

بررسی عملکرد پروور لوله‌ای دو جهته برای کالیبراسیون جریان سنج‌های مورد استفاده در صنعت نفت با استفاده از شبیه سازی CFD

سید حسن هاشم‌آبادی^{۱*}، مجید قمری^۲

^۱ آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت

ایران، نارمک، تهران

^۲ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر

دریافت: ۹۱/۷/۷ پذیرش: ۹۱/۹/۳۰

چکیده

در این مقاله شبیه سازی عملکرد پروور لوله‌ای، در سرعت‌های ۲ و ۳ m/s برای نفت سفید و دو نوع نفت خام به منظور پیش‌بینی میتر فاکتور (ضریب تصحیح جریان سنج)، با استفاده از روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مورد بررسی قرار گرفته است. بدلیل شرط مرزی متحرک، از مش‌های متحرک در میدان جریان استفاده شده است. در مرحله اول شبیه سازی، از لوله‌ی پروور بدون توپک برای داشتن جریان کاملاً توسعه یافته در بخش کالیبراسیون استفاده شده است، سپس شبیه سازی به همراه توپک با حفظ شرایط مرحله اول صورت گرفته است. برای دستیابی به کمترین خطای ممکن، از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای شبیه‌سازی اغتشاش در جریان استفاده شده است. جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی، ضریب اصطکاک بدست آمده برای جریان، با روابط تجربی مقایسه شده است. پروفایل‌های سرعت برای مقطع خروجی لوله و اطراف توپک رسم و مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد در مدل ایجاد شده تغییرات عدد رینولدز تاثیری روی میتر فاکتور بدست آمده ندارد. در این مطالعه توانمندی شبیه سازی‌های CFD در تحلیل فرآیندهایی که نیاز به استفاده از مش دینامیک دارند به خوبی نشان داده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میتوان با هزینه کمی عملکرد پروورها که از اهمیت ویژه‌ای در صنعت برخوردارند و همینطور طراحی آنها، تعیین مکان مناسب آشکارسازها و سایر موارد، از شبیه سازی CFD استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، میتر فاکتور، پروور لوله‌ای، کالیبراسیون

مقدمه

قرار می‌گیرند. در طولانی مدت با فرسایش جریان سنج‌ها و تغییر کیفیت مایعات نفتی و شرایط عملیاتی، دقت جریان سنج‌ها تغییر خواهد کرد. همانطور که کالیبراسیون وسایل اندازه‌گیری طول یا وزن به طور قراردادی با یک وسیله دقیق تر سنجیده می‌شوند، وسایل اندازه‌گیری جریان سیال نیز باید به صورت دوره‌ای برای تأیید دقت، با روشی دقیق و استاندارد مورد سنجش قرار گیرند [۱]. به همین منظور از دستگاه پروور، جهت کالیبره کردن

با توجه به لزوم انتقال مایعات نفتی، اطلاع از میزان جریان مایع منتقل شده و یا نرخ انتقال دبی بسیار حائز اهمیت است. به همین منظور از وسایل اندازه‌گیری جریان برای اندازه‌گیری سرعت یا حجم مایعات استفاده می‌شود. جریان سنج‌ها نیز تنوع زیادی دارند و هر کدام با در نظر گرفتن نوع سیال، سایز لوله و شرایط فیزیکی سیال (دما، فشار، ویسکوزیته و غیره) مورد استفاده

* Hashemabadi@iust.ac.ir

در شرایط عملیاتی رخ داده باشد [۵ و ۲].

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، روی مدلسازی عملکرد پروور لوله‌ای دو جهته با استفاده از شبیه سازی CFD کار خاصی گزارش نشده است. لذا در این مطالعه با استفاده از حل عددی معادلات حاکم شامل بقاء جرم، ممنتوم و معادلات مربوط به اغتشاش و شرایط مرزی مناسب، عملکرد پروور مورد بررسی قرار گرفته است. با این مدل امکان بررسی تاثیر عوامل مختلف عملیاتی بر عملکرد پروور لوله ای دو جهته وجود دارد.

ساختار پروور

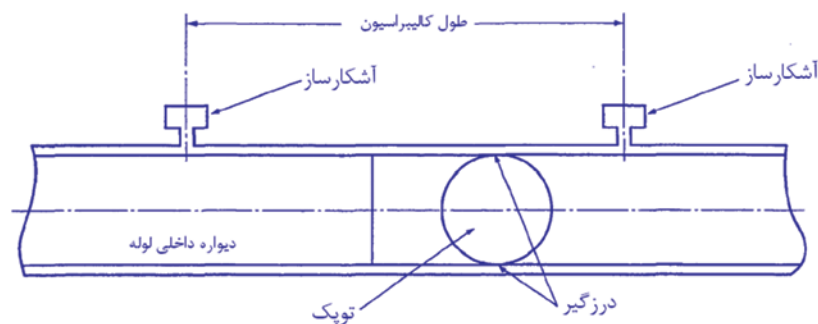
پروور، از لوله‌ای با نوع و جنس استاندارد، که معمولاً فولاد ضدزنگ^۶ با پوشش داخلی و قطر معین می‌باشد تشکیل شده است. در داخل لوله، یک عدد توپک از جنس لاستیک سخت که درون آن با مایع مناسب پر شده قرار گرفته است. قطر توپک برابر قطر داخلی لوله پروور می‌باشد به طوری که توپک با لوله درزگیر شده‌است و توپک می‌تواند در داخل پروور به راحتی حرکت کند. دو آشکارساز برای نشان دادن موقعیت توپک درون لوله قرار گرفته است. زمانیکه توپک در موقع عبور از داخل لوله به محل آشکارساز برسد، باعث قطع و وصل شدن سوئیچ آشکارساز می‌گردد. فاصله بین این دو آشکارساز در شرایط استاندارد، حجم پایه پروور را شامل می‌شود. چون توپک در مسیر لوله حرکت می‌کند، پروور همیشه تمیز و بدون واکس و رسوب می‌باشد. در شکل (۱) ساختار بخشی از پروور مشاهده می‌شود [۲].

تمامی جریان سنج‌ها می‌توان استفاده کرد. وسایل اندازه‌گیری جریان سیالات عموماً به دو روش، جهت صحت عملکرد و تعیین میزان دقت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳ و ۲]:

۱. مقایسه با ظروف استاندارد^۱ (عبور دادن سیال با حجم ثابت از وسیله مورد آزمایش)

۲. مقایسه با وزن استاندارد^۲ (عبور دادن سیال با میزان وزن مشخص از وسیله مورد آزمایش)

عملیات پرووینگ^۳ عبارت است از، عبور همان مقدار مواد نفتی که از جریان سنج می‌گذرد، از دستگاه آزمایش پروور نیز عبور کند و مقایسه حجمی که از جریان سنج عبور نموده با حجمی که پروور نشان می‌دهد. حجم پروور^۴ همان حجم پایه پروور در فشار نسبی صفر و دمای ۶۰ درجه فارنهایت است، که به دقت اندازه‌گیری و تعیین شده است [۴]. پروور لوله‌ای، یکی از انواع پروورها می‌باشد که به طور سری در مسیر دستگاه اندازه‌گیری جریان قرار می‌گیرد. از مزایای پروورهای لوله‌ای^۵ این است که در عملیات پروو کردن، سیستم‌های پیوسته متوقف نمی‌شوند. همچنین نیازی به خارج کردن جریان سنج از سیستم و یا استفاده از جریان سنج اضافی نمی‌باشد و چون در سیستم بسته صورت می‌گیرد، خطای اندازه‌گیری ناشی از تبخیر حاصل نمی‌شود. زمانی نیاز به پروو کردن جریان سنج می‌باشد که جریان سنج برای تعمیر یا بازرسی باز شده باشد، کالیبراسیون جریان سنج تغییر کند و یا نیاز به تغییرات داشته باشد، هر یک از لوازم جانبی جریان سنج تعویض یا تعمیر شده باشند و تغییراتی



شکل ۱: ساختار بخش کالیبراسیون پروور لوله ای

1. Volumetric Calibration
2. Gravimetric Calibration
3. Proving

4. Base Volume
5. Pipe Prover
6. Stainless Steel

عملکرد پروور

معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز^۳ در حالت آشفته بیان می‌شوند. این معادلات برای سیال با لزجت و چگالی ثابت، تراکم‌ناپذیر و جریان ناپایا در سیستم مختصات سه بعدی دکارتی، به صورت روابط (۲) و (۳) قابل بیان می‌باشند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

که U_i مولفه سرعت در جهت X_i ، ρ چگالی سیال، P فشار کل، μ ویسکوزیته سیال و τ_{ij} تانسور تنش رینولدز^۴ بوده که در حالت آشفته بصورت معادله (۴) بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

در این رابطه، k انرژی جنبشی آشفته‌گی، δ_{ij} دلتای کرونکر و μ_t معرف ویسکوزیته آشفته‌گی^۵ می‌باشد. بطور کلی برای حل معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز، تنها نیاز به دانستن تنش رینولدز (τ_{ij}) می‌باشد. این ترم اضافی به واسطه اغتشاش در جریان به وجود آمده است. لذا در این حالت، مسئله حل جریان مغشوش به صورت روشی برای حل این تنش رینولدز که در قالب مدل‌های آشفته‌گی بیان شده‌اند، در خواهد آمد. در کار حاضر از مدل‌های آشفته‌گی standard k- ω و standard k- ϵ استفاده شده است.

ضریب اصطکاک جریان

جهت اعتبار سنجی نتایج برای جریان کاملاً توسعه یافته در لوله پروور، مقدار ضریب اصطکاک با روابط تجربی مقایسه شده است. با اندازه‌گیری اختلاف فشار (ΔP) بین دو مقطع از لوله در بخش جریان کاملاً توسعه یافته، ضریب اصطکاک بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{\Delta P}{L} \frac{D}{\rho V^2 / 2} \quad (5)$$

که D قطر داخلی لوله، L فاصله بین دو مقطع و V سرعت

با قرار گرفتن پروور به طور سری بعد از جریان سنج و بدون نیاز به قطع جریان و خارج کردن جریان سنج از مسیر اصلی، جریان سیال بعد از عبور از جریان سنج بوسیله یک شیر چهار راه از مسیر اصلی وارد پروور می‌شود. قطع نشدن جریان، به جریان سنج اجازه می‌دهد که تحت شرایط عملیاتی ثابت و سرعت یکنواخت جریان کالیبره شود. از آنجایی که توپک در سراسر بخش کالیبراسیون باید دارای سرعت ثابتی باشد، باید فاکتورهای مؤثر در پایداری سرعت جریان مانند طول کافی بین توپک و آشکار ساز، انواع پمپ‌ها در مسیر جریان و پارامترهای عملیاتی رعایت شوند. به همین منظور و برای هواگیری لوله، جریان ورودی در ابتدا بدون توپک از لوله پروور عبور داده می‌شود و با یکنواخت شدن جریان، توپک در لوله رها می‌شود. با وجود درزگیری بین توپک و دیواره داخلی لوله، نیروی سیال باعث سر خوردن و حرکت توپک در سراسر لوله می‌شود بطوری که توپک همیشه با حرکت انتقالی خود در سرعت یکسانی از جریان سیال درون لوله قرار می‌گیرد. بعد از طی مسافتی توپک به سرعت ثابت می‌رسد. با رسیدن توپک به آشکار ساز اول، شمارنده پالس‌های^۱ جریان سنج شروع به شمارش می‌کند و بعد از رسیدن توپک به آشکار ساز دوم، شمارش شمارنده قطع می‌شود. به طوری که در طول مسیر حرکت توپک در بخش کالیبراسیون، تعداد پالس‌هایی که توسط شمارنده ثبت شده است معرف حجم سیال عبوری از جریان سنج می‌باشد. با معرفی میتر فاکتور^۲ که نسبت حجم پایه پروور به حجم عبوری نشان داده شده توسط جریان سنج است، میزان دقت جریان سنج مشخص می‌شود [۲].

$$\text{میتور فاکتور} = \frac{\text{حجم پایه پروور}}{\text{حجم عبوری از جریان سنج}} \quad (1)$$

معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی (بقای جرم) و معادله ناویر استوکس (بقای مومنتم)، که بصورت

1. Pulse
2. Meter Factor
3. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation (RANS)

4. Reynolds Stress Tensor
5. Turbulent Viscosity

سرعت در ورودی، فشار در خروجی، تقارن در مرکز لوله و شرط مرزی عدم لغزش در دیوارها اعمال شده است. تابع تعریف شده برای حرکت توپک، بر اساس قانون دوم نیوتن می‌باشد. بطوری که به ازای هر گام زمانی نیروی وارد بر دیواره توپک محاسبه می‌شود و در رابطه (۷) قرار می‌گیرد. در این رابطه مقدار تغییرات سرعت (dv) در هر گام زمانی محاسبه و به سرعت توپک اضافه می‌شود.

$$dv = \left(\frac{F}{m}\right) * dt \quad (7)$$

که m جرم توپک، dt گام زمانی و F نیروی وارده بر توپک می‌باشند. نیرو در رابطه (۷)، نیروی کلی در امتداد بردار نیرو (در جهت محور لوله) و بر روی ناحیه دیواره توپک می‌باشد که برابر با مجموع ضرب داخلی نیروهای فشار و لزجت بر روی هر سطح در بردار نیرو (در جهت محور لوله) است.

$$\vec{F}_a = \vec{F}_p + \vec{F}_v \quad (8)$$

که \vec{F}_a مؤلفه نیروی کلی، \vec{F}_p بردار نیروی فشار و \vec{F}_v بردار نیروی لزجت می‌باشند [۸]. شبیه‌سازی برای پروور لوله‌ای دوجته^۴ واقع در واحد پرووینگ پتروشیمی بندر امام صورت

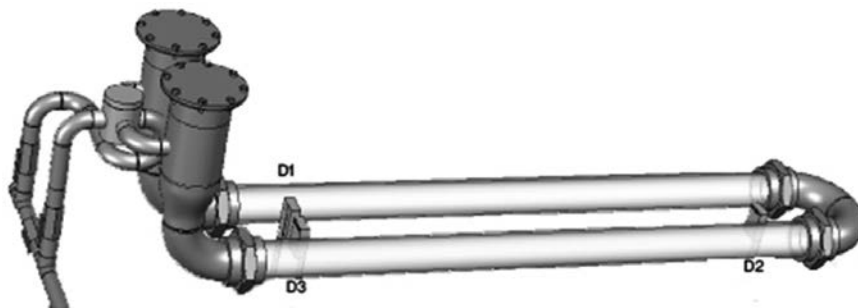
جریان سیال درون لوله است که همراه با ΔP اندازه‌گیری می‌شود. ضریب اصطکاک توسط رابطه تجربی هلند^۱ که دقت بالایی دارد محاسبه می‌شود [۶].

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad Re \geq 2100 \quad (6)$$

که Re عدد رینولدز و ϵ/D زبری نسبی لوله می‌باشد. زبری فولاد ضد زنگ ۰،۰۰۴۸ میلی متر است.

شرایط مرزی و شبیه‌سازی جریان

از هندسه دو بعدی و متقارن استفاده شده است. میدان جریان در سراسر پروور با المان‌های چهارضلعی شبکه بندی شده است و در نواحی نزدیک دیواره و نواحی اطراف توپک، شبکه ریزتر بکار رفته است. چون توپک در میدان جریان حرکت می‌کند باید از روش شرایط مرزی متحرک استفاده کرد، به همین منظور با بکارگیری مش متحرک^۲ و تعریف تابعی برای دیواره توپک، مش‌های میدان جریان بر اساس دیواره توپک حرکت می‌کنند [۷]. مدل مش متحرک از نوع لایه‌ای^۳ می‌باشد، پس استفاده از مش‌های چهارضلعی با طول یکسان ضروری است. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، شرط مرزی



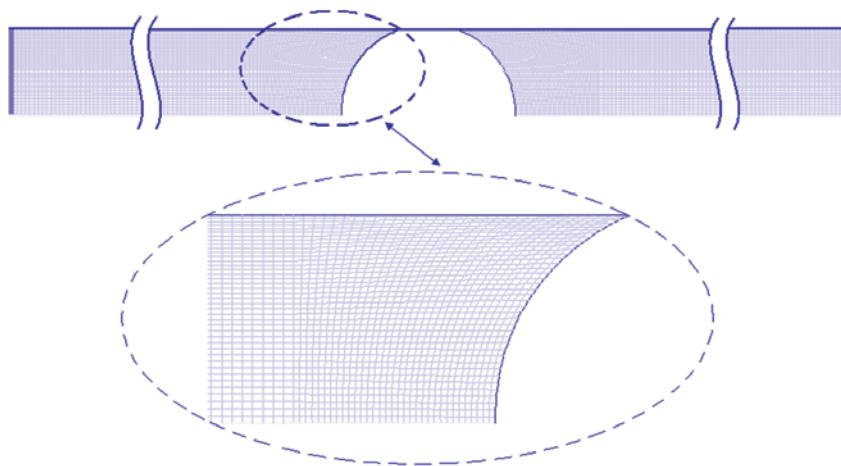
شکل ۳: نمایی از پروور لوله ای دو جهته

1. Haaland
2. Dynamic mesh

3. Layering
4. Bidirectional Pipe Prover

جدول ۱: خواص فیزیکی سیالات در شبیه سازی

	نفت سفید	نفت خام (۳۵,۶ API)	نفت خام (۳۲,۶ API)
ویسکوزیته (cp)	۲,۲	۱۶	۲۱
دانسیته (gr/cm^3)	۰,۸۲	۰,۸۵	۰,۸۶



شکل ۴: شبکه بندی میدان جریان در لوله پروور

معادلات تارسیدن به مقدار 10^{-3} کاهش یافته‌اند. در مرحله اول شبیه سازی، به علت لزج بودن سیالات و چون حرکت توپک در حالت ناپایا و در زمان محدودی صورت می‌گیرد، شبیه‌سازی لوله پروور بدون توپک جهت ایجاد جریان توسعه یافته حل شده است. در مرحله بعدی، شبیه سازی به همراه توپک و با حفظ شرایط میدان جریان حل شده در مرحله اول، در نظر گرفته شده است. همچنین به توپک سرعت اولیه ای معادل سرعت متوسط سطح مقطع لوله در جریان کاملاً توسعه یافته داده شده است. در شکل (۴) شبکه بندی میدان جریان در لوله پروور نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج

به منظور بررسی تأثیر زبری دیواره داخلی لوله، ضریب اصطکاک و همچنین صحت سنجی شبکه بندی میدان جریان، نتایج ضریب اصطکاک CFD برای سه ماده (نفت سفید و دو

گرفته است. این پروور دارای سه آشکارساز و دو حجم پایه می‌باشد. شکل (۳) نمایی از این پروور را نمایش می‌دهد. همچنین شبیه سازی در مقیاس (۱/۱۰) با رعایت آنالیز ابعادی، در لوله‌ای با قطر ۱/۶ اینچ و طول بخش کالیبراسیون ۴۰ اینچ (بین آشکار سازهای ۲ و ۳)، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از سیال‌های نفت سفید و دو نوع نفت سنگین در سرعت‌های ورودی ۳ و ۲ m/s، جهت اعتبار سنجی در نظر گرفته شده‌اند. خواص فیزیکی سیالات در جدول (۱) نشان داده شده اند [۹].

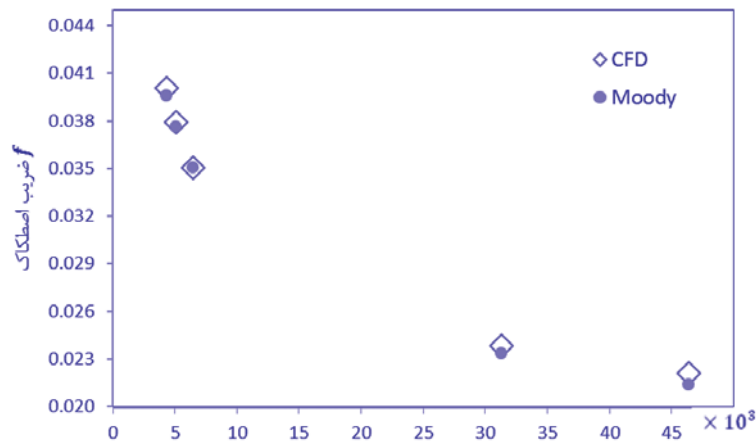
برای هر سه ماده در سرعت‌های متفاوت، از مدل آشفتگی k- ω استفاده شده است. اما برای نفت سفید در سرعت ۳ m/s بعلت رینولدز بالا، از مدل آشفتگی k- ϵ استفاده شده است. الگوریتم سیمپل جهت کوپل کردن ترم‌های سرعت و فشار و روش آپویند مرتبه اول^۲ برای انفصال سازی ترم‌های جابجایی بکار رفته است. باید متذکر شد که برای اطمینان از همگرایی حل، باقیمانده تمام

1. SIMPLE

2. First Order Upwind

جدول ۲: درصد خطای ضریب اصطکاک جریان در رینولدزهای مختلف

Re	نفت سفید		API ۳۵,۶ نفت خام		API ۳۲,۶ نفت خام
	۴۶۰۰۰	۳۱۰۰۰	۶۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰
درصد خطا %	۳,۳۰	۲,۱۳	۰,۱	۱,۳۳	۰,۷۶



شکل ۵: مقایسه ضریب اصطکاک CFD با رابطه تجربی (۶) در رینولدزهای مختلف

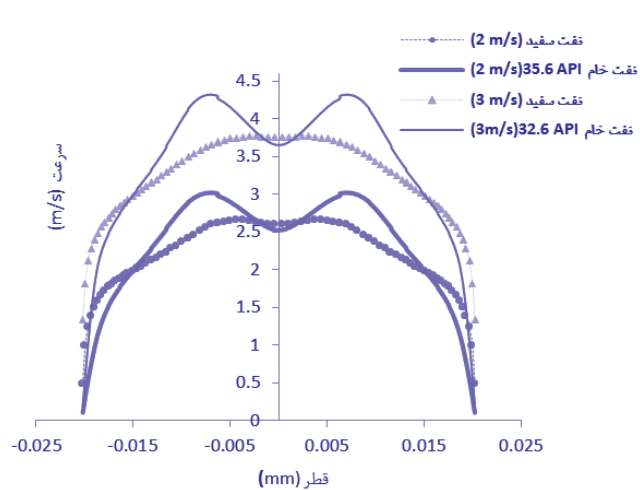
پروور (۲ و ۳ متر بر ثانیه) بدست آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، نفت خام بعلت ویسکوزیته بالایی که دارد باعث افزایش مقاومت ناشی از سیال، در مقابل توپک می‌شود، از طرفی توپک با لوله پروور کاملاً درگیر شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با حرکت توپک، سیال مقابل آن جاروب می‌شود، حال اگر این سیال نفت خام باشد در نزدیکی دیواره پروور ایجاد گرداب کوچکی می‌نماید (شکل ۸ب) و با طی مسافت بیشتر این گرداب بزرگتر شده و در نهایت (حدود ۳ برابر قطر لوله) در مرکز تقارن محو خواهد شد. ولی برای سیال با ویسکوزیته کم (شکل ۸ الف)، مقاومت در مقابل نیروی توپک کاهش می‌یابد و سیال به راحتی از انتهای لوله پروور خارج می‌شود.

در شبیه سازی انجام شده از میتر فاکتور، که نسبت حجم سیال جابجا شده توسط توپک به حجم سیال خروجی از انتهای پروور می‌باشد، جهت بررسی عملکرد پروور استفاده شده است. این میتر فاکتور با فرض ایده‌آل بودن جریان سنج متصل به پروور حاصل شده است، بدین صورت که حجم سیال نشان داده شده

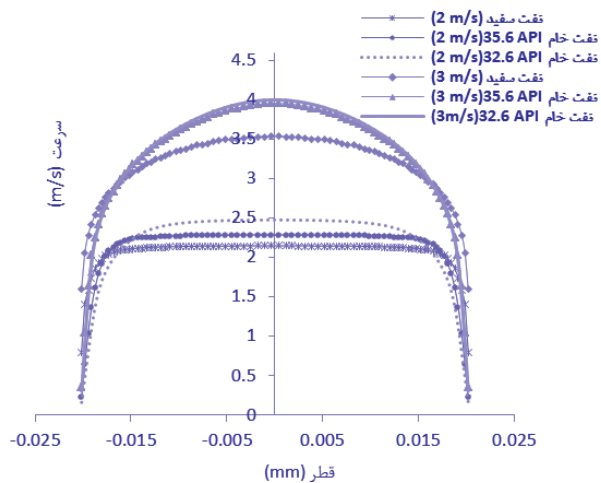
نوع نفت خام) در دو سرعت مختلف محاسبه و با نتایج روابط تجربی مقایسه شده است. این نتایج در شکل (۵)، نشان داده شده است.

جدول (۲)، درصد خطای کمی را برای ضریب اصطکاک نشان می‌دهد، که نشان دهنده دقت بالای شبیه‌سازی برای رینولدزهای مختلف می‌باشد. به طوری که در رینولدزهای پایین، دقت بیشتری دارد.

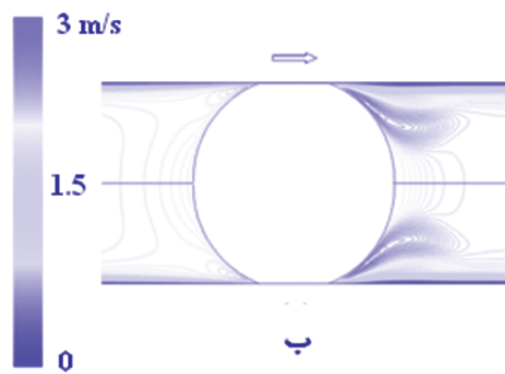
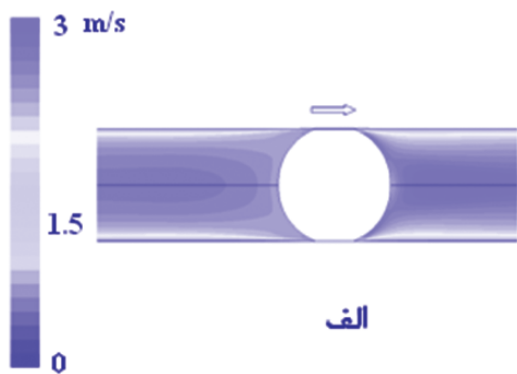
پروفایل‌های سرعت برای نشان دادن اثر ویسکوزیته سیال و سرعت جریان در سطح مقطع خروجی لوله پروور و همچنین در سطح مقطع نزدیک توپک در حال حرکت، برای سرعت‌های متفاوت ورودی و مواد مختلف در شکل‌های ۶ تا ۸ رسم شده‌اند. شکل ۸-الف خطوط جریان در طول لوله پروور و نزدیکی توپک را برای نفت سفید، در ابتدای حرکت توپک نشان می‌دهد. شکل ۸-ب تاثیر افزایش ویسکوزیته بر خطوط جریان، برای نفت خام در نزدیکی توپک را نشان می‌دهد. پروفایل‌های سرعت برای حداقل و حداکثر سرعت، با در نظر گرفتن سرعت استاندارد



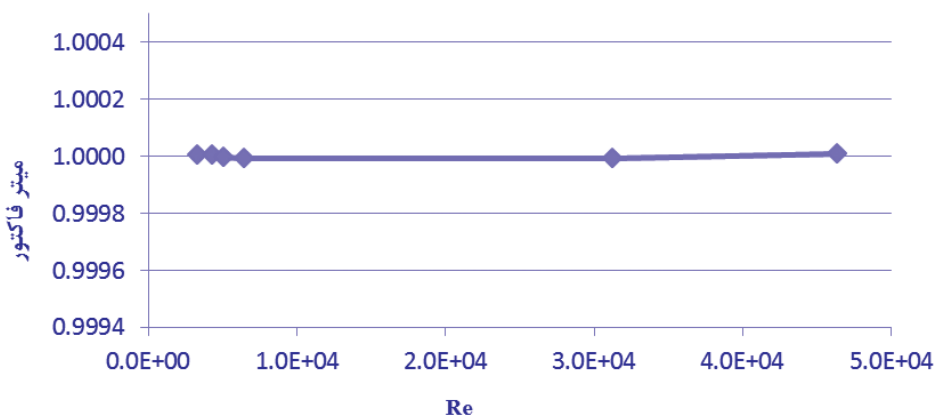
شکل ۷: پروفایل سرعت در سطح مقطع اطراف توپک در حال حرکت



شکل ۶: پروفایل سرعت در سطح مقطع خروجی پروور



شکل ۸: الف) خطوط جریان نفت سفید و ب) خطوط جریان نفت خام برای سرعت ورودی ۳ m/s



شکل ۹: دقت عملکرد پروور در سرعت‌های ۲ و ۳ m/s برای سه سیال

این جریان در ابتدا در نزدیکی دیواره لوله تشکیل می‌شود و با گذشت زمان به مرکز لوله منتقل می‌گردد و سپس جریان یکنواخت خواهد شد. با رها کردن توپک در جریان کاملاً توسعه یافته سرعت حرکت توپک و دبی خروجی در طول مسیر کالیبراسیون مقدار ثابتی است. پروور که در واقع نوعی جریان سنج است در مقایسه با دیگر جریان‌سنج‌ها، با داشتن توپک درزگیر شده به اندازه قطر داخلی لوله، تمام جریان سیال ورودی را به حرکت انتقالی توپک تبدیل می‌کند. در نتیجه میتر فاکتور برای ویسکوزیته و سرعت‌های مختلف سیال در نظر گرفته شده، تغییر چندانی نمی‌کند. تطابق ضرایب اصطکاک جریان بدست آمده با روابط تجربی، نشان دهنده دقت شبیه‌سازی CFD در رینولدزهای مختلف می‌باشد. در رینولدزهای ۴۰۰ تا ۳۱۰۰ مدل آشفتگی استاندارد دقت بیشتری دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میتوان با هزینه کمی عملکرد پروورها که از اهمیت ویژه‌ای در صنعت نفت برخوردارند و همینطور طراحی آنها، تعیین مکان مناسب آشکارسازها و سایر موارد، از شبیه‌سازی CFD استفاده کرد.

توسط جریان سنج همان حجم سیال ورودی به پروور می‌باشد و حجم پایه پروور بعنوان حجم سیال جاروب شده توسط توپک در نظر گرفته شده است. در شکل (۹)، میتر فاکتور برای سه سیال با خواص متفاوت و در دو سرعت ورودی محاسبه شده است. در صورتی که مقدار میتر فاکتور برابر یک شود، یعنی همان مقدار حجمی که توسط توپک جاروب می‌شود از پروور خارج شده است و همچنین حرکت انتقالی توپک، سرعتی برابر با سرعت متوسط سیال در ناحیه کاملاً توسعه یافته دارد. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل (۹)، میتر فاکتور برای سیالات و سرعت‌های مختلف در نظر گرفته شده به عدد یک نزدیک می‌باشند. از آنجایی که در صنعت، میتر فاکتور تا چهار رقم اعشار بکار برده می‌شود، نتایج موجود دقت بالای شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

طبق پروفایل‌های سرعت بدست آمده، برای ویسکوزیته‌های بالا، در نزدیکی توپک جریان چرخشی مشاهده می‌شود، اما

منابع

1. M.C. Rhoades, "Meter Factor Variations and Factors Affecting the Accuracy of Positive Displacement Meters" Journal of Petroleum Technology, Vol. 16, Issue 8, pp. 841-844, 2007.
2. American Petroleum Institute, Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4-Proving Systems, Sections 2 and 8, 2006.
3. M.R. Shafer, F.W. Ruegg, Liquid-Flowmeter Calibration Techniques, Transactions of the ASME, pp. 1369-1375, 1958.
4. S. Wencheng, The method of measuring tank volume with pipe prover calibration device, Journal of Ship Design, 2003.
5. S. Wencheng, Pipe Prover's Calibrating Error induced by Wax Deposition and its Countermeasures, DOI:CNKI:SUN:YQCY.0.1997-08-008, Chinese Journal, 1997.
6. S.E. Haaland, Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow, Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, 105, 89, 1983.
7. L. Li, L. Yong-wei, Y. Jian-xiong, D. Guang-sheng, Research on the Numerical Simulation of Moving Vans' Unsteady Aerodynamic Characteristics with Dynamic Mesh Technique, Shandong University, 2007.
8. FLUENT 6.3.26 Documentation. FLUENT, 2006.
9. P.P. Jakubenas, "Measuring Flow of High-Viscosity Liquids" Pipeline & Gas Journal, Vol. 234, 2007.