



WHITE PAPERS

ASK-RD-ENG-015

R&D Department

ARYA SEPEHR KAYHAN (ASK) | SHAHID SALIMI INDUSTRIAL CITY, TABRIZ, IRAN

شرکت آریا سپهر کیهان با نام اختصاری ASK، طراح و تولیدکننده پمپ های گریز از مرکز و روتاری و ارائه دهنده راهکارهای بهینه سازی سیستم های فرایندی و پمپاژ می باشد.

توجه!

مقالات تخصصی با عنوان White Papers جهت افزایش دانش عمومی پمپ ها در بخش تحقیق و توسعه این شرکت نگارش شده است. استفاده از این مقالات رایگان می باشد و لازم است جهت استفاده از محتویات آن به موارد ذیل توجه فرمایید:

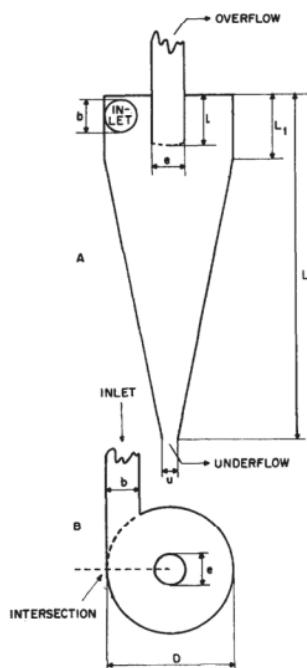
- 1- انتشار مجدد مطالب مقالات (به شکل اولیه و بدون تغییر در ساختار محتوایی و ظاهری) با ذکر منبع، بلامانع است.
- 2- استفاده تجاری از محتویات مقالات در نشریات مجاز نمی باشد.

مبانی طراحی هیدروسیکلون

بخش اول - مبانی اولیه

ساختار شناسی هیدروسیکلون

هیدروسیکلون وسیله ای است که با کمک حرکت گریز از مرکز (سانتریفیوژی)، ذرات ناخالصی پراکنده شده در یک مایع را از آن جدا می کند. هیدروسیکلون متشکل است از یک لوله یا پوسته ی استوانه ای که قسمت فوقانی آن توسط یک صفحه مسدود شده و قسمت تحتانی آن به یک مخروط منتهی می شود. در راس مخروط یک دریچه تعبیه شده است. در مرکز صفحه ی فوقانی یک لوله ی استوانه ای وجود دارد که یابنده ی گردابه^{۲۹} نام دارد. مایع یا سوسپانسیونی که عمل جداسازی روی آن صورت می گیرد، مماس به دیواره از ورودی ای که در بالای قسمت استوانه ای تعبیه شده است وارد هیدروسیکلون شده و به گردش در می آید. در شکل ۱-۱ نمایی از یک هیدروسیکلون نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- نمایی از هیدروسیکلون

ذرات جامد پراکنده شده در مایع می توانند چگالی بیشتری یا کمتر از مایع داشته باشند. در اینجا تنها درباره ی هیدروسیکلون هایی بحث می شود که در آنها ذرات جامد چگالی بیشتری از مایع داشته باشند. در این هیدروسیکلون ها خروجی مرکزی ای که در مجاورت ورودی قرار دارد و نازل سرریز^{۳۰} نام دارد، مایع تصفیه شده را تخلیه می کند. در حالی که خروجی ای که در راس مخروط تعبیه شده است، ذرات جامد را تخلیه می کند. به این خروجی پاریز^{۳۱} می گویند.

²⁹ Vortex finder

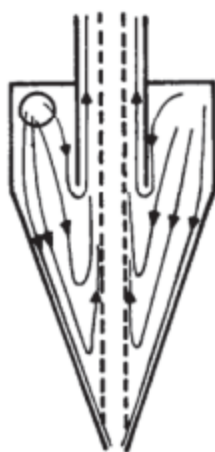
³⁰ Overflow nozzle

³¹ Underflow

هیدروسیکلون برای عملکرد مناسب نیاز به افت فشار مشخصی دارد که وابسته به ساختار و ظرفیت آن است. درون هیدروسیکلون نیز گرادیان فشاری وجود دارد. تقریباً در تمامی نمونه های موجود، داخل هیدروسیکلون هسته ی گازی^{۳۲} تشکیل می شود. عدم وجود هسته ی گازی منجر به افزایش مقدار افت فشار و کاهش بازده می شود.

الگوی جریان در هیدروسیکلون

الگوی جریان در یک هیدروسیکلون به صورت تقریبی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. بنا بر قانون بقای ممنتوم زاویه ای، سرعت مماسی با کاهش شعاع افزایش می یابد. گذاره پیشین به این معناست که باید ثابت $V \cdot r =$ باشد ولی با توجه اصطکاک دیواره و اصطکاکات داخلی ناشی از آشفستگی و ویسکوزیته این عبارت نمی تواند درست باشد. اگر اتلافات اصطکاکی غالب باشد، سرعت مماسی متناسب با شعاع است، یعنی: ثابت $\frac{V}{r} =$



شکل ۱-۲- الگوی جریان تقریبی در هیدروسیکلون

برای جداسازی ذرات جامد از سیال، به سرعت مماسی بالایی نیاز است. به همین منظور سطح داخلی هیدروسیکلون باید بسیار صاف و هموار باشد تا از اتلافات اصطکاک و آشفستگی جلوگیری شود. در هیدروسیکلون های خوش ساخت هر قدر عدد رینولدز جریان ورودی بزرگتر باشد، پروفیل سرعت بیشتر مشابه مدل ثابت $\frac{V}{r} =$ است.

رفتار هیدرودینامیکی سیال داخل هیدروسیکلون با معادلات ناویر استوکس بررسی می شود. همانطور که مشخص است در حالت کلی معادلات ناویر استوکس قابل حل نمی باشد. در برخی موارد خاص با فرائض خاصی معادلات ناویر استوکس ساده شده و حل می شود.

برای حل معادله ناویر استوکس جریان داخل هیدروسیکلون، از این معادله میانگین زمانی گرفته می شود و در نتیجه نوسانات آشفستگی حذف می شود. مربعات نوسانات آشفستگی با عبارت ویسکوزیته سینماتیکی آشفستگی (ϵ) نشان داده می شود و باید به ویسکوزیته ی معمولی سیال اضافه شود. نتیجه معادله ممنتوم زیر است :

$$U \frac{\partial V}{\partial r} + W \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{UV}{r} = (v + \epsilon) \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{V}{r^2} \right\}$$

معادله ی فوق کماکان قابل حل نیست. به همین دلیل فرض می کنیم V مستقل از z است. صحت این فرض در نزدیکی دیواره نقض می شود. با توجه به این فرض معادله ممنتوم به شرح زیر است :

$$\frac{-U}{r} \frac{dV_r}{dr} + (v + \epsilon) \left\{ \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{dV_r}{dr} \right) \right\} = 0$$

چند پارامتر به صورت زیر تعریف می شود :

$$\lambda = \frac{-U_0 R^*}{v + \epsilon}$$

$$\phi = \frac{V_r r}{V_0 R}$$

$$\sigma = \frac{r}{R}$$

پس معادله ممنتوم فرم نهایی زیر را پیدا می کند :

$$\lambda \frac{U}{U_0} \frac{1}{\sigma} \frac{d\phi}{d\sigma} + \left[\frac{d}{d\sigma} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{d\phi}{d\sigma} \right) \right] = 0$$

برای حل معادله دیفرانسیل درجه دوم فوق نیاز به دو شرایط مرزی داریم. یکی از شرایط مرزی روی دیواره اتفاق می افتد که در آن $\sigma = 1$ است، لذا $\phi = 1$.

شرایط مرزی دیگر روی سطح هسته گازی انتخاب می شود که در آنجا $\sigma = \sigma_1$ است و هیچ تنش برشی وجود ندارد. پس :

$$\frac{d(\phi/\sigma)}{d\sigma} = \frac{\phi}{\sigma^2}$$

آخرین فرض برای حل معادله ممنتوم، ثابت در نظر گرفتن سرعت شعاعی در تمام حجم داخل هیدرو سیکلون است. یعنی : $U = U_0$

پاسخ نهایی به شرح زیر خواهد بود :

$$\phi = C_2 - C_1 e^{-\sigma \lambda} \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

که در آن :

$$C_1 = \frac{\lambda^2}{-e^{-\lambda} - \lambda e^{-\lambda} + \left(\frac{\sigma_1^2}{2} \right) \lambda^2 e^{-\lambda \sigma_1} + \lambda \sigma_1 e^{-\lambda \sigma_1} + e^{-\lambda \sigma_1}}$$

$$C_2 = 1 + C_1 e^{-\lambda} \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

بخش دوم- بررسی افت فشار در هیدروسیکلون

همانطور که پیش تر بیان شد، افت فشار یکی از مهمترین پارامترهای عملکردی هیدروسیکلون هاست. برای محاسبه افت فشار بر اساس سرعت مماسی تئوری باید از رابطه $\frac{dP}{dr} = \rho \frac{V^2}{r}$ انتگرال گیری کرد ولی این انتگرال گیری عملاً غیرممکن است. زیرا دو پارامتر λ و شعاع هسته ی گازی به صورت نامشخصی با تغییر عدد رینولدز جریان ورودی و ساختار هیدروسیکلون تغییر می کنند و همانطور که بیان شد، این دو پارامتر تاثیر زیادی روی اندازه ی سرعت مماسی دارند. با توجه به توضیحات فوق نتیجه می شود که تنها راه دست یابی به مقدار افت فشار در هیدروسیکلون ها، استفاده از یک رابطه تجربی دقیق است.

به منظور دست یابی به رابطه ی تجربی آزمایشات تجربی روی هیدروسیکلونی با زاویه راس مخروط ثابت، قطر ۳ اینچ، طول متغیر و نازل های ورودی و سرریز و پاریز متغیر انجام شده است. همچنین تاثیرات ویسکوزیته و عدد رینولدز با استفاده از دو سیال آب و مخلوط آب و گلیسرین بررسی شده است. همچنین همواره هسته ی گازی داخل سیکلون وجود دارد. نتایج به دست آمده از این آزمایش نشان می دهد که افت فشار کلی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$G = \frac{(\Delta P)_t}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = G\left(\frac{b}{D}, \frac{e}{D}, \frac{u}{D}, \frac{L_1}{D}, \frac{L_2}{D}, \frac{l}{D}, Re_{inlet}, C, \alpha, \frac{gD}{\frac{1}{2}V_0^2}\right)$$

که در آن :

G = عامل افت فشار کل

D = قطر هیدروسیکلون

b = قطر ورودی هیدروسیکلون

e = قطر خروجی سر ریز

u = قطر نازل پاریز

L₁ = طول قسمت استوانه ای هیدروسیکلون

L₂ = طول قسمت مخروطی هیدروسیکلون

l = طول قسمت یابنده گردابه

Re_{inlet} = عدد رینولدز در ورودی هیدروسیکلون

C = غلظت ذرات جامد در مخلوط

α = شیب محور هیدروسیکلون نسبت به عمود

g = شتاب گرانش

در عمل همواره افت فشار استاتیکی درون هیدروسیکلون (ΔP_s) در مقایسه با فشار استاتیکی در اثر گرانش آن $\rho g(L_1 + L_2)\cos\alpha$ مقدار بسیار بیشتری دارد. به همین دلیل می توان از وابستگی افت فشار کل هیدروسیکلون به $\frac{gD}{\frac{1}{2}V_0^2}$ صرف نظر کرد.

به دلیل پیچیدگی و وابستگی به درجه غلظت و دبی جریان پاریز، از وابستگی افت فشار کل هیدروسیکلون به غلظت ذرات جامد در مخلوط صرف نظر می شود. تنها در صورتی که غلظت محلول آنقدر کم باشد که مخلوط مانند یک سیال نیوتونی رفتار کند، تاثیر غلظت با جایگزینی چگالی مخلوط به جای چگالی آب در نظر گرفته می شود. در این حالت نیز در صورتی که غلظت ذرات جامد کمتر از ۱ باشد می توان از آن صرف نظر کرد.

در هیدروسیکلون ها نسبت $\frac{l}{D}$ همیشه مقدار کوچکی دارد و به همین دلیل از تاثیر آن نیز بر افت فشار صرف نظر می شود. از تاثیر $\frac{u}{D}$ نیز صرف نظر می شود زیرا در عمل هیچ گاه دبی پاریز با استفاده از اندازه درپچه ی در راس مخروط پاریز مشخص نمی شود، بلکه با تنظیم اختلاف فشار مشخصی بین سر ریز و پاریز به دست می آید. به همین دلیل بهتر است که به جای آن از نسبت $\frac{O}{q}$ استفاده شود. O دبی سرریز و q میزان دبی مستقیم از ورودی به خروجی هیدروسیکلون است.

به این ترتیب رابطه عملی مناسب برای افت فشار در هیدروسیکلون برابر است با:

$$F = \frac{(\Delta P)_s}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = F(Re_{inlet}, \frac{b}{D}, \frac{e}{D}, \frac{L}{D}, \frac{O}{q})$$

که در آن F عامل افت فشار هیدروسیکلون است.

علاوه بر این، رابطه ی مناسب برای بیان افت فشار کل هیدروسیکلون باید شامل سه بخش زیر هم باشد:

۱- هد سرعت ورودی ($\frac{1}{2}\rho V_0^2$) که در واقع فشار دینامیک ای است که پمپ باید برای شتاب دهی آب تغذیه از حالت ساکن تا سرعت V_0 تامین کند.

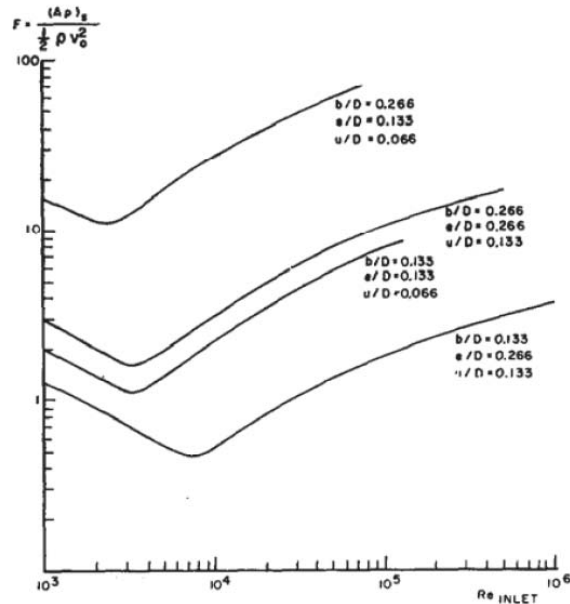
۲- اتلافات اصطکاکی در سیکلون.

۳- هد سانتریفیوژ (گریز از مرکز) که برابر است با: $\int_0^R \frac{\rho V^2}{r} dr$

بخش های ۲ و ۳ را می توان با افت فشار استاتیکی به صورت زیر نشان داد:

$$F = G - 1 = \frac{(\Delta P)_s}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}$$

هنگامی که عدد رینولدز از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ افزایش می یابد، F ابتدا کاهش و سپس از رینولدز ۵۰۰۰ به بالا افزایش می یابد. به عبارت دیگر هنگامی که رینولدز جریان زیر ۵۰۰۰ است اتلافات اصطکاکی غالب است و بالای این رینولدز بحرانی هد گریز از مرکز برتری دارد. شکل ۱-۲ نشان دهنده تغییرات F بر حسب رینولدز ورودی است.



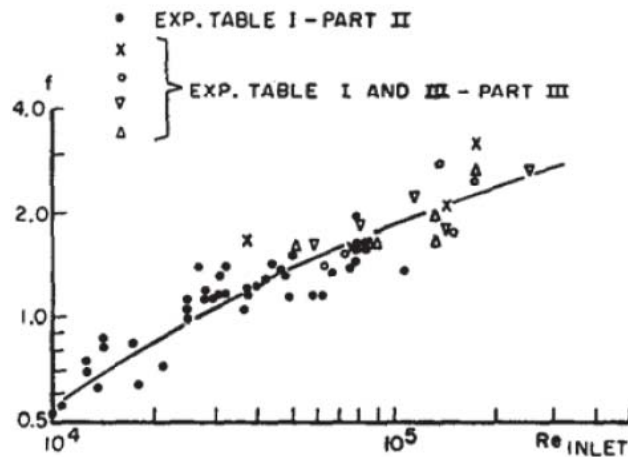
شکل ۱-۲- تغییرات F بر حسب رینولدز ورودی

در محدوده ی عدد رینولدزی که در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار می گیرد، برای محاسبه افت فشار تنها از هد گریز از مرکز استفاده می کنند. زیرا که این هد به سرعت مماسی وابسته بوده و سرعت مماسی وابسته به اتلافات اصطکاکی دیواره فرض می شود.

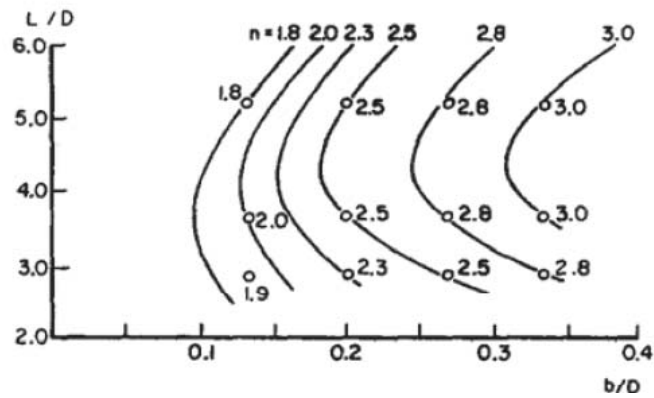
رابطه ی نهایی به دست آمده برای محاسبه ی افت فشار در هیدروسیکلون ها به صورت زیر است:

$$F = f \times \gamma \times \left(\frac{b}{e}\right)^n \times \left(\frac{D}{L}\right)^{0.7} \times \left(\frac{O}{q}\right) \times 0.8$$

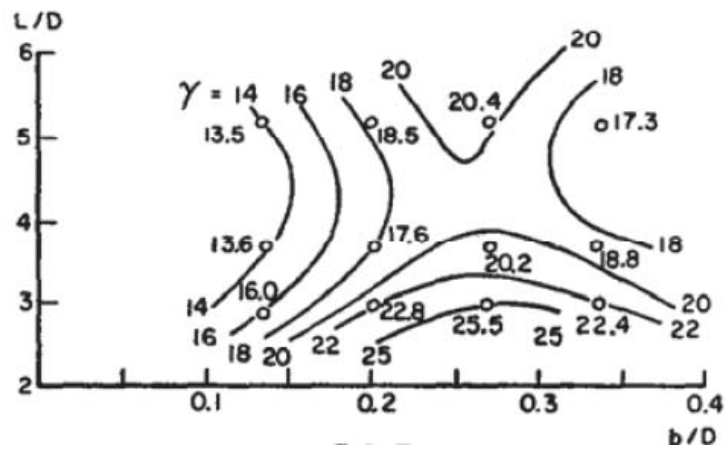
که ثوابت رابطه ی فوق از شکل های ۲-۲ تا ۲-۴ به دست می آید. همچنین رابطه فوق برای جریان های ورودی با رینولدز بزرگتر از ۸۰۰۰ معتبر است.



شکل ۲-۲- نمودار f بر حسب رینولدز ورودی



شکل ۲-۳- نمودار n بر حسب ابعاد



شکل ۲-۴- نمودار γ بر حسب ابعاد

بخش سوم - قدرت جداسازی هیدروسیکلون

برای به دست آوردن قدرت جداسازی هیدروسیکلون، تئوری های زیادی ارائه شده است. اساس تئوری های پیشین به این شرح است که ذرات جامدی که قطر حالت پایدارشان کمتر از قطر سرریز باشد از آن تخلیه می شوند و آن هایی که قطرشان در حالت پایدار بزرگتر از قطر سرریز باشد از طریق دهانه ی راس مخروط (پاریز) خارج می شوند. فرض این تئوری ها رسیدن ذرات به قطر پایدارشان در یک لحظه است. در واقع این تئوری ها هیدروسیکلون را در حالت تعادل بررسی می کردند.

تئوری کنونی که برتر از تئوری های پیشین است هیدروسیکلون را در حالت دینامیکی بررسی می کند. در این تئوری فرض می شود، ذراتی که قطرشان در حالت پایدار کمتر از قطر سرریز است ممکن است قبل از رسیدن به قطر پایدار، با حرکت به سمت دیواره هیدروسیکلون از جریان جدا شوند. بازده جداسازی برحسب قطر ۵۰ درصد^{۳۳} (قطر ذره جامدی که شانس یکسانی برای جداسازی از جریان یا حفظ در جریان دارد) بیان می شود.

جداسازی در هیدروسیکلون ها در اثر نیروی گریز از مرکز ناشی از سرعت مماسی جریان ورودی صورت می پذیرد. به دلیل تفاوت چگالی ذرات جامد با آب، این ذرات سرعت شعاعی متفاوتی نسبت به سرعت شعاعی آب خواهند داشت. این سرعت شعاعی به سمت دیوار است و باعث جدایش این ذرات از آب می شود.

امکان اینکه ذرات به دیوار نرسند نیز وجود دارد که دلیل آن یکی از ۴ حالت زیر است:

- ۱- اگر سرعت شعاعی آب که به سمت محور هیدروسیکلون است بسیار زیاد باشد.
 - ۲- اگر ورودی هیدروسیکلون فاصله ی زیادی از دیواره داشته باشد.
 - ۳- اگر زمان مقاومت^{۳۴} ذرات بسیار کوتاه باشد.
 - ۴- آشفتگی جریان که باعث نفوذ ذرات جامد همراه با ادی ها و ایجاد گرادیان غلظت در هیدروسیکلون می شود.
- ایده ی اصلی این تئوری وجود رابطه ای مشخص بین اختلاف فشار استاتیکی و جداسازی به دست آمده بر حسب قطر ۵۰ درصد است که باعث به دست آمدن بازده هیدروسیکلون می شود. این ایده از این واقعیت که جداسازی مانند اختلاف فشار استاتیکی تحت تلاثیر شتاب گریز از مرکز داخل هیدروسیکلون است نشات می گیرد. روند به دست آوردن این رابطه با دو فرض شروع می شود:

- ۱- نفوذ ادی^{۳۵} های آشفتگی در جداسازی قابل صرف نظر است.
 - ۲- عدد رینولدز برای ذرات جامد جدا شده به قدری کم است که می توان برای تحلیل آن از قانون استوکس استفاده کرد.
- پوسته ای مخروطی و هم محور با مخروط هیدروسیکلون را مطابق با شکل ۱-۳ تصور کنید که ورودی را به دو قسمت مساوی تقسیم می کند. فرض می شود ذرات جامدی که از قسمت داخلی ورودی به هیدروسیکلون وارد می شوند مستقیماً از سرریز و ذراتی که از نیمه ی بیرونی آن وارد می شوند از پاریز خارج می شوند. ذراتی که دقیقاً از نیمه ی ورودی وارد هیدروسیکلون می شوند نیز به وسیله ی نیروی گریز از مرکز جدا می شوند. این تئوری به بررسی همین نوع از ذرات می پردازد.

³³ 50 percent diameter

³⁴ resistance time

³⁵ Eddy

فاصله ی ورودی از دیواره ی هیدروسیکلون برابر $\frac{1}{2}b$ است که در آن b قطر ورودی است. در لحظه ای که ذرات به راس مخروط برسند فاصله ی آنها از دیواره به صفر می رسد. سرعت شعاعی ذرات برابر خواهد بود با $U - U_p$ که در آن U سرعت شعاعی آب و U_p سرعت شعاعی ذره ی جامد نسبت به آب است. از قانون استوکس این سرعت نسبی به صورت زیر به دست می آید:

$$U_p = \frac{d_{50}^2 \Delta \rho V^2}{18 \eta r}$$

که در آن:

$$\Delta \rho = \text{اختلاف چگالی ذرات جامد و آب}$$

$$V = \text{سرعت مماسی در هیدروسیکلون}$$

$$\eta = \text{ویسکوزیته ی دینامیکی آب}$$

$$r = \text{ضخامت شعاعی در سیکلون}$$

اگر زمان مقاومت آن T باشد، ذره ی جامد باید در این مدت زمان فاصله ی ورودی تا سر مخروط را طی کند پس:

$$\int_0^T (U - U_p) dt = R - \frac{1}{2}b - \frac{1}{2}a = R_1$$

که در آن a قطر هسته ی هوای داخل سیکلون است. همچنین فرض می شود که سرعت های شعاعی و محوری ثابت باشند. در نتیجه:

$$\int_0^T U dt = \int_0^T U \frac{dl}{W} = \frac{UL}{W}$$

که در آن L نماد طول هیدروسیکلون و W نماد سرعت محوری سیال داخل هیدرو سیکلون است. با جاگذاری مقدار سرعت نسبی ذرات جامد در رابطه ی اصلی به دست می آید:

$$\frac{d_{50}^2 \Delta \rho}{18 \eta} \int_0^T \frac{V^2}{r} dt = \frac{U}{W} L - R_1$$

$$\rightarrow \frac{d_{50}^2 \Delta \rho}{18 \eta} \int_{R-\frac{1}{2}b}^{\frac{1}{2}a} \frac{V^2}{r} \frac{dt}{dr} dr = \frac{U}{W} L - R_1$$

در رابطه ی فوق $\frac{dt}{dr}$ بیانگر معکوس سرعت شعاعی ذره جامد است. با توجه به این فرض که سرعت محوری ذرات برابر با سرعت محوری آب است (و مانند آن ثابت است)، سرعت شعاعی ذره نیز باید ثابت باشد. زیرا در غیر این صورت ذره جامد ناحیه ی جداسازی را در نزدیکی دیواره ترک می کند و از آب جدا نخواهد شد. پس با میانگین گیری:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{W}{L} R_1 \rightarrow \frac{dt}{dr} = \frac{L}{WR_1}$$

از طرفی فشار استاتیکی برابر است با:

$$(\Delta P)_s = \int_{R-\frac{1}{2}b}^{\frac{1}{2}a} \frac{\rho V^2}{r} dr$$

اکنون رابطه ی جدایش را می توان تبیین کرد:

$$\frac{d_{50}^2 \Delta \rho}{18 \eta} \times \frac{L}{W} \times \frac{1}{R_1} \times \frac{(\Delta P)_s}{\rho} = \frac{U}{W} L - R_1$$

همچنین رابطه مشخصی بین سرعت ورودی و سرعت محوری وجود دارد:

$$W = C_1 V_0 = C_1 \frac{4q}{\pi b^2}$$

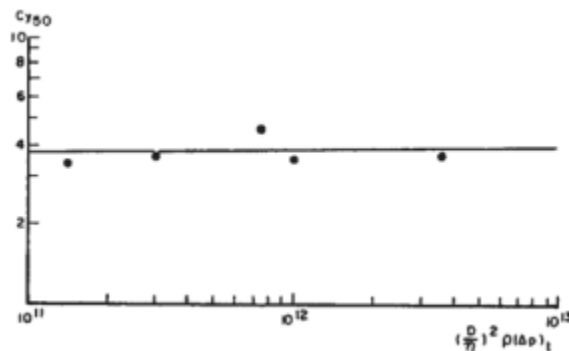
$$\rightarrow \frac{d_{50}^2 \Delta \rho}{\eta} L \frac{(\Delta P)_s}{\rho q} = \frac{72 C_1 R_1}{\pi b^2} \left(\frac{U}{W} L - R_1 \right)$$

که در آن ρ چگالی آب است. طرف راست رابطه ی فوق تنها شامل پارامترهای هندسی و سرعت است و برای یک هیدروسیکلون خاص این طرف از عبارت ثابت می ماند. با توجه به تساوی دو طرف رابطه، طرف چپ رابطه نیز ثابتی است که از ثوابت هیدروسیکلون است و عدد رابطه ی سیکلون بر اساس d_{50}^{36} نام دارد:

$$C_{y50} = \frac{d_{50}^2 \Delta \rho}{\eta} L \frac{(\Delta P)_t}{\rho q}$$

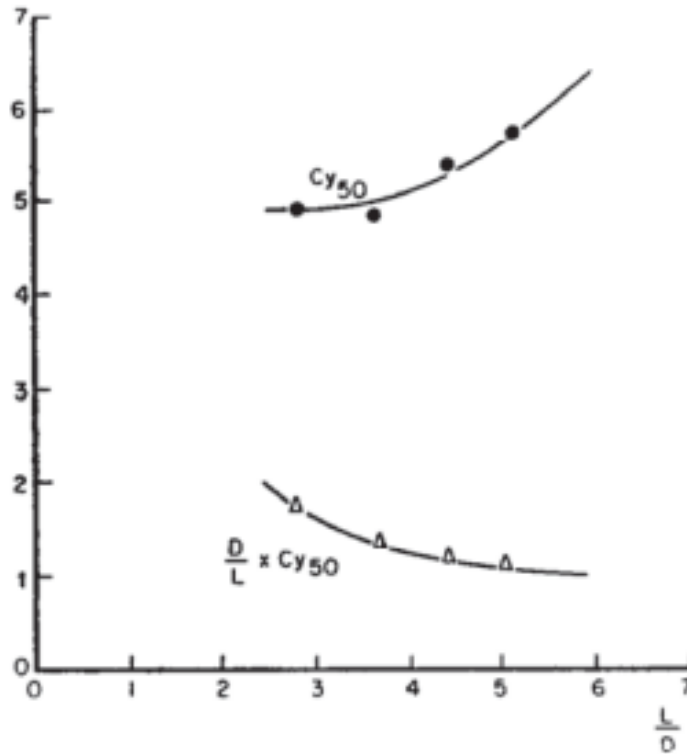
تعیین C_{y50} هر هیدروسیکلون نیازمند اطلاعات کاملی از سرعت هاست که به نظر غیر ممکن می آید. لذا روش عملی برای تعیین آن پیشنهاد می شود. در شکل های ۲-۳ تا ۳-۷ نمودارهای حاصل از آزمایشات تجربی نشان داده شده است. در بعضی از نمودارها منحنی $2b+e=0$ رسم شده است که بیانگر حد نقاط است. به عبارت دیگر اگر از این حد تجاوز شود جریان ورودی به یابنده گردابه برخورد کرده و ایجاد آشفستگی غیرمطلوبی می کند.

نتایج تجربی نشان داده است که هر قدر C_{y50} کوچکتر باشد، عملکرد هیدروسیکلون بهینه تر است. به همین منظور برای طراحی یک هیدروسیکلون بهینه باید:

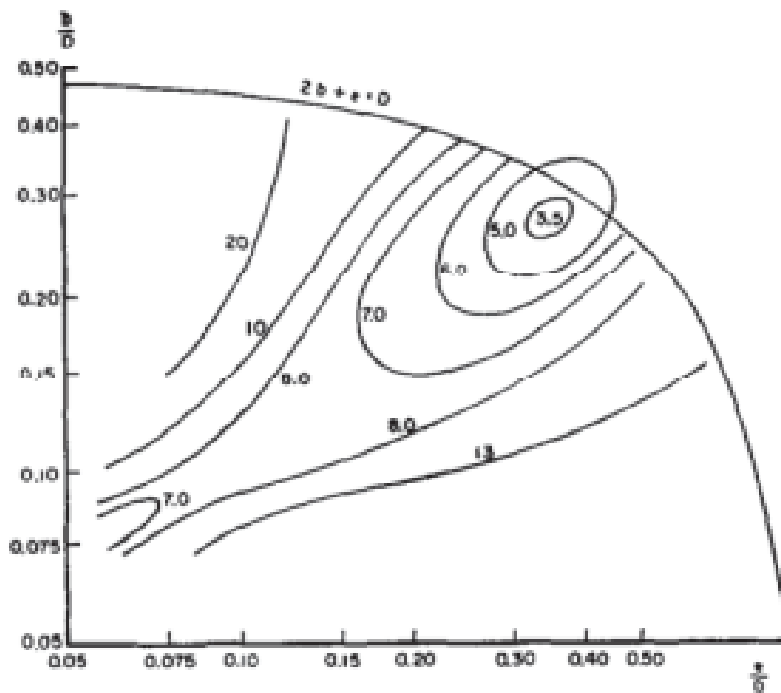


شکل ۲-۳- وابستگی C_{y50} به افت فشار برای هیدروسیکلون با خصوصیت $\frac{L}{D} = 5$ و $\frac{b}{D} = 0.266$ و $e=0.333$

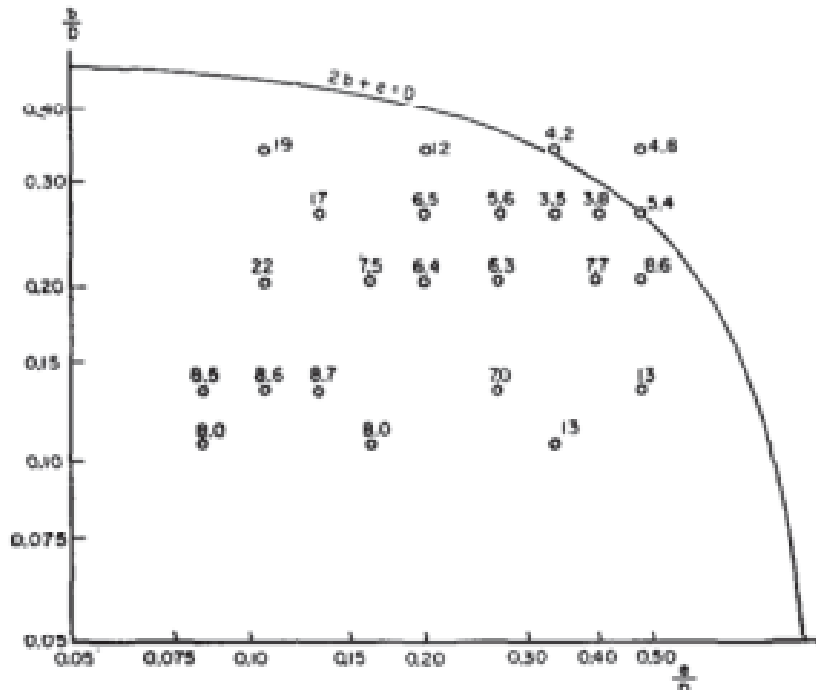
³⁶ cyclone correlation number based on d_{50}



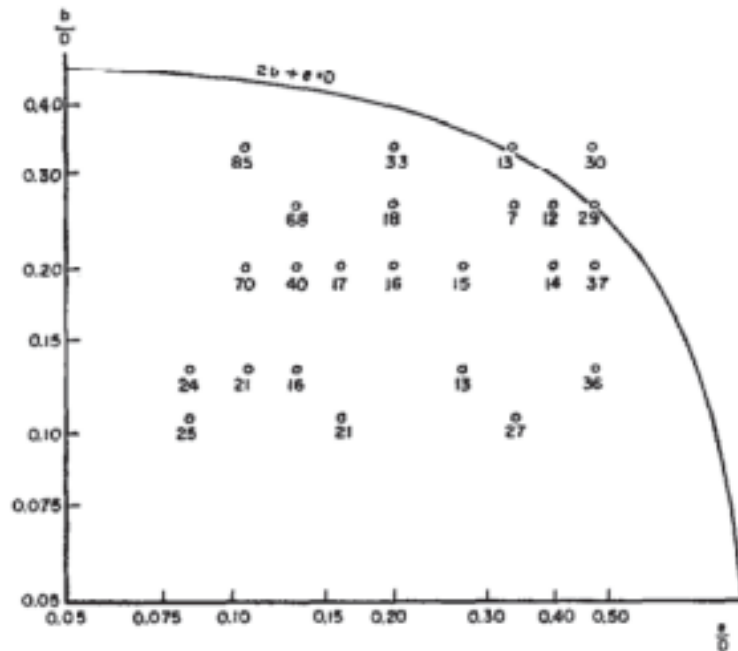
شکل ۳-۳- وابستگی Cy_{50} و $\frac{D}{L} Cy_{50}$ به $\frac{L}{D}$ برای هیدروسیکلون با خصوصیت $\frac{b}{D} = 0.2$ و $\frac{e}{D} = 0.04$



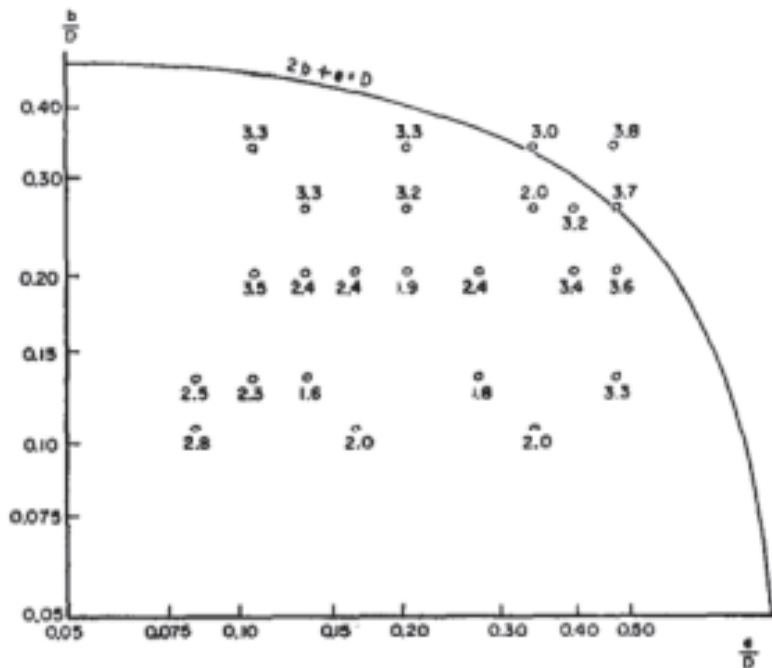
شکل ۳-۴- کانتور Cy_{50} ثابت برای $\frac{L}{D} = 5$



شکل ۳-۵- مقادیر C_{y50} برای قطرهای ورودی و خروجی مختلف برای $L = 390mm$ و $D = 75mm$



شکل ۳-۶- مقدار C_{y50} بر حسب b/D و e/D



شکل ۷-۳- طبقه بندی (بیان شده توسط $\frac{d_{80}}{d_{50}}$) بر حسب $\frac{e}{D}$ و $\frac{b}{D}$

۱- d_{80} و d_{50} در حد امکان کوچک باشند.

۲- $(\Delta P)_t$ تا حد امکان کوچک باشد.

۳- q تا حد امکان بزرگ باشد.

۴- L تا حد امکان بزرگ باشد.

همانطور که از نمودار شکل ۲-۳ پیداست، C_{y50} از افت فشار کلی مستقل است. تاکنون از مقدار طول یابنده گردابه به میان نیامد. اگر طول آن خیلی کوتاه باشد، اتصال کوتاهی بین ورودی و سرریز به وجود می آید. اگر طول آن خیلی زیاد باشد مقدار اصطکاک به دلیل محل قرارگیری یابنده گردابه بسیار زیاد خواهد شد. با استفاده از آزمایشات تجربی بهترین مقدار $\frac{l}{D} = 0.4$ خواهد بود.

با توجه به نمودار شکل ۳-۳ مقدار ۵ برای بیشترین میزان $\frac{L}{D}$ معرفی شده است که بعد از این مقدار $\frac{D}{L} C_{y50}$ و در نتیجه d_{50} ثابت می ماند. برای هیدروسیکلون باید $\frac{U}{W} = \frac{R}{L}$ باشد تا جریان گردابه موازی با دیواره باشد. لذا انتخاب $C_{y50} = 3.5$ به نظر منطقی می رسد. با توجه به عبارات فوق هیدروسیکلون بهینه دارای خصوصیات هندسی زیر است:

$$\frac{L}{D} = 5, \quad \frac{b}{D} = 0.28, \quad \frac{e}{D} = 0.34, \quad \frac{l}{D} = 0.4$$

بخش چهارم - طراحی هیدروسیکلون

عملکرد یک هیدروسیکلون که به منظور جداسازی ذرات جامد از آب طراحی شده است، با مقدار جریانی که مستقیماً از ورودی به سرریز رفته و از آنجا تخلیه می شود، تعیین می شود. به چنین جریانی تخلیه مستقیم^{۳۷} می گویند. به عبارت دیگر در یک تخلیه مستقیم مشخص افت فشار و جدایش حاصل ثابت اند.

اگر جدایش بهتری مد نظر است (یعنی مطلوب است ذرات کوچکتری از جریان جدا شده و از پاریز تخلیه شوند) باید تخلیه مستقیم را افزایش داد. برای افزایش تخلیه مستقیم دو راه پیشنهاد می شود:

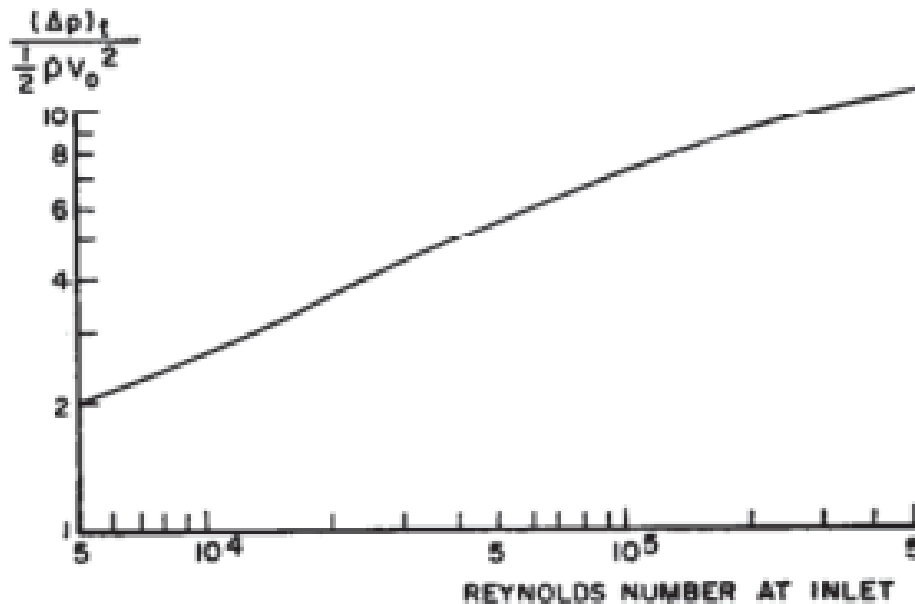
۱- مقدار افت فشار را داخل هیدروسیکلون افزایش دهیم.

۲- از هیدروسیکلون های بیشتری با ابعاد کوچکتری استفاده شود.

همانطور که در بخش های پیشین شرح داده شد، هیدروسیکلون بهینه باید ابعادی متناسب با روابط زیر داشته باشد:

$$\frac{L}{D} = 5, \quad \frac{b}{D} = 0.28, \quad \frac{e}{D} = 0.34, \quad \frac{l}{D} = 0.4$$

لذا در ادامه هیدروسیکلونی با چنین ابعادی را مورد بررسی قرار می دهیم. لازم به یادآوری است که عدد جدایش چنین هیدروسیکلونی برابر با ۳/۵ است. افت فشار وابسته به عدد رینولدز است و تغییرات این دو بر حسب یک دیگر در شکل ۱-۴ ارائه شده است.



شکل ۱-۴- تغییرات افت فشار بر حسب رینولدز ورودی

برای طراحی مجموعه ی هیدروسیکلون ها باید فاکتورهای زیر کاملا مشخص باشد:

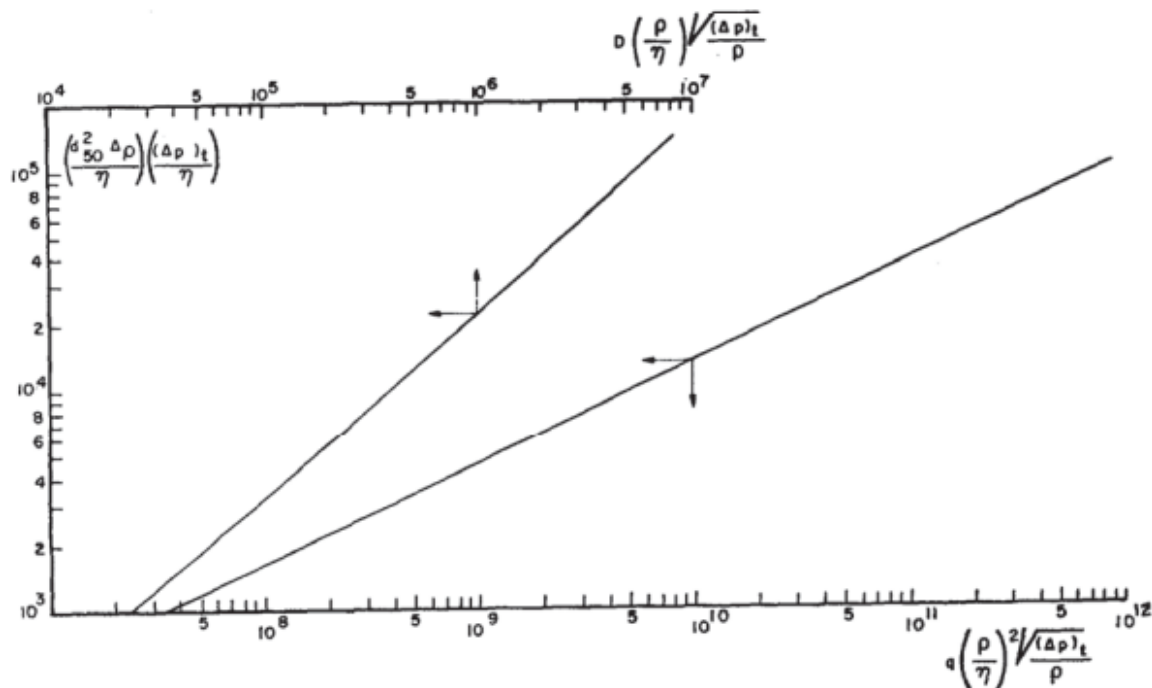
- ۱- افت فشار موجود
 - ۲- تخلیه مستقیم دلخواه
 - ۳- جدایش قطر ۵۰ درصد دلخواه
 - ۴- مشخصات فیزیکی سیستمی که جدایش در آن اتفاق می افتد.
- برای هرکدام از هیدروسیکلون های مجموعه عدد رینولدز ورودی برابر است با:

$$Re_{inlet} = \frac{b\rho V_0}{\eta} = \frac{4Ld_{50}^2\Delta\rho(\Delta P)_t}{\pi b C_{y_{50}}\eta^2}$$

برای هیدروسیکلون بهینه عدد رینولدز برابر خواهد بود با:

$$Re_{inlet} = 6.5 \frac{d_{50}^2\Delta\rho(\Delta P)_t}{\eta^2}$$

واضح است که با معلوم بودن ۴ فاکتور اشاره شده در سطور فوق مقدار عدد رینولدز هر هیدروسیکلون قابل محاسبه است. مقدار عامل افت فشار کل (G) مربوط به هیدروسیکلون مورد نظر را می توان از نمودار شکل ۱ به دست آورد. بنابراین مقدار V_0 محاسبه می شود. با استفاده از مقادیر به دست آمده به نمودارهای شکل ۲-۴ رفته و مقادیر D و q را که به ترتیب قطر هیدروسیکلون و جریان تخلیه هستند، به دست می آید.



شکل ۲-۴- نمودارهای رابطه های به دست آمده برای پارامترهای طراحی

اکنون دو عدد بی بعد جدید معرفی می شود:

$$\frac{D}{b} \times Re_{inlet} \times \sqrt{\frac{G}{2}} = D \frac{\rho}{\eta} \sqrt{\frac{(\Delta P)_t}{\rho}}$$

$$\frac{\pi}{4} \times (Re_{inlet})^2 \times \sqrt{\frac{G}{2}} = q \left(\frac{\rho}{\eta}\right)^2 \sqrt{\frac{(\Delta P)_t}{\rho}}$$

این دو عدد بی بعد برای انتخاب D و q مناسب از نمودار شکل ۲-۴ مفیدند. شایان ذکر است که نسبت های ابعادی هیدروسیکلون ثابت اند.

اگر کل جریان تخلیه با Q نشان داده شود، تعداد هیدروسیکلون های موازی، با جریان تخلیه q برابر است با:

$$n = \frac{Q}{q}$$

طراحی یک نمونه هیدرو سیکلون

برای تصفیه ی جریان روغن داغ حامل ذرات جامدی با غلظت وزنی تقریبی ۰/۱ درصد هیدروسیکلونی طراحی شود که غلظت وزنی آن را به ۰/۰۲ درصد کاهش دهد. اطلاعات مورد نیاز به شرح زیر است:

برای طراحی هیدروسیکلون مناسب ابتدا باید ۴ فاکتور ذکر شده در بخش گذشته مشخص شود :

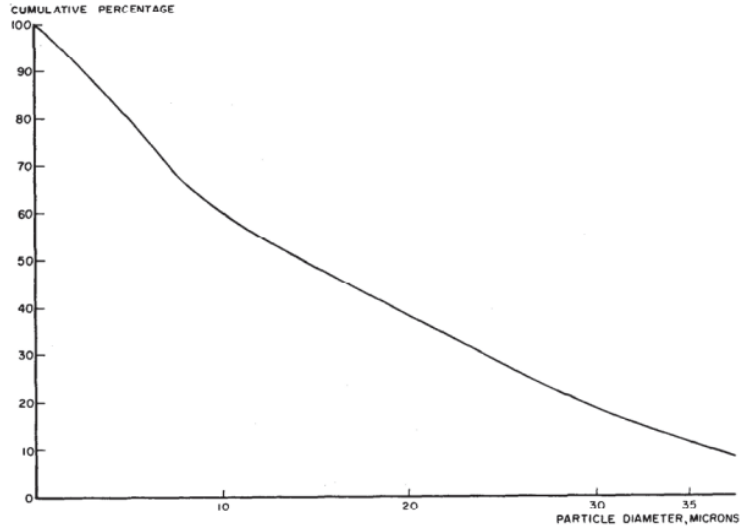
- ۱- افت فشار موجود ۴ اتمسفر لحاظ می شود.
- ۲- تخلیه مستقیم دلخواه ۱۰۰۰ تن در روز باید باشد.
- ۳- با توجه به شکل ۳ ذراتی با قطر بیشتر از ۵ میکرون باید از جریان جدا شوند. برای احتیاط بیشتر $d_{50} = 4\mu m$ انتخاب می شود.
- ۴- مشخصات فیزیکی عبارتند از:

اطلاعات روغن

دما ۲۴۰ درجه سانتیگراد
چگالی ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
ویسکوزیته ۰/۰۰۰۷ کیلوگرم بر مترثانیه

اطلاعات ذرات جامد

چگالی ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
طیف اندازه ذرات جامد ۱ تا ۵۰ میکرون (توزیع آن در شکل ۳-۴ نشان داده شده است)
فشار وجود ۵ تا ۷ اتمسفر (مطلق)



شکل ۳-۴- توزیع اندازه ذرات جامد

با توجه به اطلاعات فوق :

$$\frac{d_{50}^2 \Delta \rho (\Delta P)_t}{\eta^2} = 1.8 \times 10^4$$

از شکل ۲-۴ مقادیر زیر به دست می آید:

$$D \frac{\rho}{\eta} \sqrt{\frac{(\Delta P)_t}{\rho}} = 5.6 \times 10^5$$

$$q \left(\frac{\rho}{\eta}\right)^2 \sqrt{\frac{(\Delta P)_t}{\rho}} = 10^{10}$$

با توجه به روابط فوق مقادیر قطر هیدروسیکلون و جریان تخلیه به دست می آید:

$$D = 22.5 \text{ mm}$$

$$q = 3.7 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 24 \frac{\text{tons}}{\text{day}}$$

با توجه به ثابت بودن نسبت های هیدروسیکلون ابعاد آن به دست می آید:

$$b = 0.28 \times D = 6.3 \text{ mm}$$

$$e = 0.34 \times D = 7.6 \text{ mm}$$

$$L = 5 \times D = 113 \text{ mm}$$

تعداد هیدروسیکلون های مورد نیاز برابر است با:

$$n = \frac{1000}{24} = 41.66 \rightarrow n = 42$$

ملاحظات ساخت

- ۱- ورودی باید دقیقا مماس بر بدنه ی هیدروسیکلون باشد.
- ۲- دیواره ی داخلی هیدروسیکلون باید کاملا صاف و صیقلی بوده تا از تولید آشفستگی و اصطکاک جلوگیری شود.
- ۳- ضخامت دیواره باید ۰/۱ قطر داخل هیدروسیکلون باشد.
- ۴- در حالتی که از چند هیدروسیکلون موازی استفاده شود که همگی از یک خط تغذیه ی مشترک تغذیه شوند، قطر لوله ی ورودی باید حداقل ۴ برابر قطر هیدروسیکلون باشد.
- ۵- توصیه می شود در ساخت هیدروسیکلون ها از مواد بسیار سخت استفاده شود.

منابع و مراجع

- 1- K.Rietema, "Performance and design hydrocyclones (Part 1)- General considerations", Chemical engineering science, 1961, Vol15
- 2- K.Rietema, "Performance and design hydrocyclones (Part 2)- Pressure drop in the hydrocyclone", Chemical engineering science, 1961, Vol15
- 3- K.Rietema, "Performance and design hydrocyclones (Part 3)- Seperating power of hydrocyclone", Chemical engineering science, 1961, Vol15
- 4- K.Rietema, "Performance and design hydrocyclones (Part 4)- Design of hurocyclone", Chemical engineering science, 1961, Vol15