

بررسی تاثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد هیدروسیکلون جداکننده آب از نفت با استفاده از شبیه سازی CFD

امین کولیوند، سید حسن هاشم‌آبادی*

آزمایشگاه تحقیقاتی CFD، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نارمک، تلفن:
۷۷۲۴۰۳۷۶، فاکس: ۷۷۲۴۰۴۹۵، پست الکترونیکی: hashemabadi@iust.ac.ir

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۰ بهمن ۸۹

دریافت پس از اصلاح: ۲۲ مرداد ۹۰

پذیرش نهایی: ۳۰ شهریور ۹۰

کلمات کلیدی:

هیدروسیکلون

جداسازی آب از نفت

شرایط عملیاتی

شبیه‌سازی CFD

چکیده

در این مطالعه، یک هیدروسیکلون مدل کولمن^۱ - تئو^۲ جداکننده آب از نفت، به صورت سه بعدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است. برای شبیه سازی جریان مغشوش از مدل تنش رینولدز، برای تحلیل جریان دو فاز از مدل اولرین - اولرین و برای تأیید صحت نتایج شبیه سازی، بازدهی و درصد نفت جریان خروجی از پایین هیدروسیکلون با نتایج تجربی گزارش شده مقایسه شده است. در مرحله بعد به بررسی جریان در داخل هیدروسیکلون و سرعت‌های محوری و شعاعی پرداخته شده است. بررسی های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش دبی ورودی، به دلیل افزایش سرعت مماسی و افزایش نیروی گریز از مرکز، بازدهی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش قطر قطرات ورودی آب، بازدهی افزایش و با افزایش درصد آب ورودی به بیش از مقدار نسبت جدایش، بازدهی جداسازی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش اختلاف چگالی بین آب و نفت (افزایش API نفت) نیروی وارد شده بر قطرات آب بیشتر شده، در نتیجه بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ویسکوزیته نفت باعث افزایش نیروی پسای وارده بر قطره‌های آب و کاهش بازدهی جداسازی می‌شود.

۱- مقدمه

برای سالها از هیدروسیکلون‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌شده است. علت مقبولیت عامه برای هیدروسیکلون به سادگی طراحی، نداشتن هزینه های نگهداری و عملیاتی، ظرفیت بالا، بهره برداری آسان و نداشتن قطعات متحرک بر می‌گردد. از دیگر مزایای این وسیله، کوچکی و زمان ماند کم جریان در آن است که کنترل آن را ساده‌تر می‌کند. از سال ۱۹۸۰ به بعد جداسازی مایع-مایع توسط هیدروسیکلون‌ها به دلیل استفاده گسترده آنها در صنایع نفت مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از هیدروسیکلون‌ها در جداسازی آب از نفت در ته چاه‌ها جهت کاهش آب تولیدی از این جمله می‌باشد. در این فناوری^۳ مخلوط آب و نفت توسط هیدروسیکلون، در ته چاه از یکدیگر جدا شده و نفت به سطح زمین منتقل و آب به لایه‌ای مناسب در چاه تزریق می‌شود. در این مطالعه نیز سعی شده است تا شرایط ته چاهی به عنوان شرایط عملیاتی هیدروسیکلون جدا کننده آب از نفت در نظر گرفته شود.

اکثر کارهایی که در زمینه جداسازی مایع-مایع توسط هیدروسیکلون‌ها انجام گرفته، در زمینه نفت زدایی از پسابهای نفتی بوده و آب‌زدایی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و اگر کاری نیز انجام شده است، بیشتر جنبه آزمایشگاهی دارد. از جمله کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه، می‌توان کارهای کولمن و تتو و اسمیت^۴ اشاره کرد [۱،۲]. همچنین بلیدی^۵ بر روی نوع سیال چند فاز، ساده و چند گانه کار کرده است. سیال چند فاز چند گانه به سیالی گفته می‌شود که در آن قطرات فاز پیوسته در داخل قطرات فاز گسسته قرار گرفته و مجدداً این قطرات در داخل فاز پیوسته قرار داده شده باشند [۳]. از کارهای شبیه سازی انجام شده، می‌توان به کار شوترز^۶ و همکارانش که بر روی شکستگی و به هم پیوستگی قطرات در سیال دو فاز کار کرده‌اند اشاره کرد [۴]. شان و لین^۷ نیز فرایند آبدایی توسط هیدروسیکلون را شبیه‌سازی کرده و به بررسی تاثیر دبی پرداخته‌اند [۵]. شرایط عملیاتی، نقش تعیین کننده در عملکرد هیدروسیکلون دارد. چندین کار بر روی تاثیر شرایط عملیاتی بر روی عملکرد هیدروسیکلون انجام شده است. از جمله شرایط عملیاتی موثر بر عملکرد هیدروسیکلون، دبی ورودی، درصد فاز گسسته، قطر ذرات فاز

گسسته در ورودی، اختلاف دانسیته دو فاز و ویسکوزیته فاز پیوسته است. دبی ورودی تاثیر بسزایی بر عملکرد جداسازی هیدروسیکلون دارد. تقریباً در همه کارهای انجام شده بر روی بررسی تاثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد هیدروسیکلون، با افزایش دبی ورودی، بازدهی هیدروسیکلون افزایش پیدا می‌کند. از جمله در کار بای^۸ و ونگ^۹ که در مورد جداسازی آب از نفت توسط هیدروسیکلون ریتما-برادلی بوده است، با استفاده از شبیه سازی CFD به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش دبی ورودی، به علت افزایش نیروهای گریز از مرکز وارده بر قطرات آب، بازدهی هیدروسیکلون افزایش می‌یابد [۵]. همچنین بای و همکارانش با استفاده از کار آزمایشگاهی که در مورد جداسازی آب از روغنهای خوراکی انجام داده‌اند به این نتیجه رسیده‌اند که در دبی‌های کم، به علت کم بودن نیروی گریز از مرکز، بازدهی کم است. این نیرو با افزایش دبی افزایش یافته تا به یک مقدار ماکزیمم برسد. پس از این نقطه به علت افزایش تنش وارد شده بر قطرات فاز گسسته، قطرات بزرگ خرد شده و به قطرات کوچکتر تبدیل می‌شوند و این باعث کاهش بازدهی هیدروسیکلون می‌شود [۶]. یانگ^{۱۰} و همکارانش در بررسی هیدروسیکلون‌های دو مخروطی مایع-مایع، به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش دبی برای هیدروسیکلون مدل کولمن-تتو بازدهی افزایش می‌یابد [۷]. همچنین هوسوج^{۱۱} و همکارانش بر روی تاثیر دبی ورودی بر روی عملکرد هیدروسیکلون کار کرده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش دبی بازدهی هیدروسیکلون افزایش می‌یابد [۸]. در بررسی تاثیر قطر ذرات فاز گسسته ورودی [۹، ۱۰] این نتیجه حاصل شده است که با افزایش قطر ذرات ورودی، به علت افزایش نیروی گریز از مرکز، بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد. در کار آزمایشگاهی که بر روی جداسازی نفت از آب توسط یانگ و واکلی^{۱۲} انجام شده است، ثابت شده است که در صورتی که در خروجی بالایی، جریان کافی برای خروج نفت وجود داشته باشد، بازدهی مستقل از درصد نفت ورودی خواهد بود [۱۱]. در شبیه‌سازی های انجام شده، نشان داده شده است که با افزایش درصد جامد ورودی در هیدروسیکلون جامد-مایع، زمان جداسازی برای ذرات کـ گـاهـش پـیـدا کـرده و

8 Zhi-shan Bai
9 Hua-lin Wang
10 Young
11 Husveg
12 Young, Wakley

3 Downhole Oil Water Separation (DOWS)
4 Smyth
5 Belaidi
6 Schutz
7 Shun and Lin

در این رابطه p فشار استاتیکی و τ تنش است. F در این شبیه سازیها بیان کننده تاثیر نیروهای بدنه است که بر سیال وارد می شود. یکی از مهمترین این نیروها، نیروی پسا است. در این مطالعه، برای محاسبه نیروی پسا، از رابطه شیلر- نیومن استفاده شده است. این مدل برای محاسبات دو فازی مایع-مایع قابل استفاده بوده و در محاسبات دارای پایداری بیشتری است و همگرایی را افزایش میدهد [۱۶]. لازم به ذکر است که این ضریب درگ برای ذرات جامد و قطرات مایعی که به اندازه کافی کوچک باشند تا بتوان از تغییر شکل آنها صرف نظر کرد توصیه شده است که این، بر فرضیات مسئله ما منطبق است. τ^t تنش درهم می باشد که مولفه های آن به صورت زیر بدست می آید.

$$\tau_{ij}^t = -\rho R_{ij} \quad (3)$$

که

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j} \quad (4)$$

از آنجا که اغتشاش در هیدروسیکلون شدید و به طور طبیعی غیر ایزنتروپیک است، لذا در اکثر موارد به منظور انجام یک شبیه سازی با دقت بالا و از نظر محاسباتی به صرفه، از مدل اغتشاش تنش رینولدز (RSM) استفاده می شود [۱۹، ۱۰، ۵-]. در این مطالعه نیز از مدل RSM برای محاسبه تنش رینولدز (τ^t) مخلوط فازها استفاده شده است. در این مدل، تنش های رینولدز مستقیماً از حل معادله دیفرانسیل جزئی زیر، حاصل می شوند.

$$\frac{\partial(\rho R_{ij})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k R_{ij})}{\partial x_k} = P_{ij} + D_{Tij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

که P_{ij} ترم تولید تنش اغتشاش بوده و بصورت معادله ۶ بدست می آید.

$$P_{ij} = -\rho(R_{jk} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + R_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k}) \quad (6)$$

D_{ij} ترم نفوذ می باشد که شامل دو ترم نفوذ مولکولی و نفوذ ناشی از اغتشاش است و به شکل زیر بدست می آید.

$$D_{ij} = D_{Tij} + D_{Lij} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_i} \right) + C_\mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{H}{\sigma_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

که ویسکوزیته اغتشاش μ_t بصورت زیر تعریف می شود:

بازدهی کاهش پیدا می کند [۱۲، ۱۳]. از طرف دیگر بررسی های آزمایشگاهی نشان می دهد که با افزایش غلظت ذرات جامد یا مایع ورودی در هیدروسیکلون، به علت افزایش احتمال به هم پیوستگی ذرات و افزایش ویسکوزیته مخلوط، نیروهای گریز از مرکز و نسبت جدایش کاهش پیدا کرده و در نتیجه بازدهی کم می شود [۲، ۱۴].

آنچه مشخص است کارهای زیادی بصورت آزمایشگاهی و همچنین CFD بر روی هیدروسیکلونها انجام شده است. ولی کاری که مشخصاً روی هیدروسیکلون های جداکننده آب از نفت با شرایط عملیاتی ته چاه انجام شده باشد تا کنون گزارش نشده است. لازم به ذکر است طراحی هیدروسیکلون های جداکننده نفت از آب متفاوت بوده و امکان استفاده از کارهای تحقیقاتی گزارش شده، برای تحلیل عملکرد و طراحی هیدروسیکلون های آب از نفت نمی باشد. هدف از این مطالعه بررسی تاثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد هیدروسیکلون آب زدا و یافتن شرایط مناسب برای طراحی این دسته از هیدروسیکلونها می باشد. لذا در این مطالعه به بررسی تاثیر شرایط عملیاتی شامل دبی ورودی، اندازه قطرات آب، درصد آب ورودی، اختلاف چگالی بین دو فاز و ویسکوزیته فاز پیوسته بر عملکرد هیدروسیکلون با استفاده از شبیه سازی CFD پرداخته شده است.

۲- معادلات حاکم

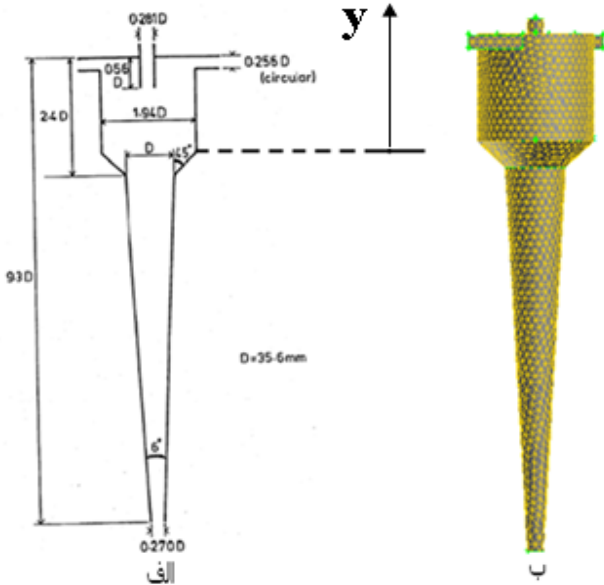
به منظور مدلسازی جریان چند فازی، از مدل اولرین- اولرین استفاده شده است که برای جریان های دو فازی که فاز گسسته آنها سنگین تر است استفاده میشود [۲۰]. در این دیدگاه هر فاز پراکنده به عنوان یک فاز پیوسته رفتار می کند و تمام فازها در حل معادلات به اندازه کسر حجمی آن فاز سهمیم هستند. معادله پیوستگی جرم که ناشی از مقدار جرم ثابت در هر فرایند است به صورت زیر بیان می شود [۱۵]:

$$\frac{\partial(\overline{\alpha_k \rho_k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\alpha_k \rho_k u_k}) = S_m \quad (1)$$

S_m در سمت راست این معادله، در بر گیرنده انتقال جرم بین فازها است که در این شبیه سازی برابر صفر در نظر گرفته شده است. معادله ممنتوم یا حرکت از بررسی برآیند نیروها وارد بر المان سیال به دست می آید.

$$\overline{\alpha_k \rho_k u_k} + \nabla \cdot (\overline{\alpha_k \rho_k u_k u_k}) = \overline{\alpha_k \nabla p} + \overline{\alpha_k \rho_k g} + \overline{\alpha_k \nabla p} + \overline{\alpha_k (\tau_k^t + \tau_k^t)} \quad (2)$$

۴۵ لیتر بر دقیقه به قسمت بالای هیدروسیکلون وارد می‌شود. ویسکوزیته و چگالی نفت در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نیز به ترتیب 0.143 kg/m.s و 780 kg/m^3 است. طبیعی است که در مواردی که هدف، بررسی یک پارامتر خاص باشد، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده و فقط شرط عملیاتی مورد نظر تغییر خواهد کرد. به منظور حل همزمان معادلات ممنتوم و پیوستگی از روش SIMPLE و برای گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی در معادلات ممنتوم و درصد حجمی از روش QUICK استفاده شده است [۵]. مشخصات سیستم مورد استفاده برای انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌های CFD بصورت (CPU: Intel i7-2.67GHz, RAM: 6GB, HARD: 500GB) بوده است.



شکل (۱) الف- هیدروسیکلون کولمن- تئو با ابعاد مشخص شده و ب- هیدروسیکلون با مش چهار وجهی [۱]

۴- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی CFD

۴-۱- بررسی استقلال نتایج از مش و اعتبار مدل

نسبت جدایش ۱۳ (F) به صورت نسبت دبی خروجی از پایین هیدروسیکلون به دبی ورودی به هیدروسیکلون و بازدهی ۱۴ (E) نیز به صورت نسبت جرمی آب خروجی از پایین به آب ورودی تعریف می‌شود. در مورد هیدروسیکلونهای نفت زدا، مقدار بالای نسبت جدایش و بازدهی بالا مطلوب و مورد نظر است. ولی در مورد هیدروسیکلونهای آب‌زدا (مورد

$$\mu_t = \rho C_s \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (۸)$$

K نرخ تولید انرژی جنبشی است:

$$\kappa = \frac{1}{2} R_{ij} \quad (۹)$$

ε_{ij} مولفه‌های تنسور تلفات انرژی جنبشی است که به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \rho \delta_{ij} \quad (۱۰)$$

که δ_{ij} دلتای کرانکر و ε اندازه تنسور تلفات انرژی جنبشی است که با استفاده از معادله دیفرانسیل جزئی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\partial(\rho \bar{V} \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(C_\varepsilon \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} R_{ij} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(-2 C_\varepsilon \rho R_{ij} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \right) \quad (۱۱)$$

که Φ_{ij} کرنش ناشی از فشار می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_{ij} = C_1 \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(\frac{2}{3} \delta_{ij} \kappa - R_{ij} \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} G_k \right) \quad (۱۲)$$

که ثابت بکار رفته شده در معادلات فوق به صورت زیر

هستند:

$$c_\mu = 0.24, c_1 = 1.8, c_2 = 0.6, c_{\varepsilon 1} = 1.44$$

$$c_{\varepsilon 2} = 1.92, c_4 = 0.13, \sigma_k = 0.82, c_s = 0.09$$

۳- شبکه محاسباتی، شرایط مرزی و شبیه‌سازی CFD

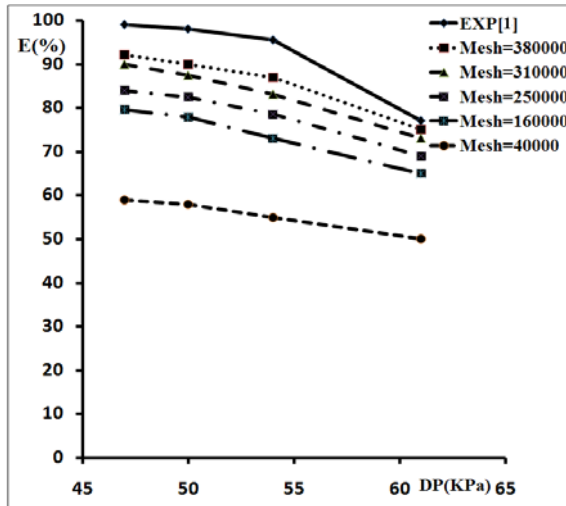
CFD

ابعاد هیدروسیکلون شبیه‌سازی شده در شکل ۱ (الف) آمده است. همانطور که دیده می‌شود، این هیدروسیکلون از نوع مدل کولمن-تئو است که دارای دو قسمت مخروطی و دو ورودی برای مخلوط آب و نفت می‌باشد [۱]. به منظور شبیه‌سازی هیدروسیکلون، به دلیل پیچیدگی هندسه و محدودیت در ایجاد مش شش وجهی، از مش چهار وجهی استفاده شده است. در شکل ۱ (ب) یک هیدروسیکلون با مش چهار وجهی نشان داده شده است. در همه موارد شبیه‌سازی، شرط جرم ورودی در ورودی‌ها و شرط فشار خروجی در خروجی‌ها در نظر گرفته شده است. در حالت استاندارد، نفت با ۱۵٪ آب و متوسط اندازه قطرات برابر ۴۵ میکرومتر به طور مماسی با دبی

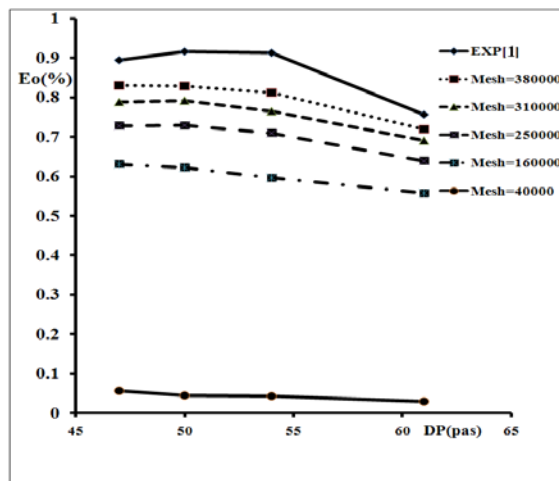
بحث در این مقاله) این طور نیست. در هیدروسیکلونهای آب-زدا، مطلوب آن است که آب همراه از نفت جدا شده و از پایین خارج شود و نفت نیز از بالای هیدروسیکلون خارج گردد. بنابراین اگر چه افزایش نسبت جدایش باعث خروج آب بیشتری از ته ریز هیدروسیکلون می شود، ولی مقدار نفت خروجی از پایین نیز افزایش می یابد. لذا برای این منظور، بازدهی کلی ۱۵ به صورت معادله ۱۳ تعریف می شود [۱،۲].

$$E_o = \frac{(100 - F)}{100} \left(\frac{100 - k_u}{100 - k_i} - \frac{k_u}{k_i} \right) \quad (13)$$

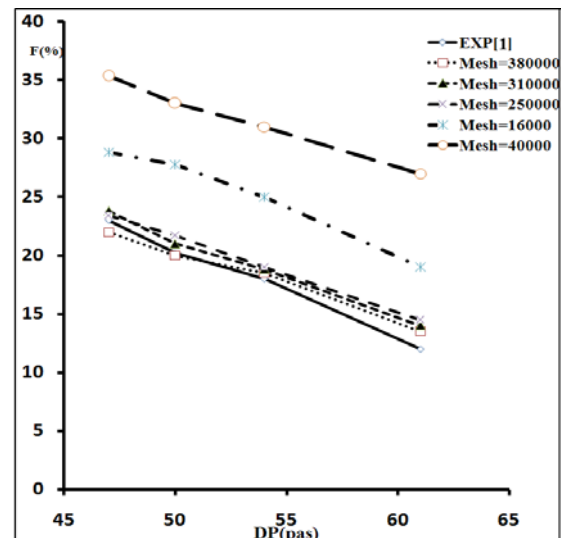
زیرنویس های u و i به ترتیب به معنی جریان بالایی و ورودی هستند. F و k نیز به ترتیب نسبت جدایش و درصد حجمی آب در جریان دو فازی را نشان می دهد.



شکل (۳) - تغییرات بازدهی با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون



شکل (۴) - تغییرات بازدهی کلی با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون



شکل (۲) تغییرات نسبت جدایش با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون

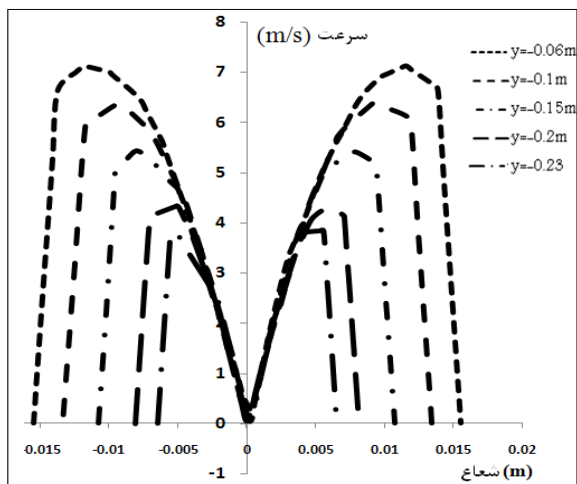
جدول (۱) خطای نسبت جدایش، بازدهی و بازدهی کلی برای مشهای مختلف

مش	متوسط خطا (%)			زمان محاسبات (ساعت)
	F	E	E _{overall}	
۴۰۰۰۰	۳۹	۷۸	۹۵	۹/۲
۲۵۰۰۰۰	۸/۸	۱۴	۱۹	۴۶
۳۱۰۰۰۰	۷	۹	۱۲	۸۹/۲۸
۳۸۰۰۰۰	۵	۷	۸	۱۲۸

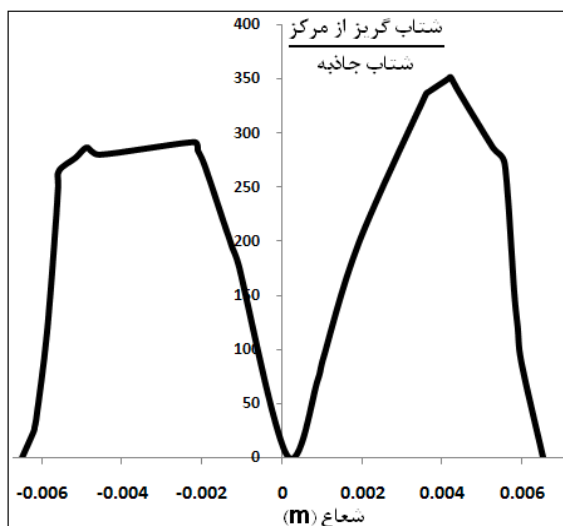
۴-۲-سرعت مماسی

آنچه که جدایش قطرات آب از فاز نفتی نامیده می شود در واقع مهاجرت و حرکت قطرات آب در جهت شعاع و به

در شکل های ۲ تا ۴، نتایج حاصل از شبیه سازی برای چهار نوع دانسیته مش مختلف و نتایج تجربی [۱] برای تغییرات بازدهی با افت فشار بین بالا و پایین هیدروسیکلون آمده است. در این شکل ها، همانطور که دیده می شود، با افزایش تعداد مش، خطای شبیه سازی کم می شود. در جدول ۱ مقادیر متوسط خطای برای مشهای مختلف آمده است. همانطور که دیده می شود، تغییرات نتایج برای تغییرات مش از ۳۱۰۰۰۰ به ۳۸۰۰۰۰ زیاد نیست. لذا استقلال نتایج از مش ۳۱۰۰۰۰ برای شبیه سازی به وجود آمده است و نتایج در مش ۳۱۰۰۰۰ مورد بررسی قرار می گیرند.



شکل (۵) سرعت مماسی برای شرط DP=47 kPa در مقاطع مختلف



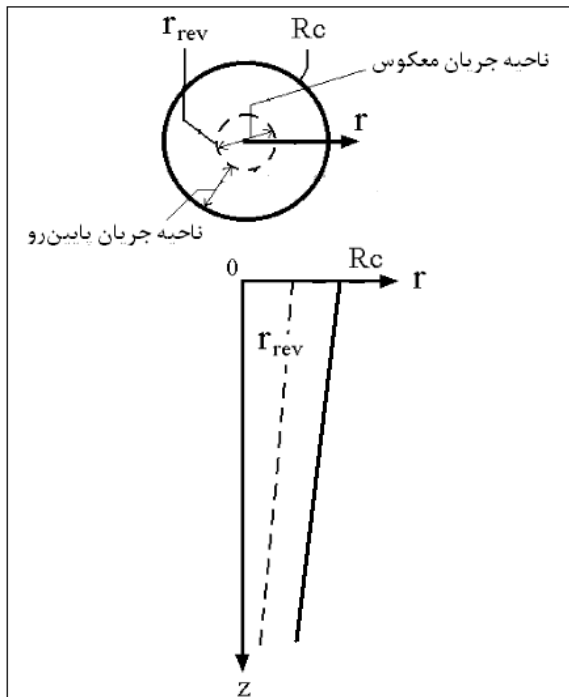
شکل (۶) نسبت شتاب شعاعی و شتاب گرانش برای DP=47kPa و y=-0.23m

بنابراین شدت جداسازی نسبت به حالتی که از نیروی گرانشی زمین در جداکننده‌های ثقلی استفاده می‌شود، در همه هیدروسیکلون‌ها، بسیار بیشتر است. همچنین برای شبیه سازی‌های انجام شده در چهار اختلاف فشار، نتایج سرعت مماسی در مقطع $y = -0.15m$ از هیدروسیکلون در شکل ۷ نشان داده شده است. در اینجا نیز روند صعودی- نزولی سرعت مماسی در جهت شعاع دیده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود، در شعاع‌های بیشتر از شعاع مربوط به سرعت مماسی ماکزیمم، تغییر چشمگیری در سرعت مماسی با تغییر DP دیده نمی‌شود. اما در شعاع‌های کمتر از شعاع مربوط به سرعت مماسی ماکزیمم، با کاهش DP، سرعت مماسی افزایش

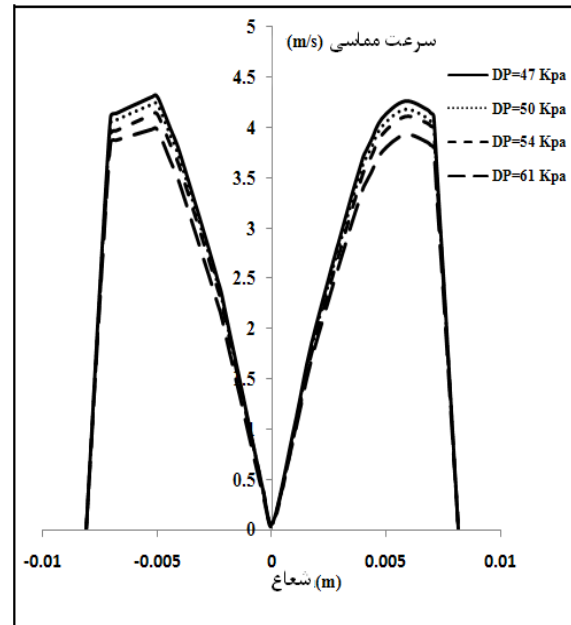
سمت دیواره، تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز، و انتقال آنها توسط جریان‌های کنار دیواره به سمت پایین هیدروسیکلون است. بنابراین هر مقدار که سرعت شعاعی قطرات بیشتر باشد، بازدهی جداسازی بیشتر است. نیروی گریز از مرکز لازم برای حرکت و جداسازی قطرات در جهت شعاع، توسط سرعت مماسی تامین می‌شود. قانون اصلاح شده‌ی استوکس برای حرکت در سرعت شعاعی به صورت معادله ۱۴ است [۲۱]:

$$u_r = \sqrt{\frac{4}{3} \left| \frac{\rho_c - \rho_d}{\rho_c} \right| \frac{u_{\theta}^2 d}{r C_D}} \quad (14)$$

در این رابطه u_r سرعت در جهت شعاعی، r شعاع حرکت، d قطر قطره، ρ_d چگالی فاز گسسته (آب)، ρ_c چگالی فاز پیوسته (نفت)، C_D ضریب پسا و u_{θ} سرعت مماسی است. هر چه مقدار این سرعت بیشتر باشد، راندمان جداسازی قطرات آب، به دلیل افزایش احتمال پیوستن آنها به جریان کنار دیواره بیشتر می‌شود. از جمله راه‌هایی که برای این منظور می‌توان در نظر گرفت کاهش ویسکوزیته و یا افزایش اندازه قطرات آب ورودی است. در شرایط ثابت، برای افزایش سرعت شعاعی به منظور افزایش مقدار بازدهی، لازم است که مقدار u_{θ} افزایش پیدا کند. در شکل ۵ سرعت‌های مماسی برای چند سطح مقطع از هیدروسیکلون برای حالتی که اختلاف فشار بین بالا و پایین (DP) هیدروسیکلون ۴۷ کیلوپاسکال است آورده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش شعاع، سرعت مماسی افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار ماکزیمم برسد. بعد از آن سرعت مماسی کاهش پیدا کرده و در دیواره که شرط غیر لغزشی بودن برقرار است به صفر می‌رسد. در همه مقاطع، شکل منحنی سرعت مماسی تقریباً ثابت است. همچنین از شکل ۵ نتیجه می‌شود که در مقطعی که سطح مقطع هیدروسیکلون بیشتر است، سرعت مماسی نیز بیشتر است. لذا جداسازی در این قسمت بیشتر اتفاق می‌افتد. علت سرعت جداسازی بالا در هیدروسیکلون نسبت به جداسازی ثقلی، به نسبت بالای شتاب گریز از مرکز به شتاب ثقلی مربوط می‌شود. در شکل ۶ تغییرات نسبت شتاب ناشی از نیروهای گریز از مرکز به شتاب گرانش (g) در شعاع‌های مختلف برای $y = -0.23m$ آورده شده است. با اینکه کمترین سرعت‌های مماسی در نظر گرفته شده است ($y = -0.23$)، ولی چنانچه دیده می‌شود، نسبت شتاب گریز از مرکز برخی نقاط به بیش از ۳۴۰ برابر شتاب ثقلی می‌رسد.



شکل (۸) ناحیه جریان معکوس و ناحیه با جریان پایین رو در هیدروسیکلون

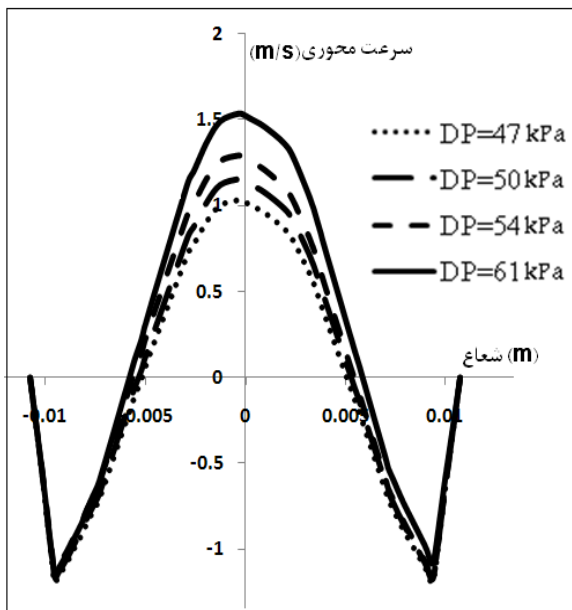


شکل (۷) - سرعت مماسی در چهار اختلاف فشار مختلف (y=-0.15m)

پیدا می کند. لذا در این نواحی، با کاهش اختلاف فشار، جداسازی بهتر انجام می گیرد.

۴-۳- سرعت محوری

همانطور که گفته شد، جداسازی به معنی حرکت قطرات به سمت دیواره و نیز حرکت در امتداد دیواره و به سمت پایین هیدروسیکلون است. بنابراین یک پارامتر حرکتی مهم دیگر، سرعت محوری است. اگر یک سطح مقطع طولی از هیدروسیکلون در نظر گرفته شود، دو ناحیه برای آن قابل تعریف است. ناحیه جریان معکوس نفت به سمت بالا و جریان آب به سمت پایین، این دو ناحیه در شکل ۸ نشان داده شده است [۲۱].



شکل (۹) - سرعت محوری برای چهار اختلاف فشار مختلف

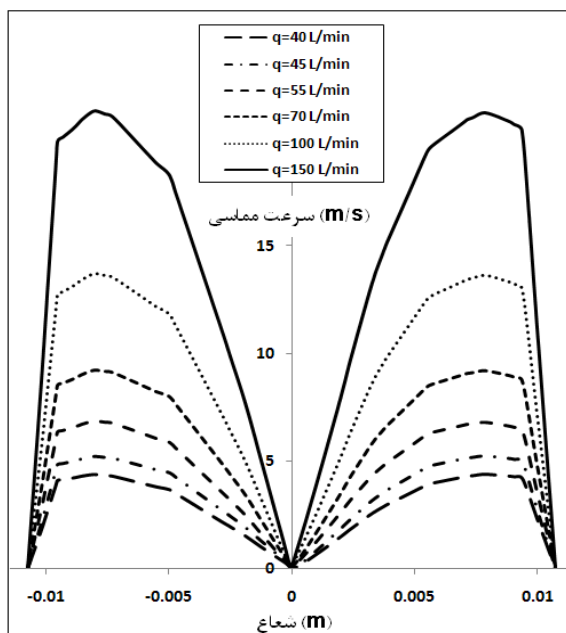
در شکل ۹، پروفایل سرعت محوری در سطح مقطع m در $y = -0.15$ در اختلاف فشارهای مختلف از هیدروسیکلون مشخص شده است. در ناحیه داخلی، جریان در جهت مثبت محور y (شکل ۱) حرکت می کند. این جریان عمدتاً نفت بوده و از سرریز هیدروسیکلون خارج می شود. همانطور که از شکل ۹ قابل مشاهده است، بیشترین سرعت محوری در محور هیدروسیکلون وجود دارد. با افزایش شعاع، مقدار این سرعت کاهش پیدا کرده و در نقطه ای به نام شعاع معکوس ۱۶، به صفر می رسد. این نقطه در واقع مرز جدایی دو جریان رو به بالا و رو به پایین در هیدروسیکلون است.

نواحی که در خارج از شعاع معکوس قرار دارند، یعنی نواحی نزدیک به دیواره، محتوی قطرات آب است که به دلیل نیروی گریز از مرکز، به سمت دیواره کشیده شده اند. همچنین مشاهده می شود که هر چه مقدار فشار پایین هیدروسیکلون کمتر باشد، نمودار سرعت محوری به سمت پایین انتقال می یابد، اما جابجایی محسوسی در شعاع معکوس دیده نمی شود که نتیجه آن، کاهش مقدار سیال خروجی از بالای

۴-۴- تاثیر تغییر دبی ورودی

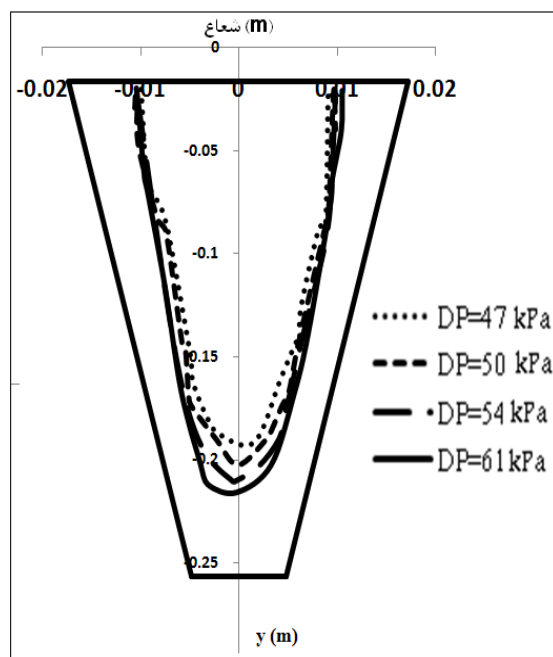
دبی ورودی تعیین کننده سرعت ورودی و در نتیجه توزیع سرعت در داخل هیدروسیکلون و کارایی آن در جداسازی فاز گسسته است. کارهای انجام شده بر روی تاثیر دبی ورودی بر عملکرد هیدروسیکلون نشان می‌دهد که با افزایش دبی ورودی و در نتیجه افزایش سرعت ورودی، راندمان جداسازی در داخل هیدروسیکلون افزایش می‌یابد. در اینجا به منظور بررسی تاثیر دبی ورودی بر عملکرد هیدروسیکلون، دبی‌های ۴۰، ۴۵، ۵۵، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ لیتر بر دقیقه در اختلاف فشار بین بالا و پایین هیدروسیکلون ۶۱ kpa بررسی شده است. همانطور که انتظار می‌رود [۵-۸]، با افزایش دبی ورودی، سرعت مماسی افزایش یافته و این امر باعث افزایش بازدهی هیدروسیکلون می‌شود (شکل ۱۱).

شکل ۱۲، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تاثیر دبی ورودی بر نسبت جدایش، بازدهی و بازدهی کلی را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، با افزایش دبی، نسبت جدایش افزایش می‌یابد. اما از آنجائی که به ازای دبی‌های بیشتر از ۶۰ لیتر در دقیقه برای این طراحی، بازدهی تقریباً ثابت است، با توجه به رابطه ۱۳، بازدهی کلی کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر دبی، نسبت جدایش نیز تغییر زیادی نداشته و در نتیجه بازدهی کلی نیز ثابت می‌ماند.



شکل (۱۱) توزیع سرعت مماسی در دبیهای مختلف (DP=61Kpa, d=45μm, k_t=15%)

هیدروسیکلون و افزایش نسبت جدایی است. با افزایش شعاع، سرعت محوری کاهش یافته و در دیواره به صفر می‌رسد. در شکل ۱۰ برای چهار اختلاف فشار مختلف، این نواحی نشان داده شده است. خطوط منحنی در واقع مکان هندسی نقاطی است که سرعت محوری در آنها صفر است. در نواحی داخلی، سرعت رو به بالا و در نواحی خارجی، که محتوی قطرات آب است جریان به سمت پایین هیدروسیکلون حرکت می‌کند. هر قدر که وسعت ناحیه خارجی، که در آن سرعت محوری رو به پایین است، بیشتر باشد، احتمال جداسازی قطرات آب نیز بیشتر خواهد بود. در شبیه سازی با اختلاف فشار کمتر،

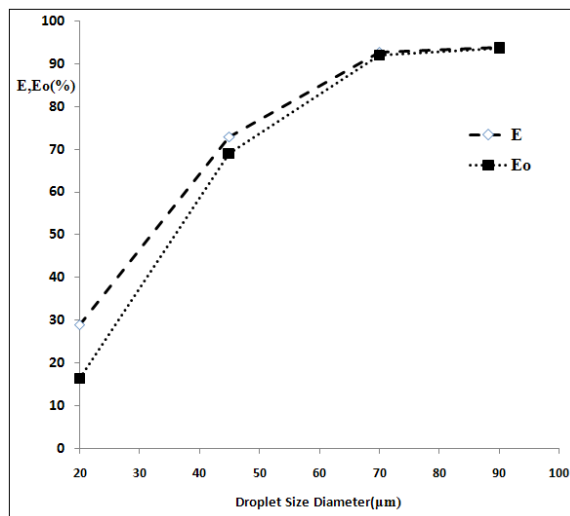


شکل (۱۰) برش طولی از هیدروسیکلون و نمایش نواحی جریان معکوس برای اختلاف فشارهای داده شده

همانطور که از نمودار دیده می‌شود، وسعت ناحیه خارج از شعاع معکوس افزایش یافته و در نتیجه احتمال پیوستن قطرات آب به جریان پایین رو اضافه شده و بازدهی جداسازی نیز بیشتر می‌شود. البته بین این دو ناحیه در قسمت‌های بالایی، با تغییر اختلاف فشار زیاد تغییر نکرده و فقط در قسمت‌های پایین هیدروسیکلون جابجایی این مرزها به طور واضح قابل رویت است. در واقع آنچه که باعث حرکت سیال به سمت بالای هیدروسیکلون می‌شود، اختلاف فشاری است که بین بالا و پایین هیدروسیکلون وجود دارد. بنابراین هر قدر که این اختلاف فشار کمتر باشد حرکت سیال به سمت خروجی پایین دست هیدروسیکلون افزایش و نسبت جدایش و راندمان افزایش می‌یابد.

رینولدز، این سرعت بیشتر شده و بازدهی افزایش می‌یابد. این نتیجه در همه کارهای انجام شده، از جمله در کارهای گومز و همکاران [۲۱]، ناراسیمها و همکاران [۹]، هانگ [۱۰] و بای و همکاران [۶]، نشان داده شده است.

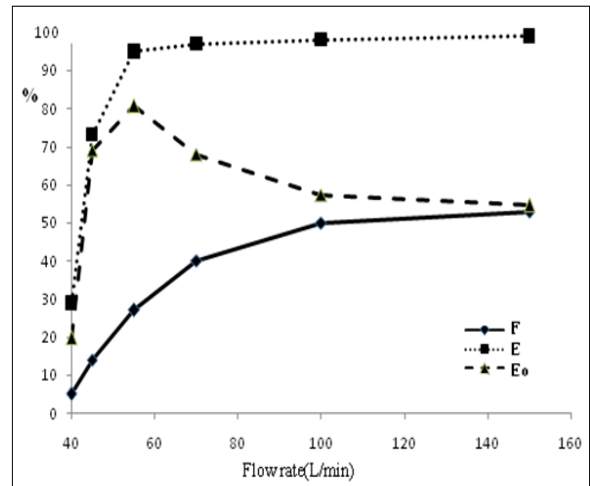
در شبیه سازی انجام شده توسط بای و ونگ [۵] و کار آزمایشگاهی اسمیت و همکارانش [۱]، اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۹۰ میکرون در نظر گرفته شده است. همچنین در یک کار آزمایشگاهی دیگر که توسط اسمیت و همکارانش انجام شده است، اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۶۰ میکرون در نظر گرفته شده است [۲]. لذا در این قسمت، شبیه‌سازهای با اندازه ۲۰ و ۴۵ و ۷۰ و ۹۰ میکرومتر در اختلاف فشار ۶۱kpa بین خروجی بالا و پایین هیدروسیکلون انجام شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۱۳ آمده است. همانطور که دیده می‌شود، در اینجا نیز با افزایش اندازه قطرات، به علت افزایش نیروی گریز از مرکز قطرات آب، بازدهی جداسازی هیدروسیکلون کولمن-تئو تا نزدیکی ۱۰۰٪ افزایش می‌یابد.



شکل (۱۳) - تغییرات بازدهی و بازدهی کلی با اندازه قطر ذرات آب در ورودی (K_i=15%, Q=45L/min)

۴-۶- تاثیر درصد آب ورودی

درصد آب ورودی به هیدروسیکلون ممکن است متغیر باشد. در کارهای انجام شده توسط اسمیت و همکارانش، درصد آب ورودی بین صفر تا ۳۰ درصد متغیر بوده است [۱، ۲]. همچنین در کارهای بای و ونگ، درصد آب ورودی بین ۵ تا ۱۰ درصد بوده است [۵]. در اینجا نیز به منظور بررسی تاثیر درصد آب ورودی بر بازدهی عملکرد هیدروسیکلون، شبیه سازی‌هایی با کسر حجمی آب ورودی ۰/۰۳ و ۰/۰۷ و ۰/۱ و ۰/۱۲ و ۰/۱۵ و ۰/۲۰ و ۰/۲۵ و ۰/۳۰ انجام شده است. نتایج این



شکل (۱۲) توزیع سرعت مماسی در دبیهای مختلف (DP=61Kpa, d=45μm, ki=15%)

اختلاف فشار بین بالا و پایین هیدروسیکلون در شرایط دبی ثابت تعیین کننده نسبت جدایش است. هر چه این اختلاف فشار بیشتر باشد، نسبت جدایش هیدروسیکلون کمتر است. سیال برای حرکت به سمت پایین هیدروسیکلون، باید بر این اختلاف فشار غلبه کند. هر چه مقدار سرعت سیال بیشتر باشد، انرژی آن برای غلبه بر این اختلاف فشار نیز افزایش می‌یابد. ولی اگر سرعت ورودی خیلی زیاد باشد، اختلاف فشار در مقابل انرژی جنبشی سیال خیلی کم بوده و اثرش در تعیین نسبت جدایش از بین می‌رود. لذا در دبی‌های بالا، نسبت جدایش مستقل از اختلاف فشار بالا و پایین هیدروسیکلون است.

۴-۵- تاثیر اندازه قطرات ورودی

همانطور که گفته شد، آنچه که سبب انتقال قطرات آب به سمت دیواره هیدروسیکلون می‌شود، نیروی گریز از مرکزی است که به خاطر اختلاف دانسیته بر قطرات وارد می‌شود. این نیرو باعث حرکت ذرات به دیواره با سرعت شعاعی u_r می‌شود. این نیرو از رابطه زیر می‌شود.

$$F = (V\Delta\rho)a \quad (15)$$

در این رابطه، $\Delta\rho$ اختلاف دانسیته دو فاز، a شتاب در جهت نیرو و V حجم قطره است که نیرو بر آن وارد می‌شود. نیرویی که در مقابل حرکت ذرات وارد می‌شود نیروی پسا است. اگر یک قطره به حال تعادل در آمده باشد و با سرعت شعاعی حدی u_r در جهت شعاع و سرعت زاویه‌ای ω در حرکت باشد، در این صورت، سرعت شعاعی حدی از رابطه ۱۴ به دست می‌آید [۲۱]. ضریب پسا (C_D)، با عدد رینولدز نسبت عکس دارد. بنابراین با افزایش قطر قطره و در نتیجه افزایش

$$E = \frac{F}{k_i} \quad (16)$$

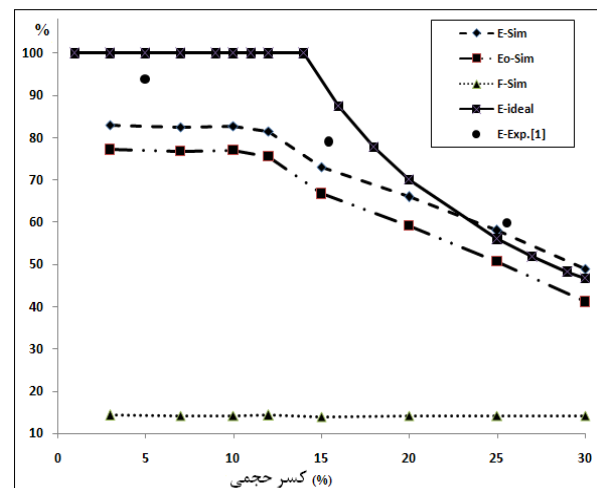
همانطور که دیده می‌شود، بازدهی ایده‌آل نیز با افزایش درصد آب ورودی کاهش می‌یابد. در واقع کاهش بازدهی برای درصد‌های ورودی بیش از ۱۴٪ مربوط به ظرفیت هیدروسیکلون است. همانطور که دیده می‌شود، به ازای درصد حجمی‌های بالاتر آب، نتایج شبیه‌سازی به نتایج تجربی و رفتار ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شود. در این شرایط، مقدار بیشتری از آب به سمت دیواره حرکت کرده و در نسبت جدایش ثابت، مقدر نفت کمتری از پایین خارج می‌شود. لذا کسر حجمی بالاتر آب در ورودی، سطح مقطع بیشتری از خروجی پایین را اشغال کرده و این حالت به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر است.

۴-۷- تاثیر اختلاف چگالی

مهمترین نیرو در جداسازی دوفاز آب و نفت در هیدروسیکلون، نیروی گریز از مرکزی است که به خاطر اختلاف چگالی بر قطرات آب وارد می‌شود. در هر حال این اختلاف چگالی ممکن است به خاطر دما یا فشار تغییر کند. از آنجائی که یکی از موارد استفاده از هیدروسیکلون‌های آب‌زدا در جداسازی ته چاهی آب از نفت است، لذا عملکرد آن در این شرایط در ادامه بررسی شده است.

هر چه عمق چاه بیشتر باشد، فشار آن نیز بیشتر است. عمیقترین چاهی که در ایران حفر شده است، ۷۵۰۰ متر عمق دارد. متوسط گرادیان حرارتی در زمین ۳۰ درجه سانتیگراد در هر کیلومتر است اما این گرادیان ممکن است به ۶۵ تا ۹۰ درجه برسد. به طور معمول دمای چاه در ۳۰۰۰ متری ۱۰۰ تا ۱۲۵ درجه، در ۶۰۰۰ متری ۲۰۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و در ۷۳۰۰ متری ۲۹۰ درجه سانتیگراد است [۲۲]. لذا در این تحقیق گرادیان دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان تغییرات دما با عمق چاه و ماکزیمم دمای مخزن ۲۹۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. همچنین با افزایش عمق چاه، فشار آن نیز بیشتر می‌شود. ماکزیمم فشار مخزن حدود ۵۰۰۰ psi در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ وزن مخصوص نفت خام برخی از مناطق نفت خیز ایران در ۳۵ درجه سانتی‌گراد آمده است [۲۳]:

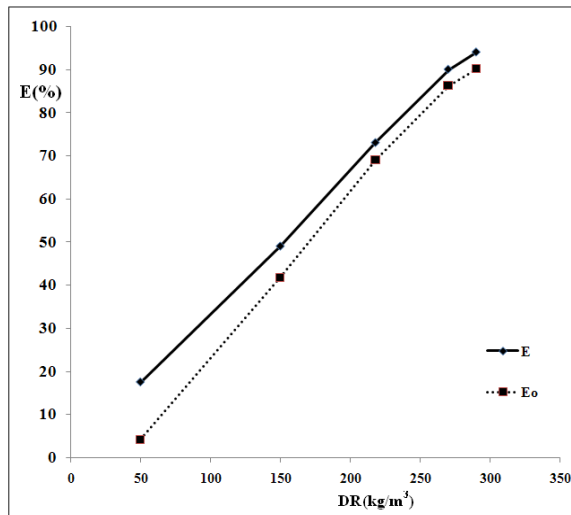
شبیه‌سازی‌ها برای بازدهی و بازدهی کلی و نسبت جدایش در شکل ۱۴ آمده است. همانطور که دیده می‌شود، مقدار نسبت جدایش تقریباً ثابت بوده و در حدود ۱۴ درصد است. در ابتدا با افزایش درصد آب ورودی در سیال ورودی، از حدود ۳ درصد تا حدود ۱۴ درصد، بازدهی تغییر محسوسی نمی‌کند. با اضافه شدن آب ورودی به بیشتر از ۱۴ درصد، بازدهی کم می‌شود و از آنجا که مقدار نسبت جدایش ثابت است، لذا بازدهی کلی کاهش می‌یابد. در توضیح این پدیده باید گفت که نسبت جدایش که نشان دهنده ظرفیت سیال خروجی از پایین هیدروسیکلون است، تقریباً ثابت و برابر ۱۴٪ است. در نتیجه با افزایش درصد آب ورودی به بیش از ۱۴ درصد، مقدار آب مازاد بر ظرفیت خروجی از پایین هیدروسیکلون، از بالای آن خارج می‌شود. به عبارتی دیگر، هیچگاه بیش از ۱۴ درصد سیال ورودی، از پایین هیدروسیکلون خارج نمی‌شود و وقتی که درصد آب ورودی بیش از ۱۴ درصد باشد، هیدروسیکلون حداکثر توان جداسازی مقداری از آن را دارد که حجم آن معادل ۱۴ درصد سیال ورودی باشد. برای توضیح بیشتر این مطلب، نمودار بازدهی ایده‌آل نیز در شکل ۱۴ آمده است. در این نمودار، به ازای درصد ورودی‌های کمتر از ۱۴٪، تمام آب ورودی از پایین هیدروسیکلون خارج شده و در نتیجه بازدهی ۱۰۰٪ می‌شود.



شکل (۱۴) تغییرات بازدهی و بازدهی کلی با درصد آب

ورودی ($d=45\mu\text{m}$, $Q=45\text{L}/\text{min}$)

به ازای درصد ورودی‌های بیشتر از ۱۴٪، بازدهی ایده‌آل برای جداسازی هیدروسیکلون از رابطه ۱۶ به دست می‌آید.



شکل ۱۶- تغییرات بازدهی با اختلاف دانسیته دو فاز

۴-۸- تاثیر ویسکوزیته نفت

نفت خامی که از چاه استخراج می‌شود دارای محدوده خواص متغیری است. ویسکوزیته و چگالی بعنوان دو خاصیت مهم سیال، بر عملکرد جداسازی هیدروسیکلون موثر می‌باشند. شرایط ذکر شده در قسمت قبل برای چاه در نظر گرفته می‌شود. در کار آزمایشگاهی که توسط ناصری و همکارانش بر روی ویسکوزیته نفت خام ایران انجام شده است، ویسکوزیته نفت خام در شرایط فشار و دمای بالا آمده است. رابطه‌ای به صورت زیر، برای ویسکوزیته نفت خام، در شرایط فشار و دمای بالا، به صورت تابعی از درجه API و دما ارائه شده است [۲۴]. طبق این رابطه، ویسکوزیته نفت خام در شرایط چاه می‌تواند بسیار متغیر باشد.

$$\log(\mu) = 11.2699 - 4.2699 \log(API) - 2.052 \log(T) \quad (17)$$

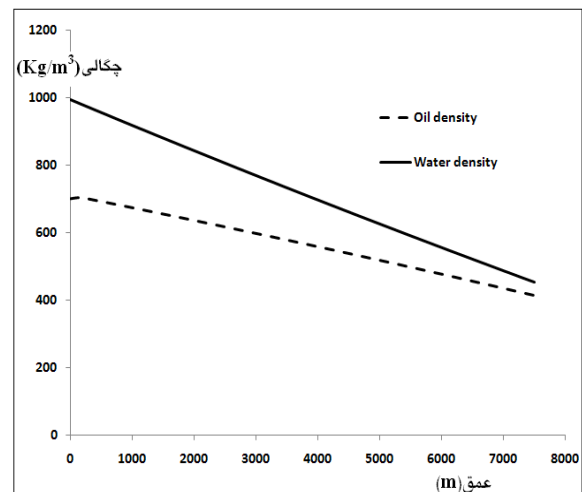
بنابر این تحقیقات، ویسکوزیته نفت خام در محدوده 0.0001 تا 0.1 kg/(m.s) قرار می‌گیرد [۲۴]. از آنجائی که در این تحقیق، نفت خام فاز پیوسته است و درصد حجمی آن بیشتر از آب در نظر گرفته می‌شود، لذا انتظار می‌رود که افزایش ویسکوزیته آن منجر به افزایش مقاومت در برابر حرکت قطرات آب و کاهش بازدهی شود. درستی این استدلال از نمودار شکل ۱۷ پیداست.

جدول (۲) وزن مخصوص نفت خام مناطق نفت خیز ایران در

۳۵ درجه سانتی گراد [۲۳]

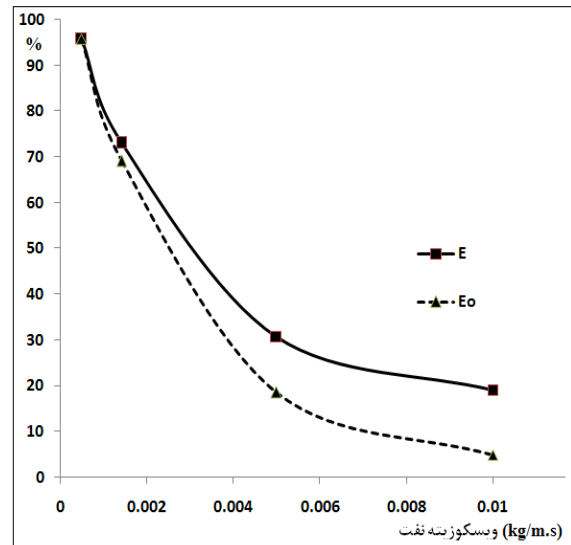
منطقه	وزن مخصوص	منطقه	وزن مخصوص
نفت شاه	۰/۷۷۲	مسجد سلیمان	۰/۸۰۸
هفتگل	۰/۸۱۲	لال	۰/۸۱۶
گچساران	۰/۸۳۷	آغاچاری	۰/۸۲۶

اگر بیشترین و کمترین وزن مخصوص نفت خام در دمای ۳۵ درجه و فشار $14/7 \text{ psi}$ ، به ترتیب $0/7$ و $0/850$ در نظر گرفته شود، در این صورت، وزن مخصوص نفت خام در شرایط چاه می‌تواند در محدوده $0/415$ تا $0/870$ قرار گیرد. در شکل ۱۵ محدوده دانسیته آب و نفت خام بر حسب عمق چاه آمده است. این داده‌ها بر اساس تغییرات فشار و دما به دست آمده‌اند. طبق رابطه ۱۵، هر چه این اختلاف چگالی بیشتر باشد، نیروی وارد شده بر قطره بیشتر شده و بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای اختلاف دانسیته‌های مختلف در شکل ۱۶ آمده است. DR اختلاف دانسیته بین دو فاز را نشان می‌دهد. نتیجه اینکه طراحی کولمن-تئو در اختلاف دانسیته‌های کم، بعنوان مثال برای جداسازی آب از نفت سنگین، راندمان خیلی کمی دارد. لذا در این شرایط عملیاتی باید طراحی هیدروسیکلون را تغییر داد.



شکل ۱۵- تغییرات چگالی آب و نفت خام با عمق چاه

باعث افزایش نیروی گریز از مرکز و افزایش بازدهی هیدروسیکلون می‌گردد. افزایش درصد آب ورودی، در مقادیر کم، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد هیدروسیکلون ندارد. اما در مقادیر بالاتر، به دلیل ثابت بود ظرفیت هیدروسیکلون در خروج سیال از پایین، مقدار اضافی آب از بالا خارج شده و بازدهی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش اختلاف چگالی دو فاز، نیروی گریز از مرکز وارد بر قطرات آب زیاد شده و بازدهی افزایش می‌یابد. افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته، باعث افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت قطرات آب شده و کاهش بازدهی را به همراه دارد.



شکل ۱۷- تغییرات بازدهی، بازدهی کلی و نسبت جدایش با ویسکوزیته نفت خام

علائم اختصاری و نمادها

شتاب حرکت	a
ضریب پسا	Cd
قطر قطره	d
اختلاف فشار	DP
بازدهی	E
بازدهی کلی	E _o
نسبت جدایش	F
شتاب گرانش	g
درصد حجمی آب در جریان پایینی	k _d
درصد حجمی آب در جریان ورودی	k _i
درصد حجمی آب در جریان بالایی	k _u
فشار	p
ترم چشمه	S _m
زمان	t
سرعت مماسی	u _θ
حجم قطره	V
دلتای کرانکر	δ
اختلاف چگالی	Δρ
اتلافات	ε
انرژی جنبشی	K
چگالی	ρ
چگالی فاز پیوسته	ρ _c
چگالی فاز گسسته	ρ _d
تنش	τ

مراجع

- [1] I.C. Smyth, M.T. Thew, and D.A. Colman (1984) "The effect of split ratio on heavy dispersion liquid-liquid separation in hydrocyclones", 2th International Conference on Hydrocyclone, 177-190.

همانطور که دیده می‌شود، با افزایش ویسکوزیته فاز نفتی، به علت افزایش مقاومت در برابر حرکت قطرات آب و افزایش نیروی وارد بر آنها، بازدهی کاهش پیدا می‌کند. لذا ویسکوزیته بیشتر نفت سنگین نیز باعث کاهش راندمان جداسازی هیدروسیکلون، در مقایسه با جداسازی آب از نفت سبک می‌گردد.

۵- نتیجه گیری

از هیدروسیکلون‌ها به منظور جداسازی دو یا چند فاز از همدیگر استفاده می‌شود. از هیدروسیکلون‌های آب زدا برای جداسازی آب از نفت یا انواع روغن‌ها و دیگر مایعات غیرقابل امتزاج در آب استفاده می‌گردد. یکی از جدیدترین استفاده‌های هیدروسیکلون‌های آب‌زدا، در جداسازی ته چاهی آب است. در این فناوری آب و نفت در ته چاه از یکدیگر جدا شده و نفت به سطح زمین منتقل شده و آب به لایه‌های مناسب تزریق می‌گردد. شرایط ته چاهی ممکن است بر خواص سیال و در نتیجه بر عملکرد هیدروسیکلون تاثیر گذارد. لذا در شبیه‌سازی‌ها، این اثرات باید لحاظ شود. با در نظر گرفتن یک دانسیته مش، مدل دو فازی اولرین-اولرین مدل توربولنسی تنش رینولدز، جریان دو فازی آب-نفت در هیدروسیکلون شبیه سازی شد. با بررسی‌هایی که از این طریق بر روی تاثیر دبی ورودی بر روی راندمان هیدروسیکلون انجام شد، مشخص شد که با افزایش دبی ورودی، به دلیل افزایش سرعت مماسی در هیدروسیکلون، نیروهای گریز از مرکز افزایش یافته و بازدهی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش اندازه قطرات آب ورودی،

- [14] K. Saengchana, A. Nopharatanab, and W. Songkasiric (2009) "Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop on tapioca starch separation with a hydrocyclone", *Chemical Engineering and Processing*, 48, 195–202.
- [15] K. Udaya Bhaskara, Y. R. Murthy, N. Ramakrishnan, J.K. Srivastava, S. Sarkar, and V. Kumar (2007) "CFD validation for flyash particle classification in hydrocyclones", *Minerals Engineering*, 20, 290–302.
- [16] L. Schiller, and Z. Naumann (1935) "A Drag Coefficient Correlation" *Z. Ver. Deutsch. Ing.*, 77, 318-320.
- [17] R.A. Medronho, J. Schuetze, and W.D. Deckwer (2005) "Numerical simulation of hydrocyclones for cell separation", *Latin American Applied Research*, 35, 1-8.
- [18] H. Shalaby, K. Pachler, K. Wozniak, and G. Wozniak (2005) "Comparative study of the continuous phase flow in a cyclone separator using different turbulence models", *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 48, 1175-1197.
- [19] M.F. Dlamini, M.S. Powell, and C.J. Meyer (2005) "A CFD simulation of a single phase hydrocyclone flow field", *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 105, 711-718.
- [20] V.V. Ranade (2002) *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor*, 3rd edition.
- [21] C. Gomez, J. Caldentey, S. Wang, L. Gomez, R. Mohan, and O. Shoham (2001) "Oil-Water Separation in Liquid-Liquid Hydrocyclones (LLHC)—Experiment and Modeling", *SPE* 71538, 1-18.
- [22] صفرا اسماعیلی فرد، جمشید حسن زاده، عباسعلی علی اکبری بیدختی (۱۳۷۴) "محاسبه گرادیان زمین گرمایی در پهنه‌های زمین ساختی زاگرس، کپه داغ، ایران مرکزی و مقایسه آنها"، نخستین همایش سالانه انجمن زمین شناسی ایران، ۲۹-۳۰.
- [23] جلال‌الدین توانا (۱۳۳۵) "استخراج نفت"، انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول.
- [24] A. Naseria, M. Nikazarb, and S.A. Mousavi Dehghania (2005) "A correlation approach for prediction of crude oil viscosities", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 47, 163-174.
- [2] I.C. Smyth, M.T. Thew, P.S. Debenham, and D.A. Colman (1980) "Small scale experiments on hydrocyclones for dewatering light oils", *1st International Conference on Hydrocyclones*, 189-208.
- [3] A. Belaidi, M.T. Thew, and S.J. Munaweera (2003) "Hydrocyclone Performance with Complex Oil-Water Emulsions in the Feed", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81, 1159 -1170.
- [4] S. Schutz, G. Gorbach, and M. Piesche (2009) "Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid-liquid separation in hydrocyclones", *Chemical Engineering Science*, 64, 3935 –3952.
- [5] Z. Bai, and H. Wang (2006) "Numerical Simulation of the Separating Performance of Hydrocyclones", *Chemical Engineering Technology*, 29, 1161–1166.
- [6] Z. Bai, and H. Wang, S. Tu (2009) "Dehydration of Waste Edible Oil by Hydrocyclones", *International Journal of Green Energy*, 6, 184 - 191.
- [7] G.A. Young, D.L. Taggart, D.G. Hild, D.w. Simms, and G.R. Worrell (1993) *Hydrocyclone with finely tapered tail section*, US Patent 5225082.
- [8] T. Husveg, O. Rambeau, T. Drenngstig a, and T. Bilstad (2007) "Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates", *Minerals Engineering*, 20, 368–379.
- [9] M. Narasimha, R. Sriprya, and P.K. Banerjee (2005) "CFD modelling of hydrocyclone-prediction of cut size", *International Journal of Mineral Processing*, 75, 53– 68.
- [10] S. Huang (2005) "Numerical Simulation of Oil-water Hydrocyclone Using Reynolds-Stress Model for Eulerian Multiphase Flows", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83, 829-834.
- [11] G.A.B. Young, and W.D. Wakley (1994) "Oil-water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 11, 37-50.
- [12] T. Neesse, and J. Dueck (2007) "Dynamic modelling of the hydrocyclone", *Minerals Engineering*, 20, 380–386.
- [13] T. Braun, and M. Bohnet (1990) "Influence of Feed Solids Concentration on the Performance of Hydrocyclones", *Chemical Engineering Technology*, 13, 15-20.

Investigation of operating condition on hydrocyclone dewatering performance using CFD simulation

A. Kolivand, S.H. Hashemabadi*

Computational Fluid Dynamics Research Laboratory, School of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, 16846, Tehran, Iran, Fax: +(9821) 7724-0495, Tel: +(9821) 7724-0376, E-mail: hashemabadi@iust.ac.ir

ABSTRACT

In this work, a Colman-Thew hydrocyclone type has been simulated utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) method. In order to take into account the turbulent and multi-phase flow, Reynolds Stress approach and Eulerian-Eulerian model has been applied, respectively. Moreover, for the verification of obtained results, a comparison between the simulation results and the reported experimental data were done in terms of hydrocyclone separation efficiency and split ratio. Axial and tangential velocity of flow through the hydrocyclone has been discussed. The results showed that by increasing the inlet flow rate, density difference (higher API) and droplet size diameter, the separation efficiency was enhanced. Furthermore, due to the increasing of drag forces affecting on water droplets, the efficiency decreased by the promotion of oil viscosity

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 Feb. 2011

Received in revised form 13 Aug. 2011

Accepted 21 Sep. 2011

Key words:

Hydrocyclone

Dewatering

Oil-water

Operation condition

CFD Simulation

All right reserved.

* Corresponding author