افزایش بازدهی در مدل یک هیدروسیکلون

حسن رحیم زاده[1*]، بهار فیروزآبادی[2]، محمد موری زاده[1]

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مکانیک

۲- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مکانیک

پیام نگار: **rahimzad@aut.ac.ir**

چکیده

هدف این پژوهش بهبود عملکرد و افزا یش بازدهی در هیدرو سیکلون بوده است.این مهم با ایجاد تغییرات هندسی در داخل بعضی اجزاء و درون هیدروسیکلون مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. در آزمایش‌های صورت گرفته، نمونه‌هایی متفاوت از قطعه استوانه‌ای سیکلون به همراه میله‌های افقی و عمودیِ اضافه شونده مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهدات نشان دادند که عدم استفاده از میله باعث ازدیاد قطر هسته هوایی و کاهش بازدهی در ذرات کمتر از ۴۰ میکرون می‌شود. به‌کارگیری میله افقی در قسمت مخروطی موجب کاهش قطر هسته می‌گردد ولی ناپایداری آن را افزایش می‌دهد که با اضافه کردن میله عمودی این مشکل کاهش می‌یابد و هسته هوایی حذف می‌گردد. اضافه کردن میله‌های افقی و عمودی موجب افزایش بازدهی و نسبت ته‌ریز به ظرفیت می‌شود و حد برش را کاهش می‌دهد. در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته، بهترین حالت از نظر کارایی، استوانه سهموی بهمراه میله افقی و عمودی، و بدترین حالت، در استوانه هذلولوی فاقد میله است.

کلمات کلیدی: هیدروسیکلون، بازدهی ابعادی، هسته هوایی، حد برش، نسبت ته‌ریز به ظرفیت

۱- مقدمه

امروزه فناوری جدایش نقش ویژه‌ای را در فرایندهای استحصال، تغلیظ و بازیافت مواد برای صنایع شیمیایی و معدنی ایفا می‌کند. اندیشهٔ جداسازی مواد و ذرات جامد از آب همواره توجه پژوهشگران و مهندسان را بخود مشغول کرده است. روش‌های سنتی تصفیه و پالایش آب از جمله شناوری، جدایش مغناطیسی، ته‌نشینی گرانشی، رسوب گیری گریزازمرکزی و دیگر روش‌ها به‌دلیل مشکلاتی که داشتند نتوانستند توسعه چندانی نمایند و ماندگار بمانند. تفکر جدید موجب پیدایش دستگاهی بنام هیدروسیکلون شد که ساخت اولین نمونه این دستگاه برای جدایش ذرات کوچکِ شن از آب توسط برنتی (۱۸۹۱)[1] به حدود ۱۰۰ سال پیش می‌رسد. اصول کارکرد یک هیدرو سیکلون شبیه یک دستگاه گریز از مرکز است، با این تفاوت که سیال داخل آن می‌چرخد و پیکره سیکلون ثابت خواهد بود. گرداب لازم برای فرایند جدایش در هیدروسیکلون، توسط شدت جریان سیال که به‌صورت مماسی وارد می‌شود ایجاد می‌گردد. در اثر گردش سریع سیال در داخل پیکرهٔ سیکلون دو گردابه اولیه و ثانویه پدید می‌آید. گردابه اولیه ذرات معلق، چگال و درشت را به طرف دیوارهٔ داخلی و از کنار دیواره داخلی به سمت ته‌ریز[2] می‌راند و گرداب ثانوی ذرات سبک و ریز به همراه آب را از طریق مجرای پیداکنندهٔ گرداب[3] به سمت سرریز[4] حرکت می‌دهد.[۱]

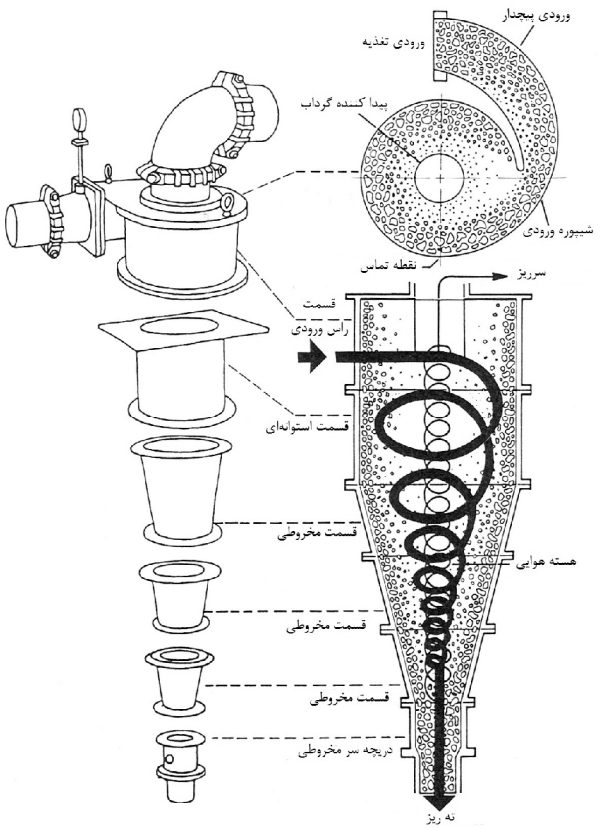
عوامل ساختاری از جمله زاویه ورودی، قطر و هندسه ورودی، قطر و ارتفاع و هندسهٔ قسمت استوانه ای، قطر و ارتفاع پیداکنندهٔ گرداب،

1. Brenty

2. Underflow
3. Vortex Finder
4. Overflow

زاویه و هندسهٔ قسمت مخروطی، قطر و هندسهٔ خروجی زیرین و همچنین زاویه قرارگیری هیدرو سیکلون و نیز پارامترهای جریان، مانند غلظت ورودی، فشار ورودی، شدت جریان ورودی و اندازهٔ ذرات، تأثیر بسزایی در بازدهی و کارایی هیدروسیکلون دارند [۳و۲]. همچنین لایهٔ مرزی در رابطه با غلظت ذرات گوناگون نقش مهمی ایفا می‌کند.[۴]

در مقاله حاضر، با بررسی ۴ نوع هندسه گوناگون برای قطعه استوانه‌ای هیدرو سیکلون و همچنین اضافه کردن میله‌های افقی و عمودی به‌صورت همزمان در درون جریان، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. این مقایسه‌ها که احتمالاً قبلاً در پژوهش‌های دیگران مشاهده نشده است به منظور بررسی و تحلیل بازدهی و حد برش در هر حالت بوده و نهایتا افزایش بازدهی و کاهش هسته هوایی درون سیال را در پی خواهد داشت.



شکل ۱- طرح مبسوط یک نمونه سیکلون

۲- نظریه و معادلات لازم

در اینجا از اصطلاح بازدهی جهت توانایی جدا کننده برای بازیابی جامدات در ته‌ریز، همانطوری که در عملیات تغلیظ و تصفیه لازم است، استفاده می‌گردد. توانایی جداسازی یک جامد از جامد دیگر در عملیات طبقه بندی، دقت جدایش نامیده می‌شود.

به‌طور ساده مشهورترین تعریف بازدهی جدایشE_t، میزان بازیابی جرم در ته‌ریز، M_c، به‌صورت کسری از شدت جریان جرمی خوراک،M، می‌باشد:

$$E_r = \frac{M_c}{M} \qquad (۱)$$

در بعضی از کاربردها در جدایش جامد از مایع، هنگامی که یک ته‌ریز نسبتا رقیقی رخ می‌دهد، از قبیل آنچه در هیدروسیکلون‌ها اتفاق می‌افتد، و نیز بازدهی کل، تأثیر تقسیم شدن جریان (یا جریان مرده[1]) را شامل می‌شود. علت این است که هر نوع جداکننده به‌عنوان مقسّم جریان عمل می‌کند و همچنین جامدات را حداقل به نسبت مشابه، همانند نسبت ته‌ریز به ظرفیت، $R = U/Q$، تقسیم می‌نماید.

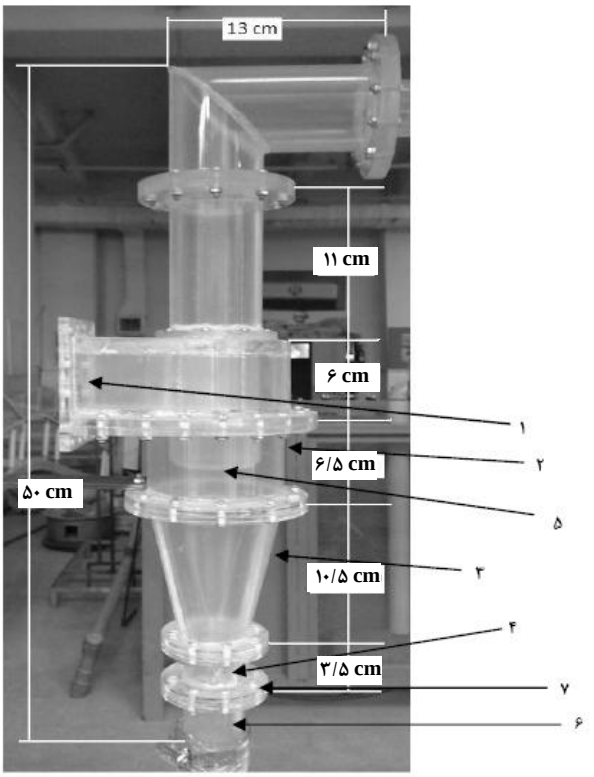
در صورتی که هدف، درنظر گرفتن اثر جدایش به تنهایی و کم کردن سهم جریان مرده باشد، تعاریف متعددی نیز از بازدهی در کتب مختلف دیده می‌شود که بهترین و وسیع‌ترین تعریف، بازدهی کاهش داده شده یا بازدهی کاهیده است که به‌صورت فرمول زیر بیان می‌گردد:

$$E'_r = \frac{E_r - R_f}{1 - R_f} \qquad (۲)$$

بازدهی ابعادی، همانند بازدهی کل تعریف می‌گردد با این تفاوت که مقدار آن فقط به یک اندازهٔ ذره مربوط می‌شود. در مورد جداکننده‌ای که کارایی آن به اندازهٔ ذره وابسته است، بازدهی ابعادی با ابعاد ذرات مختلف تغییر می‌کند و نمایش نموداری این تغییر، منحنی بازدهی ابعادی نامیده می‌شود. برای هیدروسیکلونها، منحنی معمولاً به شکل S است.

یکی از بهترین تعاریف که از منحنی بازدهی ابعادی استخراج می‌شود حد برش (D_{50}) است که یک تعریف منطقی و پذیرفته شده است. در واقع در این حالت احتمال جداشدن و عبور از دو خروجی سرریز و ته‌ریز یکسان است. [۳]

1. Dead Flux



شکل ۲- تصویر هیدروسیکلون مورد استفاده

۳- دستگاه‌ها و روش انجام آزمایش

۳-۱ دستگاه‌های آزمایش

هیدروسیکلون ساخته شده از جنس پلکسی گلاس است تا جریان درون آنها قابل مشاهده باشد. این هیدروسیکلون از ۷ قطعه مجزا ساخته شده که با توجه به شکل (۲) عبارتند از [۴]:

۱. قسمت ورودی جریان به قطر ۴ سانتی‌متر

۲. استوانه اصلی به قطر ۸ سانتی‌متر

۳. قطعه مخروطی به قطر بزرگ ۸ و قطر کوچک ۳/۵ سانتی‌متر و زاویه رأس ۲۸ درجه

۴. استوانه زیر قسمت مخروطی به قطر ۳/۵ سانتی‌متر

۵. پیدا کنندهٔ گرداب و سرریز به قطر ۵ سانتی‌متر

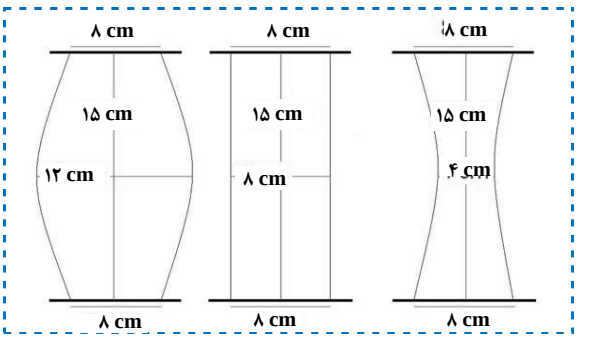
۶. قطعه تەریز به قطر ۳/۵ سانتی‌متر

۷. فلنج‌ها

قطعات اضافه شده به این سیکلون، سه قطعه شامل: استوانه ساده، استوانه هذلولوی (مقعر) و استوانه سهموی (محدب) می‌باشند که نقش جایگزین برای قطعه ۴، استوانهٔ هیدروسیکلون را دارند. ارتفاع همه ۱۵ و قطر ۲ دهانه آنها ۸ سانتی‌متر است. استوانه هذلولوی در وسط ارتفاعش قطری برابر ۴ سانتی‌متر و استوانه سهموی در وسط ارتفاعش قطری برابر ۱۲ سانتی‌متر دارد. تصویر و ابعاد آنها در اشکال ۳ و ۴ آمده است.

سایر اجزاء استفاده شده شامل پمپ با ظرفیت آبدهی ۳۰ تا ۵۸ متر مکعب در ساعت و ارتفاع (هد)، ۸ تا ۳۳ متر، الک‌های استاندارد با اندازهٔ مش ۵۳ تا ۲۵۱ میکرون، دستگاه شیکر (همزن) برای الک کردن بهتر ذرات و ترازوی دقیق برای وزن کردن نمونه‌ها با دقت ۰/۱ گرم بوده است.

شکل ۳- تصویر قطعات استوانه‌ای ساخته شده



شکل ۴- نقشه قطعات استوانه‌ای

۳-۲ روش انجام آزمایش‌ها

ذرات جامد از جنس ماسه سیلیسی و خاک رس با چگالی ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده‌اند و غلظت دوغاب‌های مورد آزمایش همگی ۲٪ وزنی تنظیم شده اند. شدت جریان مورد آزمایش ثابت و برابر ۲/۸۱ لیتر بر ثانیه و اعداد بدون بعد رینولدز و فرود در این آزمایش به‌صورت زیر محاسبه شده‌اند:

$$Q = 2.81(lit/s) = 0.00281(m/s), V = Q/A = 2.23(m/s)$$
$$D = 0.04(m), \rho = 1041.6(kg/m), \mu = 1.003*10(kg/m.s)$$
$$\mathrm{Re} = \frac{V.D.\rho}{\mu} = 92632.82$$
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.D}} = 3.5598$$

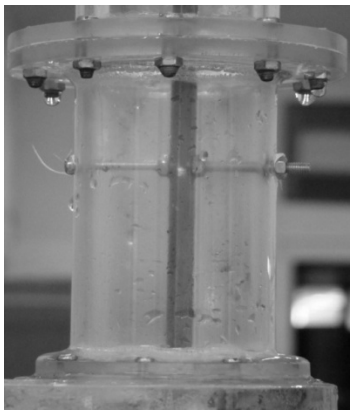
پس از راه‌اندازی، در یک زمان معین و برای مدت محدود ۳ تا ۵ ثانیه، از ۲ خروجی هیدروسیکلون به‌طور همزمان درون ظرف‌های مدرج و به‌طور مجزا نمونه برداری انجام گرفته است. سپس با خشک کردن کامل نمونه‌ها، آنها را به‌طور مجزا وزن کرده و به‌طور مجزا، ذرات الک، تعیین اندازه شده‌اند. پس از پایان مرحله اول آزمایش‌ها، تغییرات لازم در سیکلون اعمال می‌شود و مجددا همین مراحل تکرار می‌گردد. این تغییرات همانگونه که گفته شد شامل تغییر در قطعه استوانه‌ای و همچنین اضافه کردن میله جامد افقی و عمودی می‌باشد. قطر میله افقی ۴ میلی متر است که در قسمت مخروطی و در ۱/۵ سانتی‌متری بالای قاعده زیرین واقع شده است. میله عمودی نیز با قطر ۶ میلی متر از قسمت مخروطی تا قسمت سرریز ادامه دارد (شکل‌های (۵) و (۶)).

شکل ۵- اتصال میله افقی و عمودی در قسمت مخروطی

۴- بررسی و تحلیل نتایج به‌دست آمده

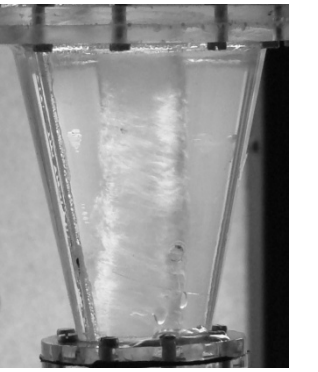
۴-۱ مشاهدات انجام شده

در مراحل اولیه برای ایجاد جریان چرخشی مؤثر در هیدروسیکلون (رخداد پدیدهٔ گردابی جهت جدایش ذرات)، یک شدت جریان حداقل، مورد نیاز است که این شدت جریان در حدود ۱/۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. مشاهده دوم اینکه، از لحظه ای که شدت جریان به میزان حداقلی خود رسید،یک هسته هوایی پدید می‌آید و در همین شدت جریان بحرانی است که بیشترین قطر و بیشترین ناپایداری در هسته مشاهده می‌شود. با افزایش شدت جریان، قطر هسته هوایی کم کم کاهش یافته و ناپایداری آن نیز کم می‌شود؛ اما این روند تا شدت جریان ۳/۴ لیتر بر ثانیه ادامه دارد و در شدت جریان‌های بالاتر، دیگر تغییری در اندازهٔ قطر و پایداری هسته هوایی مشاهده نمی‌گردد. بزرگترین قطر هسته هوایی (حدود ۷۵٪ اندازهٔ قطر لوله تەریز) از جمله مشخصات بارز این حالت است.

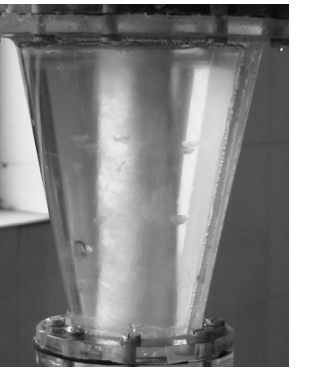


شکل ۶- اتصال میله عمودی در قسمت بالای سرریز

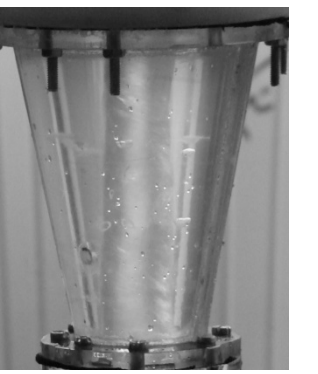
مورد سوم (که مقایسه مشاهدات تمام حالت‌ها نسبت به حالت استوانهٔ سادهٔ بلند است) اینکه در شدت جریان ۲/۸۱ لیتر بر ثانیه که شدت جریان مورد آزمایش بوده است، در حالت استوانهٔ سادهٔ بلند، نسبت به حالت استوانهٔ سادهٔ کوتاه، قطر هسته هوایی تغییری نمی‌کند ولی ناپایداری آن اندکی افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش ارتفاع هستهٔ هوایی است. در حالت استوانهٔ هذلولوی بدلیل قطر کم در قسمت وسط آن، نسبت به حالت استوانهٔ ساده بلند، قطر هسته هوایی اندکی کاهش می‌یابد ولی پایداری آن تغییری نمی‌کند. در مقایسه حالت استوانه سهموی با استوانه سادهٔ بلند، قطر هسته تغییری نمی‌کند ولی ناپایداری آن بدلیل بیشتر بودن قطر وسط استوانه سهموی و میدان وسیع‌تر برای جابجایی هسته، اندکی افزایش می‌یابد. تصاویر هسته هوایی این ۴ حالت در قسمت مخروطی در شکل‌های (۷) تا (۱۰) آمده است. در مرحله بعد با اضافه کردن میله افقی در قسمت مخروطی، شاهد کاهش چشمگیر قطر هسته می‌شویم که اثر نامطلوبی بر پایداری گذاشته و ناپایداری را افزایش می‌دهد. (شکل (۱۱) و (۱۲)). با اضافه کردن میله عمودی سرتاسری در داخل جریان، هسته هوایی به کلی حذف شد (شکل (۱۳) و (۱۴)).



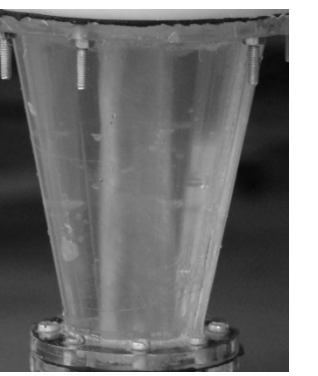
شکل ۷- استوانهٔ سادهٔ کوتاه



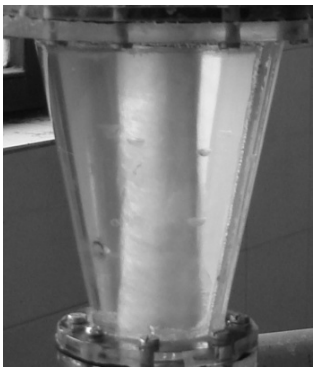
شکل ۸- استوانهٔ سادهٔ بلند



شکل ۹- استوانهٔ هذلولوی



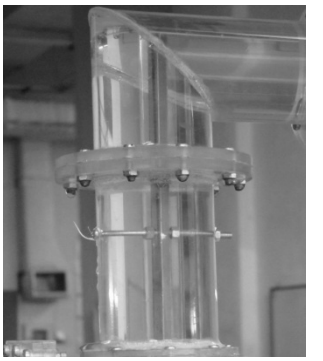
شکل ۱۰- استوانهٔ سهموی



شکل ۱۱- قطر زیاد و نا پایداری کم هسته هوایی در نبود میله افقی

شکل ۱۲- کم شدن قطر و بیشتر شدن ناپایداری با اضافه شدن میله افقی

شکل ۱۳- میله‌های افقی و عمودی در قسمت مخروطی و حذف هسته هوایی



شکل ۱۴- میله‌های افقی و عمودی در قسمت فوقانی و حذف هسته هوایی

۴-۲ بررسی نتایج آزمایش‌ها به‌صورت چندگانه

۴-۲-۱ بررسی نتایج به‌دست آمده برای استوانه هذلولوی

در این بخش به‌عنوان نمونه، منحنی‌های ۳ گانه استوانه هذلولوی در نمودار (۱) برای مقایسه رسم شده است.

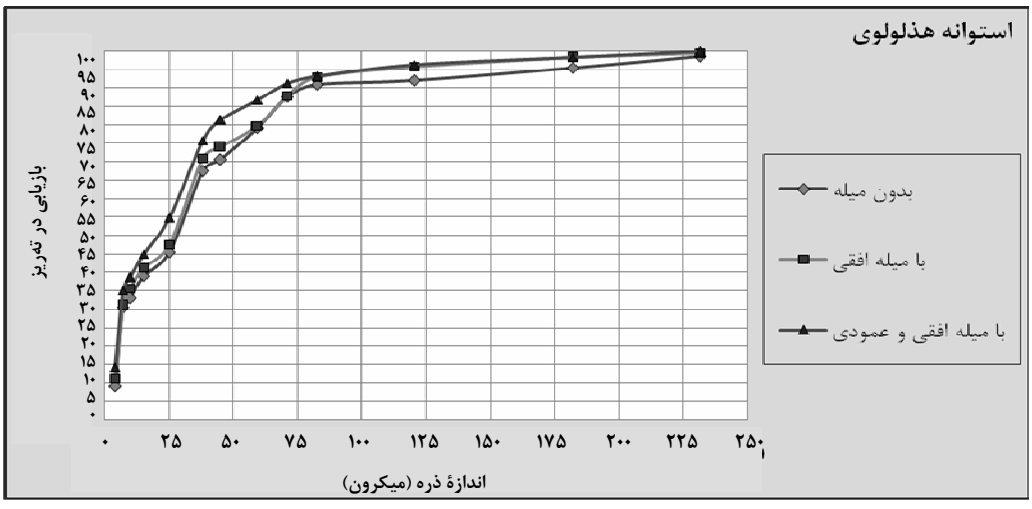
نتایج حاصل شده از این نمودار و نمودارهای مشابه برای قطعات استوانه‌ای دیگر، به این شرح است:

۱. اول اینکه در تمامی انواع قطعات استوانه‌ای، بکارگیری همزمان میله افقی و عمودی، بازدهی بالاتری، در مقایسه با اینکه صرفا از میله افقی استفاده شود، دارد، و استفاده تنها از میله افقی نیز بازدهی بالاتری نسبت به حالت ساده (عدم استفاده از میله افقی یا عمودی) دارد. این رخداد چند دلیل دارد؛ از جمله آنها اینکه: الف) با اضافه کردن میله افقی به‌صورت تنها، قطر هسته هوایی در همه انواع قطعات استوانه‌ای، کاهش مشهودی می‌یابد (تقریباء ۴۰ درصد کاهش قطر) که این امر سبب می‌شود که، اولاً مقاومت در سر راه جریان ته‌ریز کمتر شود و شدت جریان بیشتری از آن خارج گردد و به تبع آن ذرات بیشتری راهی ته‌ریز شوند. ثانیاً، اینکه جریان رو به بالا در فاصله شعاعی کمتری اعمال می‌شود و ذرات ریز کمتری را با خود به سمت سرریز می‌برد. به‌عنوان مثال، در صورتی که در حالت عدم استفاده از میله، شعاع هسته ۱/۴ سانتی‌متر بوده باشد، جریان رو به بالا ناشی از هسته نیز در همین شعاع شروع می‌شود و بیشترین شدت خود را دارد. ولی در حالت استفاده از میله افقی، شعاع هسته به ۱ سانتی‌متر کاهش می‌یابد و در نتیجه جریان رو به بالا نیز در همین شعاع آغاز می‌گردد. ب) اضافه شدن میله عمودی به میله افقی، علاوه بر حذف هسته هوایی، یک جریان هوایی بسیار کم و رو به پایین در سیکلون ایجاد می‌کند. این باعث می‌شود که اولا اختلاط و آشفتگی جریان کمتر شود، ثانیاً بیشتر ذرات ریز که در محدودهٔ نزدیک محور عمودی سیکلون هستند، توسط این جریان رو به پایین، به سمت ته‌ریز کشیده شده و خارج می‌شوند. بدین ترتیب به‌کارگیری همزمان میله افقی و عمودی، بازدهی بیشتری را در مقایسه با حالت استفاده تنها از میله افقی نتیجه می‌دهد.

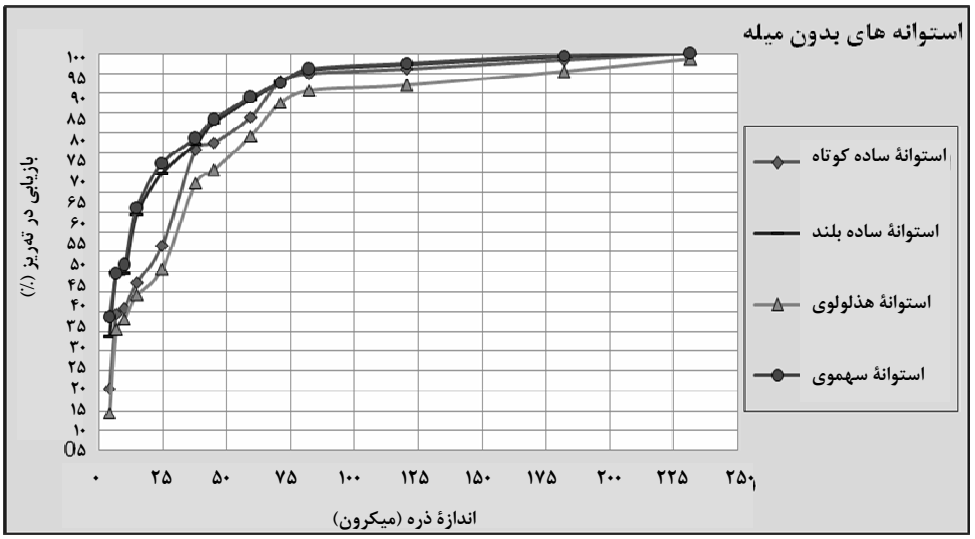
۲. برای ذرات زیر ۷۵ میکرون افزایش بازدهی کاملاً مشهود است و دلیل این رخداد آن است که اصولا ذرات درشت‌تر در نزدیکی جداره‌های داخلی سیکلون حرکت می‌کنند و جریان دارند؛ بنابراین کمتر تحت تأثیر تغییرات هندسی و هسته هوایی قرار می‌گیرند. ولی در عوض ذرات ریزتر که عموماً حول محور عمودی سیکلون جریان دارند، از این تغییرات هندسی و ساختاری و به تبع آن تغییرات هسته هوایی، بیشترین تأثیر را می‌پذیرند.

۴-۲-۲ مقایسه حالات مختلف انواع استوانه‌ها با یکدیگر

در این بخش بین انواع قطعات استوانه‌ای آزمایش شده، مقایسه‌ای بین حالات بدون میله، حالات استفاده از میله افقی تنها و حالت‌های استفاده همزمان از میله افقی و عمودی صورت گرفته است تا مشخص شود کدام شرایط خاص، بهترین بازدهی را دارد (نمودار (۲) تا (۴)).



نمودار ۱- مقایسه منحنی در صد ته‌ریز به اندازهٔ ذرات برای ۳ حالت در استوانه هذلولوی



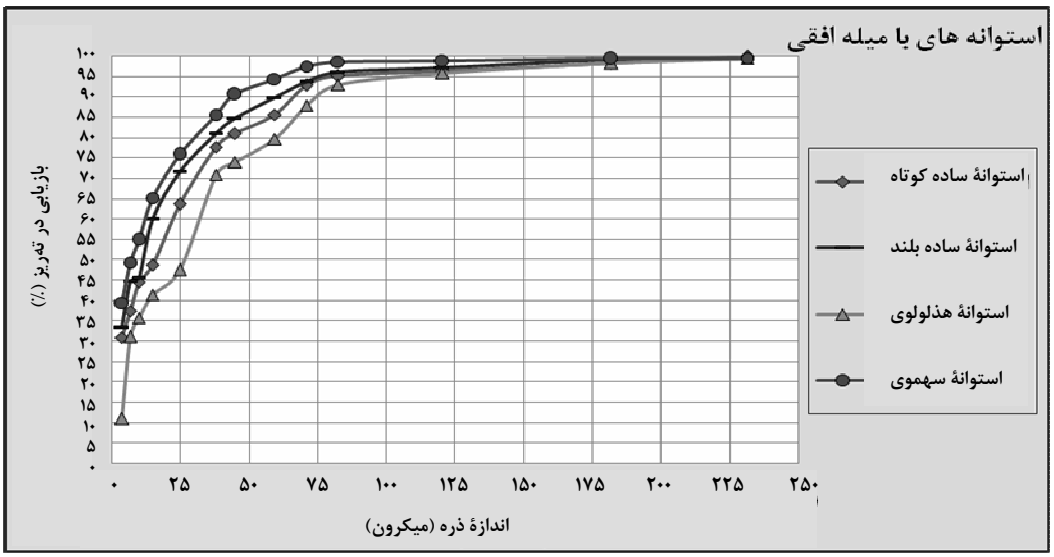
نمودار ۲- مقایسه منحنی در صد ته‌ریز به اندازهٔ ذرات درحالت‌های استوانه‌های بدون میله

در حالات بدون میله (نمودار (۲))، استوانه هذلولوی کمترین میزان بازدهی ابعادی را داراست؛ دلیل این امر آن است که اولا: چون قطر دهانه آن در ابتدا زیاد، و سپس کم شده و دوباره زیاد می‌گردد (حالتی شبیه به ونتوری)، در زیر قسمت تنگ شدگی، بدلیل اینرسی موجود در ذرات و در اثر شیب نیمهٔ بالایی قطعه، ذرات به سمت محور استوانه متمایل می‌شوند و نوعی اختلاط بین جریان کنار جداره (که رو به پایین حرکت می‌کند) و جریانی که در محور استوانه جاریست (و رو به بالا حرکت می‌کند) بوجود می‌آید. این پدیده به همراه کم بودن قطر استوانه در مرکز، موجب می‌شود ذرات توسط جریان رو به بالا که توسط هسته هوایی و فشار نسبی منفی ایجاد شده است، به سمت سرریز برده شوند و بازدهی سیکلون در ته‌ریز کاهش یابد. علاوه بر این، کم بودن قطر استوانه هذلولوی در وسط، باعث افزایش سرعت جریان رو به بالای سیال می‌شود و افزایش شدت جریان سرریز و کاهش شدت جریان ته‌ریز را نتیجه می‌دهد و نتیجتاً کاهش نسبت ته‌ریز به ظرفیت را درپی دارد.

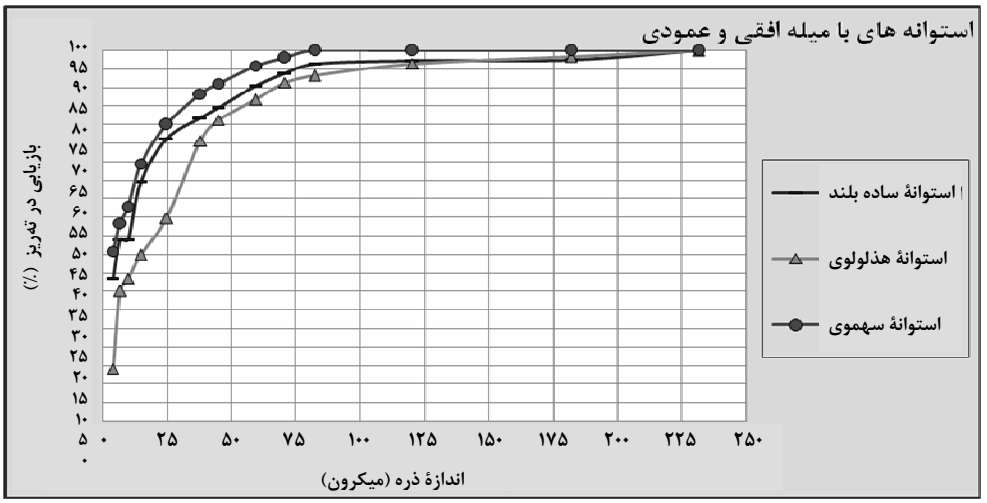
در شرایطی بهتر از استوانه هذلولوی، استوانهٔ ساده کوتاه، قرار دارد. دلیل بالاتر بودن بازدهی ابعادی استوانه ساده کوتاه نسبت به استوانه هذلولوی را می‌توان در نبود همان قسمت ونتوری شکل و قطر کم آن دانست، و به همین علت در استوانهٔ ساده دیگر اختلاط در جریان اطراف جدارهٔ داخلی و جریان محوری بوجود نمی‌آید و فرایند جدایش روند عادی خود را طی می‌کند. استوانهٔ ساده بلند و استوانهٔ سهموی که تقریبا نمودار آنها منطبق بر هم است و بازدهی مشابهی دارند، در مراتب بالاتر هستند. این امر نیز بدین دلیل است که برخلاف استوانه هذلولوی، پدیدهٔ اختلاط جریانهای ذکر شده مشاهده نمی‌شود و ذرات جامد وارد جریان محوری رو به بالا نمی‌شوند، همچنین افزایش ارتفاع آنها، زمان بیشتری را در اختیار ذرات متوسط و ریزتر قرار می‌دهد تا در اثر نیروی گریز از مرکز، به سمت جداره و لایه مرزی مربوطه متمایل و از آنجا راهی ته‌ریز شوند. علت بالاتر بودن منحنی بازدهی ابعادی استوانهٔ سهموی نسبت به استوانهٔ ساده بلند در این است که لایه مرزی تشکیل شده در دیوارهٔ قسمت استوانه‌ای، در استوانهٔ سهموی به میزان اندکی بزرگتر از استوانهٔ ساده بلند است و در نتیجه میزان ذرات بیشتری را در خود جای داده و به سمت ته‌ریز می‌برد. نتیجه اینکه افزایش ارتفاع قسمت استوانه‌ای سیکلون باعث افزایش بازدهی می‌گردد.

همانگونه که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود، در حالت اضافه شدن میله افقی، بازهم همان رتبه‌های اول تا چهارم حفظ شده است. با این تفاوت که در استوانهٔ سهموی، نسبت به استوانهٔ ساده بلند، عدم انطباق منحنی‌ها محسوس‌تر شده و برخلاف نمودار قبل، بر روی هم منطبق نمی‌شوند. این امر به دلیل تأثیر بیشتر میله افقی بر استوانه سهموی بخاطر بزرگتر بودن مقطع وسط آن می‌باشد. لذا میزان تغییراتِ اندازه و ناپایداری هسته هوایی بیشتر است، نتیجه اینکه اضافه شدن میله افقی تأثیر بیشتری روی این استوانه نسبت به سایر استوانه‌ها دارد.

در حالت اضافه شدن میله‌های افقی و عمودی به‌صورت همزمان، که نتایج آن در نمودار (۴) آمده است، بازهم استوانه‌های هذلولوی، سادهٔ بلند و سهموی، حائز رتبه‌های سوم تا اول شدند.



نمودار ۳- مقایسه منحنی در صد تەریز به اندازۀ ذرات در حالت‌های با میله افقی در استوانه ها



نمودار ۴- مقایسه منحنی در صد تەریز به اندازۀ ذرات در حالت‌های با میله افقی و عمودی در استوانه ها

جدول ۱- میزان حد برش، بازدهی کل، نسبت تەریز به ظرفیت، بازدهی کل کاهش یافته برای تمام حالت

نوع آزمایش	حد برش (میکرون)	بازدهی کل (٪)	*Rf* (%)	بازدهی کل کاهش یافته (٪)
استوانۀ ساده کوتاه	۲۱/۳۱	۸۳/۳	۳۷/۵	۷۳/۲۸
استوانۀ ساده کوتاه با میله افقی	۱۵/۹	۸۸/۵۳	۴۰/۵	۸۰/۷۲
استوانۀ ساده بلند	۱۶/۸۵	۸۴/۱۱	۳۷/۷	۷۴/۴۹
استوانۀ ساده بلند با میله افقی	۱۳/۵۶	۹۰/۰۴	۴۰/۹	۸۳/۲
استوانۀ ساده بلند با میله افقی و عمودی	۱۰/۳	۹۳/۳۸	۴۳/۸	۸۸/۲۲
استوانۀ هذلولوی	۲۶/۳۸	۷۵/۹۵	۳۷/۲	۶۱/۷
استوانۀ هذلولوی با میله افقی	۲۴/۳۶	۷۹/۸۳	۳۹/۸	۶۶/۲۷
استوانۀ هذلولوی با میله افقی و عمودی	۲۲/۶۳	۷۹/۹۸	۴۲/۱	۶۴/۵
استوانۀ سهموی	۱۵/۱۱	۸۶/۰۶	۳۸/۱	۷۷/۴۸
استوانۀ سهموی با میله افقی	۱۲/۴۶	۹۳/۷۹	۴۱/۲	۸۹/۴۴
استوانۀ سهموی با میله افقی و عمودی	۱۰/۰۲	۹۵/۶۳	۴۴/۷	۹۲/۱۷

با توجه به نتایج جدول (۱) ملاحظه می‌شود که اضافه کردن میله افقی و عمودی در تمام موارد، باعث بالا رفتن بازدهی کل شده است که این مقادیر افزایش یافته را می‌توان از جدول فوق مشاهده و مقایسه کرد[۵].

۵- نتیجه‌گیری

۱. در عدم استفاده از میله‌های افقی و عمودی، هسته هوایی تأثیر منفی قابل ملاحظه ای در کارایی هیدروسیکلون دارد. این امر باعث می‌شود که نسبت ته‌ریز به ظرفیت و میزان بازدهی ابعادی کاهش یابد.

۲. با اضافه شدن میله افقی، قطر هسته هوایی کاهش می‌یابد ولی ناپایداری آن بیشتر می‌گردد. این امر سبب افزایش بازدهی، کاهش حد برش و کاهش نسبت ته‌ریز به ظرفیت می‌گردد.

۳. هنگامی که میلهٔ عمودی به میلهٔ افقی اضافه می‌گردد، هسته هوایی کاملاً حذف می‌شود. در مشاهدات انجام شده نیز مقدار کمی جریان هوا از ورودی به سمت ته‌ریز جریان دارد که ناشی از حباب‌های هوای کشیده شده توسط پمپ از درون مخزن می‌باشد. این امور سبب می‌شوند که نسبت ته‌ریز به ظرفیت و بازدهی ابعادی افزایش، و حد برش کاهش یابد.

۴. بررسی‌ها و مشاهدات انجام شده نشان می‌دهند که از لحاظ بازدهی، استوانه هذلولوی رتبه چهارم، استوانه سادهٔ کوتاه رتبه سوم، استوانه ساده بلند رتبه دوم و استوانه سهموی رتبه اول را کسب نمایند.

۶- تقدیر و تشکر

لازم است که از مساعدت‌های آقای مهندس احمدی و آقای محب، همکاران آزمایشگاه سیالات دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تشکر و قدر دانی شود.

۷- فهرست علائم

E_r	بازدهی کل
E_r'	بازدهی کل اصلاح شده
D_{50}	حد برش
M_c	شدت جریان جرمی ذرات ته‌ریز
M	شدت جریان جرمی ذرات ته ورودی
U	شدت جریان حجمی ته‌ریز
Q	شدت جریان حجمی ورودی
R_f	نسبت ته‌ریز به ظرفیت

مراجع

[1] Weiss Norman L. "SME MINERAL PROCESSING HANDBOOK", Volume 1, Society of Mining Engineers of AIME, pp. 3D-10 to 3D-37, (1985).

[2] Svarovsky L. "Solid - Liquid Separation", London, Butterworth-Heinemann, pp. 1–10 & 191-215, (2000).

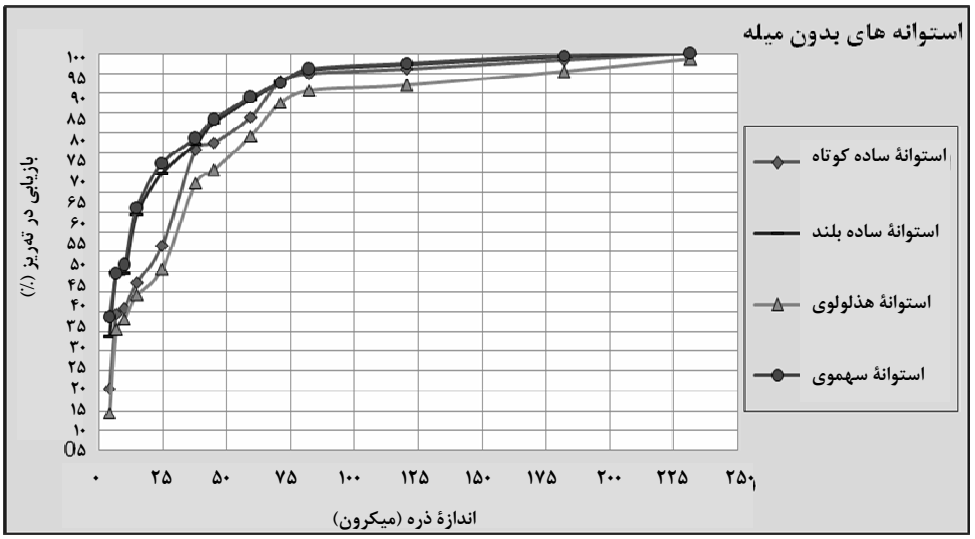
[3] GUPTA R,Kaulaskar M,D.,Kumara V.,Sripria R., Meikap B.C.,Chakraborty S."Studies on the understanding mechanism of air core and vortex formation in a Hydrocyclone", Chemical Engineering Journal 144, 53-68, (2008).

[4] Laverack S.D.,"The effect of particle concentration on the boundary layer flow in a hydrocyclone", Tranc. L. Chem. E .33-58, (1980).

[۵] رحمانی ع.اکبر، «هیدروسیکلونها»، انتشارات سایه گستر، قزوین، فصل ۱ تا ۶ و فصل ۱۰، (۱۳۸۴).

[۶] رحیم زاده ح.، بهشتی س.س، هاشمی مرغزار ش. «تحلیل تجربی جریان در جداکننده‌های هیدروسیکلونی»، مجله مهندسی شیمی ایران، سال پنجم، شماره ۲۴، (۱۳۸۵).

[۷] موری زاده م. «بررسی تجربی اثرات ساختاری بر روی یک جداکننده مرکب»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۸).



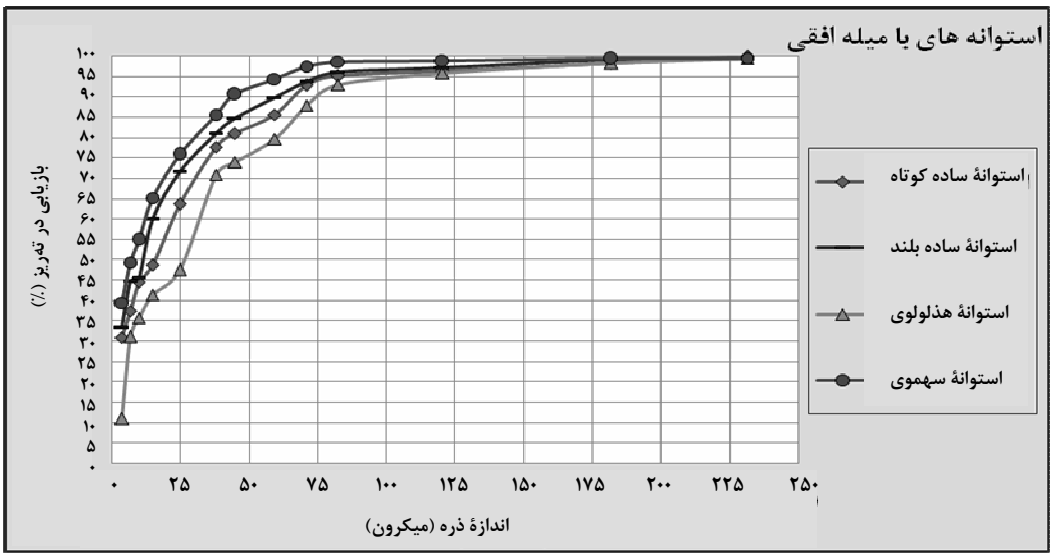
نمودار ۲- مقایسه منحنی در صد ته‌ریز به اندازهٔ ذرات درحالت‌های استوانه‌های بدون میله

در حالات بدون میله (نمودار (۲))، استوانه هذلولوی کمترین میزان بازدهی ابعادی را داراست؛ دلیل این امر آن است که اولا: چون قطر دهانه آن در ابتدا زیاد، و سپس کم شده و دوباره زیاد می‌گردد (حالتی شبیه به ونتوری)، در زیر قسمت تنگ شدگی، بدلیل اینرسی موجود در ذرات و در اثر شیب نیمهٔ بالایی قطعه، ذرات به سمت محور استوانه متمایل می‌شوند و نوعی اختلاط بین جریان کنار جداره (که رو به پایین حرکت می‌کند) و جریانی که در محور استوانه جاریست (و رو به بالا حرکت می‌کند) بوجود می‌آید. این پدیده به همراه کم بودن قطر استوانه در مرکز، موجب می‌شود ذرات توسط جریان رو به بالا که توسط هسته هوایی و فشار نسبی منفی ایجاد شده است، به سمت سرریز برده شوند و بازدهی سیکلون در ته‌ریز کاهش یابد. علاوه بر این، کم بودن قطر استوانه هذلولوی در وسط، باعث افزایش سرعت جریان رو به بالای سیال می‌شود و افزایش شدت جریان سرریز و کاهش شدت جریان ته‌ریز را نتیجه می‌دهد و نتیجتاً کاهش نسبت ته‌ریز به ظرفیت را درپی دارد.

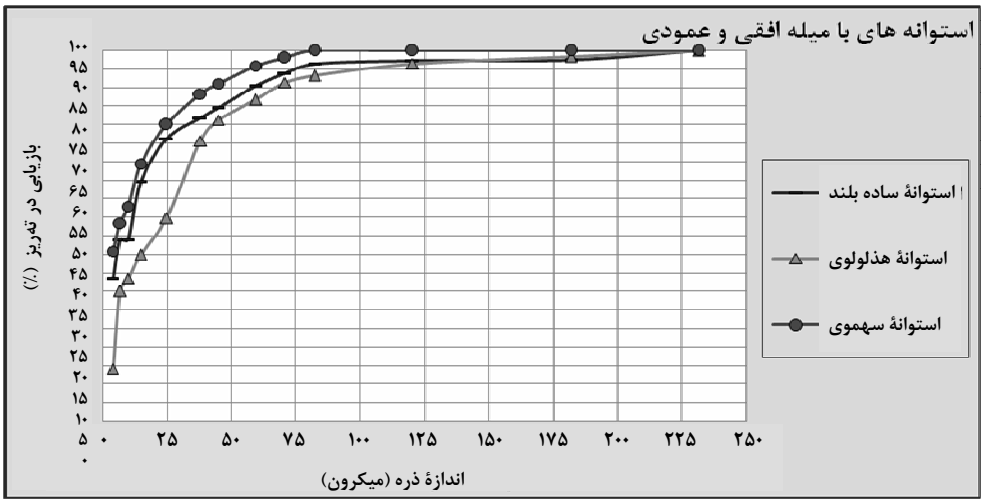
در شرایطی بهتر از استوانه هذلولوی، استوانهٔ ساده کوتاه، قرار دارد. دلیل بالاتر بودن بازدهی ابعادی استوانه ساده کوتاه نسبت به استوانه هذلولوی را می‌توان در نبود همان قسمت ونتوری شکل و قطر کم آن دانست، و به همین علت در استوانهٔ ساده دیگر اختلاط در جریان اطراف جدارهٔ داخلی و جریان محوری بوجود نمی‌آید و فرایند جدایش روند عادی خود را طی می‌کند. استوانهٔ ساده بلند و استوانهٔ سهموی که تقریبا نمودار آنها منطبق بر هم است و بازدهی مشابهی دارند، در مراتب بالاتر هستند. این امر نیز بدین دلیل است که برخلاف استوانه هذلولوی، پدیدهٔ اختلاط جریانهای ذکر شده مشاهده نمی‌شود و ذرات جامد وارد جریان محوری رو به بالا نمی‌شوند، همچنین افزایش ارتفاع آنها، زمان بیشتری را در اختیار ذرات متوسط و ریزتر قرار می‌دهد تا در اثر نیروی گریز از مرکز، به سمت جداره و لایه مرزی مربوطه متمایل و از آنجا راهی ته‌ریز شوند. علت بالاتر بودن منحنی بازدهی ابعادی استوانهٔ سهموی نسبت به استوانهٔ ساده بلند در این است که لایه مرزی تشکیل شده در دیوارهٔ قسمت استوانه‌ای، در استوانهٔ سهموی به میزان اندکی بزرگتر از استوانهٔ ساده بلند است و در نتیجه میزان ذرات بیشتری را در خود جای داده و به سمت ته‌ریز می‌برد. نتیجه اینکه افزایش ارتفاع قسمت استوانه‌ای سیکلون باعث افزایش بازدهی می‌گردد.

همانگونه که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود، در حالت اضافه شدن میله افقی، بازهم همان رتبه‌های اول تا چهارم حفظ شده است. با این تفاوت که در استوانهٔ سهموی، نسبت به استوانهٔ ساده بلند، عدم انطباق منحنی‌ها محسوس‌تر شده و برخلاف نمودار قبل، بر روی هم منطبق نمی‌شوند. این امر به دلیل تأثیر بیشتر میله افقی بر استوانه سهموی بخاطر بزرگتر بودن مقطع وسط آن می‌باشد. لذا میزان تغییراتِ اندازه و ناپایداری هسته هوایی بیشتر است، نتیجه اینکه اضافه شدن میله افقی تأثیر بیشتری روی این استوانه نسبت به سایر استوانه‌ها دارد.

در حالت اضافه شدن میله‌های افقی و عمودی به‌صورت همزمان، که نتایج آن در نمودار (۴) آمده است، بازهم استوانه‌های هذلولوی، سادهٔ بلند و سهموی، حائز رتبه‌های سوم تا اول شدند.



نمودار ۳- مقایسه منحنی در صد تەریز به اندازۀ ذرات در حالت‌های با میله افقی در استوانه ها



نمودار ۴- مقایسه منحنی در صد تەریز به اندازۀ ذرات در حالت‌های با میله افقی و عمودی در استوانه ها

جدول ۱- میزان حد برش، بازدهی کل، نسبت تەریز به ظرفیت، بازدهی کل کاهش یافته برای تمام حالت

نوع آزمایش	حد برش (میکرون)	بازدهی کل (٪)	*Rf* (%)	بازدهی کل کاهش یافته (٪)
استوانۀ ساده کوتاه	۲۱/۳۱	۸۳/۳	۳۷/۵	۷۳/۲۸
استوانۀ ساده کوتاه با میله افقی	۱۵/۹	۸۸/۵۳	۴۰/۵	۸۰/۷۲
استوانۀ ساده بلند	۱۶/۸۵	۸۴/۱۱	۳۷/۷	۷۴/۴۹
استوانۀ ساده بلند با میله افقی	۱۳/۵۶	۹۰/۰۴	۴۰/۹	۸۳/۲
استوانۀ ساده بلند با میله افقی و عمودی	۱۰/۳	۹۳/۳۸	۴۳/۸	۸۸/۲۲
استوانۀ هذلولوی	۲۶/۳۸	۷۵/۹۵	۳۷/۲	۶۱/۷
استوانۀ هذلولوی با میله افقی	۲۴/۳۶	۷۹/۸۳	۳۹/۸	۶۶/۲۷
استوانۀ هذلولوی با میله افقی و عمودی	۲۲/۶۳	۷۹/۹۸	۴۲/۱	۶۴/۵
استوانۀ سهموی	۱۵/۱۱	۸۶/۰۶	۳۸/۱	۷۷/۴۸
استوانۀ سهموی با میله افقی	۱۲/۴۶	۹۳/۷۹	۴۱/۲	۸۹/۴۴
استوانۀ سهموی با میله افقی و عمودی	۱۰/۰۲	۹۵/۶۳	۴۴/۷	۹۲/۱۷

با توجه به نتایج جدول (۱) ملاحظه می‌شود که اضافه کردن میله افقی و عمودی در تمام موارد، باعث بالا رفتن بازدهی کل شده است که این مقادیر افزایش یافته را می‌توان از جدول فوق مشاهده و مقایسه کرد[۵].

۵- نتیجه‌گیری

۱. در عدم استفاده از میله‌های افقی و عمودی، هسته هوایی تأثیر منفی قابل ملاحظه ای در کارایی هیدروسیکلون دارد. این امر باعث می‌شود که نسبت ته‌ریز به ظرفیت و میزان بازدهی ابعادی کاهش یابد.

۲. با اضافه شدن میله افقی، قطر هسته هوایی کاهش می‌یابد ولی ناپایداری آن بیشتر می‌گردد. این امر سبب افزایش بازدهی، کاهش حد برش و کاهش نسبت ته‌ریز به ظرفیت می‌گردد.

۳. هنگامی که میلهٔ عمودی به میلهٔ افقی اضافه می‌گردد، هسته هوایی کاملاً حذف می‌شود. در مشاهدات انجام شده نیز مقدار کمی جریان هوا از ورودی به سمت ته‌ریز جریان دارد که ناشی از حباب‌های هوای کشیده شده توسط پمپ از درون مخزن می‌باشد. این امور سبب می‌شوند که نسبت ته‌ریز به ظرفیت و بازدهی ابعادی افزایش، و حد برش کاهش یابد.

۴. بررسی‌ها و مشاهدات انجام شده نشان می‌دهند که از لحاظ بازدهی، استوانه هذلولوی رتبه چهارم، استوانه سادهٔ کوتاه رتبه سوم، استوانه ساده بلند رتبه دوم و استوانه سهموی رتبه اول را کسب نمایند.

۶- تقدیر و تشکر

لازم است که از مساعدت‌های آقای مهندس احمدی و آقای محب، همکاران آزمایشگاه سیالات دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تشکر و قدر دانی شود.

۷- فهرست علائم

E_r	بازدهی کل
E_r'	بازدهی کل اصلاح شده
D_{50}	حد برش
M_c	شدت جریان جرمی ذرات ته‌ریز
M	شدت جریان جرمی ذرات ته ورودی
U	شدت جریان حجمی ته‌ریز
Q	شدت جریان حجمی ورودی
R_f	نسبت ته‌ریز به ظرفیت

مراجع

[1] Weiss Norman L. "SME MINERAL PROCESSING HANDBOOK", Volume 1, Society of Mining Engineers of AIME, pp. 3D-10 to 3D-37, (1985).

[2] Svarovsky L. "Solid - Liquid Separation", London, Butterworth-Heinemann, pp. 1–10 & 191-215, (2000).

[3] GUPTA R,Kaulaskar M,D.,Kumara V.,Sripria R., Meikap B.C.,Chakraborty S."Studies on the understanding mechanism of air core and vortex formation in a Hydrocyclone", Chemical Engineering Journal 144, 53-68, (2008).

[4] Laverack S.D.,"The effect of particle concentration on the boundary layer flow in a hydrocyclone", Tranc. L. Chem. E .33-58, (1980).

[۵] رحمانی ع.اکبر، «هیدروسیکلونها»، انتشارات سایه گستر، قزوین، فصل ۱ تا ۶ و فصل ۱۰، (۱۳۸۴).

[۶] رحیم زاده ح.، بهشتی س.س، هاشمی مرغزار ش. «تحلیل تجربی جریان در جداکننده‌های هیدروسیکلونی»، مجله مهندسی شیمی ایران، سال پنجم، شماره ۲۴، (۱۳۸۵).

[۷] موری زاده م. «بررسی تجربی اثرات ساختاری بر روی یک جداکننده مرکب»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۸).