

شبیه‌سازی سه‌بعدی صحت‌سنج لوله‌ای نفت خام با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

سیدحسین هاشم‌آبادی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی، دانشکده مهندسی شیمی،

دانشگاه علم و صنعت ایران

Hashemabadi@iust.ac.ir

مجید قمری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی حرکت توپک در صحت‌سنج لوله‌ای، برای سرعت‌های ورودی ۲ تا ۳ متر بر ثانیه سیال نفت خام به‌منظور پیش‌بینی دقت عملکرد صحت‌سنج، با استفاده از روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی، بررسی شده است. شبیه‌سازی سه‌بعدی با شرط مرزی متحرک در حالت ناپایا به‌کار رفته است. سرعت توپک در حالت یکنواخت با استاندارد موجود و همچنین ضریب اصطکاک جریان، جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با روابط تجربی مقایسه شده است، که البته نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد. بررسی عوامل مؤثر بر حرکت توپک برای داشتن سرعت یکنواخت در لوله صحت‌سنج حامل نفت خام صورت گرفته است. در مرحله اول شبیه‌سازی، از لوله صحت‌سنج بدون توپک برای داشتن جریان کاملاً توسعه‌یافته در بخش کالیبراسیون استفاده شده است، سپس شبیه‌سازی به‌همراه توپک با حفظ شرایط مرحله اول صورت گرفته است. نهایتاً پروفیل‌های سرعت برای مقطع خروجی لوله و اطراف توپک رسم و مکان مناسب آشکارساز بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب سنجش، صحت‌سنج لوله‌ای، کالیبراسیون.



مقدمه

جریان‌سنج‌ها^۱ و تغییر کیفیت مایعات نفتی و شرایط عملیاتی، دقت جریان‌سنج‌ها نیز تغییر خواهد کرد. از این‌رو نیاز به سیستم‌های اندازه‌گیری دقیق و اندازه‌گیری صحت‌سنجی^۲ در پایانه‌های صادراتی نفت خام و مشتقات آن ضروری است. همان‌طور که کالیبراسیون وسائل اندازه‌گیری طول یا وزن به‌طور

صادرات نفت خام و محصولات نفتی از پایانه‌ها، سهم بسزایی در تأمین بودجه کشور دارند، که باید از نظر روش سنجش حجم تبادل‌شده و نحوه سنجش میزان مایعات بارگیری از سوی هر کشتی مورد کنکاش بیشتری قرار گیرد. در طولانی مدت، با فرسایش

صحت‌سنجی جریان‌سنج می‌باشد که جریان‌سنج به‌منظور تعمیر یا بازرسی باز شده باشد، کالیبراسیون جریان‌سنج تغییر کند و یا نیاز به تغییرات داشته باشد، هر یک از لوازم جانبی جریان‌سنج تعویض یا تعمیر شده باشند و تغییراتی در شرایط عملیاتی رخ داده باشد [۴].

صحت‌سنج از لوله‌ای با نوع و جنس استاندارد، معمولاً فولاد ضدزنگ با پوشش داخلی و قطر معین - تشکیل شده است. در داخل لوله یک عدد توپک توخالی از جنس لاستیک سخت، که درون آن با مایع مناسبی (معمولاً آب) پر شده، قرار گرفته است. قطر توپک برابر قطر داخلی لوله صحت‌سنج می‌باشد، به طوری که توپک با لوله درزگیر شده است و می‌تواند در داخل صحت‌سنج به راحتی حرکت کند. دو آشکارساز برای نمایش موقعیت توپک درون لوله قرار گرفته است. زمانی که توپک در موقع عبور از داخل لوله به محل آشکارساز برسد، باعث قطع و وصل سوئیچ آشکارساز می‌شود. فاصله میان این دو آشکارساز در شرایط استاندارد، حجم پایه صحت‌سنج را شامل می‌شود. در شکل ۱ نمای از صحت‌سنج لوله‌ای دو جهته^۵ مشاهده می‌شود [۵].

با قرار گرفتن صحت‌سنج به‌طور سری، بعد از جریان‌سنج، جریان سیال از جریان‌سنج به وسیله یک شیر چهارراه از مسیر اصلی وارد صحت‌سنج می‌شود. قطع نشدن جریان، به جریان‌سنج اجازه می‌دهد که تحت شرایط عملیاتی ثابت و سرعت یکنواخت جریان، کالیبره شود. چون توپک در سراسر بخش کالیبراسیون باید دارای سرعت ثابتی باشد، باید فاکتورهای مؤثر در پایداری سرعت جریان مانند طول کافی بین توپک و آشکارساز و پارامترهای عملیاتی رعایت شوند.

قراردادی با یک وسیله دقیق‌تر سنجیده می‌شوند، وسائل اندازه‌گیری جریان سیال نیز باید به صورت دوره‌ای، برای تأیید دقت، با روشی دقیق و استاندارد مورد سنجش قرار گیرند. اطمینان از صحت عملکرد جریان‌سنج، زمانی که بحث فروش سیال عبوری از آن مطرح باشد^۳، بسیار جدی تر می‌شود. مثلاً اگر در یک پایانه صادراتی، جریان‌سنجی یک میلیون بشکه نفت را در روز اندازه‌گیری کنند، با خطای ± 0.2 درصد حدود ۲۰۰۰ بشکه خطا و در سال چیزی حدود ۷۳۰ هزار دلار، $\pm 58/4$ میلیون دلار کم‌فروشی یا ضرر! همین مثال ساده نشان می‌دهد که تعیین و بهبود دقت اندازه‌گیری تا چه اندازه مهم است. به همین منظور از دستگاه صحت‌سنج^۴ جهت کالیبره کردن جریان‌سنج‌ها در واحدهای عملیاتی استفاده می‌شود [۱ و ۲]. با استفاده از شبیه‌سازی، که موضوع این مقاله می‌باشد، می‌توان اثر عوامل گوناگون عملیاتی همچون تغییرات دبی، دما، ویسکوزیته سیال و سایر خواص را بر عملکرد صحت‌سنج بررسی کرد.

به‌طور کلی صحت‌سنجی عبارت است از عبور جریان خروجی جریان‌سنج از دستگاه و مقایسه حجم عبوری از جریان‌سنج با حجمی که صحت‌سنج نشان می‌دهد. حجم پایه صحت‌سنج در فشار نسبی صفر و دمای ۶۰ درجه فارنهایت به دقت اندازه‌گیری و تعیین شده است [۳]. صحت‌سنج لوله‌ای یکی از انواع صحت‌سنج‌هاست که به‌طور سری در مسیر دستگاه اندازه‌گیری جریان قرار می‌گیرد. از مزایای صحت‌سنج‌های لوله‌ای این است که در عملیات صحت‌سنجی، نیازی به خارج کردن جریان‌سنج از سیستم و یا جریان‌سنج اضافی ندارد. زمانی نیاز به



به منظور جلوگیری از صدمه به توپک و آشکارسازها، همچنین با توجه به وجود اصطکاک بین دیواره لوله با توپک، محدوده سرعت توپک طبق استاندارد API حداکثر ۱۰ و حداقل ۱-۰/۵ فوت بر ثانیه می باشد.

به طور کلی معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی (بقای جرم) و معادلات ناویر استوکس (بقای مومنتم)، که به صورت معادلات میانگین گیری شده رینولدز^۷ در حالت آشفته بیان می شوند. این معادلات برای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر در شرایط ناپایا در سیستم مختصات دکارتی سه بعدی، به صورت روابط ۲ و ۳ بیان می شوند:

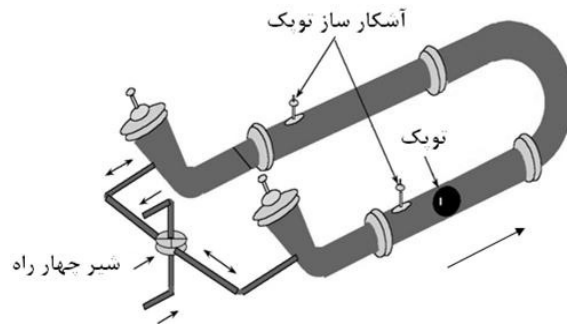
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

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

به طوری که در این معادلات x_1 و x_2 و x_3 به ترتیب محورهای مختصات z و y و x و u_1 و u_2 و u_3 به ترتیب مؤلفه های سرعت در راستای محورهای z و y و x می باشند. ρ چگالی سیال، p فشار کل، μ ویسکوزیته سیال و τ_{ij} تانسور تنش رینولدز^۸ بوده که در حالت آشفته به صورت معادله ۴ بیان می شود:

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

در این رابطه، k انرژی جنبشی ناشی از اغتشاش، δ_{ij} دلتای کرونکر و μ_t معرف ویسکوزیته آشفته^۹ می باشد. به طور کلی برای حل معادلات میانگین گیری شده رینولدز، تنها به دانستن تنش رینولدز نیاز است. 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

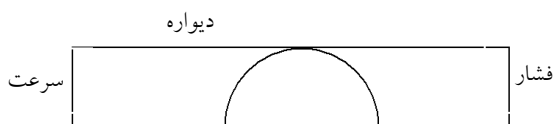


شکل ۱. نمایی از صحت سنج لوله ای دو جهته [۵]

به همین منظور و برای هواگیری لوله، جریان ورودی در ابتدا بدون توپک از لوله صحت سنج عبور داده می شود و با یکنواخت شدن جریان، توپک در لوله رها می شود. با وجود درزگیری بین توپک و دیواره داخلی لوله، تمام نیروی سیال باعث سرخوردن و حرکت توپک در سراسر لوله می شود. توپک شتاب گرفته، از حالت سکون حرکت می کند و پس از طی مسافتی به سرعت ثابت می رسد. چون طول بخش کالیبراسیون باید در سرعت یکنواختی از توپک طی شود، آگاهی از مکان و زمان ثابت شدن سرعت توپک سبب تعیین مکان مناسب اولین آشکارساز و همچنین زمان اتمام عملیات صحت سنجی است. با رسیدن توپک به آشکارساز اول، شمارنده پالس های جریان سنج شروع به شمارش می کند و بعد از رسیدن توپک به آشکارساز دوم، شمارش شمارنده قطع می شود. به طوری که در طول مسیر حرکت توپک در بخش کالیبراسیون، تعداد پالس هایی که توسط شمارنده ثبت شده است معرف حجم سیال عبوری از جریان سنج می باشد. با معرفی ضریب سنجش^۱، که نسبت حجم پایه صحت سنج به حجم عبوری نشان داده شده توسط جریان سنج است، میزان دقت جریان سنج مشخص می شود [۴].

$$\text{ضریب سنجش} = \frac{\text{حجم پایه صحت سنج}}{\text{حجم عبوری از جریان سنج}} \quad (1)$$

میدان جریان حرکت می‌کنند، باید از روش شرایط مرزی متحرک استفاده کرد. به همین منظور با به کارگیری شبکه متحرک^{۱۳} و تعریف تابعی برای دیواره توپک، شبکه‌های میدان جریان براساس دیواره توپک حرکت می‌کنند [۸]. چون توپک طول زیادی از لوله را طی می‌کند، برای جلوگیری از تأثیر حرکت شبکه در کیفیت آن، از قبیل حداکثر و حداقل حجم سلول و عدم تقارن در سلول‌ها، مدل شبکه متحرک از نوع لایه‌ای^{۱۴} استفاده شده است، که به کارگیری شبکه‌های چهاروجهی با حجم کم و یکسان ضروری به نظر می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، از نرم افزار گمبیت^{۱۵} برای تولید هندسه مسئله و اعمال شرایط مرزی استفاده شده است. شرط مرزی سرعت در ورودی، فشار در خروجی، تقارن در مرکز لوله و شرط مرزی عدم لغزش در دیواره‌ها اعمال شده است [۹].



شکل ۲. شرایط مرزی اعمال شده به مدل

طول لوله در بالادست صحت‌سنج ۱۰ برابر قطر، برای قرار گرفتن توپک در جریان کاملاً توسعه‌یافته و همچنین دبی ثابت در خروجی صحت‌سنج در نظر گرفته شده است.

حرکت توپک

حرکت توپک توسط تعادل بین نیرو سیال پشت توپک و نیرو مقاومت سیال جلوی توپک صورت می‌گیرد. این تعادل در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

که در قالب مدل‌های آشفتگی بیان شده‌اند، در خواهد آمد. در کار حاضر از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. با استفاده از نسخه^{۱۶} نرم‌افزار فلونت^{۱۷} این معادلات حاکم بر جریان حل شده است.

ضریب اصطکاک جریان

جهت اعتبارسنجی نتایج برای جریان کاملاً توسعه‌یافته در لوله صحت‌سنج، مقدار ضریب اصطکاک با نمودار مودی^{۱۱} مقایسه شده است. با اندازه‌گیری اختلاف فشار بین دو مقطع از لوله در بخش جریان کاملاً توسعه‌یافته، ضریب اصطکاک به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶].

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

در اینجا D قطر داخلی لوله، L طول توسعه‌یافتگی جریان در لوله و V سرعت جریان سیال درون لوله است که همراه با ΔP اندازه‌گیری می‌شود. ضریب اصطکاک توسط رابطه تجربی هلند^{۱۲} که دقت بالایی با نمودار مودی دارد محاسبه می‌شود [۷].

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

که Re عدد رینولدز و ϵ/D زبری نسبی لوله است. زبری فولاد ضدزنگ ۰/۰۰۴۸ میلی‌متر است.

شرایط مرزی و شبیه‌سازی جریان

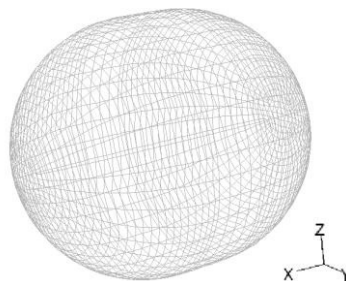
برای شبیه‌سازی جریان از هندسه سه‌بعدی و متقارن استفاده شده است. میدان جریان در سراسر صحت‌سنج با المان‌های حجمی چهار وجهی شبکه بندی شده و در نواحی نزدیک دیواره و اطراف توپک، شبکه ریزتر به کار رفته است. چون توپک در

است. نیرو در رابطه ۹، نیروی کلی در امتداد بردار نیرو (در جهت محور لوله) و بر روی دو طرف ناحیه دیواره توپک می باشد که برابر با مجموع ضرب داخلی نیروهای فشار و لزجت بر روی هر سطح در بردار نیرو (در جهت محور لوله) است.

$$\vec{F}_a = \vec{a} \cdot \vec{F}_p + \vec{a} \cdot \vec{F}_v \quad (12)$$

در اینجا، \vec{a} بردار معین، \vec{F}_p بردار نیروی فشار، \vec{F}_v بردار نیروی ویسکوز، \vec{F}_a مؤلفه نیروی کلی، $\vec{a} \cdot \vec{F}_p$ مؤلفه نیروی فشار و $\vec{a} \cdot \vec{F}_v$ مؤلفه نیروی لزجت می باشند [۱۰].

در این مقاله، شبیه سازی صحت سنج لوله ای دو جهته واقع در واحد صحت سنجی پتروشیمی بندر امام انجام شده است. این صحت سنج دارای سه آشکارساز و دو حجم پایه است. شبیه سازی در مقیاس یک هشتم در لوله ای با قطر ۲ اینچ و طول بخش کالیبراسیون ۴۰ اینچ (بین آشکارسازهای ۲ و ۳)، بررسی شده است. بدین منظور از نفت خام با ویسکوزیته ۲۲ سانتی پویز و دانسیته ۰/۸۲ گرم بر سانتی متر مکعب، در سرعت های ورودی ۲ تا ۳ متر بر ثانیه جهت اعتبارسنجی در نظر گرفته شده اند. الگوریتم سیمپل جهت حل هم زمان سرعت و فشار و روش آپویند مرتبه اول برای انفصال سازی ترم های جابه جایی به کار رفته است. در مرحله اول شبیه سازی، به علت لزج بودن سیالات و حرکت توپک در حالت ناپایا و زمان محدود، شبیه سازی جریان در لوله صحت سنج 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. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با استفاده از نرم افزار گمبیت شبکه بندی میدان جریان در لوله صحت سنج و اطراف توپک اعمال شده است.



شکل ۳. نمای ایستایی از توپک

نمای ایستایی فوق را می توان به بیان ریاضی و بر اساس قانون دوم نیوتن به صورت فرمول زیر در آورد [۱۰].

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (F) \quad (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (8)$$

به طوری که در این روابط v سرعت توپک، m جرم توپک و F نیروی سیال است. معادلات ۷ و ۸ را می توان با استفاده از مدل صریح اولر^{۱۶} همانند زیر بیان کرد [۱۱].

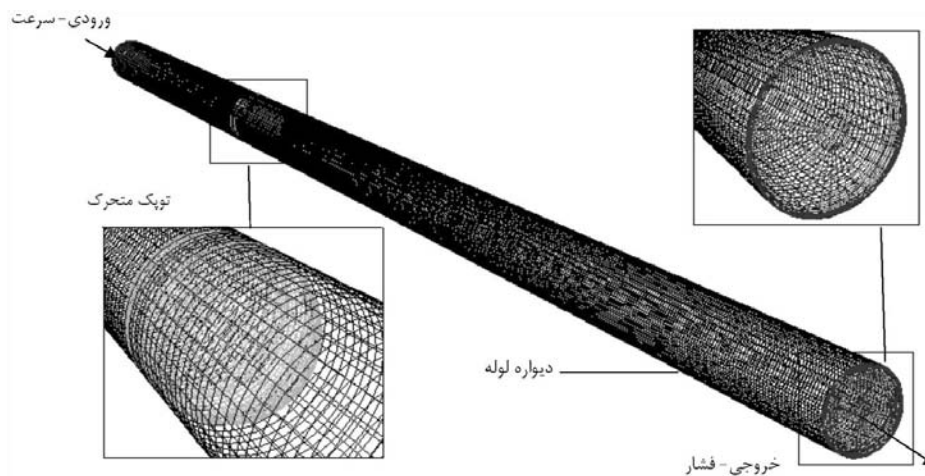
$$\Delta v = \frac{1}{m} (F) \Delta t \quad (9)$$

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v \quad (10)$$

$$x_{i+1} = x_i + \Delta v \Delta t \quad (11)$$

در اینجا، زیر نویس i گام زمان قدیم، زیر نویس $i + 1$ گام زمانی جدید و Δt گام زمانی است. بنابراین ابتدا معادلات حاکم بر جریان سیال حل شده، سپس نیروی فشار و ویسکوزیته وارد شده بر توپک مشخص می شود. با قرار گرفتن بر ایند نیروها در معادله ۹، ابتدا سرعت و سپس مقدار حرکت توپک ($\Delta x = v \Delta t$) محاسبه می شود. شبکه توپک از ۱۲۳۲ گره^{۱۷} و ۱۲۰۰ سطح در پشت توپک تشکیل شده است و همین مقادیر برای جلوی توپک اعمال شده است. نیرو مورد نظر از مجموع نیروهای وارده بر این سطوح تشکیل شده





شکل ۴. شبکه‌بندی میدان جریان در لوله صحت‌سنج

جدول ۱. درصد خطای ضریب اصطکاک جریان در رینولدزهای گوناگون

Re	5×10^4	4×10^4	3×10^4
f (Moody)	۰/۰۲۰۹۹	۰/۰۲۱۹	۰/۰۲۳۰
f (CFD)	۰/۰۲۱۰۲	۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۳۸
درصد خطا	۰/۱۴	۲/۵۸	۳/۵۰

تجزیه و تحلیل نتایج

به‌منظور بررسی تأثیر زبری دیواره داخلی لوله، ضریب اصطکاک و همچنین صحت‌سنجی شبکه‌بندی میدان جریان، نتایج ضریب اصطکاک به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در ۳ سرعت گوناگون برای نفت خام محاسبه و با نتایج حاصل از رابطه تجربی (معادله ۶) مقایسه شده است. این نتایج در جدول ۱، نشان‌دهنده درصد خطای کمی برای ضریب اصطکاک است.

با افزایش سرعت ورودی، نیروی وارد بر پشت توپک افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با حرکت توپک از حالت سکون، این نیرو با گذشت زمان کاهش خواهد یافت. نیروی مقاومت سیال در جلوی توپک که در مقابل نیروی وارد بر پشت توپک مقدار کوچکی است، به‌طور تناوبی تغییر می‌کند تا به مقداری ثابت برسد. براین‌د نیروهای وارد بر توپک در شکل ۵ نمایش داده شده است.

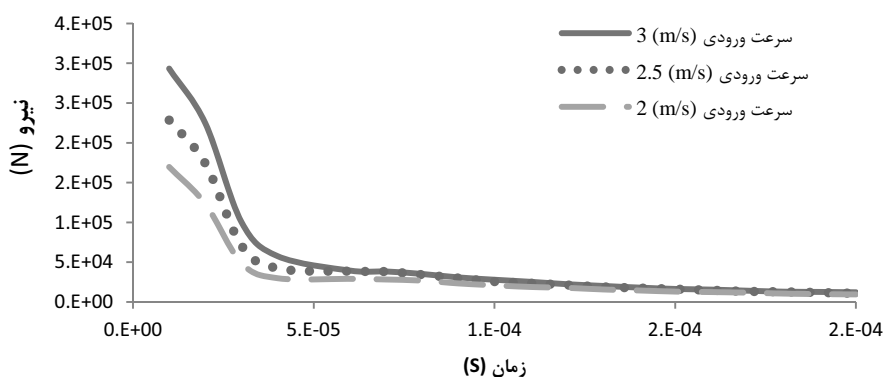
البته باید توجه داشت که بیشتر نیروی وارد بر توپک، نیروی فشاری سیال است و نیروی لزجت مقدار کوچکی می‌باشد. با افزایش سرعت ورودی، فشار بیشتری بر جسم وارد شده و با حرکت توپک این فشار کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با حرکت توپک از حالت سکون اختلاف فشار و براین‌د نیروی دو سر توپک کاهش یافته، تا اینکه مقدارشان ثابت می‌شود و در این حالت توپک با سرعت یکنواختی حرکت می‌کند. چون در طول زمان عملیات صحت‌سنجی، توپک باید در سرعت ثابتی طول بخش کالیبراسیون را طی کند، آگاهی از سرعت توپک در طول لوله و همچنین مکان ثابت‌شدن سرعت توپک برای تشخیص مکان آشکارساز حائز اهمیت می‌باشد. به‌همین منظور در شکل‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب تغییرات سرعت توپک در ابتدای حرکت و طول

حجم جاروب شده توسط حرکت توپک، نشان دهنده مقدار دبی خروجی از صحت سنج است که برای سرعت ثابت توپک این مقدار به دبی ورودی می رسد. شکل ۸، دبی حجمی در ورودی و خروجی صحت سنج را بر حسب زمان برای سرعت ورودی ۳ متر بر ثانیه نشان می دهد.

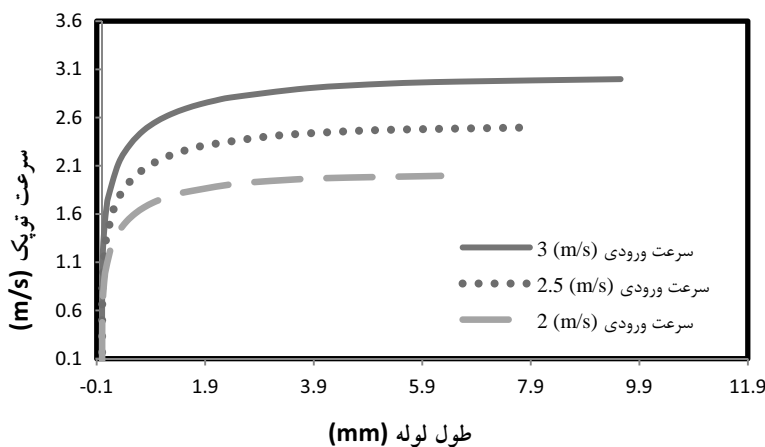
پروفیل های سرعت و فشار برای نمایش اثر ویسکوزیته سیال و سرعت جریان در سطح مقطع خروجی لوله صحت سنج و همچنین در سطح مقطع نزدیک توپک در حال حرکت، برای سرعت ورودی ۳ متر بر ثانیه در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده اند. این پروفیل ها در طول زمان حرکت توپک در بخش کالیبراسون تغییری نمی کنند.

حرکت توپک در ۳ سرعت ورودی متفاوت رسم شده است. به طوری که از این مکان به بعد سرعت توپک ثابت خواهد بود. با افزایش سرعت ورودی سیال، طول بیشتری از لوله برای قرار گرفتن آشکارساز اول لازم است. مکان آشکارساز دوم که حجم پایه صحت سنج را مشخص می کند، وابسته به تعداد پالس های زده شده در واحد زمان، از جریان سنج متصل به صحت سنج می باشد که توسط استاندارد تعیین می شود.

شکل ۸ مقایسه سرعت توپک با استاندارد را در سرعت های ورودی متفاوت نشان می دهد. به طوری که از زمان ۰/۰۰۳ ثانیه به بعد، توپک یکنواختی سرعتش را حفظ می کند.

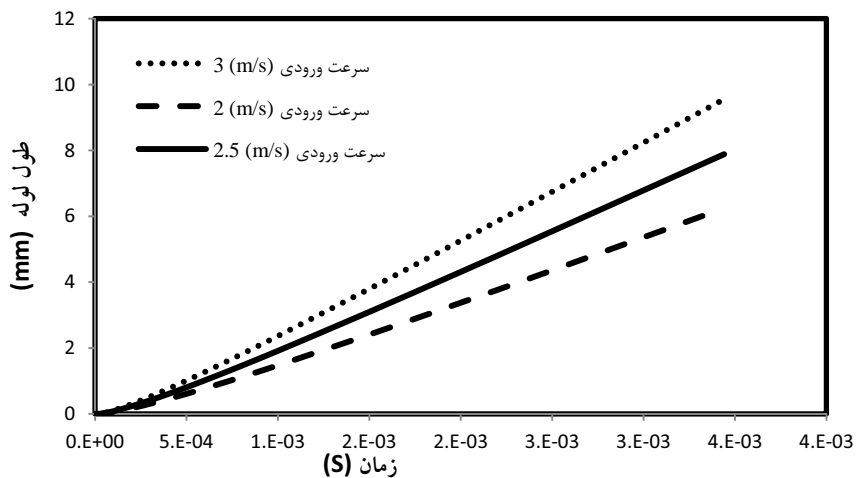


شکل ۵. برآیند نیروهای وارد بر توپک در سرعت های ورودی متفاوت

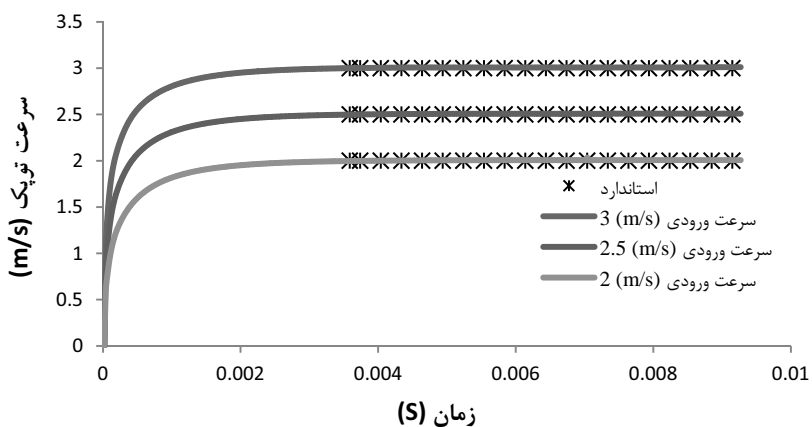


شکل ۶. تغییرات سرعت توپک در طول لوله صحت سنج

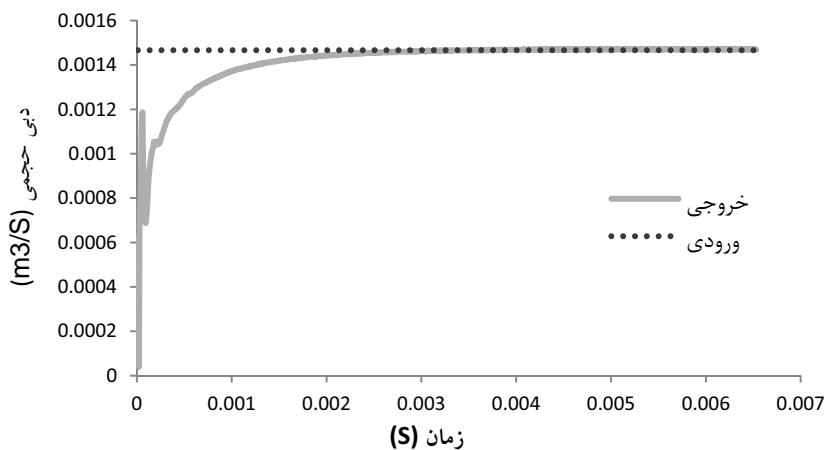




شکل ۷. مکان توپک برحسب زمان



شکل ۸. مقایسه تغییرات سرعت توپک با زمان به دست آمده از شبیه سازی و مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد



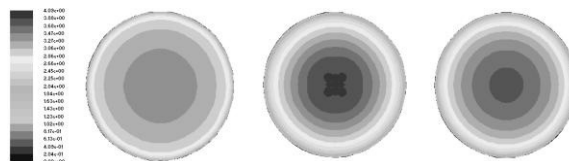
شکل ۹. دبی حجمی در ورودی و خروجی صحت سنج بر حسب زمان



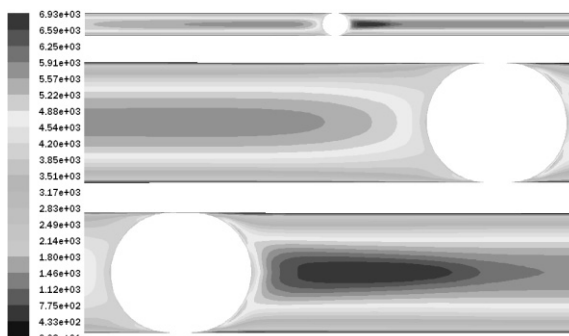
در صورتی که مقدار دقت عملکرد صحت‌سنج برابر با ۱ شود؛ یعنی همان مقدار حجمی که توسط توپک جاروب می‌شود از صحت‌سنج نیز خارج شده است و همچنین طبق استاندارد حرکت انتقالی توپک، سرعتی برابر با سرعت متوسط سیال در ناحیه کاملاً توسعه یافته دارد. براساس نتایج به دست آمده در شکل ۱۲، دقت عملکرد صحت‌سنج برای دبی‌های در نظر گرفته شده تا چهار رقم اعشار تأیید می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای بررسی عملکرد صحت‌سنج لوله‌ای نفت خام مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی ارائه شده است. با حل معادلات پیوستگی و حرکت، استفاده از شبکه متحرک پروفایل سرعت حرکت توپک در صحت‌سنج مورد بحث قرار گرفته است. طبق پروفیل‌های سرعت و فشار به دست آمده، با رهاکردن توپک در جریان کاملاً توسعه یافته، حرکت توپک و دبی خروجی در طول مسیر کالیبراسیون مقدار ثابتی است. صحت‌سنج در مقایسه با دیگر جریان‌سنج‌ها، با

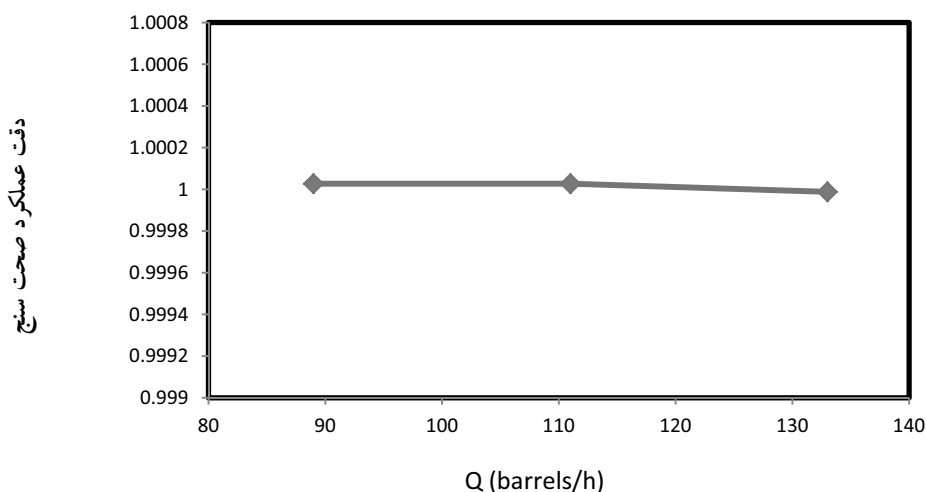


شکل ۱۰. پروفیل سرعت در سطح مقطع الف) قبل از توپک، ب) بعد از توپک و ج) خروجی صحت‌سنج



شکل ۱۱. پروفیل فشار در طول لوله و اطراف توپک

برای نمایش دقت شبیه‌سازی عملکرد صحت‌سنج، از نسبت حجم سیال جابه‌جا شده توسط توپک به حجم سیال خروجی از انتهای صحت‌سنج استفاده شده است. در شکل ۱۲ دقت عملکرد صحت‌سنج برای نفت خام در دبی‌های ورودی متفاوت ارائه شده است.



شکل ۱۲. دقت عملکرد صحت‌سنج در دبی‌های ورودی متفاوت

- [7] S.E. Haaland, Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow, Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, 105(1), 89-90, 1983.
- [8] L. Li, L. Yong-Wei, Research on the Numerical Simulation of Moving Vans' Unsteady Aerodynamic Characteristics with Dynamic Mesh Technique, 8th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD), France, 2008.
- [9] FLUENT 6.3.26 Documentation. FLUENT, 2006.
- [10] C. Chuen-Yen, An Introduction to Computational Fluid Mechanics by Example, Seminole Publishing Co., 1981.
- [11] J. H. Lee, Y. H. Choi, Y. W. Lee, Computational Analysis of Flow Characteristics of a PCV Valve, Transaction of KSAE, 13(4), 66-73, 2005.

داشتن توپک درزگیر شده به اندازه قطر داخلی لوله، تمام نیرو جریان ورودی را به حرکت انتقالی توپک تبدیل می‌کند. پس سرعت توپک برابر سرعت جریان ورودی شده و دبی خروجی برابر حجم جاروب شده توسط توپک خواهد بود. تطابق مقادیر سرعت یکنواخت توپک با استاندارد و همچنین ضرایب اصطکاک جریان به دست آمده با روابط تجربی، نشان دهنده دقت مدل شبیه سازی و شبکه ایجاد شده است. با استفاده از نتایج شبیه سازی می توان مکان نصب آشکارسازها را تعیین و دامنه عملکرد مطمئن صحت سنج را مشخص کرد. جنبه دیگر مقاله حاضر چگونگی شبیه سازی مسائلی است که دارای مش متحرک هستند. نتایج این مقاله نشان داد که می توان با دقت خوبی مسائل جریانی از این دست را با نرم افزار فلوئنت شبیه سازی کرد.

پی نوشت

1. Flow Meter
2. Proving
3. Custody Transfer and Flow Measurement
4. Prover
5. Bidirectional
6. Meter Factor
7. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation (RANS)
8. Reynolds Stress Tensor
9. Turbulent Viscosity
10. Fluent Software
11. Moody Diagram
12. Haaland
13. Dynamic Mesh
14. Layering
15. Gambit Software
16. Euler's explicit
17. Node

★ ★ ★

مراجع

- [1] R. H. Pfrehm, The Calibrated Pipe Prover- An Improved Method For Calibrating Meters In LACT Units, *Journal of Petroleum Technology*, SPE 343-PA, 14(10), 1087-1090, 1962.
- [2] Measurement Canada, Guidelines for the Calibration and Certification of Volumetric Standards Part 3: Calibration of Pipe Prover, 2008.
- [3] S. Wencheng, the Method of Measuring Tank Volume with Pipe Prover Calibration Device, *Journal of Ship Design*, 1, 78-80, 2003.
- [4] American Petroleum Institute (API), Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4- Proving Systems, Section 2 And 8, 2006.
- [5] Y.F. Basrawi, Crude and Hydrocarbon Measurement Technologies, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 56808- MS, USA, 1999.
- [6] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 6th Edition, McGraw-Hill, 2009.

