جداسازی ذرات میکرونی در جریان گاز به روش اینرسی

سعید خردمند*
استادیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
kheradmand@mut-es.ac.ir

سید مهدی رمضانی
کارشناس ارشد مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
s.mehdi.ramezani@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳

چکیده

ذرات معلق در هوا عامل بسیاری از پدیده‌ها و رخدادهای طبیعی‌اند. لذا همواره سعی می‌شود این مواد شناسایی شوند؛ گاهی نیز سعی می‌شود تا از جریان حذف شوند. از جمله روش‌های شناسایی و جداسازی ذرات در مقیاس میکرو، روش مبتنی بر اینرسی ذرات است. برای این منظور ابزارهای متنوعی نیز وجود دارد که با کمک اینرسی ذرات این جداسازی را انجام می‌دهند. مهمترین این ابزارها ایمپکتور صفحه‌ای، ایمپکتور صفحه‌ای همراه با نازل، ایمپکتور مجازی و سیکلون است. ایمپکتورها بیشتر برای نمونه‌برداری و شناسایی ذرات و سیکلون‌ها در دبی بالاتر از گاز، بیشتر برای فیلتر و حذف‌کردن ذرات در اندازه‌های بالاتر از ۵ میکرومتر، به‌کار می‌روند. در ایمپکتورهای صفحه‌ای، ذرات با لختی بالا بر صفحهٔ روبروی جریان رسوب می‌کند و با برداشتن آنها از صفحه، ذرات شناسایی می‌شوند. در ایمپکتور مجازی اما ذرات در مجرایی که روبروی مجرای ورودی قرار دارد تلغیظ می‌شوند. در این مقاله این چهار ابزار معرفی و دربارهٔ نحوهٔ کارکرد و تفاوت‌های آنها بحث می‌شود.

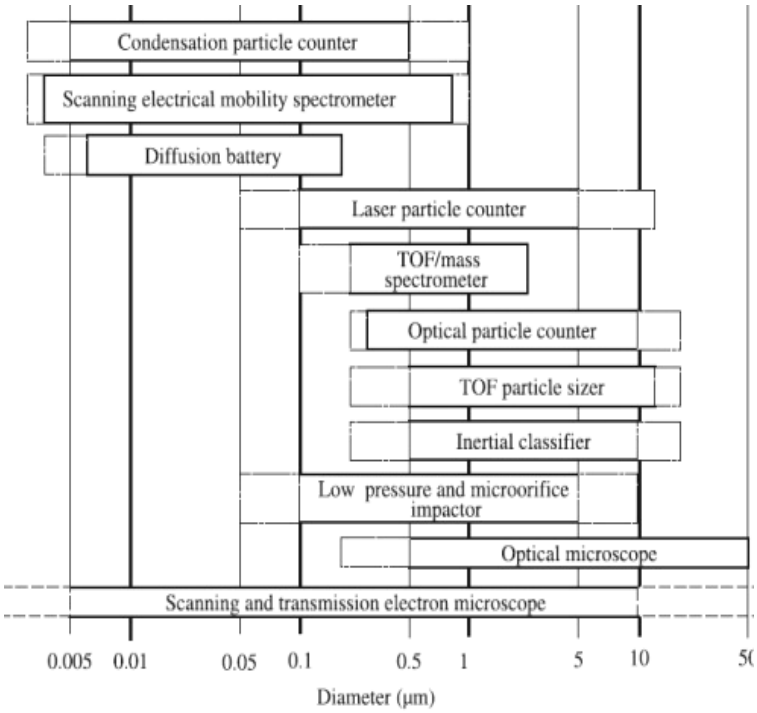
واژگان کلیدی: جداسازی اینرسیایی، ایمپکتور مجازی، ایمپکتور حقیقی، سیکلون

۱. مقدمه

ذرات معلق در هوا، عامل بسیاری از آلودگی‌ها و بیماری‌ها هستند. همواره نیز سعی شده است تا این مواد شناسایی شوند؛ گاهی نیز سعی شده تا از جریان حذف شوند. شناسایی آئرسول‌ها در محیطهایی که با مواد شیمیایی سروکار دارند، کشاورزی و جنگ‌ها کاربرد قابل توجهی دارند. مثلاً برای شناسایی آلودگی‌های موجود در مزارع کشاورزی (ذرات بیوزیستی مخرب)، اگر ذرات معلق در آن فضا شناسایی شوند، به‌راحتی ضد این آئرسول‌های مخرب مورد استفاده قرار خواهد گرفت. طی چند دههٔ گذشته، نیاز به اندازه‌گیری ذرات معلق در هوا به‌طور چشمگیری در زمینه‌های گوناگون از جمله آلودگی هوا، بهداشت عمومی، علوم جو، فناوری نانو، تولید مواد شیمیایی و دارو افزایش یافته است. به‌عنوان مثال مهندسان محیط زیست و بهداشت صنعتی، ذرات معلق در هوا را با هدف اطمینان از اینکه ذرات معلق در هوا در سطح مطلوبی قرار دارند و افراد را در معرض خطر قرار نمی‌دهند، اندازه‌گیری می‌کنند. در

مقابل آثار نامطلوب ذرات معلق در هوا بر سلامت و محیط زیست، در برخی از موارد اثر مطلوب آئروسل، برای تولید مواد خاص همانند برخی از داروها به‌طور فزاینده‌ای توسط محققان مورد توجه قرار گرفته است. طی سالیان اخیر، با ظهور فناوری نانو، علاقه‌ای خاص برای اندازه‌گیری ذرات در این مقیاس به‌وجود آمده است. همچنین برای کاهش آلودگی حاصل از نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها و صنایع تولیدی مواد معدنی، به فیلترکردن گازهای خروجی نیاز پیدا شده است. اندازهٔ ذرات مهمترین خاصیت تغییر رفتار آنها در گازهاست. ذرات با اندازه‌های مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند و با قوانین فیزیکی خاص خود اداره می‌شوند. مثلاً در سطح زمین، ذرات با مقدار اندکی بزرگتر از مولکول‌های گاز در درجهٔ اول توسط حرکت براونی اداره می‌شوند، حال آنکه ذرات بزرگتر از چند میکرومتر در درجهٔ اول تحت تاثیر نیروهای گرانشی و اینرسی قرار دارند.

از جمله روش‌های جداسازی یا طبقه‌بندی ذرات جامد درون سیال، روش اینرسی است. وسائل گوناگونی بر این اساس کار می‌کنند که مهمترین آنها سیکلون‌ها و ایمپکتورها می‌باشند. این وسائل کاربردهای گسترده‌ای در نمونه‌برداری و فیلترکردن ذرات میکرونی در اندازهٔ بالاتر دارند. ایمپکتورها شامل سه نوع صفحه‌ای (حقیقی)، صفحه‌ای همراه با نازل و مجازی[1] می‌باشند که در نمونه‌برداری‌ها برای ذرات میکرونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، اساس کار این ابزارها اینرسی است. اینرسی، لختی یا ماند، تمایل ذرت به حفظ وضعیت فعلی است؛ یعنی ذرات ساکن تمایل به حفظ حالت سکون و ذرات متحرک تمایل به ادامهٔ حرکت بر خط مستقیم حرکتی خود با همان سرعت را دارند. برای غلبه بر اینرسی، نیرو لازم است، به این معنا که اینرسی در برابر تغییر موقعیت حرکتی نوعی مقاومت ایجاد می‌کند. روش‌های متفاوتی که برای جداسازی، نمونه‌برداری، اندازه‌گیری ذرات معلق وجود دارند در شکل ۱ براساس قطر ذرات نشان داده شده است [۱]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، محدودهٔ روش‌های اینرسی در بازهٔ قطر ذرات ۰/۲ تا ۲۰ میکرومتر است، که البته سیکلون‌ها برای ذرات با اندازه‌های بزرگتر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱. روش‌های اندازه‌گیری ذرات [۱]

اساس کار این سیستم‌ها بدین صورت است که با شتاب‌دادن به سیال در یک ناحیه، سبب افزایش شتاب سیال و ذرات درون آن خواهند شد. چون ذرات، داری چگالی بسیار بالاتری (تقریباً ۱۰۰۰ برابر) نسبت به سیال می‌باشند، در هنگام شتاب‌گیری اینرسی بیشتری نسبت به ذرات سیال پیدا خواهند کرد. این افزایش اینرسی باعث خواهد شد تغییر مسیر ذرات نسبت به سیال کمتر باشند و در هنگام رسیدن جریان به جسم جامد، ذرات با حرکتی مستقیم روی دیواره رسوب کنند، در حالی که سیال صفحه را دور خواهد زد. به‌عنوان مثال برای روشن‌تر شدن موضوع می‌توان به حرکت خودرو در هوای غبارآلود اشاره کرد؛ در حالی که جریان سیال اطراف خودرو را دور خواهد زد، ذرات با اندازهٔ بزرگتر روی بدنهٔ خودرو رسوب خواهند کرد.

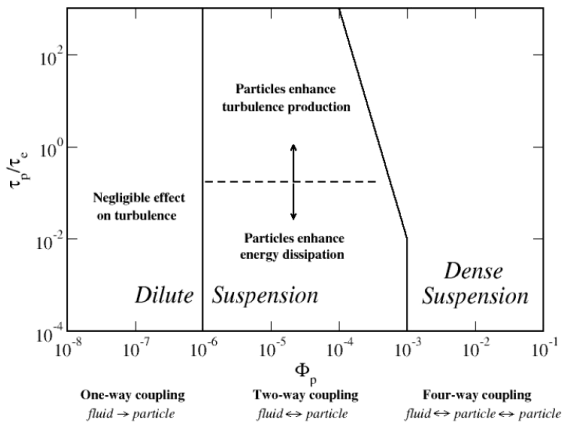
۲. معرفی پارامترها

با توجه به مطالب بیان‌شده، چند پارامتر مهم در این ضمینه وجود دارد که شامل سرعت جریان (U)، چگالی ذرات (ρ_p)، اندازهٔ ذرات (d_p) و اندازهٔ جسم (d_p) می‌باشند که با عدد بدون بعدی به نام عدد استوکس به‌هم ارتباط داده خواهند شد. عدد استوکس به‌صورت نسبت زمان پاسخ ذره τ_p به مشخصهٔ زمان در جریان سیال τ_f، همانند معادلهٔ زمان ادی‌های بزرگ تعریف می‌شود. اگر زمان پاسخ ذره نسبت به اندازهٔ زمان سیال خیلی کوچک باشد، آنگاه ذره به احتمال زیاد با حرکت سیال همسو خواهد بود. به‌عبارت دیگر اگر τ_p از τ_f بزرگتر باشد، آنگاه احتمال کمتری دارد که ذره به حرکت سیال پاسخ دهد [۲].

$$S_{tk} = \frac{\tau_p}{\tau_f} \qquad (۱)$$

$$S_{tk} = \frac{\rho_p {d_p}^2 C_c U}{9 \mu d_b} \qquad (۲)$$

پارامتر دیگر کسر حجمی ذرات Φ_p است که به‌عنوان نسبت کل حجم ذره به حجم تحت اشغال با سیال بیان می‌شود. برای جریان مغشوش همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در رژیم مغشوش جفت‌شدگی یک‌طرفه، ذرات اثر ناچیزی بر فاز حامل ذرات دارند. در رژیم جفت‌شدگی دوطرفه، غلظت ذره به اندازهٔ کافی زیاد است که انتقال ممنتوم را به سیال وادار کند، لذا در جریان مغشوش خواص توربولانس اصلاح خواهد شد. هرگاه کسر حجمی فراتر از حد رقیق سوسپانسیم شود و سوسپانسیم غلیظ شود، جفت‌شدگی چهارراهه مبنی بر اثر برخورد ذره - ذره نامیده می‌شود. در بررسی ایمپکتورها به‌دلیل اندازهٔ ناچیز فاز گسسته در جریان، رژیم جفت شدگی یک‌طرفه خواهد بود، بدین معنا که ذرات روی سیال تأثیر نخواهند داشت.

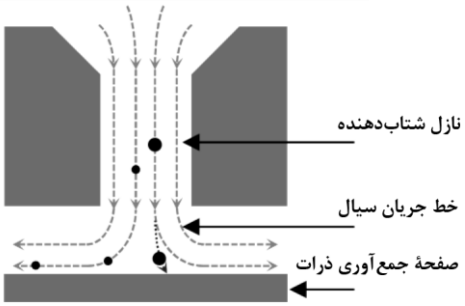


شکل ۲. جفت‌شدگی سیال - ذره در جریان مغشوش [۳]

۳. ایمپکتور صفحه‌ای همراه با نازل شتاب‌دهنده

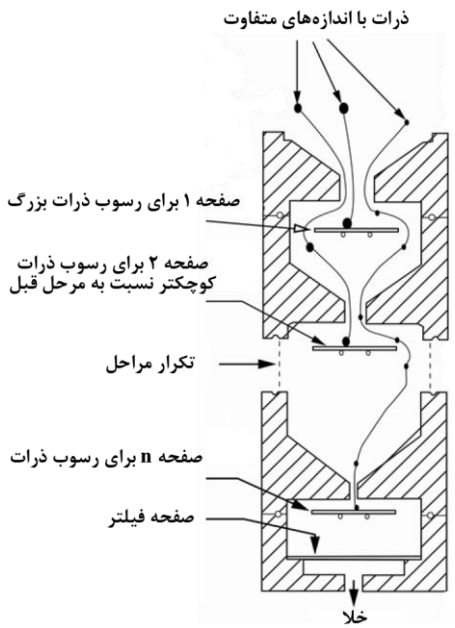
در این نوع از ایمپکتور جریان با عبور از نازل شتاب خواهد گرفت (شکل ۳). درپی شتاب‌گرفتن جریان سیال، ذرات درون جریان هم شتاب می‌گیرند. پس از عبور جریان از نازل، روبروی جریان، صفحه‌ای قرار داده خواهد شد که جریان در مواجه با آن انحراف ۹۰ درجه‌ای پیدا خواهد کرد و در مجراهای کناری جاری می‌شوند. اما ذراتی که در جریان قرار دارند، به‌دلیل چگالی بالایی که دارند، برای انحراف به نیروی بیشتری نیاز دارند. به‌عبارت دیگر ذرات تمایل دارند که مسیر حرکتی خود را بدون تغییر مسیر ادامه دهند و انحرافی نداشته باشند یا اگر انحرافی وجود دارد،

حداقل باشد. بدین صورت که ذرات با برخورد روی صفحه رسوب خواهند کرد [۴]. البته ذرات کوچکتر یا دارای اینرسی پایین‌تر خطوط جریان را طی خواهند کرد و تابع جریان بوده که با انحراف جریان ذرات ریزتر هم در مجراهای کناری جاری خواهند شد.



شکل ۳. ایمپکتور صفحه‌ای همراه با نازل شتاب‌دهنده

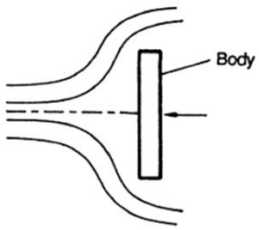
نوع دیگری از ایمپکتور، معروف به ایمپکتور آبشاری[۲]، وجود دارد که در آن چند صفحه همانند شکل ۴ پشت سرهم قرار خواهند گرفت [۵] و در هر مرحله با کاهش گلوگاهی خروجی نازل، سرعت خروجی از نازل افزایش خواهد یافت که این موجب رسوب ذرات ریزتر در مراحل بعدی خواهد شد. در این حالت اینرسی ذرات با افزایش سرعت افزایش پیدا کرده است.



شکل ۴. ایمپکتور آبشاری

۴. ایمپکتور صفحه‌ای

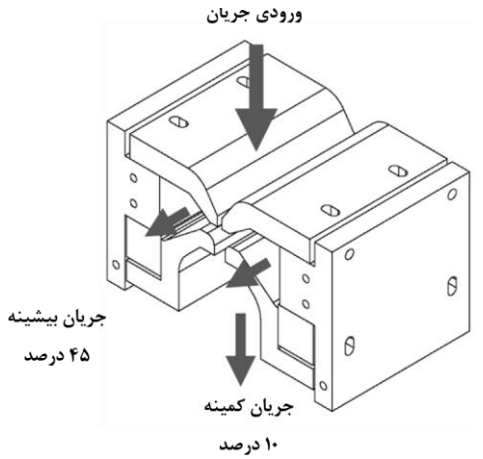
در این نوع ایمپکتور، همانند ایمپکتور قبلی، صفحه‌ای در برابر جریان قرار خواهد گرفت؛ با این تفاوت که از شتاب‌دهنده برای شتاب‌دادن به جریان و ذرات استفاده نشده است [۱]. کاربرد این ایمپکتور برای نمونه‌برداری در مناطقی است که جریان عبوری دارای سرعت بالاست و یا آنکه اندازهٔ ذرات به‌قدری بزرگ است که روی صفحهٔ مقابل جریان رسوب خواهند کرد.



شکل ۵. ایمپکتور صفحه‌ای بدون نازل شتاب‌دهنده

۵. ایمپکتور مجازی

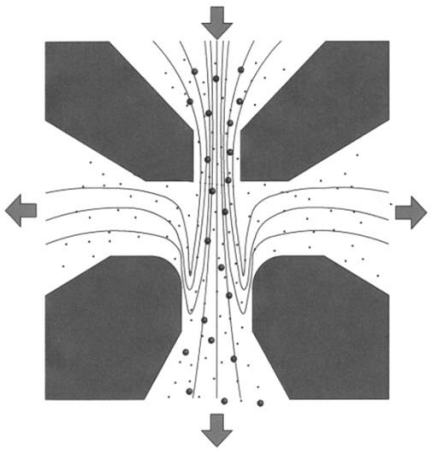
ایمپکتور مجازی، که در شکل ۶ نمایش داده شده است، در گروه طبقه‌بندی‌کنندهٔ[۳] ذرات براساس اینرسی جای دارد و به‌تازگی توسعهٔ زیادی برای مصارف گوناگون پیدا کرده است.



شکل ۶. ایمپکتور مجازی

این نوع از ایمپکتورها این ویژگی که ذرات موجود در سیال پس از برخورد روی سطح جامد روی آن سطح رسوب

خواهند کرد، را ندارند. ایمپکتور مجازی ذرات را براساس اندازه‌ای که دارند از جریان جدا خواهد کرد. این ویژگی سیستم مشابه ایمپکتور صفحه‌ای است، با این تفاوت که سطح برخورد با یک فضای مجازی راکد یا جریان آهسته هوا جایگزین شده است. ذرات بزرگ به‌جای اینکه روی صفحهٔ ایمپکتور رسوب کنند، در مجرای روبرویی به‌دام خواهند افتاد. در شکل ۷ نشان داده شده است که جریان سیال با عبور از نازل شتاب خواهد گرفت و سپس با ورود به قسمت مقسم جریان، به سه بخش منشعب می‌گردد. حدود ۹۰ درصد از کل جریان ورودی به‌صورت دو قسمت ۴۵ درصدی با تغییر جهت ۹۰ درجه‌ای به قسمت جریان بیشینه[۴] منحرف می‌شود و ۱۰ درصد از کل جریان بدون تغییر جهت، با حرکتی مستقیم به قسمت جریان کمینه[۵] وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، ذرات وقتی از یک اندازهٔ مشخص بزرگتر می‌شوند، دیگر با تغییر جهت جریان منحرف نخواهند شد و با حرکت در خط مسیر مستقیم خود در جریان روبرویی (جریان کمینه) جای می‌گیرند [۶].



شکل ۷. تغییر جهت ذرات در ایمپکتور مجازی

برای ایجاد چنین شرایطی، که جریان با این نسبت بین مجراها تقسیم گردد، در هر سه خروجی مکش یا پمپ خلأ کار گذاشته می‌شود [۷]. ذرات موجود در سیال، بسته به اینرسی خود با نسبت تقسیم جریان در مجراهای خروجی تقسیم نمی‌شوند، بلکه جریان کمینه، که حدود ۱۰ درصد از کل جریان را دربر می‌گیرد، با تمرکز ذرات معلق، بسیار غلیظتر از جریان بیشینه خواهد شد. عملکرد ایمپکتور مجازی یا ایمپکتورهای صفحه‌ای با پارمتر بازدهی مشخص می‌گردد. بازدهی برای ایمپکتور مجازی با رابطهٔ ۳ [۸] و برای صفحه‌ای با رابطهٔ ۴ [۲] مشخص می‌شوند.

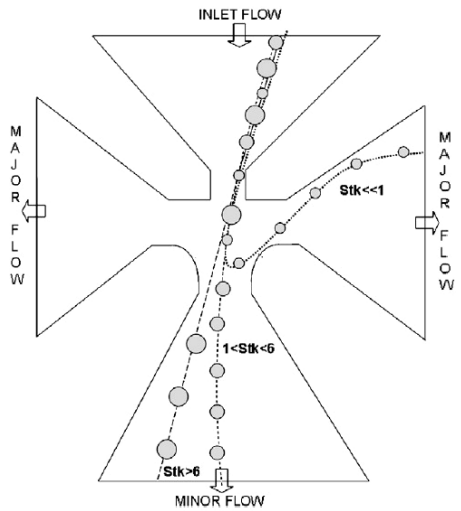
$$\eta = \left(\frac{n_{\min}}{n_{\min} + n_{maj}} \right) \times 100 \qquad (۳)$$

در این رابطه η بازدهی و n_{min} تعداد ذرات در جریان کمینه و n_{maj} تعداد ذرات در جریان بیشینه می‌باشد.

$$\eta = \left(\frac{n_w}{n_{in}} \right) \times 100 \qquad (۴)$$

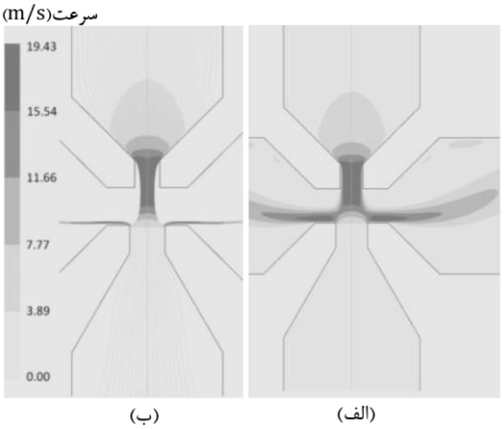
در این رابطه n_w تعداد ذرات رسوب‌شده روی صفحه و n_{in} تعداد کل ذرات ورودی می‌باشد. پارامتری که نشان می‌دهد ایمپکتور برای چه ذراتی قابل استفاده است و قادر به طبقه‌بندی چه ذراتی است، قطر بحرانی یا قطر اندازهٔ برش[۶] است؛ پارامتری که اندازهٔ قطری از ذرات را بیان می‌کند. بازدهی ایمپکتور مجازی در این اندازه از قطر دارای بازدهی ۵۰ درصد است. به‌عبارت دیگر به‌همان مقدار ذراتی که در جریان کمینه وجود دارد، در جریان بیشیه هم وجود دارد. در ایمپکتور مجازی بهترین عملکرد برای جریان‌هایی ایجاد می‌شوند که ذرات موجود در جریان دارای اندازه‌هایی بالاتر از میکرومتر باشند. در این حالت نیروی اصلی وارد بر ذرات، نیروی اینرسی خواهد بود و مسیر ذرات با توجه به اینرسی که دارند مشخص خواهد شد. برای مثال در کار تحقیقاتی هاری و حسن [۸] گزارش شده است که ذراتی که دارای اندازهٔ قطر کوچک‌اند، ذرات تابع جریان‌اند، به‌معنای آنکه اگر ۹۰ درصد جریان با زاویه‌ای ۹۰ درجه‌ای منحرف شود، این ذرات به دنبالهٔ جریان اصلی منحرف خواهند شد. در هنگامی که ذرات دارای اندازهٔ بزرگتر باشند، از مسیر حرکت خود مقدار اندکی منحرف خواهند شد؛ در حالی‌که ذرات خیلی بزرگتر، که اینرسی بالایی دارند، انحرافی نداشته و مسیر حرکت خود را به‌صورت کاملاً مستقیم ادامه

می‌دهند. ذرات مورد اندازه‌گیری در حالت کلی به‌صورت کروی فرض شده است. مفهوم قطر معادل، که اغلب در علم آئروسل استفاده می‌شود، اندازهٔ ذره‌ای را بیان می‌کند که نشان‌دهندهٔ خاصیت و رفتار ذرات موجود است. قطر معادل برای ذرات به‌عنوان قطر کره‌ای با همان ویژگی از جمله اینرسی، جاذبه، حرکت براونی، سطح ذره، نسبت حجم به سطح، حرکت القایی بر اثر الکتریسیته، پخش‌کردن نور تعریف می‌شود.

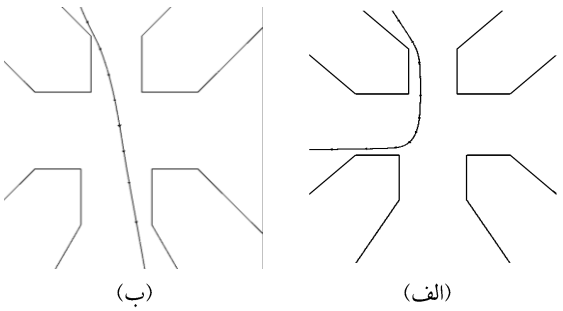


شکل ۸ تغییر جهت ذرات در ایمپکتور مجازی

برای مشخص‌شدن نحوهٔ توزیع سیال و ذرات در ایمپکتور مجازی، یک مورد به‌صورت عددی شبیه‌سازی شد که نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. این نتایج چنین نشان می‌دهد که وقتی قسمت اعظم جریان با چرخش ۹۰ درجه‌ای همراه بوده، ذرات چنین رفتاری ندارند و کمتر تحت تاثیر نیروی مکشی در مجراهای کناری خواهند بود. به‌عبارت دیگر، مکشی که در مجراهای کناری وجود دارد از چنان قدرتی برخوردار نیست که ذرات را همانند سیال از مسیر حرکت مستقیم خود منحرف کند. شکل ۱۰ مربوط به مسیر حرکت دو ذره با اعداد استوکس متفاوت است، که عدد استوکس با قطر ذرات تغییر نموده است. از این شکل چنین برمی‌آید که ذراتی که دارای عدد استوکس بالاتر از یک باشند، در این مسئله تحت تأثیر انحراف جریان قرار نگرفته و مسیر حرکتی خود را مستقل از انحراف جریان طی کرده‌اند تا در جریان کمینه در مسیر روبرویی قرار گیرند.



شکل ۹. توزیع سرعت در ایمپکتور مجازی
الف) سیال، ب) ذرات



شکل ۱۰. مسیر حرکت ذره الف) استوکس ۱/۸۸، ب) استوکس ۰/۲۱۵

۶. سیکلون

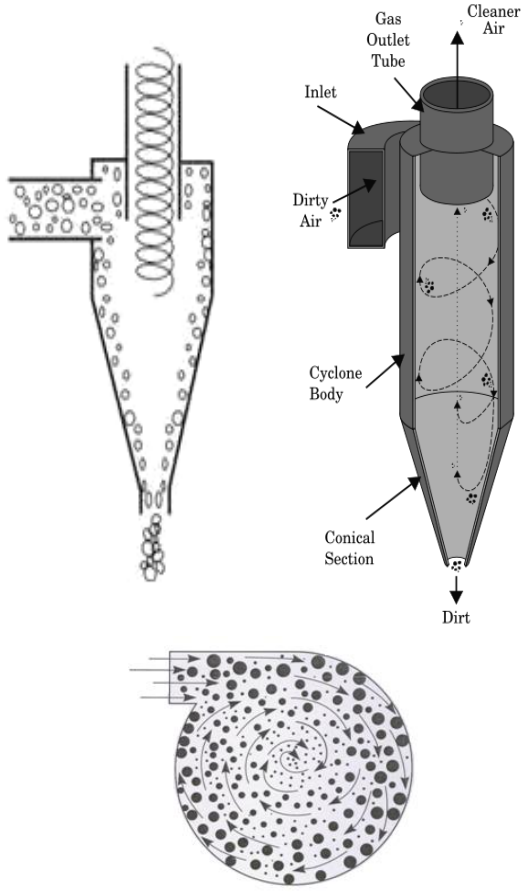
از دیگر وسائلی که در جداسازی ذرات جامد از فاز گاز استفاده می‌شوند، سیکلون‌ها هستند. جهت جداسازی ذرات معلق از سیال در این سیستم از دو نیروی چرخش سیال و گرانش استفاده می‌شود تا ذرات جامد از سیال جدا شوند. همان‌گونه که در شکل۱۱ نمایش داده شده است، در این سیستم جریان سیال همراه با ذرات جامد وارد یک محفظهٔ استوانه‌ای - مخروطی می‌شوند. جریان سیال با عبور از ورودی سیکلون شتاب می‌گیرد و با حرکتی گردابی به‌سمت پایین حرکت می‌کند. چون نیروی اینرسی وارده بر ذرات جامد از نیروی اینرسی وارده بر گاز بیشتر است، ذرات

مماس بر دیوارهٔ استوانه با حرکت مارپیچی به‌سمت پایین محفظهٔ حرکت می‌کنند. در قسمت پایین محفظه، ذرات به‌صورت ناپیوسته یا پیوسته از محفظه خارج می‌شوند. دلیل اینکه ذرات به‌سمت دیواره‌ها خواهند رفت و هرچه اندازهٔ آنها بزرگتر باشد به دیواره نزدیکتر می‌شود (شکل ۱۱)، همان اینرسی ذرات است. اما چون فاز گاز دارای چگالی کمتری است، تحت تأثیر نیروی کمتری قرار می‌گیرد و حرکت کمتری روبه پایین دارد. در حالی‌که ذرات جامد از نقاط فوقانی به‌سمت پایین محفظه حرکت می‌کنند و به هر مقدار که اندازهٔ ذرات بزرگتر باشند، ذرات سریع‌تر و با حرکت مارپیچ کمتری در پایین سیکلون رسوب خواهند کرد. در قسمت مرکزی سیکلون‌ها، معمولاً یک استوانهٔ نسبتاً قطور برای خروج گاز استفاده می‌شود. این لوله در وسط سیکلون تعبیه شده و از ذرات جامد که در اثر نیروی اینرسی وارده، در کناره‌های سیکلون جای می‌گیرند، فاصله دارد.

بدین ترتیب اکثر ذرات جامد ورودی، از جریان گاز جدا می‌شوند. یک سیکلون در حقیقت یک محفظهٔ ته‌نشین‌سازی است که شتاب جاذبه با شتاب سانتریفوژی جایگزین شده است. مقدار نسبت شتاب سانتریفوژی به‌شتاب جاذبه، به قطر سیکلون بستگی دارد. نیروی وارده بر ذرات بزرگ‌تر مقدار بیشتری می‌باشد، لذا ذرات بزرگتر با چرخش کمتری در سیکلون به پایین سیکلون می‌رسند [۱]. در مقایسه با سایر جداکننده‌های گاز جامد، سیکلون‌ها ازلحاظ هزینهٔ ساخت و عملیات هزینه کمتری دارند و نحوهٔ ساخت آنها پیچیدگی خاصی ندارد که این یک مزیت مهم برای آنها به‌شمار می‌رود.

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام‌شده روی سیستم‌های اخیر می‌توان به اهمیت بسیار آنها در نمونه‌برداری از ذرات در محیطهایی که غلظت ذرات پایین است یا استفاده از آنها به‌عنوان فیلتراسیون هوا اشاره کرد. از ایمپکتورها بیشتر برای نمونه‌برداری ذرات در محیط استفاده خواهد شد؛ حال آنکه سیکلون بیشتر برای جداسازی ذرات جامد درون گاز مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با مقایسه‌ای بین ایمپکتور مجازی و صفحه‌ای می‌توان به این نکته اشاره کرد که ایمپکتور مجازی که نسل جدیدتری می‌باشند، به‌دلیل به‌دام انداختن ذرات در مسیر روبرویی دیگر مشکل پرش ذرات از روی صفحه و قرارگیری ذرات درون جریان منحرف‌شده را نداشته و همچنین در ایمپکتور مجازی برای نمونه‌برداری، دیگر نیاز به برداشتن صفحه نیست، بلکه همواره یک جریان تلغیظشده از ذرات وجود خواهد داشت که می‌توان نمونه‌برداری از این مسیر را انجام داد. البته ساختار ایمپکتور صفحه‌ای به‌مراتب از ایمپکتور مجازی ساده‌تر است و برای قرارگیری در مدار پیچیدگی‌های مربوط به ایمپکتور مجازی را نیاز ندارد.



شکل ۱۱. سیکلون و نحوهٔ حرکت ذرات در آن

۸. مآخذ

[1] Baron, P. A., K. Willeke, *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*, 2nd ed., Wiley, 2001.

[2] Hari, S., Y. A. Hassan, A. R. McFarland. "Computational fluid dynamics simulation of a rectangular slit real impactor's performance." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, No. 9, 2005, pp. 1015-1028.

[3] Charrouf, M. L. "Fluid and particle dynamics in an aerosol virtual impactor", Master of Science Thesis, Department of Chemical Engineering, Maryland, 2004.

[4] Tavakoli, F. "Aerodynamic Aerosol Classifier", Doctor of Philosophy Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aerodynamic Aerosol Classifier, 2014.

[5] Johnson, T., *Aerodynamic Particle Sizing*, 2009.

[6] Marple, V. A., B. A. Olson, D. S. Ensor, *Aerosol Science and Technology: History and Reviews*, RTI International, 2011.

[7] Hu. S., "Application of computational fluid dynamics to aerosol sampling and concentration", doctor of philosophy Thesis, Mechanical Engineering, Texas A&M University, 2007.

[8] Hari, S., Y. A. Hassan. "Computational fluid dynamics simulation of virtual impactor performance: Comparison to experiment." *Powder Technology*, Vol. 188, No. 1, 2008, pp. 13-22.

پی‌نوشت

1. virtual impactor
2. cascade impactor
3. classifier
4. major flow
5. minor flow
6. cut-off