

# بررسی تجربی و شبیه‌سازی CFD هیدروسیکلون

## کک زدای پتروشیمی جم

مهدی مشتاقیان، سید حسن هاشم آبادی\*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

پیام نگار: Hashemabadi@iust.ac.ir

### چکیده

در این مقاله فرایند جداسازی کک از آب توسط هیدروسیکلون صنعتی بررسی شده و با شبیه سازی آن به کمک CFD نحوه جداسازی و پارامترهای موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه سازی از مدل مخلوط برای بررسی رفتار فازها در شرایط پایا و برای محاسبه ضریب دراگ از مدل شیلر نیومن استفاده شده است. در این تحقیق از داده‌ها و نتایج بدست آمده از شرایط عملیاتی مختلف از ورودی و خروجی هیدروسیکلون کک زدای پتروشیمی جم استفاده گردیده و نتایج حاصل از آن با شبیه سازی CFD مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان داده است. همچنین، تأثیر سه مدل مختلف اغتشاش  $RNG (K-\epsilon)$ ،  $Realizable (k-\epsilon)$  و  $RSM$  بر روی نتایج شبیه‌سازی بررسی شد. مدل  $RSM$  به جهت داشتن نتایج با دقت قابل قبول، بهترین مدل در بین این سه مدل برای بررسی هیدرو دینامیک جریان دو فازی (جامد- مایع) ارزیابی گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که در اندازه‌های ذرات ورودی بزرگ‌تر، بازدهی هیدروسیکلون به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین تغییر میزان شدت جریان ورودی نشان داد که با افزایش شدت جریان، بازدهی به شدت افزایش می‌یابد. در پایان، افزایش تعداد ورودی بر روی بازدهی جداسازی با استفاده از دو طراحی متفاوت بررسی شد و نتایج، افزایش بازدهی تا ۵ درصد را نشان دادند.

کلمات کلیدی: هیدروسیکلون، کک زدایی، شبیه‌سازی CFD، جریان آشفته، مدل مخلوط

### ۱- مقدمه

متغیرهای مهم در طراحی هیدروسیکلون، پیچیدگی جریان ورودی است که کاربرد مشترکی در تمام زمینه‌های معدنی دارد. استفاده از هیدروسیکلون‌ها ابتدا در صنایع معدنی و بعدها در زمینه‌های مهندسی شیمی، پتروشیمی، صنایع نساجی، صنایع فلزی و بسیاری از صنایع دیگر روز به روز افزایش یافت. هیدروسیکلون‌ها امروزه به خوبی جای خود را در صنعت باز کرده و استفاده از آن‌ها توسعه

هیدروسیکلون‌ها در محدوده گسترده‌ای از صنایع شیمیایی، معدنی، نفت، گاز و پتروشیمی بکار گرفته می‌شوند. یک هیدروسیکلون معمولی تشکیل شده است از یک قسمت مخروطی با یک لوله تخلیه در رأس مخروط و یک لوله ورودی خوراک که به قسمت بالایی ناحیه استوانه‌ای در نقطه ورود به بدنه مماس شده است. یکی از

دای و همکارانش در سال ۱۹۹۹ به مطالعه تجربی بر روی رفتار جریان دو فازی مایع-جامد در هیدروسیکلون پرداختند که با کمک گرفتن از ابزار لیزری دقیق رفتار ذرات و مسیر حرکت آن‌ها را مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند [۴]. مطالعات آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که ذرات جامد تمایل دارند به سمت دیواره حرکت کنند و هر چه اندازه ذرات کوچک‌تر می‌شود این حرکت به سمت محور هیدروسیکلون متمایل می‌گردد. تأثیر طراحی بدنه هیدروسیکلون و نوع ورودی هیدروسیکلون توسط نوروزی و هاشم آبادی مطالعه شده است [۵،۶].

در این مطالعه، بازدهی عملکرد هیدروسیکلون کک زدای پتروشیمی جم مورد مطالعه میدانی قرار گرفته است و با ایجاد یک مدل CFD، پارامترهای موثر بر عملکرد آن بررسی شده است. از آنجایی که این تجهیز بصورت واقعی و در ابعاد و اندازه‌های صنعتی شبیه‌سازی گردیده است، انجام این تحقیق می‌تواند دریچه‌ای جدید در کاربردی شدن شبیه‌سازی CFD بر روی صنعت کشورمان بگشاید.

## ۲- هیدروسیکلون کک زدای پتروشیمی جم

هیدروسیکلون کک زدا (شکل (۱)) در قسمت ۲۵۰ واحد اولفین پتروشیمی جم قرار گرفته است. با توجه به اینکه هنگام کراکینگ به همراه گاز کراک مقداری کک نیز حاصل می‌گردد و این مقادیر کک در سیکل آب خنک کننده به صورت معلق باقی می‌ماند جهت خارج نمودن این کک‌ها از سیکل آب خنک کننده از هیدروسیکلون‌های موجود کمک گرفته شده تا سیکل چرخشی عاری از هرگونه ذرات معلق شود و از گرفتگی در تجهیزات و همچنین سایش جلوگیری به عمل آورد.

در ابتدا جهت بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی، از سیال مورد نظر در ورودی و خروجی‌ها در شرایط و حالت‌های مختلف نمونه‌گیری به عمل آمد که نتایج آن‌ها در جدول (۱) آمده است. آزمایش به این صورت بوده که در شرایط عملیاتی مختلف از ورودی و خروجی هیدروسیکلون نمونه‌گیری به عمل آمده و در آزمایشگاه با عبور از صافی، پس از خشک و وزن کردن، میزان درصد حجمی و وزنی کک آن نمونه بدست می‌آید.

نکته قابل ذکر این است که در واحد اولفین در ورودی سیکل آب خنک کننده، ۶ کوره گازی وجود دارد که به طور نرمال ۵ کوره در

یافته است. چندین ویژگی هیدروسیکلون‌ها آن‌ها را به شکل خاصی مورد توجه قرار داده است.

- ۱- با توجه به نداشتن قطعات متحرک هزینه نگهداری پایینی دارند.
- ۲- نصب و کاربرد آن‌ها ساده است.
- ۳- به فضای کم عملیاتی نیاز دارند.
- ۴- بر خلاف جداسازهای دیگر بازدهی آن‌ها با افزایش شدت جریان ورودی افزایش می‌یابد.

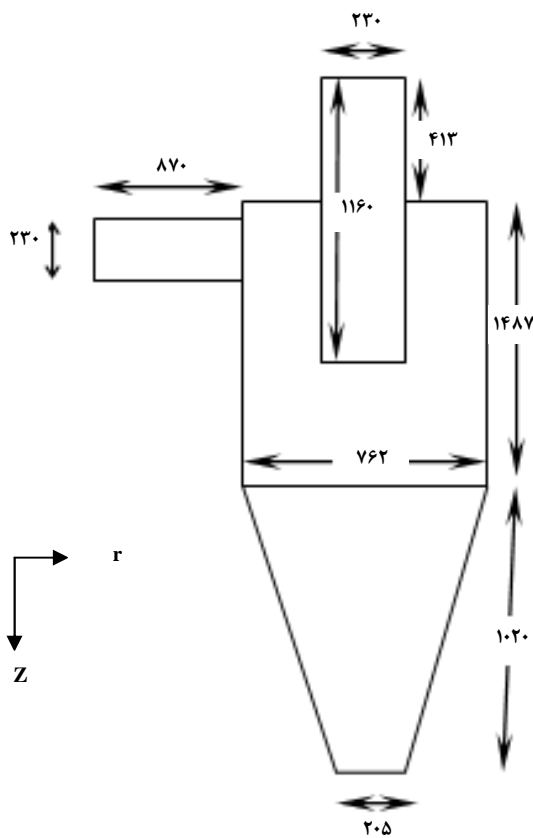
۵- هم به شکل افقی و هم به شکل عمودی قابل نصب هستند.

سیال به صورت مماسی به داخل هیدروسیکلون تزریق می‌شود و این ورودی مماسی سبب چرخش سیال درون دستگاه و تولید نیروی گریز از مرکز می‌گردد. تحت اثر این نیرو ذرات درشت و سنگین‌تر به سمت دیواره حرکت می‌کنند و پس از برخورد با دیواره با لغزش در جهت پایین به سمت خروجی پایینی دستگاه که به آن ته ریز گفته می‌شود می‌روند و از دستگاه خارج می‌شوند. ناحیه مخروطی، محل عبور این جریان گردابی به سمت پایین را باریک می‌کند و از همان جا یک ستون چرخشی از مایع و هم جهت با جهت چرخش جریان اصلی به سمت بالا شروع به گردش می‌کند. این جریان به همراه ذرات سبکی که در حین مسیر به آن ملحق می‌شوند از طریق لوله خروجی بالای هیدروسیکلون که اصطلاحاً گردابه یاب نام دارد از هیدروسیکلون خارج می‌گردد [۱].

فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در ارتباط با بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌ها انجام پذیرفته است. باسکار و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به مطالعه شبیه‌سازی به کمک CFD بر روی هیدروسیکلون‌ها با خوراک دوغابی با ۱۰٪ خاک رس پرداختند [۲]. جهت شبیه‌سازی از مدل‌های مختلف جریان درهم مانند مدل استاندارد  $(k-\epsilon)$ ،  $(k-\epsilon)$  و  $RNG$  استفاده گردید. با توجه به آزمایش‌ها و تجربیات شبیه‌سازی مدل اغتشاش  $RSM$ ، نتایج، بهتر شد و درصد خطای ۴٪ تا ۸٪ را نشان داد. وانگ و همکارش در سال ۲۰۰۶ به مطالعه جریان سیال ذرات در هیدروسیکلون با ابعاد و اندازه‌های متفاوت پرداختند [۳]. در این تحقیق از مدل جریان درهم  $RSM$  و مدل لاگرانژی جهت شبیه‌سازی جریان دو فازی استفاده شد. در این تحقیق با تغییر اندازه و ابعاد هیدروسیکلون به این نتیجه رسیدند که سیکلون کوچک‌تر باعث افزایش بازدهی گشته و همچنین افزایش طول قسمت مخروطی کار آبی را بهبود می‌بخشد.

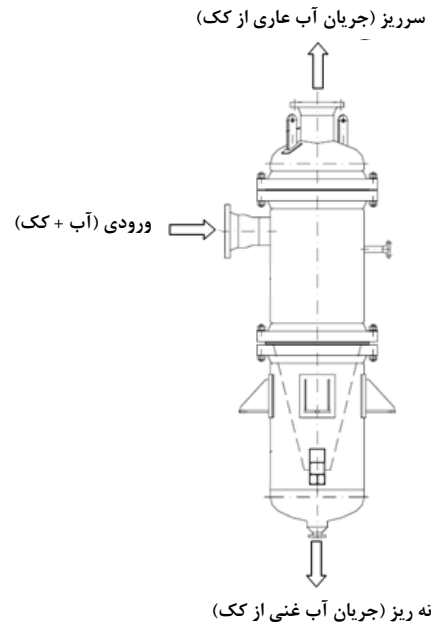
ابتدای کراکینگ باشد به آغاز کار<sup>۱</sup> معروف و کوره‌ای که در انتهای کراکینگ و نزدیک زمان کک زدایی باشد به پایان کار<sup>۲</sup> معروف می‌گردد. بالطبع کوره‌هایی که در انتهای زمان کراکینگ قرار دارند میزان کک بیشتری به قسمت هیدروسیکلون‌ها هدایت می‌کنند.

ابعاد هیدروسیکلون مورد استفاده شامل سیلندری به قطر ۷۶۲ میلی‌متر و طول ۱۴۸۷ میلی‌متر، قطر دهانه ورودی ۲۳۰ میلی‌متر، قطر دهانه خروجی بالا و پایین به ترتیب ۲۳۰ میلی‌متر و ۲۰۵ میلی‌متر و طول هیدروسیکلون ۲۵۰۷ میلی‌متر می‌باشد. همچنین زاویه مربوط به قسمت مخروطی ۷۵ درجه است. شکل (۲) ساختار هیدروسیکلون شبیه‌سازی شده (کلیه واحدها بر حسب میلی‌متر است) را نشان می‌دهد. شرایط عملیاتی مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول (۲) مشخص گردیده است.



شکل ۲- ساختار هیدروسیکلون شبیه‌سازی شده (کلیه واحدها بر حسب میلی‌متر است)

1. Start of run
2. End of run



شکل ۱- هیدروسیکلون شبیه‌سازی شده

جدول ۱- نتایج حاصل شده از شرایط مختلف عملیاتی

آزمایش ۵	آزمایش ۴	آزمایش ۳	آزمایش ۲	آزمایش ۱	
۰	۱	۲	۳	۴	تعداد کوره‌های آغاز کار
۵	۴	۳	۲	۱	تعداد کوره‌های پایان کار
۲۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۸۰	۶۵	کک ورودی (ppm)
۱۰	۱۰	۸	۱۰	۱۵	کک خروجی از سرریز (ppm)
۹۵	۹۱۶۷	۹۲	۸۷/۵	۷۶/۹۲	بازدهی (%)

حال کراکینگ و یک کوره به صورت آماده به کار می‌باشد. به طور معمول هر کوره به مدت ۶۰ روز در حالت کراکینگ قرار گرفته و پس از آن عملیات کک زدایی جهت خارج نمودن کک‌های موجود در داخل تیوب‌ها بر روی آن‌ها صورت می‌پذیرد که کوره‌ای که در

جدول ۲- مشخصات عملیاتی و خصوصیات مواد

اندازه	فشار	گرانروی (cP)	شدت		فاز
			چگالی	جریان ورودی	
( $\mu\text{m}$ )	(bar)		( $\text{kg/m}^3$ )	( $\text{m}^3/\text{h}$ )	
-	۹	۱/۰۳۵	۱۰۰۰	۸۶۲	مخلوط آب و کک
۲۵	-	-	۱۲۰۰	-	کک
-	-	۱/۰۰۳	۹۹۸/۲	-	آب

### ۳- معادلات حاکم

در این مطالعه به علت اینکه حجم فاز گسسته کمتر از ۱۰٪ کل حجم سیال می‌باشد و همچنین جهت کاهش زمان محاسباتی از مدل مخلوط برای بررسی رفتار جریان دو فازی استفاده شده است. معادله پیوستگی در مدل مخلوط به شکل زیر می‌باشد [۷].

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (1)$$

$$u_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k}{\rho_m}, \quad \rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (2)$$

که  $u_m$  سرعت متوسط جرمی،  $\rho_m$  چگالی مخلوط،  $n$  تعداد فازها و  $\alpha_k$  جزء حجمی فاز  $k$  می‌باشد. معادله تکانه در این مدل به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial (\rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = -\nabla p - \nabla \cdot (\tau_m) + \rho_m g + F \quad (3)$$

سرعت نسبی  $u_{Dk}$  و سرعت لغزشی  $u_{Sk}$  و رابطه آن‌ها با یکدیگر با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$u_{Sk} = u_k - u_c, \quad u_{Dk} = u_k - u_m, \quad u_{Dk} = u_{Sk} - \sum_k Y_k u_{Sk} \quad (4)$$

$Y_k$  جزء جرمی فازهای پراکنده،  $u_k$  سرعت فازهای پراکنده و  $u_c$  سرعت فاز پیوسته می‌باشد.

$$u_{Sk} = \frac{\tau_p (\rho_k - \rho_m)}{f \rho_k} \left( \frac{\partial u_m}{\partial t} + u_m \cdot \nabla u_m - g \right) \quad (5)$$

برای بدست آوردن کسر حجمی فاز پراکنده  $p$  می‌توان معادله زیر را حل کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p v_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p v_{dr,p}) + \sum (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (6)$$

برای بدست آوردن نیروی دراگ از مدل (شیلر- نیومن) برای محاسبه ضریب دراگ استفاده شده است که در اصل برای محاسبه ضریب دراگ ذرات جامد در یک سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد و به علت اینکه سبب ناپایداری در حل نمی‌شود مدل بسیار مناسبی برای این گونه مسائل بشمار می‌رود. رابطه ضریب دراگ شیلر نیومن به صورت زیر تعریف می‌شود [۷].

(۷)

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_d} (1 + 0.15 \text{Re}_d^{0.687}) & \text{Re}_d \leq 1000 \\ 0.44 & \text{Re}_d \geq 1000 \end{cases}$$

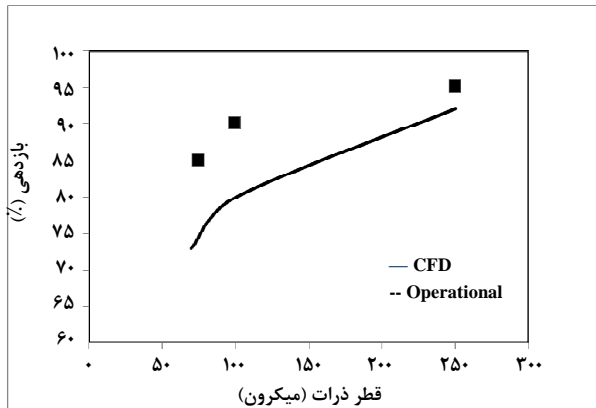
مدل RSM کامل‌ترین مدل در بین مدل‌های آشفتگی بر مبنای میانگین‌گیری زمانی معادلات (ناویر- استوکس) می‌باشد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و تجارب پیشین از مسائل مشابه [۲۳]، در مسئله این پروژه از مدل RSM با یک شبکه‌بندی مشخص استفاده می‌گردد. نهایتاً با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌ها و تحلیل‌های عددی بهترین روش، برگزیده شده و برای انجام بهینه‌سازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این مطالعه برای پیش بینی رفتار سیال در کنار دیواره از مدل تابع دیواره استفاده شده است. هرگاه از شرط مرزی تابع دیواره برای مدل کردن سیال در نزدیکی دیواره استفاده شود باید شرایط صحت آن نیز در نظر

#### 1. Wall Function

که از نمودار مشخص است با کاهش اندازه ذرات، مقدار بازدهی کاهش می‌یابد که این امر هم در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخص است و هم در نتایج بدست آمده از داده‌های حاصل از شرایط عملیاتی مختلف پدیدار گشته است.

جدول ۳- نتایج بدست آمده برای بازدهی جداسازی برای سه چگالی مش مختلف

مش	بازدهی (CFD)	زمان محاسبات (hr)	خطا (%)
۵۷۰۰۰	۸۵	۲	۱۳/۲
۲۷۰۰۰۰	۹۰	۳/۵	۸/۱
۳۴۸۰۰۰	۹۲	۵	۶



شکل ۳- مقایسه نتایج CFD و داده‌های میدانی برای بازدهی بر اساس قطر ذرات ورودی

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص می‌باشد و بر اساس اندازه ذرات متفاوت نشان می‌دهد که با کاهش اندازه و حجم ذرات بازدهی جداسازی کاهش می‌یابد و نتایج برای اندازه ذرات با طول میانگین ۷۵ میکرون میزان خطا را حدود ۱۷ درصد نشان می‌دهد که می‌توان آن را به خطای محاسباتی نسبت داد.

#### ۴-۲ سرعت مماسی

مهاجرت و حرکت ذرات در جهت شعاع و به سمت دیواره تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز و انتقال آن‌ها توسط جریان‌های کنار

گرفته شود. برای این منظور  $y^+$  باید در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار گیرد. در این مطالعه مقدار  $y^+$  در محدوده ۳۰ تا ۱۰۰ در اجزاهای متفاوت بوده است که میزان تخمین صحیح میدان سرعت نزدیک دیواره را تضمین می‌کند.

منطبق بر شرایط عملیاتی هیدروسیکلون کک زدای پتروشیمی جم، در شرط مرزی ورودی میزان شدت جریان به مقدار ۲۴۱ (kg/s) تعیین گردیده و همچنین شدت آشفتگی برابر ۱۰٪ و طول مشخصه ورودی برابر ۰/۲۳ در نظر گرفته شده است. در خروجی‌ها فشار به عنوان شرط مرزی مورد استفاده قرار گرفته است. ذرات کک از سطح دهانه ورودی به طور یکنواخت به داخل جریان آب تزریق می‌شوند.

#### ۴-۲ تجزیه و تحلیل نتایج

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

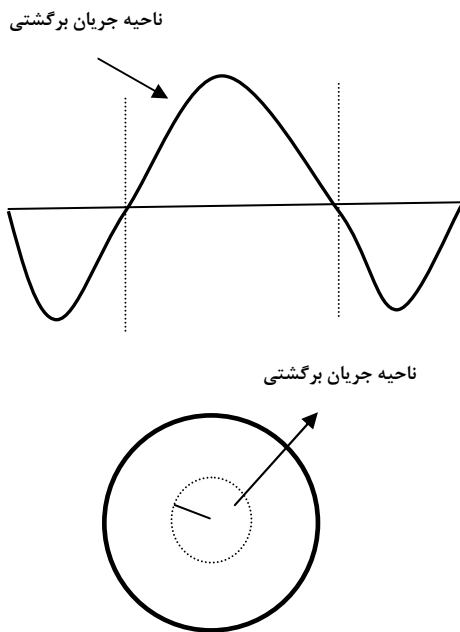
جدول (۳) نتایج بدست آمده برای بازدهی جداسازی را برای سه چگالی مش مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که از یک سامانه محاسباتی مناسب (CPU Intel920-i7-2.676GHz, RAM:6GB, HARD:500GB) برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. نتایج برای مش‌های با چگالی بیشتر به داده‌های تجربی نزدیکتر می‌باشند اما در مش‌های بالاتر از ۳۴۸۰۰۰، زمان محاسباتی بسیار زیاد بوده است، از طرفی درصد خطای بدست آمده تغییر چندانی نکرد. لذا مش ۳۴۸۰۰۰ با توجه به اینکه خطای آن کمتر از سایر مش‌ها می‌باشد به عنوان مش بهینه در این تحقیق انتخاب شده است. بازدهی جداسازی و میدان جریان فقط برای هندسه استاندارد با استفاده از مدل آشفتگی RSM بدست آمده است. باید به این نکته اشاره شود که مقدار بازدهی به کمک فرمول زیر بدست آمده است:

$$E_r = 1 - \frac{C_{\text{overflow}}}{C_{\text{input}}} \quad (8)$$

که  $C$  غلظت کک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) نتایج برای اندازه ذرات با طول میانگین بالای ۲۵۰ میکرون دقت بالایی دارد (مقدار متوسط خطا در این ناحیه حدود ۳ درصد است). همان‌طور

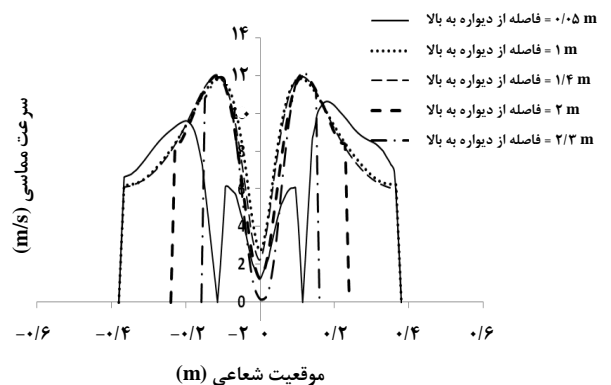
1. Pressure outlet

دیواره به سمت پایین هیدروسیکلون باعث جداسازی فازها می‌گردد؛ بنابراین هر مقدار که سرعت شعاعی ذرات بیشتر باشد بازدهی جداسازی بیشتر است. نیروی گریز از مرکز لازم برای حرکت و جداسازی ذرات در جهت شعاع توسط سرعت مماسی تأمین می‌شود. در شکل (۴) در مقاطع مختلف هیدروسیکلون بر اساس فاصله دیواره فوقانی سیکلون سرعت مماسی در جهت شعاع رسم گردیده است با توجه به شکل دیده می‌شود که میزان سرعت مماسی در نواحی نزدیک محور هیدروسیکلون بیشترین مقدار را دارد و در نواحی کنار دیواره مقدار آن به صفر می‌رسد. همچنین نشان داده می‌شود که سرعت مماسی از ناحیه‌ای که سرعت، بیشترین مقدار خود را دارد تا محور هیدروسیکلون افت ناگهانی نشان می‌دهد بعلاوه با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که سرعت مماسی از بالای هیدروسیکلون (نسبت به ورودی) به سمت پایین هیدروسیکلون افت می‌کند. در واقع هر چه سرعت مماسی بیشتر باشد نیروی گریز از مرکز وارد بر ذرات بیشتر بوده و نهایتاً بازدهی جداسازی بیشتر خواهد بود. نوسانات سرعت در قسمت بالایی حاکی از این موضوع می‌باشد که چون در ابتدای نقطه ورودی گردابه یاب می‌باشد سرعت در کنار دیواره و مرکز صفر است و هرچه به قسمت انتهایی گردابه یاب نزدیک می‌شویم سرعت یکنواخت می‌گردد.



شکل ۴- نمایش سرعت محوری

در شکل (۵) نمودار سرعت محوری در چند مقطع متفاوت هیدروسیکلون با توجه به فاصله از دیواره فوقانی هیدروسیکلون در جهت شعاعی رسم شده است. مقادیر مثبت جریان برگشتی به سمت خروجی از بالای هیدروسیکلون و مقادیر منفی جریان به سمت خروجی از پایین را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود میزان ماکزیمم سرعت در تمام مقاطع بجز مقطع شامل گردابه یاب در محور هیدروسیکلون می‌باشد که مقادیر مثبت سرعت در محور نشان‌دهنده جریان برگشتی در محور به سمت خروجی بالا می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود در مقاطع شامل گردابه یاب نواحی شامل سرعت منفی یا مثبت شامل چند ناحیه هستند که این پدیده به خاطر به وجود آمدن توربولانسی (حالت گردابی) در این ناحیه



شکل ۴- نمایش مؤلفه سرعت مماسی در جهت شعاعی در پنج موقعیت متفاوت محوری نسبت به دیواره بالایی هیدروسیکلون

#### ۳-۴ سرعت محوری

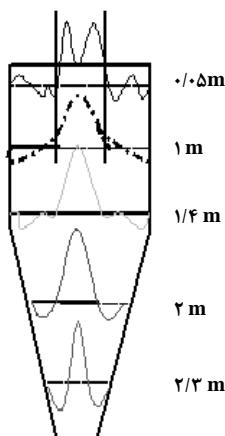
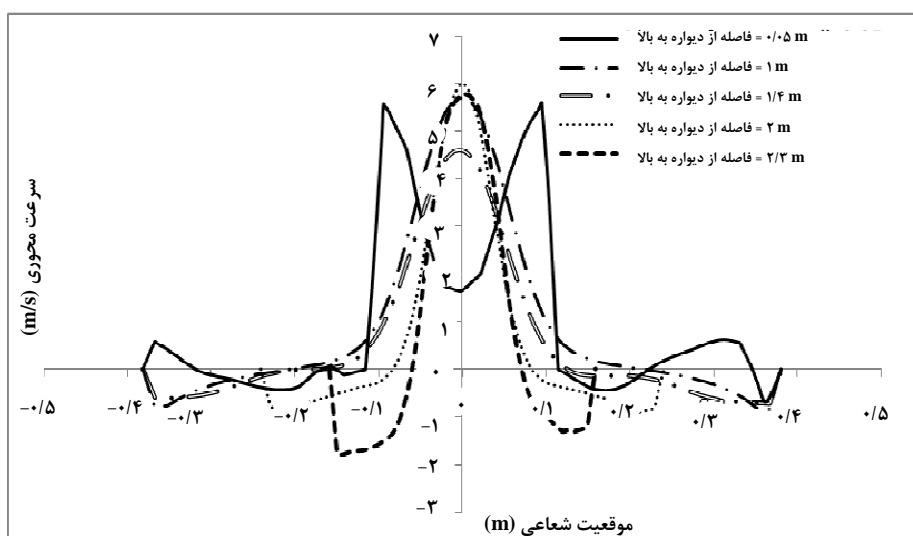
اگر یک سطح طولی از هیدروسیکلون در نظر گرفته شود دو ناحیه برای آن قابل تعریف است. این دو ناحیه یعنی ناحیه جریان معکوس

می‌باشد. همچنین چون در ابتدای گردابه یاب است سرعت به حالت یکنواختی نرسیده است. بعلاوه دیده می‌شود که جریان کنار دیواره به سمت پایین از دیواره فوقانی هیدروسیکلون به سمت پایین در حال افزایش است که نشان‌دهنده جریان برگشتی ضعیف‌تر در نواحی نزدیک به خروجی پایین می‌باشد.

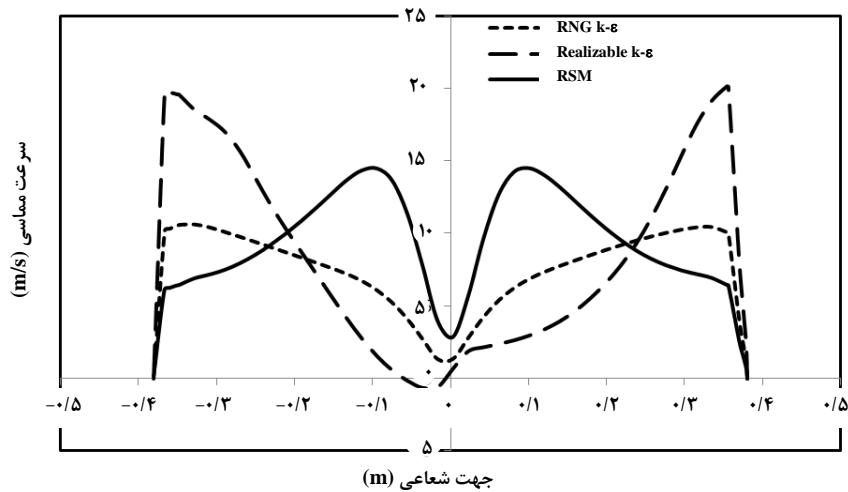
مماسی را از مقدار دو مدل دیگر بیشتر پیش‌بینی کرده است و ماکزیمم سرعت مماسی در نزدیکی دیواره هیدروسیکلون بدست آمده است. همچنین مدل  $RNG (K-\epsilon)$  مقدار سرعت ماکزیمم مماسی را در کنار دیواره کمتر پیش‌بینی می‌کند و میزان این سرعت در این مدل پایین‌تر از دو مدل دیگر می‌باشد. با توجه به شکل فوق مدل  $RSM$  سرعت مماسی ماکزیمم را در نزدیکی محور هیدروسیکلون پیش‌بینی می‌کند که با توجه به مراجع موجود [۷ و ۹] مدل  $RSM$  از نظر کیفی نیمرخ سرعت در داخل هیدروسیکلون را به خوبی پیش‌بینی کرده است. همچنین از آنجا که حالت گردابی در هیدروسیکلون شدید و به طور طبیعی غیر ایزوتروپیک است لذا در اکثر موارد به منظور انجام یک شبیه‌سازی با دقت بالا علی‌رغم هزینه محاسباتی بالاتر از مدل  $RSM$  برای انجام این شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

#### ۴-۴ بررسی تأثیر مدل آشفتگی بر روی بازدهی جداسازی و نیمرخ سرعت

در این مطالعه سه مدل  $RNG (K-\epsilon)$ ،  $Realizable (k-\epsilon)$  و  $RSM$  مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل (۶) نمودار سرعت مماسی بدست آمده در داخل هیدروسیکلون را با استفاده از سه مدل متفاوت  $RNG (K-\epsilon)$ ،  $Realizable (k-\epsilon)$  و  $RSM$  را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار دیده می‌شود که مدل  $Realizable (k-\epsilon)$  مقادیر سرعت



شکل ۵- نمایش مؤلفه سرعت محوری در جهت شعاعی در پنج موقعیت متفاوت محوری نسبت به دیواره بالایی هیدروسیکلون



شکل ۶- نمودار سرعت مماسی بدست آمده در فاصله  $Z=1m$  با استفاده از سه مدل اغتشاش متفاوت

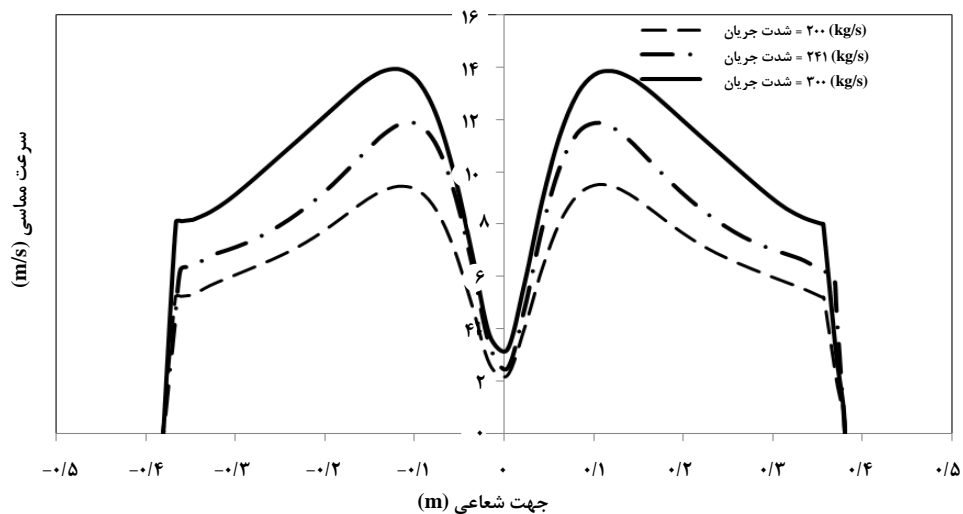
RNG K-ε, Realizable k-ε, RSM و

گسسته است. همان‌طور که از نتایج پیداست تأثیر شدت جریان ورودی بر عملکرد هیدروسیکلون نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان ورودی و در نتیجه افزایش سرعت ورودی، بازدهی جداسازی در داخل هیدروسیکلون افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش شدت جریان ورودی، سرعت مماسی افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش بازدهی هیدروسیکلون می‌شود (شکل (۷)). همچنین این افزایش سبب افزایش گرادیان فشار در داخل هیدروسیکلون می‌گردد. جدول (۴) مقدار بازدهی هیدروسیکلون را در سه شدت جریان متفاوت نشان می‌دهد که همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش شدت جریان، بازدهی به شدت افزایش می‌یابد.

بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که میزان بازدهی برای مدل RSM حدود ۹۲ درصد است که این مقدار برای مدل Realizable (k-ε) حدود ۸۰ درصد و برای مدل RNG k-ε، ۳۰ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار بازدهی عملیاتی در این شرایط ۹۵٪ (شکل ۳) می‌باشد.

#### ۴-۵ تأثیر تغییر شدت جریان ورودی بر عملکرد هیدروسیکلون

شدت جریان ورودی تعیین‌کننده سرعت ورودی و در نتیجه توزیع سرعت در داخل هیدروسیکلون و کارایی آن در جداسازی فاز



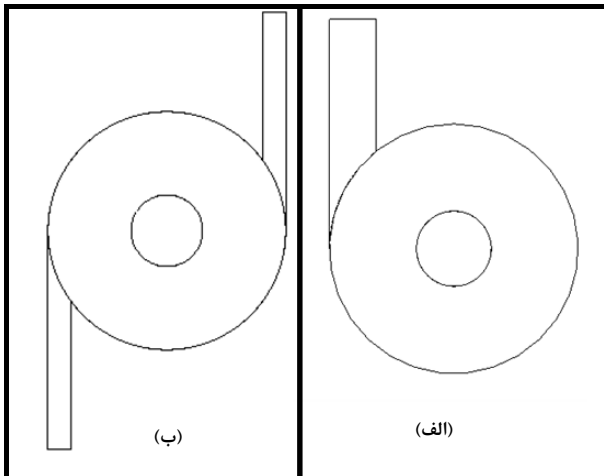
شکل ۷- نمودار سرعت مماسی بر اساس شدت جریان‌های مختلف ورودی



ورودی بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش سرعت و به دنبال آن افزایش سرعت مماسی می‌باشد.

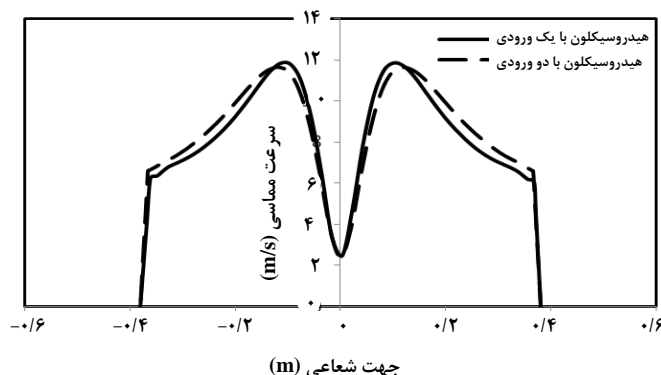
#### ۴-۶ تأثیر تعداد ورودی بر عملکرد هیدروسیکلون

براساس شکل (۸) نمایی از دو مدل مختلف را نشان می‌دهد. در شکل (الف) حالت استاندارد و تک ورودی و در حالت (ب) نمایی از دو ورودی به حالت مماسی و مختلف جهت می‌باشد.



شکل ۸- نمایی از دو مدل با ورودی‌های مختلف (الف = تک ورودی، ب = دو ورودی)

شکل (۹) سرعت مماسی در دو نوع هیدروسیکلون اولی با یک ورودی و دومی با دو ورودی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در هیدروسیکلون با دو ورودی سرعت مماسی در اکثر نقاط بیشتر از سرعت مماسی در هیدروسیکلون با یک ورودی می‌باشد این، به علت تقارن بیشتر جریان در حالت دو ورودی می‌باشد که از ایجاد اغتشاش در جریان برگشتی به سمت سرریز جلوگیری می‌کند.



شکل ۹- نمودار سرعت مماسی در دو نوع هیدروسیکلون در فاصله  $z=1m$

#### جدول ۴- مقدار بازدهی هیدروسیکلون، نسبت افت فشار و نسبت جدایش در سه شدت جریان متفاوت

بازدهی (%)	SR	نسبت افت فشار (PDR)	شدت جریان جرمی (kg/s)
۸۷	۰/۷	۱/۱۵۹	۲۰۰
۹۲	۰/۷۲	۱/۱۰۴	۲۴۱
۹۹	۰/۷۵	۱/۰۶۵	۳۰۰

این جدول همچنین میزان نسبت افت فشار بر اساس معادله (۹) در داخل هیدروسیکلون را نشان می‌دهد:

$$PDR = \frac{P_{in} - P_{overflow}}{P_{in} - P_{underflow}} \quad (9)$$

با توجه به مقادیر بدست آمده دیده می‌شود که با افزایش شدت جریان ورودی نسبت افت فشار کاهش می‌یابد و این به خاطر افزایش فشار ورودی در شدت جریان‌های بالا می‌باشد. کاهش فشار PDR نشان دهنده کاهش فشار سرریز و افزایش فشار ته ریز می‌باشد که این امر باعث می‌گردد که جریان برگشتی بیشتری به سمت سرریز حرکت کرده و نسبت جدایش<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد. که نسبت جدایش عبارت است از نسبت شدت جریان خروجی از سر ریز به شدت جریان ورودی.

$$SR = \frac{Q_{overflow}}{Q_{input}} \quad (10)$$

همچنین جدول فوق نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان

## مراجع

- [۱] امین کولیوند، سید حسن هاشم‌آبادی "بررسی تأثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد هیدروسیکلون جداکننده آب از نفت با استفاده از شبیه سازی CFD" پذیرفته شده جهت چاپ در نشریه علوم و مهندسی جداسازی، (۱۳۹۱).
- [2] Udaya Bhaskar, K., Rama Murthy, Y., Ravi Raju, M., "CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone" *Minerals Engineering* 20, 60–71(2007).
- [3] Wang, B., Yu, A.B., "Numerical study of particle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions", *Minerals Engineering* 19 ,1022–1033(2006).
- [4] Dai, G. Q., Chen, W.M., Li, J.M., Chu, L.Y., "Experimental study of solid-liquid two-phase flow in a hydrocyclone", *Chemical Engineering Journal* 74, 211-216(1999).
- [5] Noroozi, S., Hashemabadi, S.H., "CFD Analysis of Inlet Chamber Body Profile Effects on De-Oiling Hydrocyclone Efficiency", *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 968–977, (2011).
- [6] Noroozi, S., Hashemabadi, S.H., "CFD Simulation of Inlet Design Effects on De-oiling Hydrocyclone Separation Efficiency", *Chemical Engineering & Technology*, 32, No. 12, 1885–1893, (2009).
- [۷] نوروزی سورن، "شبیه سازی CFD هیدروسیکلون جداکننده نفت از آب" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۸).
- [۸] رستمی رضا "شبیه سازی هیدروسیکلون به منظور جداسازی میکروارگانسیم با کمک CFD" پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۷).
- [9] Narasimha, M., Stripriya, R., Banerjee, P.K., "CFD modeling of hydrocyclone prediction of cut size", *Mineral Processing* 75, 53– 68, (2005).

افزایش تعداد ورودی‌ها باعث بهبود عملکرد هیدروسیکلون می‌شود. افزایش بازدهی به این علت است که هرچه تعداد ورودی‌های جریان بیشتر باشد تقارن جریان بیشتر بوده و از اغتشاش‌هایی که باعث برهم خوردن جریان‌ها و پخش مجدد ذرات می‌شود جلوگیری می‌کند. مقدار بازدهی برای حالت تک ورودی در این شبیه سازی حدود ۸۰ درصد است که با افزایش تعداد ورودی‌ها این بازدهی تا ۸۵ درصد افزایش پیدا می‌کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا با استفاده از مدل آشفتگی RSM و مدل چند فازی مخلوط فرایند جدایش کک از آب در هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده با داده‌های عملیاتی مقایسه شد که در اندازه ذرات بزرگ‌تر مقدار خطا حدود ۳ درصد بدست آمد. در قسمت بعد به بررسی تأثیر مدل‌های اغتشاش مختلف بر روی نتایج شبیه‌سازی با چگالی مش بسیار بالا پرداخته شد. در انجام این قسمت از شبیه‌سازی از سه مدل اغتشاش  $k-\epsilon$ ، RNG،  $k-\epsilon$  Realizable و RSM استفاده شد اما در بین این سه مدل، مدل RSM با دقت قابل قبول، بهترین مدل در بین این سه مدل ارزیابی شد. در ادامه، تأثیر تغییر شدت جریان ورودی بر بازدهی هیدروسیکلون مورد ارزیابی قرار گرفت، ملاحظه شد که با افزایش شدت جریان، بازدهی به شدت افزایش و نسبت افت فشار کاهش می‌یابد. در پایان به بررسی تأثیر افزایش تعداد ورودی بر روی بازدهی پرداخته شد که نشان داد با افزایش تعداد ورودی بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد.