هجدهمین کنفرانس سالانه(بین المللی) مهندسي مكانيك ISME2010
ایران ،تهران،دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت۱۳۸۹

ISME2010-1910

بررسی عددی اثرات دبی ورودی و قطر بدنه سیکلون بر جدایش ذرات در جداکننده های سیکلونی

ایمان خزایی [۱]، محمد مقیمان [۲]

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی واحد تربت جام Imankhazaee@yahoo.com
[۲] دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد Mmoghiman@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش اثر دبی هوای ورودی به سیکلون و همچنین اثر قطر بدنه اصلی و نیز لوله ورودی و خروجی و قسمت مخروطی به همراه مدل توربولنسی $RNG\ k-\varepsilon$ بر روی جدایش ذرات و نیز راندمان جداسازی در سیکلون و تبخیر قطرات درون آن مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از این مدل ها با یکدیگر مقایسه شده است. معادلات بقای حاکم و معادلات مدل های توربولنس با روش حجم محدود و استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده اند. قطر ذرات استفاده شده در سیکلون از ۱ تا ۱۳ μm متغیر بوده و نیز دبی هوای ورودی از ۸.۸ تا ۱۸.۴ $L/\min$ تغیر کرده است. نتایج حاصل از حل و آزمایش نشان میدهد که با کاهش قطر دهانه خروجی، راندمان جداسازی ذرات افزایش میابد. همچنین نتایج نشان میدهد که با افزایش میزان دبی ورودی به سیکلون، مقدار راندمان جداسازی سیکلون افزایش میابد که علت آن چرخش بیشتر سیال و افزایش نیروی وارد بر ذرات و حرکت بیشتر ذرات به سمت پایین سیکلون میباشد.

کلمات کلیدی: جدا کننده های سیکلونی، شبیه سازی عددی، راندمان جداسازی، مدل های توربولنس، افت فشار

مقدمه

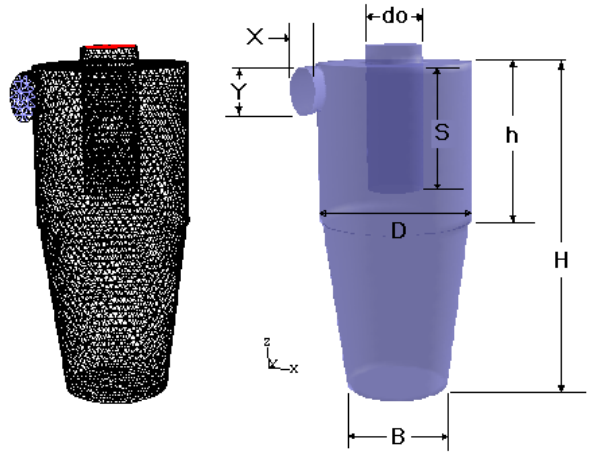
سیکلونها یکی از متعارف ترین وسایل در حذف ذرات و جداسازی آنها از جریان گاز میباشند. طراحی سیکلونها تقریبا ساده بوده و دارای عملکردی ساده میباشند که به همین دلیل است که از آنها به طور وسیعی در کنترل ذرات غبار در کاربرد های مختلف استفاده میشود. سیکلونهای کوچک نمونه ای از انواع سیکلونها میباشند که از آنها در جداسازی ذرات بسیار ریز در صنایع بهداشتی استفاده میشود. سیکلونها دارای سابقه طولانی در تصفیه هوا و در صنایع مختلف میباشند، اما مکانیزم حذف ذرات در داخل سیکلون کمی پیچیده است[۱]. علت عدم درک کامل از عملکرد سیکلون به دلیل پیچیده بودن جریان سیال در داخل آن میباشد. هندسه ساده سیکلون معمولا شامل اندازه های مختلفی میباشد که عبارت است از قطر بدنه اصلی سیکلون D، قطر لوله ورودی d_i، قطر لوله خروجی d_o، طول لوله خروجی L ارتفاع قسمت استوانه ای h و ارتفاع کلی سیکلون H و غیره که توزیع میدان جریان سه بعدی در داخل این هندسه و مدلسازی حرکت ذرات در داخل آن آن را بسیار پیچیده مینماید. در جریان های شدیداً چرخشی داخل محفظه جداکننده‌های سیکلونی، استفاده از یک مدل آشفتگی مناسب برای شبیه سازی عددی جریان نقش حیاتی در صحت نتایج به دست آمده دارد. چرخش شدید جریان داخل محفظه فیلتر سبب شده تا بسیاری از مدل‌های آشفتگی که بر پایه همگن بودن ساختار اغتشاشات جریان بنا شده‌اند، در مورد شبیه سازی جریان داخل سیکلون نتایج قابل قبولی ارائه ندهند [2]. اولین نتایج به دست آمده از مدلسازی سیکلون‌های گازی در سال ۱۹۸۲ توسط بویسان و دوستانش منتشر شد[2]. آنها از مدل تنش جبری برای محاسبه شش مولفه تنش رینولدزاستفاده نمودند. مرور کارهای انجام شده قبلی نشان میدهد که شبیه سازی سیکلونها به طور گسترده انجام نگرفته اما بویسان و همکارانش[۳] جزء اولین کسانی بودند که از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی جداکننده های سیکلونی با استفاده از روش تنش های رینولدز (RSM) استفاده کردند. اخیرا روش شبیه سازی گردابه های بزرگ[1] (LES) برای حالت ناپایدار و گردابه های حلزونی شکل در سیکلونها مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی با داده های آزمایشگاهی بدست آمده است[۴،۵،۶] که برتری روش گردابه های بزرگ در مقایسه با روش متوسط گیری رینولدز در کمتر مدل کردن توربولنس و بیشتر حل کردن معادلات میباشد. هدف اصلی از این پژوهش، پیش بینی خصوصیات جریان و راندمان جداسازی در جدا کننده های سیکلونی با استفاده از روش (CFD) میباشد که اثر یک سری پارامتر ها بر روی این خصوصیات مورد بررسی قرار گرفته است.

هندسه سیکلون

هندسه جدا کننده سیکلونی مورد استفاده در شبیه سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش، هدف

[1] Large Eddy Simulation

بررسی جداسازی ذرات با قطر های مختلف و راندمان جداسازی ذرات میباشد، قسمت مخروطی سیکلون هم در نظر گرفته شده است و با رسیدن ذرات به قسمت انتهایی سیکلون فرض میشود که فرایند جداسازی به طور کامل صورت گرفته است. ابعاد و اندازه های هندسه مورد استفاده و نیز مش بندی سیستم که از نوع چهار وجهی هرمی و به تعداد 118800 گره میباشد در شکل ۱ نشان داده شده است.



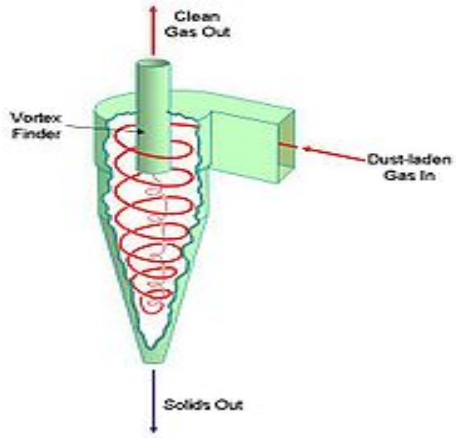
شکل ۱- هندسه سیکلون و مش بندی سیستم

در جدول ۱ مشخصات سیکلون استفاده شده و ابعاد آن نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سیکلون استفاده شده در محاسبات (سانتی متر)

	X	Y	H	h	S	B	D	do
سیکلون 1	0.71	1.29	9.5	4.5	3.6	3	4.38	1.6
سیکلون 2	0.36	0.65	9.5	4.5	3.6	1.5	2.19	0.8

در شکل ۲ یک نمونه جداکننده سیکلونی با یک دهانه ورودی نشان داده شده که نحوه عملکرد و مسیر حرکت ذرات در آن نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه سیکلون با یک دهانه ورودی و عملکرد آن

مدلسازی ریاضی

مدلسازی ریاضی فرایند داخل سیکلون به صورت زیر میباشد:

معادلات فاز گاز:

معادلات فاز گاز شامل معادله بقای جرم و بقای مومنتوم میباشد که برابر است با

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = +\nabla.(\rho u) = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla.(\rho u u) = \nabla.(\tau + \rho \overline{u'u'}) + \rho g \qquad (۲)$$

که در این معادلات u بردار سرعت ، t زمان، ρ دانسیته، g شتاب گرانش و τ هم تانسور تنش میباشد.

مدلهای توربولنس:

توربولنس هنوز هم یک پدیده پیچیده و مبهم در تحقیقات جریان سیال میباشد و مدلهای بسیاری برای آن ارائه شده است که شامل مدلهای استفاده کننده از مفهوم ویسکوزیته گردابی و مدلهای معادله تنش است که تنش های رینولدز را مستقیما از معادلات دیفرانسیل ترا نسپورت محاسبه میکنند. در نوع اول، تنش رینولدز به صورت زیر محاسبه میشود.

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \qquad (۳)$$

ویسکوزیته گردابی μ_t در مدل k-ε از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \qquad (4)$$

که k نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی و δ_{ij} دلتای کرونیکر است.

در مدل یک معادله ای هم ویسکوزیته گردابی μ_t به صورت زیر محاسبه میشود:

$$\mu_t = \rho k^{1/2} l_m \qquad (5)$$

در نوع دوم، تنش های رینولدز مستقیما از معادلات دیفرانسیل محاسبه میشوند که برابر است با:

$$\frac{D(\rho \overline{u}_i' \overline{u}'_j)}{Dt} = -\left(\overline{u_i' u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right) + \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i' u_j'}) + \overline{u_i' u_j' u_k'} - \frac{\overline{p'}}{p}(\overline{u_i'}\overline{\delta}_{jk} + \overline{u_j'}\overline{\delta}_{ik})\right] + p'\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right) - 2\mu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \qquad (۶)$$

که برای معادله بدست آمده یک سری مدلسازی هایی لازم میباشد.

مدل لاگرانژی حرکت ذره:

جریان ذرات در داخل فاز پیوسته سیال بوسیله دنبال کردن تعداد کمی از ذرات در سیال پیوسته بررسی میشود. نیروی درگ وارد شده به ذرات به صورت جدای از هم بررسی شده و اثر بین ذرات و اثر فاز ذرات بر فاز گاز، در نظر گرفته نمیشود. بنابر این معادله حاکم بر ذرات، معادله مومنتوم میباشد که تغییر سرعت ذرات با توجه به قانون دوم نیوتن محاسبه میشود.

$$m\frac{du}{dt}=F \quad (۷)$$

که در این رابطه F نیروی وارد بر ذره، m جرم ذره و u سرعت ذره میباشد. مهمترین نیروی وارد بر ذره همان نیروی درگ است که از طرف فاز گاز به طور پیوسته بر ذره وارد میشود و برابر است با

$$F_D=\frac{1}{8}\pi d^2\rho C_D|v_R|v_R \quad (۸)$$

که C_D از رابطه زیر محاسبه میشود.

$$C_D=\frac{24(1+0.15\,\mathrm{Re}^{0.687})}{\mathrm{Re}} \quad (۹)$$

و عدد رینولدز ذره هم برابر است با

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho|v_R|d}{\mu} \quad (۱۰)$$

که d قطر ذره، ρ و μ هم دانسیته و ویسکوزیته فاز گاز و v_R سرعت نسبی دو فاز است.

روش عددی و شرایط مرزی

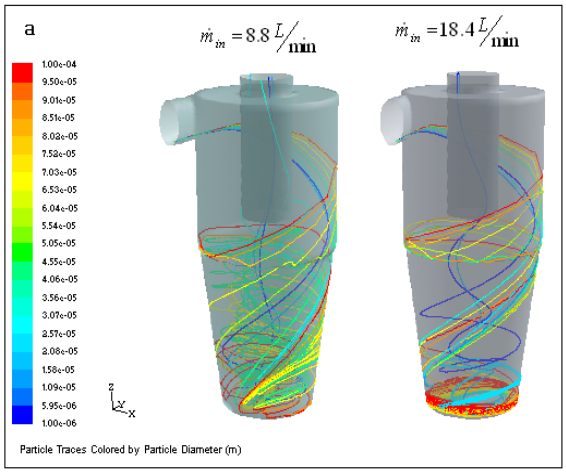
روش عددی استفاده شده برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی، روش حجم محدود با استفاده از الگوریتم سیمپل بوده که شرایط مرزی استفاده شده به صورت زیر میباشد:

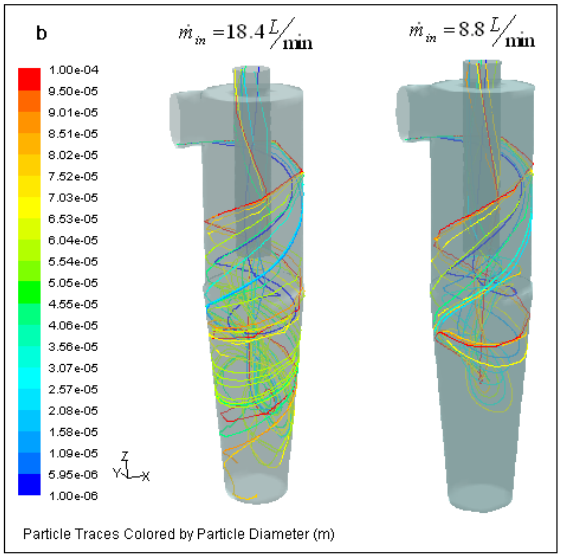
۱) دبی یکنواخت گاز در ورودی سیکلون که مقدار آن بین ۸.۸ تا ۱۸.۴ لیتر بر دقیقه تغییر میکند.
۲) شرط فشار خروجی سیکلون که زمانی است که سرعت جریان در خروجی معلوم نمیباشد.
۳) شرط عدم لغزش برای فاز گاز و شرط وجود لغزش برای ذرات و تعامل بین ذرات و دیواره بوسیله یک ضریب جبرانی میباشد.

نتایج و بحث

جداسازی ذرات

در شکل ۳ مسیر حرکت ذرات داخل سیکلون ۱ و سیکلون ۲ برای قطر های مختلف نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش قطر ذرات داخل سیکلون، این ذرات بیشتر به دیواره های سیکلون نزدیک شده و کمتر از لوله خروجی سیکلون خارج میشوند که علت آن نیروی گریز از مرکز بیشتری است که به ذره وارد میشود. همچنین ملاحظه میشود که با افزایش دبی ورودی به سیکلون، ذرات بیشتر به جداره سیکلون نزدیک شده و مسیر طولانی تری را میپیمایند و تعداد کمتری از ذرات از سیکلون خارج میشوند. نکته دیگری که از شکل ۳ ملاحظه میشود این است که با کاهش قطر بدنه اصلی و لوله خروجی، ذرات به قسمت انتهایی سیکلون نمیرسند و مسیر طولانی تری را در مرکز سیکلون طی میکنند.

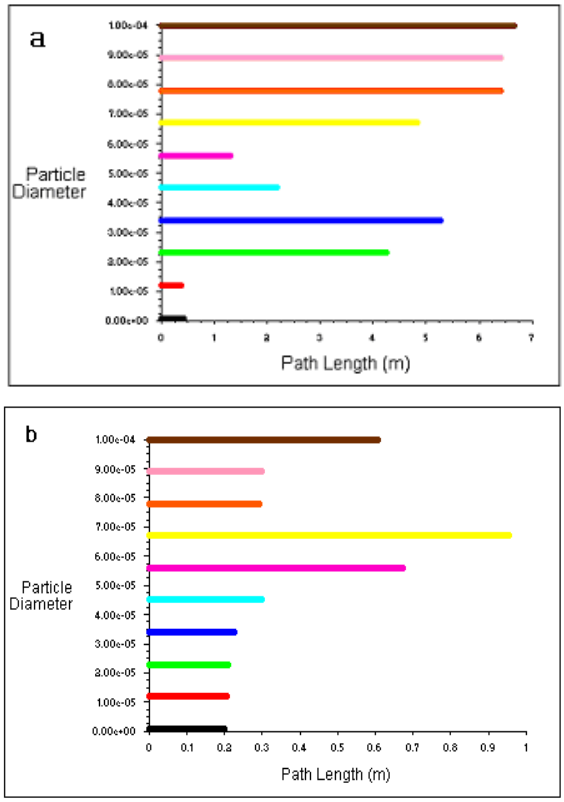




شکل۳- مسیر حرکت ذرات با قطر های مختلف در a)سیکلون۱ و b)سیکلون۲

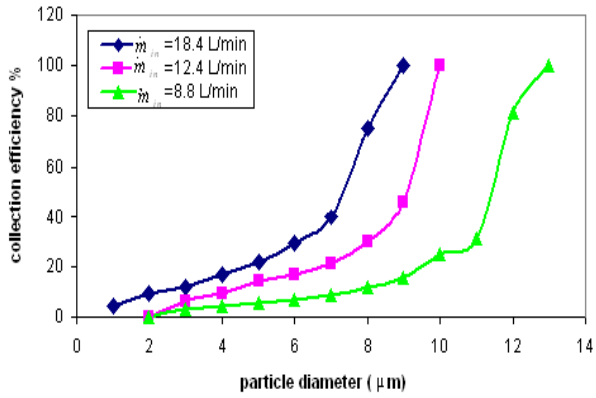
شکل ۴ طول مسیر طی شده توسط ذرات با قطر های مختلف داخل سیکلون ۱ و۲ را در $\dot{m}_{in}=18.4\,L/\min$ نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میشود وقتی قطر ذرات در کمترین مقدار خود میباشد، طول مسیر طی شده کوتاه بوده و ذره سریعا از سیکلون خارج میشود، اما با افزایش قطر ذرات به بیشترین مقدار ملاحظه میشود که ذرات مسیر بیشتری را داخل سیکلون طی میکنند تا در نهایت در کف سیکلون متوقف شده و عمل جداسازی صورت میگیرد. همچنین ملاحظه میشود که با کاهش قطر بدنه اصلی و لوله خروجی

سیکلون، طول مسیر طی شده توسط ذرات به میزان زیادی کاهش یافته و ذره با طی مسیر کمتری از سیکلون خارج میشود.



شکل۴ – طول مسیر طی شده توسط ذرات در a) سیکلون ۱و b) سیکلون ۲

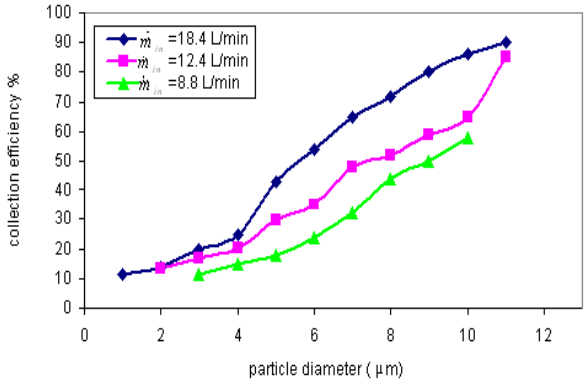
در شکل ۵ راندمان جداسازی در سیکلون ۱ برای ذرات با دانسیته $980\ kg/m^3$ با توجه به قطر ذرات و دبی ورودی به سیکلون نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش قطر ذرات ورودی به سیکلون راندمان جداسازی افزایش میابد که علت آن سنگین شدن ذرات و افزایش نیروی گریز از مرکز بر ذرات است.



شکل۵- راندمان جداسازی ذرات در سیکلون ۱

همچنین ملاحظه میشود که با افزایش دبی ورودی سیال به سیکلون، در قطر ثابت ذرات ورودی به سیکلون، راندمان جداسازی افزایش میابد که علت آن افزایش سرعت چرخش ذرات در ورودی سیکلون میباشد.

در شکل ۶ راندمان جداسازی در سیکلون ۲ برای ذرات با دانسیته $980\ kg/m^3$ با توجه به قطر ذرات و دبی ورودی به سیکلون نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش قطر ذرات ورودی به سیکلون راندمان جداسازی افزایش میابد که علت آن سنگین شدن ذرات و افزایش نیروی گریز از مرکز بر ذرات است. در مقایسه با راندمان جداسازی در سیکلون ۱ مشاهده میشود که با کاهش قطر بدنه اصلی و لوله خروجی مقدار راندمان جداسازی در قطر ثابت ذرات بیشتر میباشد که علت آن مشکلتر شدن خروج ذرات از لوله خروجی و نیز افزایش شتاب عمودی بر ذرات در حرکت درون سیکلون میباشد. همچنین مشاهده میشود که افزایش راندمان جداسازی ذرات در سیکلون ۲ برای قطر ذرات کمتر از $10\mu m$ نسبت به سیکلون ۱ بیشتر میباشد.



شکل۶- راندمان جداسازی ذرات در سیکلون ۲

با توجه به نتایج عددی بدست آمده و نیز نتایج آزمایشگاهی موجود[۱]، لازم به نظر میرسد که این نتایج با نتایج تئوری موجود مقایسه شود. یکی از روابط تئوری موجود برای راندمان جداسازی که نسبت به دیگر روابط از دقت بالاتری برخوردار میباشد توسط بارس[۷] پیشنهاد شد که بر اساس این فرض است که یک هسته مرکزی خیالی از دهانه خروجی سیکلون تا کف سیکلون وجود دارد و یک اندازه بحرانی برای ذرات تعریف میشود به نحوی که نیروی گریز از مرکز با نیروی درگ در لبه هسته مرکزی برابر میشود. بر این اساس راندمان جداسازی به صورت زیر بیان میشود.

$$\eta = \frac{1}{[1+(V_{ts}/V_{ts}^*)^{-3/2}]} \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه V_{ts} سرعت نهایی ته نشین شدن و V_{ts}^* سرعت نهایی ته نشین شدن برای اندازه بحرانی ذرات میباشد که

$$\frac{V_{ts}}{V_{ts}^*} = \frac{\pi h^* V_t^2 \rho_p d^2}{9Q\mu} \qquad (۱۲)$$

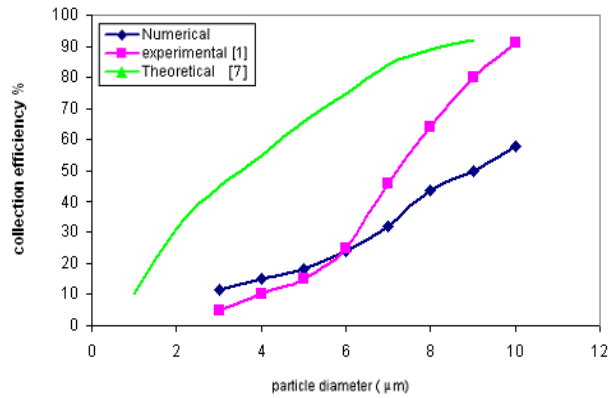
$$h^* = H - S \qquad for \;\; d_o \le B$$

$$h^* = \frac{(H-h)(D-d_o)}{(D-B)} + (h-S) \qquad for \;\; d_o \;\phi\; B$$

$$V_t = V_0 \left[\frac{(d_o/2)(D-b)\pi}{2ab\alpha + h^*(D-b)\lambda\pi} \right]$$

$$\lambda = 0.02$$

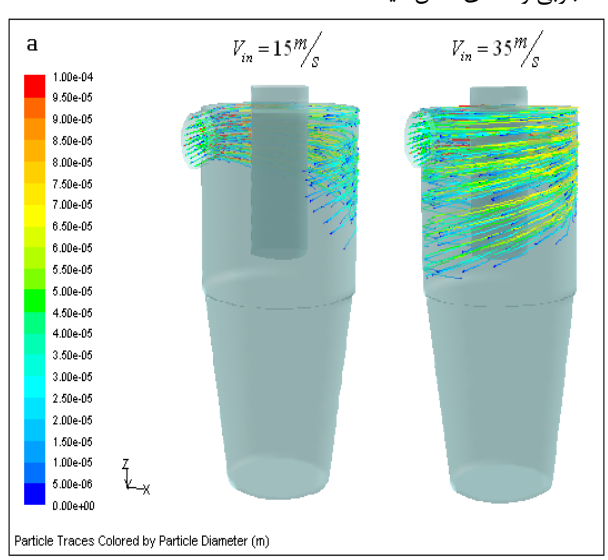
$$\alpha = 1 - 1.2(b/D)$$

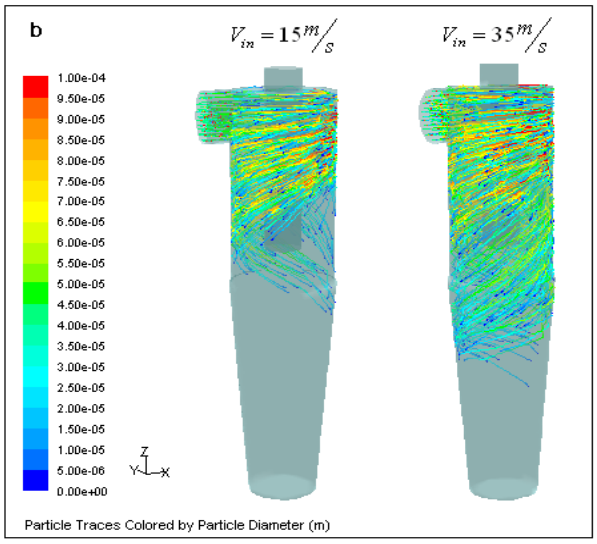


شکل۷- مقایسه راندمان جداسازی ذرات در سیکلون ۲ برای

$$\dot{m}_{in} = 8.8 \, L/\min$$

در شکل ۷ مقایسه ای برای راندمان جداسازی در سیکلون۲ برای $\dot{m}_{in} = 8.8 \, L/\min$ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی موجود[۱] و نیز با نتایج حل تئوری بارس [۷] مقایسه شده است که ملاحظه میشود نتایج حل عددی با نتایج تجربی تطابق بهتری نسبت به نتایج حل تحلیلی دارد اما نکته ای که قابل ملاحظه میباشد این است که نتایج حاصل از حل تحلیلی، مقدار بیشتری برای راندمان جداسازی نسبت به نتایج تجربی و عددی نشان میدهد.





شکل۸- مسیر حرکت قطرات با قطر های مختلف و تبخیر آنها در a)سیکلون۱ و b)سیکلون۲

تبخیر قطرات

در این قسمت به بررسی تبخیر قطرات $C_{16}H_{29}$ در سیکلون ۱ و ۲ پرداخته شده است. دبی جرمی ورودی قطرات سوخت در این قسمت $\dot{m}_f = 0.0001 \, kg/s$ ودمای قطرات سوخت $T_l = 300K$ میباشد. دمای هوای ورودی به سیکلون برای انجام تبخیر قطرات هم $T_{in} = 600K$ فرض شده است.

در تحلیل این مساله باید در روابط قبل با تغییر ضریب درگ و عدد ناسلت با عدد رینولدز وهمچنین نرخ کاهش جرم و افزایش دمای قطره بررسی صورت گیرد. معادله بقای جرم برای قطره به صورت زیر میباشد.

$$\frac{dm_l}{dt} = -\dot{m}_v \qquad (۱۳)$$

و $m_l = \rho(\frac{4}{3}\pi r^3)$ که r شعاع قطره میباشد.

معادله انرژی هم برای قطره به صورت زیر میباشد.

$$m_l c_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_l - \dot{Q}_v \qquad (14)$$

که $\dot{Q}_l$ کل حرارت منتقل شده به قطره و $\dot{Q}_v$ بخشی از حرارت است که صرف تبخیر میشود و مقادیر انها از روابط زیر بدست میاید.

$$\dot{Q}_l = -\bar{h} A (T_l - T_{in})$$

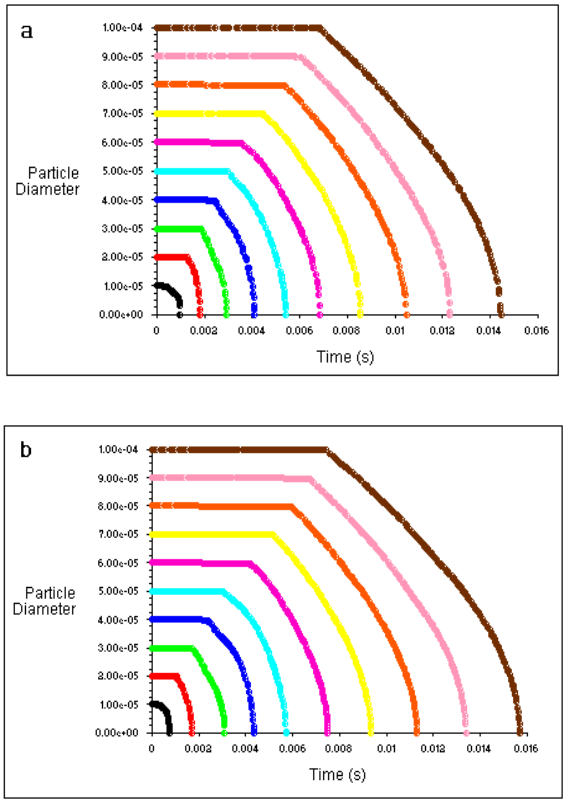
$$T_l < T_{in} \qquad (۱۵)$$

$$Nu = \frac{2\bar{h} r}{k}$$

$$Nu = 2 + \left[0.4 \, \mathrm{Re}_r^{\frac{1}{2}} + 0.06 \, \mathrm{Re}_r^{\frac{2}{3}} \right] \mathrm{Pr}^{0.4}$$

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_l \frac{T_l}{T_b} \qquad (۱۶)$$

در شکل ۸ مسیر حرکت قطرات سوخت در داخل سیکلون برای دو مقدار سرعت ورودی هوای $V_{in} = 15\ ,35\ m/s$ به داخل سیکلون نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه میشود، باورود قطرات به داخل سیکلون و طی مسیری تمام قطرات تبخیر میشوند که نتایج حاصل از حل نشان میدهد که در سیکلون ۱ بیشترین زمان صرف شده برای تبخیر قطرات، در سرعت ورودی $V_{in} = 15\ m/s$ برابر ۰.۰۱۶ ثانیه و در سرعت $V_{in} = 35\ m/s$ برابر ۰.۰۱۱ ثانیه میباشد که همانطور که انتظار میرود با افزایش سرعت ورودی به سیکلون، تبخیر قطرات سریعتر صورت میگیرد.



شکل ۹- زمان طی شده توسط قطرات سوخت و کاهش قطر آنها در a) سیکلون ۱و b) سیکلون ۲

شکل ۹ زمان طی شده توسط قطرات سوخت در سیکلون۱ و ۲ را در سرعت ورودی $V_{in} = 15\ m/s$ برای هوای ورودی به سیکلون نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میشود با افزایش قطر قطرات ورودی به سیکلون، زمان لازم برای تبخیر آنها افزایش میابد و نیز ملاحظه میشود که با کاهش قطر بدنه اصلی و قطر لوله خروجی سیکلون، زمان لازم برای تبخیر قطرات افزایش میابد که علت آن طی مسیر بیشتر قطرات در داخل سیکلون میباشد.

نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش معادلات بقاء و مدل توربولنسی $RNG\ k-\varepsilon$ و نیز معادله لاگرانژی حرکت ذرات برای ردیابی مسیر حرکت ذرات حل شده اند. یکی از نتایجی که میتوان گرفت این است که با افزایش دبی ورودی به سیکلون، ذرات بیشتر به جداره سیکلون نزدیک شده و مسیر طولانی تری را میپیمایند و تعداد کمتری از ذرات از سیکلون خارج میشوند. همچنین با افزایش قطر ذرات ورودی به سیکلون راندمان جداسازی افزایش میابد و نیز با کاهش قطر بدنه اصلی و لوله خروجی مقدار راندمان جداسازی در قطر ثابت ذرات بیشتر میباشد. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات و حل عددی با نتایج تئوری موجود مقایسه شد و نتیجه گرفته شد که نتایج حل عددی با نتایج تجربی تطابق بهتری نسبت به نتایج حل تحلیلی دارد و نیز نتایج حاصل از حل تحلیلی، مقدار بیشتری برای راندمان جداسازی نسبت به نتایج تجربی و عددی نشان میدهد. همچنین تبخیر قطرات سوخت $C_{16}H_{29}$ در سیکلون ۱ و۲ با توجه به سرعت ورودی مرد بررسی قرار گرفته شد و نتیجه گرفته شد که با افزایش قطر ذرات و کاهش قطر بدنه اصلی و قطر لوله خروجی سیکلون زمان لازم برای تبخیر قطرات افزایش میابد.

فهرست علائم

a	ارتفاع مقطع ورودی سیکلون(m)
b	عرض مقطع ورودی سیکلون(m)
D	قطر محفظه اصلی سیکلون(m)
B	قطر کف سیکلون (m)
S	طول دهانه خروجی سیکلون(m)
H	طول محفظه اصلی سیکلون(m)
h	طول قسمت استوانه ای سیکلون (m)
$\bar{h}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
h^*	ارتفاع هسته مرکزی(m)
d_i	قطر دهانه ورودی به سیکلون(m)
d_o	قطر دهانه خروجی سیکلون(m)
d	قطر ذرات (m)
u	سرعت (m/s)
g	شتاب گرانش(m/s2)
k	ضریب هدایت حرارتی
K	انرژی جنبشی توربولنس (m^2/s^2)
Re	عدد رینولدز
m_l	جرم قطره
$\dot{m}_v$	نرخ تبخیر قطره
Q	دبی ورودی به سیکلون
c_p	گرمای ویژه مایع

T_l دمای قطره

T_{in} دمای محیط

T_b دمای جوش قطره

C_D ضریب درگ

F_D نیروی درگ

V_0 سرعت خروجی سیال(m/s)

علائم یونانی

ρ دانسیته (kg/m^3)

τ تنش برشی (N/m^2)

μ لزجت دینامیک $(kg/m.s)$

ε نرخ اتلاف انرژی توربولنس (m^2/s^3)

مراجع

[1] Kim, J.C., Lee, K.W., Experimental study of Particle Collection by Small Cyclones, Aerosol Science and Technology, 12:4, 1003-1015, (1990).

[2] Ma, L., Ingham, D.B. and Wen, X., "Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones", Journal of aerosol science, vol 31, pp. 1097-1119, (2000).

[3] Boysan, F., Ayers, W. H., and Swithenbank, J., "A Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design," Trans. Inst. Chem. Eng., 16, pp. *222–230. (1982)*

[4] Schmidt, S., and Blackburn, H. M., "Simulation of Turbulent Flow in a Cyclonic Separator," Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, Dec. 10–12 2003; CSIRO, pp. 365–369. (2003).

[5] Derksen, J. J., "Separation Performance Predictions of a Stairmand High-Efficiency Cyclone," AIChE J., 49, pp. 1359–1371. (2003).

[6] Derksen, J. J., and Van den Akker, H. E. A., "Simulation of Vortex Core Precession in a Reverse-Flow Cyclone," AIChE J., 46, pp. 1317–1331.(2000).

[7] Barth, W., Berglund, R.N., and Liu, B.Y.H. Environ. Sci. Technol. (1956).

.