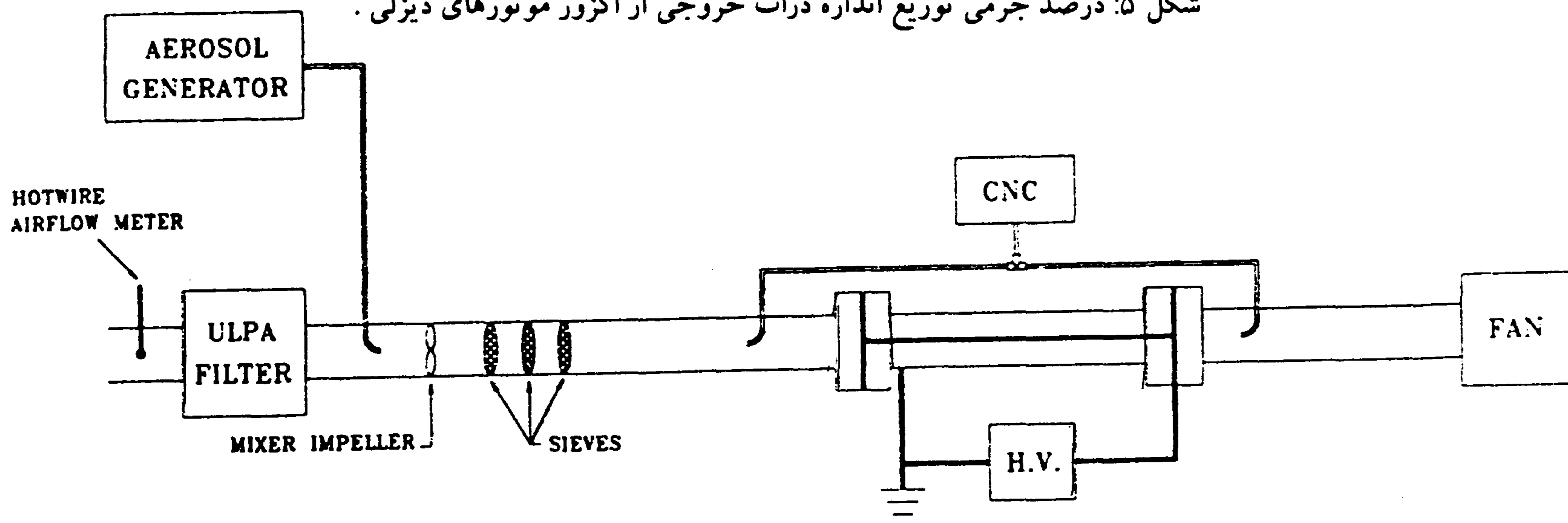
در هر دو مورد قبل از انجام آزمایش کلیه صفحات آلومینیومی و فیلترها به دقت شسته، خشک شده و وزن می‌گردند. در پایان آزمایش نیز این قطعات وزن شده تا از تفاضل این اوزان مقدار دوده نشست کرده بر روی هر صفحه و فیلتر مشخص گردد. برای تعیین غلظت کل ذرات دوده تنها از فیلترها در مسیر مکش استفاده می‌شود و کل ذرات بر روی این فیلتر جمع آوری می‌گردند. باتوجه به افزایش وزن فیلتر و میزان گاز عبور کرده در مدت آزمایش غلظت دوده مشخص می‌گردد. مدت زمان نمونه گیری از اهمیت زیادی برخوردار است. برای زمانهای کوتاه مقدار دوده جمع آوری شده بر روی صفحه‌ها بقدری نیست که بتوان میزان افزایش وزن هر صفحه را به دقت تعیین کرد. از طرف دیگر زمانهای طولانی به گرفتگی فیلتر و بنابراین افزایش افت فشار در سیستم و تغییر شدت جریان گاز عبوری از دستگاه منجر می‌گردند. پس از چندین آزمایش مقدماتی مدت زمان ده دقیقه به عنوان زمان بهینه برای نمونه برداری انتخاب گردید. آزمایشات اجرا شده بر روی وسائط نقلیه مذکور در شرایط متفاوتی از دور موتور در وضعیت ایستادن نشان داد که اندازه ذرات بستگی کمی به نوع و شرایط کار موتور دارد و بطوریکه در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است توزیع اندازه ذرات و مقدار آنها از



شکل ۴: توزیع اندازه جرمی ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرون خروجی از آگروز موتورهای دیزلی.



شکل ۵: درصد جرمی توزیع اندازه ذرات خروجی از اگزوز موتورهای دیزلی.



شکل ۶: شمای کلی سیستم آزمایشگاهی.

جریان به هم زده شود و سپس چند صفحه توری سیمی به منظور ایجاد جریان همگن و یکنواخت بکار گرفته شد. طول لوله یک متر در نظر گرفته شد تا زمان کافی برای یکنواخت شدن جریان فراهم گردد. سپس با استفاده از یک لوله نمونه برداری در ورودی به فیلتر الکترواستاتیک، تعداد ذرات ورودی از طریق انتقال بخشی از جریان به شمارنده تعیین می گردد. لوله نمونه برداری دارای طراحی ایزوسیتیک بوده تا نتایج حاصله دقیق و قابل بررسی باشند. با ورود جریان به فیلتر الکترواستاتیک مسی به قطر ۵ و طول ۴۰ سانتی متر و با تنظیم ولتاژهای مختلف که توسط یک دستگاه مولد ولتاژهای بالا تامین می شد، جداسازی ذرات صورت می گرفت. در پایان مسیر از

مقدار جریان نمی باشد از هوای تمیز اضافی تامین شده توسط یک مکنده برای افزایش شدت جریان و رقیق کردن جریان حاصله از مولد ائروسولها (حدود ۲ لیتر در دقیقه) استفاده شد. به این منظور مطابق شکل ۶ در انتهای سیستم یک مکنده هوا، نصب گردید دور موتور و در نتیجه دبی جریان توسط یک دیمر قابل تنظیم بوده و به این ترتیب مکنده موتور، جریان هوای تمیز (عاری از ذرات) از درون یک فیلتر ULPA را تامین می کرد. به علت سرعت بسیار بالای هوای عبوری از میان لوله ها، تدابیر ویژه ای جهت اختلاط کامل جریان حاوی ائروسولها و جریان هوای تمیز مکیده شده بکار برده شد. به این ترتیب که ابتدا یک پروانه متحرک در مسیر قرار داده شد تا



قرار گرفت. غلظت عددی ذرات ورودی به فیلتر و خروجی از آن توسط شمارنده ذرات متراکم CNC تعیین گردید و بازده عددی محاسبه شد. از آنجائیکه توزیع تک اندازه‌ای برای قطر در نظر گرفته می شود بازده عددی و جرمی برابر هستند. طیف وسیعی از آزمایشها انجام داده شد که تنها به ارائه جزئی از نتایج اکتفا می گردد. جزئیات تحقیق در مرجع [۱۱] آورده شده است.

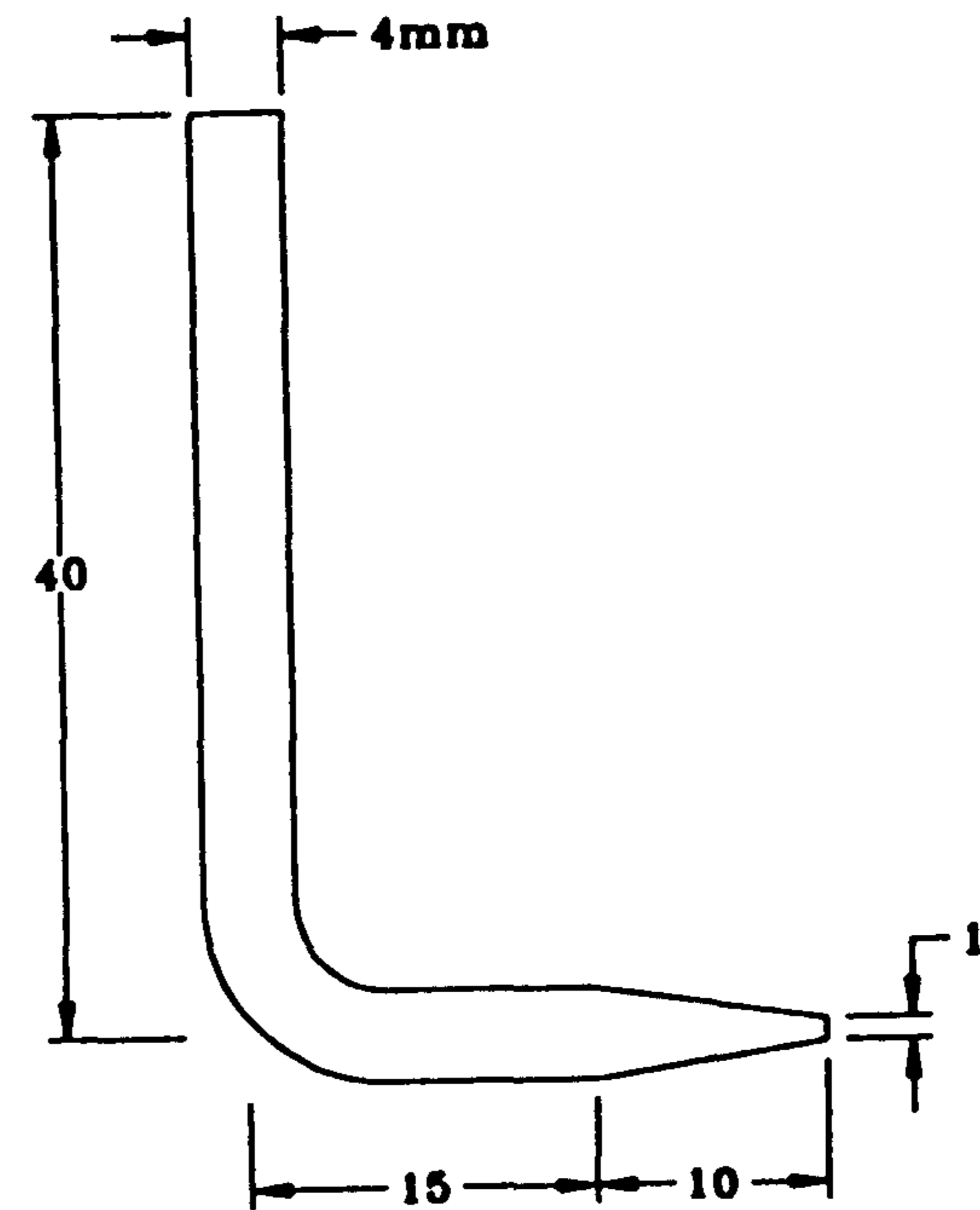
شکل ۸ بازده جداسازی را بر حسب سرعت جریان برای ذراتی با قطر  $0.4\ \mu\text{m}$  و  $1\ \mu\text{m}$  میکرومتر تحت اختلاف پتانسیلی برابر  $10\ \text{KV}$  - نشان می دهد. مشاهده می گردد که در محدوده مورد آزمایش اندازه اثر ناچیزی بر روی بازده جمع آوری دارد. با کاهش قطر از یک به  $0.4\ \mu\text{m}$  میکرومتر (۲۵ برابر) برای این اختلاف پتانسیل راندمان از ۶۰ به ۴۵ درصد کاهش می یابد.

شکلهای ۹ و ۱۰ تغییرات بازده را بر حسب اختلاف پتانسیل برای سرعت جریانهای مختلف به ترتیب برای ذرات با قطر  $0.4\ \mu\text{m}$  و  $1\ \mu\text{m}$  میکرومتر نشان می دهند. عدم تاثیر قابل ملاحظه اختلاف پتانسیل اعمالی بر روی بازده جداسازی در شرایطی که اختلاف پتانسیل از  $9\ \text{KV}$  بیشتر است کاملاً مشهود است. در این شکلها اثر سرعت جریان بر روی بازده نیز نشان داده شده است. طبیعی است که با کاهش سرعت جریان بازده جداسازی افزایش می یابد.

### نتیجه گیری و پیشنهادات

باتوجه به اینکه در بخش اول این تحقیق اندازه ذرات دوده موجود در آگروز ماشینهای دیزلی کمتر از یک میکرومتر تعیین گردید، مطالعات تجربی برای جداسازی ذراتی با گستره اندازه  $0.4\ \mu\text{m}$  -  $1\ \mu\text{m}$  میکرومتر انجام داده شد. براساس مطالعات تجربی و محاسبات نظری انجام شده می توان نتیجه گرفت که:

- افزایش قطر الکتروود تخلیه تاثیر چندانی بر کارایی دستگاه ندارد.
- افزایش قطر الکتروود جمع آوری کارایی دستگاه را کاهش می دهد.
- افزایش طول الکتروودها کارایی دستگاه را افزایش می دهد.



شکل ۷: لوله نمونه برداری.

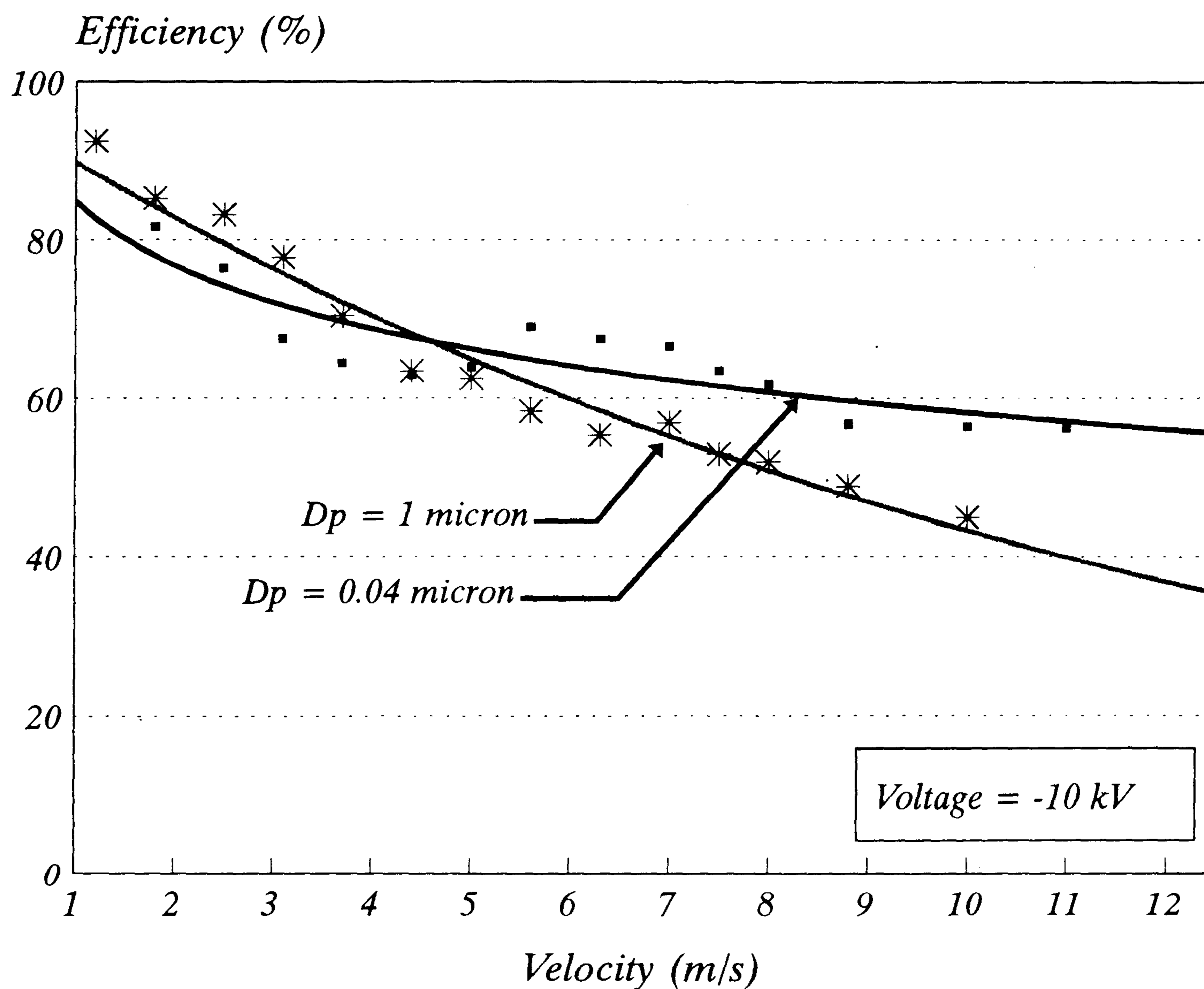
جریان خروجی از نشست دهنده نیز نمونه برداری می شد. هر دو لوله نمونه برداری (از ابتدا و انتهای فیلتر) شبیه هم و دارای ابعاد نشان داده شده (mm) در شکل ۷ می باشند.

قطر نوک لوله نمونه برداری به اندازه‌ای در نظر گرفته شد که سرعت هوا در آنجا تقریباً برابر با سرعت هوا در لوله اصلی باشد بطوریکه شرایط نمونه گیری ایزوسیتیک رعایت گردد.

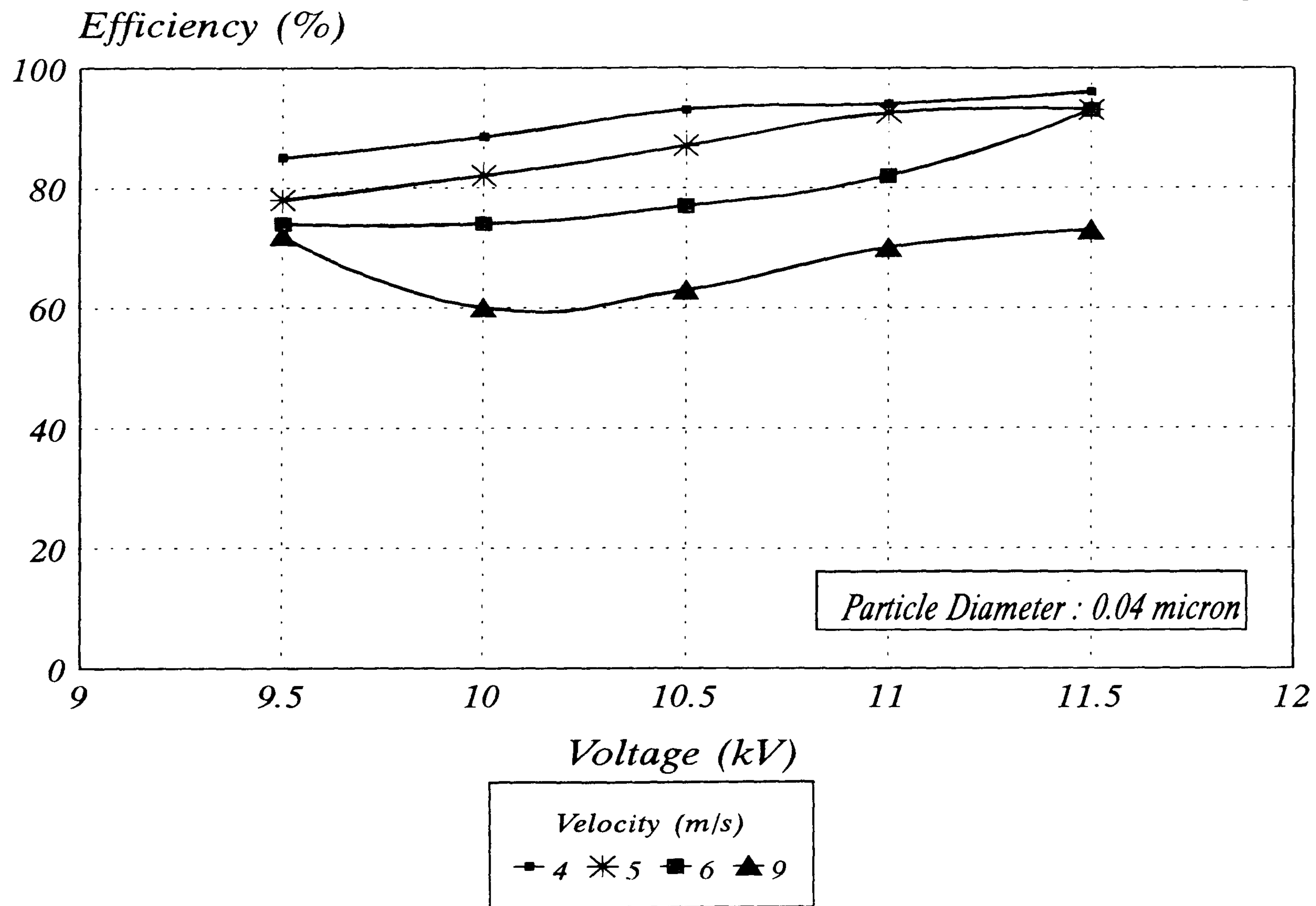
برای اندازه گیری سرعت هوا در لوله از یک سرعت سنج هوا مدل TA-2-30/6K و برای اندازه گیری ولتاژ از یک مولتی متر از نوع هیوکی ۳۲۰۰ استفاده شد.

### نتایج

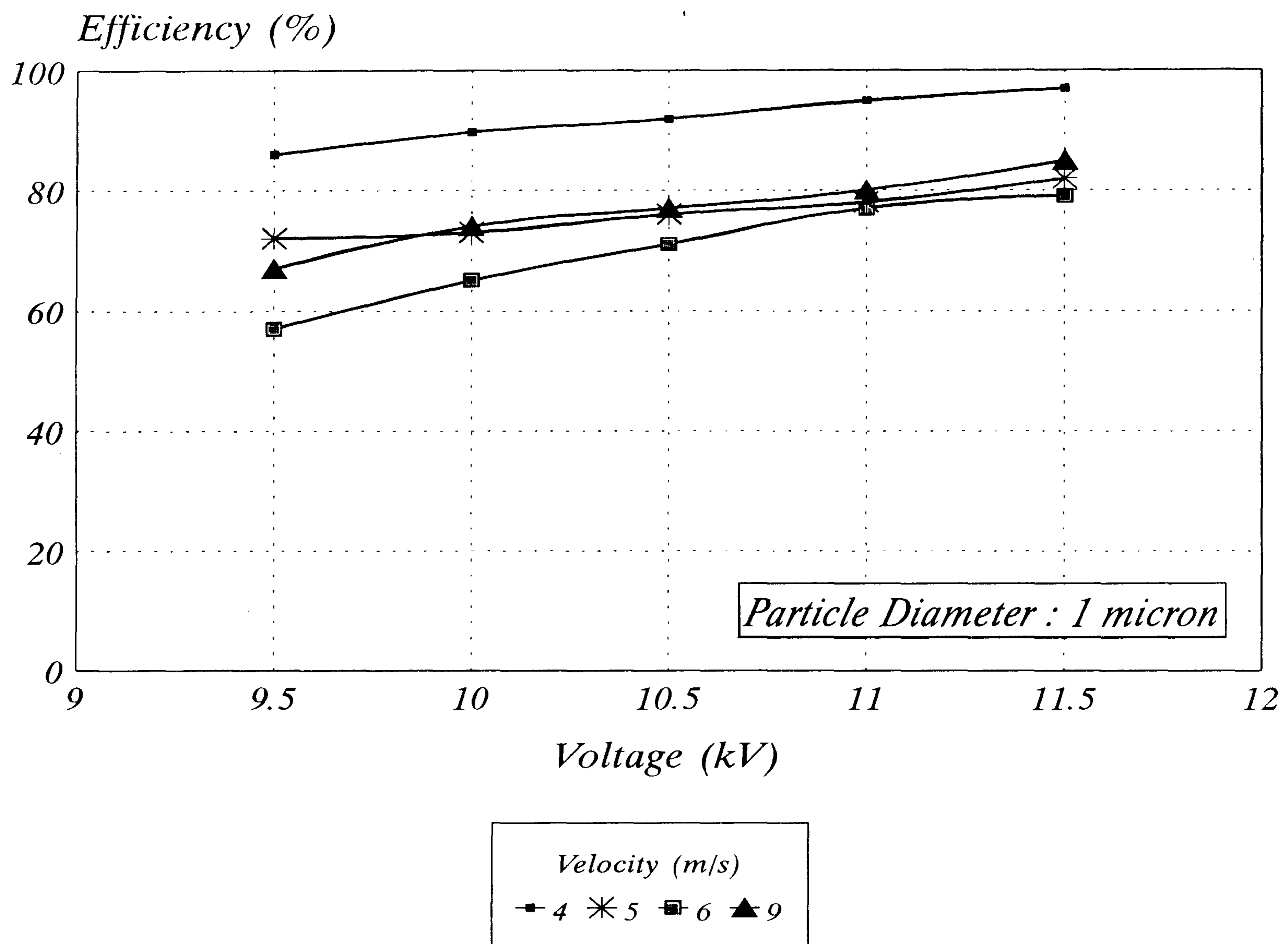
در این تحقیق توزیع اندازه و مقدار ذرات دوده خروجی از آگروز چند موتور دیزلی دودزا اندازه گیری شد. براساس این یافته ها مشخص شد که اندازه ذرات موجود در گاز خروجی مستقل از نوع و شرایط کار موتور است و سیستم جداسازی لازم برای دوده زدائی از این جریان باید قادر به حذف ذرات کوچکتر از  $1\ \mu\text{m}$  میکرومتر باشد. بنابراین در ادامه تحقیق راندمان نشست دهنده فیلتر الکترواستاتیک برای اندازه های مختلف ذرات با قطر  $0.4\ \mu\text{m}$  -  $1\ \mu\text{m}$  میکرومتر و سرعتهای جریان  $10$  -  $1\ \text{m}^3/\text{min}$  و تحت اختلاف پتانسیلهای  $12$  -  $5\ \text{kV}$  کیلوولت مورد بررسی



شکل ۸: کارایی تجربی و نظری نشست دهنده تابع سرعت جریان گاز حامل برای ذرات ۰/۰۴ و ۱ میکرون در ولتاژ ۱۰- کیلوولت.



شکل ۹: کارایی نظری و تجربی نشست دهنده بر حسب ولتاژ برای ذره ۰/۰۴ میکرون در سرعت‌های متفاوت جریان گاز حامل.



شکل ۱۰: کارایی نظری و تجربی نشست دهنده بر حسب ولتاژ برای ذره ۱ میکرون در سرعت‌های متفاوت جریان گاز حامل.

جداسازی ذرات دوده از آگروز ماشینهای دیزلی توسط یک فیلتر الکترواستاتیک به انجام رسید. مرحله نهائی کار بررسی عملی کارایی یک چنین وسیله‌ای با توجه به دمای گازهای آگروز، ماهیت نوسانی بودن سرعت جریان به علت عملکرد موتور و چگونگی تامین عملی ولتاژ لازم است. این مرحله باید با حمایت مراجع ذیصلاح، از طریق نصب و بکارگیری این فیلتر بر روی وسایل دودزا باشد که این از اهداف آتی مولفین است.

#### تشکر و قدردانی

بخشی از نیازهای مالی این تحقیق از طریق بودجه‌های تحقیقاتی اعطاء شده توسط دانشکده فنی دانشگاه تهران تامین گردید. برای امکانات آزمایشگاهی از تجهیزات موجود در مرکز تحقیقات استانداردهای هسته‌ای سازمان انرژی اتمی استفاده شد.

- افزایش سرعت جریان گاز حامل و کاهش ولتاژ نیز باعث کاهش کارایی می شوند. برای ذرات درشت ( $1\mu m$ ) کاهش سرعت از ده به یک متر بر ثانیه راندمان را از ۴۵ به ۹۰ درصد افزایش می دهد. در خصوص ذرات کوچک ( $0.4\mu m$ ) این اثر از اهمیت کمتری برخوردار است.

براساس این مطالعات امکان استفاده از یک فیلتر الکترواستاتیک به طول ۴۰cm و قطر ۵cm با الکتروتخلیه به قطر ۰/۲ میلی متر تحت اختلاف پتانسیل ۱۰KV جهت دوده زدایی از آگروز موتورهای دیزلی مشخص گردید. ولتاژ لازم را می توان از یک باتری ۱۲V تغذیه و شارژ شده توسط دینام ماشین تامین کرد. البته برای ایجاد ولتاژ ۱۰KV لازم است ابتدا جریان DC باتری به یک جریان AC تبدیل گردد سپس با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ لازم (۱۰KV) تولید شده و در پایان این ولتاژ AC مجدداً به DC تبدیل گردد. برای برخی از آزمایشات عملاً از این سیستم نیز جهت تامین اختلاف پتانسیل لازم استفاده شد. در این تحقیق کلیه مطالعات تجربی لازم برای درک

| نشانه ها     |   |
|--------------|---|
| $R_i$        | شعاع خارجی استوانه داخلی نشست دهنده             |
| $r$          | فاصله از مرکز استوانه                           |
| $S$          | فاصله بین خروجی جت از نازل و صفحه برخورد<br>(m) |
| $U$          | سرعت متوسط گاز حامل                             |
| $U_0$        | سرعت گاز درون روزنه (m/s)                       |
| $U_B$        | سرعت نهائی ذره                                  |
| $V$          | اختلاف پتانسیل الکتریکی                         |
| $V_c$        | اختلاف پتانسیل الکتریکی بحرانی                  |
| $w_f$        | سرعت مهاجرت ذره                                 |
| $z$          | مویلیته مکانیکی ذره                             |
| $\rho_g$     | چگالی گاز ( $\text{Kg/m}^3$ )                   |
| $\epsilon_0$ | ضریب گذردهی خلا                                 |
| $\mu_g$      | ویسکوزیته گاز                                   |
| $\mu_p$      | مویلیته الکتریکی ذره                            |
| $\lambda_i$  | مسیر آزاد متوسط یونی                            |
| $\xi$        | ثابت دی الکتریک ذره                             |
| $\lambda$    | پویش آزاد متوسط مولکولهای گاز (m)               |
| $a_p$        | شعاع ذره  |
| $C$          | ضریب تصحیح لغزش کانینگهام                       |
| $D_c$        | قطر روزنه (m)                                   |
| $d_p$        | قطر ذره   |
| $d'_p$       | قطر ذره ( $\mu\text{m}$ )                       |
| $E$          | شدت میدان الکتریکی                              |
| $E_c$        | شدت میدان الکتریکی بحرانی                       |
| $E_i$        | شدت میدان الکتریکی موضعی                        |
| $e$          | بار یک الکترون                                  |
| $F_E$        | نیروی حاصله از میدان الکتریکی                   |
| $F_R$        | نیروی مقاوم حاصله از سرعت نسبی ذره و سیال       |
| $H$          | ضخامت صفحه (m)                                  |
| $L$          | طول نشست دهنده                                  |
| $n$          | تعداد بارهای روی ذره                            |
| $q$          | بار ذره (کولن)                                  |
| $R_0$        | شعاع داخلی استوانه خارجی نشست دهنده             |

## مراجع

- ۱ - طراحی و ساخت سیستمی جهت جداسازی دوده از آگزوز موتورهای دیزلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندس گیتا معینی به سرپرستی دکتر علی اصغر حمیدی و دکتر اصغر صدیق زاده، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.
- 2 - Lilly, L. R. C. (1984). "Diesel engine reference book." Butter Worths.
- 3 - Calcote, H. F. (1981). "Mechanisms of soot nucleation in flames." *A Critical Review, Combustion and Flame*, 42: 215-242.
- 4 - Haynes, B. S. and Wagner, H. G. (1981). "Soot formation." *Prog. Eng. Combust. Sci.* 7: 229-273.
- 5 - Smith, O. I. (1981). "Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emission." *Prog. Eng. Combust. Sci.* 7: 275-291.
- 6 - Hirleman, E. D. (1983). "Non-intrusive laser particle size diagnostics." *ALAA 18th Thermophysics Conference*, Montreal, June.
- 7 - Lio, B. Y. H. (1976). "Fine particles." *Academic Press*, New York.
- 8 - Operating manual of anderson 1 ACFM non volatile ambient particle size sampler, Nov. (1985).
- 9 - Faith, W. L. Atkinson, A. (1972). "Air pollution." John Willey & Sons, Inc.
- 10 - Magil, P. L, Holden, F. R., and Ackley, C. (1956). "Air pollutions handbook." McGraw-Hill.
- 11 - Katz, J. (1982). "Powder handbook." *Chap 17 Electrostatic precipitation Application & Concept*.
- 12 - Calvert, S. England, H. M. (1986). "Handbook of air pollution technology." *Chap 12. White H. J Control of Paricles by Electrostatic precipitation*.