

شبیه‌سازی جریان سیال اطراف پیگ متحرک در لوله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

رضا کاوه*، محمدرضا نظری و محمد سفید

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۱۶

چکیده

از خطوط لوله برای انتقال انواع محصولات، خصوصاً در صنعت نفت و گاز استفاده می‌شود. برای داشتن عملکرد مؤثر، خطوط لوله باید در بازه‌های زمانی مشخص پیگردانی شوند. پیگ‌ها باید در سرعت ثابتی حرکت کنند و سرعت کنترل نشده و فزاینده پیگ می‌تواند بسیار خطرناک باشد. برای کنترل سرعت پیگ و مطالعه رفتار دینامیکی آن و همچنین تخمین متغیرهای مرتبط با حرکت پیگ، مطالعه رفتار سیال در اطراف پیگ ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، جریان سیال اطراف پیگ متحرک در لوله به کمک نرم‌افزار تجاری قدرتمند ANSYS CFX شبیه‌سازی شده است. در ابتدا نیروی وارد بر پیگ ساکن برای بای‌پس‌های مختلف به دست آمده و با نتایج موجود مقایسه شده است که انطباق خوبی را نشان می‌دهد. در ادامه، برای حرکت شبکه اطراف پیگ متحرک در لوله، از روش شبکه‌بندی مجدد در تکنیک شبکه دینامیک استفاده شده است. میدان جریان بالادست و پایین‌دست پیگ و همچنین سرعت، شتاب و موقعیت پیگ در زمان‌های مختلف به دست آمده است. بدین منظور، معادلات ناویر-استوکس و بقای جرم برای جریان سیال لزج تراکم‌ناپذیر حل و از مدل تلاطم $k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی توربولانس استفاده شده است. در بررسی حرکت پیگ داخل لوله نتایج نشان داده‌اند که ابتدا، نیروی وارد بر پیگ از طرف سیال زیاد است و با گذشت زمان به دلیل کاهش نیروی وارد بر پیگ، شتاب پیگ به سمت صفر میل می‌کند و سرعت پیگ ثابت می‌گردد. همچنین، با گذشت زمان و با جلو رفتن پیگ، به علت کاهش شتاب پیگ، تغییرات سرعت و فشار در طول لوله کاهش می‌یابند به طوری که شرایط جریان به سمت حالت دائم پیش می‌رود. در بررسی تأثیر وجود پیگ بر سرعت جریان در طول لوله نیز مشخص می‌گردد که بیشترین تأثیر وجود پیگ بر روی سرعت جریان خروجی پیگ است و در فواصل دورتر از پیگ تغییرات سرعت کمتر هستند.

کلمات کلیدی: پیگ، خط لوله، میدان جریان، جسم صلب، شبکه دینامیک، دینامیک محاسبات سیالات

مقدمه

می‌کنند. آژودو^۵ و همکارانش در سال ۱۹۹۶ حرکت مکانیکی پیگ را در خطوط لوله افقی بررسی کردند [۳]. در این تحقیق، سیال تک‌فازی حالت پایا و تراکم‌ناپذیر فرض شده است. همچنین مدل هیدرودینامیکی جریان بای‌پس^۶ گذرنده از پیگ تحلیل و ساده شده است. نیکله^۷ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ به بررسی و شبیه‌سازی حرکت پیگ دارای جریان بای‌پس داخل لوله‌های گاز و مایع مستقیم پرداخته‌اند [۴].

معادلات بقای جرم، بقای مومنتم و حالت برای حرکت سیال تراکم‌پذیر درون لوله در نظر گرفته و با معادلات تعادل پیگ و معادله جریان بای‌پس، که از داخل بدنه پیگ می‌گذرد، ترکیب شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق برای سه حالت حرکت پیگ درون لوله شامل حرکت پیگ برای آب‌زدایی یا خشک کردن، حرکت پیگ درون خطوط لوله گاز و حرکت پیگ درون خطوط لوله با وجود جریان بای‌پس نشان داده شده‌اند. نگوین^۸ و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۱، به بررسی و تحلیل دینامیکی حرکت پیگ داخل لوله‌های گاز مستقیم و افقی پرداخته‌اند [۵]. برای تحلیل گاز ایده‌آل و جریان تک‌فازی و یک‌بعدی لوله افقی با قطر ثابت، ضریب اصطکاک تابعی از زبری دیواره لوله و عدد رینولدز و جریان گاز غیردائم و تراکم‌پذیر فرض شده است. این تحقیق به بررسی رفتار مشخصه‌های دینامیکی (جریان سیال گاز، موقعیت و سرعت پیگ) می‌پردازد. این مرجع، سرعت مناسب پیگ در عملیات پیگرانی را، برای لوله‌های دارای سیال تراکم‌پذیر ۱ تا ۵ m/s و برای لوله‌های دارای سیال تراکم‌ناپذیر ۲ تا ۷ m/s بیان کرده است.

خطوط لوله متداول‌ترین و ایمن‌ترین روش برای انتقال فرآورده‌های نفت و گاز هستند. با گذشت زمان ذرات معلق در سیالات عبوری از داخل لوله به‌صورت رسوب به دیواره لوله می‌چسبند و باعث بالا رفتن ضریب اصطکاک بین سطح لوله و سیال و کاهش قطر داخلی لوله و در نتیجه افت دبی جریان عبوری از آن و در نهایت اتلاف انرژی می‌شوند. واکس‌ها، میعانات گازی، آب، براده‌ها، ذرات شن و دیگر ذرات خارجی رسوب‌کرده بر دیواره خط لوله همگی می‌توانند بر ظرفیت، عملکرد و یکپارچگی سیستم‌های خط لوله هیدروکربنی تأثیر منفی بگذارند. همچنین، دیواره‌های خطوط لوله، پس از چند سال کارکرد، دچار آسیب‌های فیزیکی نظیر تورفتگی و خوردگی‌های داخلی می‌شوند.

این خوردگی‌ها می‌توانند باعث تخریب خط لوله و کاهش عمر و راندمان هیدرولیکی و صافی سطح لوله شوند و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی و انتقال سیال را افزایش دهند. پیگ^۱ وسیله‌ای است که در طول لوله حرکت می‌کند و عملیات خدماتی و یا بازرسی را انجام می‌دهد. پیگرانی^۲ منجر به تخلیه خطوط لوله از مایع، کاهش افت فشار کلی و افزایش بازده جریان می‌شود.

اولین تحقیقات در زمینه عملیات پیگرانی و به دست آوردن معادلات حرکت مربوط به آن را مک‌دونالد و بیکر^۳ در سال ۱۹۶۴ انجام دادند [۱]. در این تحقیقات بیان شده که پیگرانی لوله می‌تواند کارایی انتقال سیال را ۳۰ تا ۷۰٪ افزایش دهد. کوهدا^۴ و همکارانش در سال ۱۹۸۸ اولین مدل شبیه‌سازی پیگرانی را بر پایه جریان دوفازی فرمول‌بندی کردند [۲].

نتایج معادلات با روش عددی اختلاف محدود و با استفاده از دو سیستم مختصات ثابت و متحرک جمع‌بندی شده‌اند. نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی‌شده با حل عددی به‌خوبی برابری

1. Pipeline Inspection Gauge (pig)

2. Pigging

3. McDonald and Baker

4. Kohda

5. Azevedo

6. By Pass

7. Nieckele

8. Nguyen

استخراج معادلات به کار رفته اند. همچنین در این تحقیق سرعت سیال ثابت در نظر گرفته شده است. در سال ۱۳۸۶ هجری شمسی، داوودیان شبیه‌سازی حرکت پیگ در لوله‌های گاز و مایع را انجام داد [۱۰]. در این تحقیق خط لوله مستقیم و دارای زاویه با افق، سیال یک‌بعدی و تک‌فاز و سطح مقطع لوله ثابت فرض شده است. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به دست آمده از خط لوله آقاجری به مارون مقایسه شدند.

در سال ۲۰۱۱ رامیرز^۲ و همکارانش، برای به حداقل رساندن نیرویی که از طرف سیال بر پیگ ساکن وارد می‌شود و همچنین حداکثر کردن حجم پیگ به منظور قرار دادن وسایلی مانند باتری، بردهای الکتریکی و غیره، از مدل‌های پیگ با بای‌پس‌های مختلف استفاده کردند [۱۱]. در این تحقیق عنوان شده که اگر قطره‌های ورودی و خروجی بای‌پس یکسان باشند، تغییرات شدید جریان در جلو و پشت پیگ رخ می‌دهند و برای جلوگیری از این پدیده از سه مدل پیگ پخ‌دار، پیگ نازل و پیگ سهموی استفاده شده و نیروی وارد بر پیگ از طرف سیال برای هر سه مدل به دست آمده است. با توجه به مطالعات فوق، جزئیات جریان پیگ متحرک در مطالعات گذشته مدل‌سازی نشده است. در این تحقیق جریان حول پیگ ساکن و متحرک با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی ANSYS CFX شبیه‌سازی و جزئیات جریان برای سرعت، فشار و نیرو ارائه شده‌اند.

حل عددی در CFX

نرم‌افزار ANSYS CFX از یک روش ترکیبی به نام حجم محدود مبتنی بر المان^۳ استفاده و به منظور حل معادلات، حوزه سیال را به مجموعه محدودی از حجم‌های کنترل، که شبکه^۴ نامیده می‌شود، گسسته می‌کند.

شبیه‌سازی عددی حرکت پیگ با جریان بای‌پس در خطوط لوله گاز را حسینعلی پور و همکارانش در سال ۲۰۰۷ ارائه کرده‌اند [۶]. مشابه مرجع ۴، معادلات پیوستگی، مومنتوم خطی و حالت برای جریان گاز تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. سپس این معادلات به همراه معادله پیگ و جریان بای‌پس از روش تفاضل محدود با شبکه‌بندی متحرک و متناوب^۱ حل شده‌اند. گاز به هر دو صورت ایده‌آل و حقیقی مدل شده است. با مقایسه این نتایج مشخص می‌شود که رفتار دینامیکی پیگ در هر دو حالت مشابه است و تفاوت چندانی ندارد. بنابراین با توجه به افزایش زیاد حجم محاسبات در مدل گاز حقیقی، فرض گاز ایده‌آل عاقلانه و مقرون به صرفه‌تر است. در سال ۲۰۰۹ اسماعیل‌زاده و همکارانش مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عملیات پیگ‌رانی را در خطوط لوله گاز و مایع توسط انجام دادند [۷]. در این تحقیق خطوط لوله مستقیم و دارای زاویه با افق؛ جریان گاز تک‌فاز، یک‌بعدی و غیر هم‌دمای ولی جریان مایع تک‌فاز و هم‌دمای فرض شده است. شبیه‌سازی حرکت پیگ در خطوط لوله گاز و مایع با دبی‌های مختلف سیال انجام و در هر حالت منحنی سرعت پیگ رسم شده است. برای اولین بار سعیدبخش و همکارانش در سال ۲۰۰۹ مدل‌سازی دینامیکی پیگ‌های کوچک را در خط لوله فضایی انجام دادند [۸]. در این تحقیق اثر میدان جریان روی حرکت پیگ در نظر گرفته نشده و تنها نیروی محرک تابعی از زمان فرض شده است. برای سادگی، ضریب اصطکاک ثابت و پیگ کوچک فرض شده است. معادلات به دست آمده برای سه نمونه لوله ارزیابی و نتایج آنها نشان داده شده‌اند. در سال ۲۰۱۲ لسانی و همکارانش از معادلات مرجع ۸ استفاده کردند و با ترکیب آنها با معادلات جریان سیال تراکم‌پذیر و معادله جریان بای‌پس، تحلیل دینامیکی پیگ دارای جریان بای‌پس را در لوله‌های مایع دوبعدی و سه‌بعدی انجام دادند [۹]. فرضیات ساده‌کننده‌ای نظیر کوچک بودن پیگ، ثابت بودن ضریب اصطکاک پیگ/دیواره و سیال تراکم‌ناپذیر در

1. Staggered

2. Ramirez

3. Element Based Finite Volume

4. Mesh



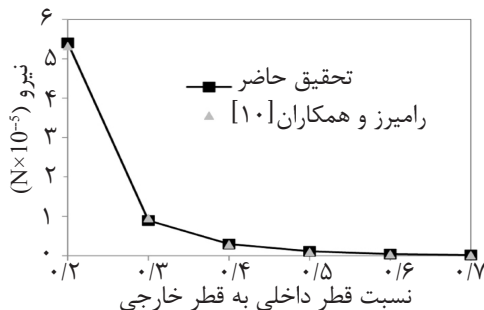
شکل ۲ دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی نیروی وارد بر پیگ.

جدول ۱ مشخصات پیگ، لوله و سیال.

واحد	مقدار	پارامتر
mm	۶۰۰	طول لوله
mm	۳۰۴/۸	قطر داخلی لوله
mμ	۲۵	زبری داخلی لوله
mm	۶۰۰	طول پیگ
mm	۱۲۱/۹۲	قطر داخلی پیگ
kg/m ³	۷۴۷	چگالی سیال
Pa.s	۰/۰۰۶۵۷	لزجت دینامیکی سیال
m/s	۵	سرعت سیال

نتایج

نیروی وارد بر پیگ ساکن، برای بای‌پس‌های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ به‌دست آمده و برای بررسی دقت حل عددی حاضر، با نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق رامیرز^۱ و همکارانش مقایسه شده است [۱۰]. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده، نتایج انطباق خوبی دارند.



شکل ۳ مقایسه تغییرات نیروی وارد بر پیگ ساکن برحسب نسبت قطر با نتایج رامیرز و همکاران [۱۰].

معادلات کلی که در نرم‌افزار ANSYS CFX حل می‌شوند معادلات گذرای ناویر-استوکس در حالت بقایی هستند. اگر جریان یک مؤلفه مشخص به کمک معادله انتقال شبیه‌سازی شود، کسر جرمی آن مؤلفه نیز محاسبه می‌شود. معادلات بقای جرم و مومنوم در جریان تراکم‌ناپذیر در روابط زیر نشان داده شده‌اند:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

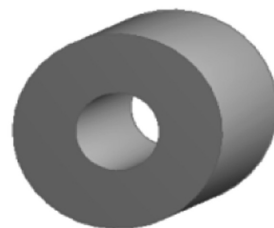
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (2)$$

که در آن v بردار سرعت، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی و ρg میدان جاذبه است.

پیگ ساکن در لوله

مدل‌سازی مسئله

ابتدا، لوله به‌صورت استوانه‌ای، مستقیم و افقی و سیال گازوئیل در نظر گرفته شده است. پیگ نیز به شکل استوانه‌ای با یک سوراخ میانی به‌عنوان بای‌پس است و بای‌پس‌های مختلف با تغییر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پیگ به دست می‌آیند. به‌عنوان مثال بای‌پس ۰/۴، با در نظر گرفتن قطر داخلی پیگ، ۱۲۱/۹۲ mm و به نسبت قطر خارجی آن، ۳۰۴/۸ mm به‌دست آمده است. نیرویی که سیال بر پیگ ساکن وارد می‌کند، برای بای‌پس‌های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ محاسبه گردیده است. نمایی از پیگ ساکن با بای‌پس نسبت ۰/۴ را می‌توان در شکل ۱ دید. مدل‌سازی دامنه محاسباتی در نرم‌افزار ANSYS CFX برای محاسبه نیرو در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات پیگ، لوله و سیال در این شبیه‌سازی طبق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱ نمایی از پیگ ساکن با بای‌پس نسبت ۰/۴.

دامنه محاسباتی در نرم‌افزار ANSYS CFX و نمای بزرگ‌شده شبکه در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

شرایط اولیه و مرزی

در این مسئله برای شبیه‌سازی عددی، به‌علت نامشخص بودن شرایط اولیه، جریان پایدار (حل دائم برای پیگ ساکن) به‌عنوان شرط اولیه در نظر گرفته و از شرایط مرزی زیر استفاده شده است:

- در ورودی، سرعت یکنواخت 5 m/s در امتداد محور لوله انتخاب و سرعت در جهت‌های دیگر صفر در نظر گرفته شده است؛

- در خروجی، فشار استاتیک صفر در نظر گرفته شده است؛

- پیگ به‌عنوان یک جسم صلب تعریف شده است؛

- دیواره‌های لوله به‌عنوان دیوار با شرط عدم‌لغزش در نظر گرفته شده‌اند.

شبکه متحرک

مدل شبکه دینامیک^۱ در شبیه‌سازی جریان‌هایی استفاده می‌شود که شکل دامنه به دلیل حرکت در مرزهای دامنه با زمان در حال تغییر باشد.

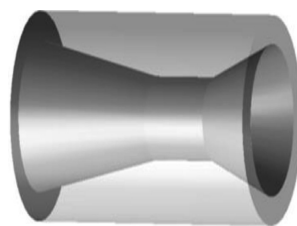
همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند، با افزایش قطر بای‌پس نیرویی که سیال بر پیگ ساکن وارد می‌کند، به‌علت کوچک شدن سطح پیگ که با سیال در تماس است، کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان با کاهش و یا افزایش قطر بای‌پس، نیروی وارد بر پیگ و در نتیجه سرعت پیگ را کنترل کرد.

پیگ متحرک در لوله

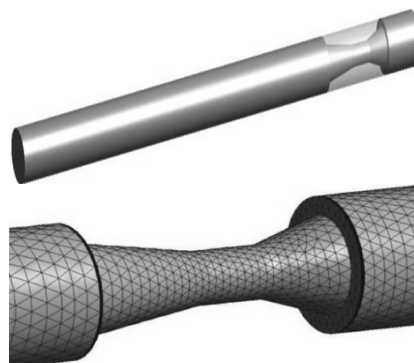
مدل‌سازی مسئله

برای مدل‌سازی میدان محاسباتی، از مدل پیگ پیشنهادشده در بررسی رامیرز و همکارانش [۱۰]، برای کاهش تغییرات ناگهانی جریان در جلو و پشت پیگ، استفاده شد. در این مدل، پیگ استوانه‌ای در نظر گرفته شده که ابتدا و انتهای آن پخ‌دار است (شکل ۴).

لوله به‌صورت استوانه‌ای، مستقیم و افقی و نوع سیال گازوئیل و موقعیت اولیه پیگ به فاصله $609/6 \text{ mm}$ از ابتدای لوله در نظر گرفته شده است. مشخصات پیگ و لوله و سیال در این شبیه‌سازی نیز طبق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌سازی



شکل ۴ نمایی از مدل پیگ استفاده‌شده در تحقیق حاضر.



شکل ۵ دامنه محاسباتی و نمای بزرگ‌شده شبکه برای شبیه‌سازی پیگ متحرک در لوله.

می‌شود؛

۲- تعریف یک Immersed Solid به‌عنوان یک جسم صلب. در این صورت حرکت جسم مغروق با حل معادلات حرکت جسم صلب مدل‌سازی می‌شود. نرم‌افزار ANSYS CFX مکان و جهت‌گیری یک جسم صلب را به کمک معادلات حرکت محاسبه می‌کند. این معادلات می‌توانند تا ۶ درجه آزادی (6DOF) را فراهم آورند: سه درجه آزادی برای حرکت انتقالی در راستای سه محور مختصات و سه درجه آزادی برای چرخش حول سه محور مختصات.

کوپل کردن حرکت جسم صلب (پیگ) با جریان سیال داخل لوله از تعادل نیروهای وارد بر جسم صلب (پیگ) انجام می‌شود. در چنین مواردی، حرکت و میدان جریان کوپل هستند. حل گر 6DOF نیروها و ممان‌هایی مانند نیروها و ممان‌های گرانش و اثرودینامیکی روی جسم را محاسبه می‌کند. این نیروها با انتگرال‌گیری عددی و پارامترهای اضافی مربوط به جسم صلب نیز مشخص می‌شود. معادله حاکم بر حرکت انتقالی مرکز جرم در سیستم مختصات اینرسی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum \vec{F}_G = m \vec{V}_G^o \quad (3)$$

که در آن \vec{V}_G^o حرکت انتقالی مرکز جرم، m جرم و \vec{F}_G بردار نیرو است.

بررسی تأثیر اندازه شبکه بر نتایج

تنها راه حذف خطاهای ناشی از درستی شبکه انجام مطالعات مربوط به شبکه است که عبارت است از بهبود اولیه یک شبکه درشت تا رسیدن به مرحله‌ای که نتایج کلیدی تغییر نکنند. آن‌گاه شبیه‌سازی مستقل از شبکه خواهد بود.

بدین ترتیب سه شبکه بی‌ساختار با تعداد سلول ۱,۳۹۴,۸۴۵ و ۱,۸۰۵,۲۴۴ و ۲,۱۱۳,۰۵۲ در نظر گرفته شده‌اند و سرعت پیگ در زمان‌های مختلف برای این سه شبکه‌بندی در شکل ۶ نشان داده شده است.

این حرکت می‌تواند حرکتی از پیش تعیین‌شده باشد. به‌عنوان مثال می‌توان سرعت‌های خطی و زاویه مدل مرکز ثقل یک جسم جامد را با زمان مشخص کرد. همچنین این حرکت می‌تواند حرکتی تعیین‌نشده باشد که حرکت بعدی براساس حل فعلی به دست می‌آید. به‌عنوان مثال سرعت‌های خطی و زاویه‌ای از تعادل نیروی واردشده بر یک جسم جامد محاسبه می‌شوند. شبیه‌سازی پیگ در این مقاله یک حرکت از پیش تعیین‌نشده است.

سه روش متداول در روش شبکه دینامیک برای تجدید شبکه در نواحی تغییرشکل‌یافته در هر بازه زمانی وجود دارند: روش هموارسازی، روش لایه‌های دینامیکی و روش شبکه‌بندی مجدد.

در روش شبکه‌بندی مجدد هنگامی که حرکت مرز در مقایسه با اندازه سلول‌ها خیلی بزرگ است، به از بین رفتن کیفیت سلول و حتی خود سلول (در نتیجه حجم سلول منفی) و در نهایت مشکلات همگرایی در زمان ورود به قدم زمانی بعدی منجر می‌شود که نیازمند بازسازی است تا پس از آن شبکه‌ای از سلول‌های یکنواخت در مرزهای تغییرشکل‌داده ایجاد شود.

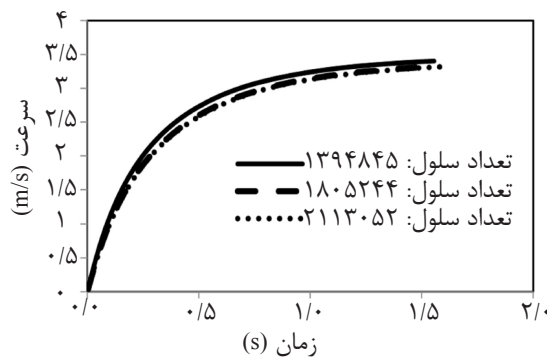
جسم صلب^۱ و 6DOF^۲

جسم صلب به جسم جامدی اطلاق می‌شود که درون حوزه سیال حرکت می‌کند بدون این که خود تغییر شکل دهد. جسم صلب را نیروها و گشتاورهای اعمال‌شده از طرف سیال به‌علاوه هر نیروی خارجی (از قبیل نیروی گرانش) و گشتاورهای خارجی حرکت می‌دهند.

در نرم‌افزار ANSYS CFX یک جسم صلب را به دو روش می‌توان مدل کرد:

۱- تعریف آن به‌عنوان مجموعه‌ای از نواحی دوبعدی که سطوح آن را تشکیل می‌دهند. هنگامی که یک جسم صلب از این طریق تعریف می‌شود، دیگر به تولید شبکه برای خود جسم صلب نیاز نیست. از گزینه Mesh Motion برای حرکت دادن سطوح جسم مطابق با حل معادلات حرکت جسم صلب استفاده

1. Rigid Body
2. Degree of Freedom



شکل ۶ سرعت پیگ در زمان‌های مختلف برای سه شبکه با تعداد سلول مختلف.

همراه نمودار سرعت در محور لوله، برحسب طول لوله در زمان‌های مختلف، دید.

همان طور که در نتایج مشاهده می‌گردد، با افزایش زمان، پیگ به سمت جلو حرکت می‌کند و سرعت سیال داخل پیگ و همچنین فشار سیال بالادست پیگ که در ابتدا زیاد است کاهش می‌یابد. فشار در میانه بای‌پس، به علت سرعت زیاد سیال، کم است.

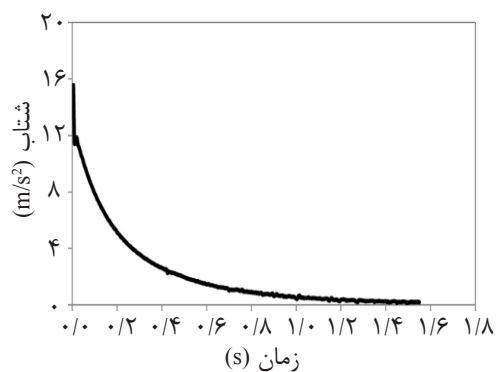
به دلیل کاهش شتاب، میزان تغییرات سرعت در طول لوله نیز کمتر شده است. همچنین مقادیر ماکزیمم‌های منحنی‌های سرعت با افزایش زمان کاهش می‌یابد و شکل منحنی‌های سرعت یکسان می‌شود. منحنی‌های فشار برحسب طول لوله نیز با افزایش زمان تقریباً یکسان می‌شوند و در نتیجه شرایط جریان به سمت حالت دائم پیش می‌روند. در شکل ۱۵ موقعیت پیگ در طول لوله در زمان‌های مختلف نشان داده و یک مقطع خاص به صورت خط عمودی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۶ منحنی‌های سرعت در آن مقطع در زمان‌های مشخص شده رسم شده‌اند. همان گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، ماکزیمم سرعت در زمان ۱ ثانیه و در باریک‌ترین مقطع بای‌پس است. همچنین در دو مقطع نزدیک به ورود و خروج پیگ در زمان‌های ۰/۹۲ و ۱/۰۵ ثانیه، به دلیل یکسان بودن تقریبی اندازه مقطع، منحنی‌های سرعت تقریباً یکسان هستند.

همان گونه که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده برای دو شبکه‌بندی با تعداد سلول ۲,۱۱۳,۰۵۲ و ۱,۸۰۵,۲۴۴ تطابق خوبی دارند و نتایج مستقل از شبکه‌اند.

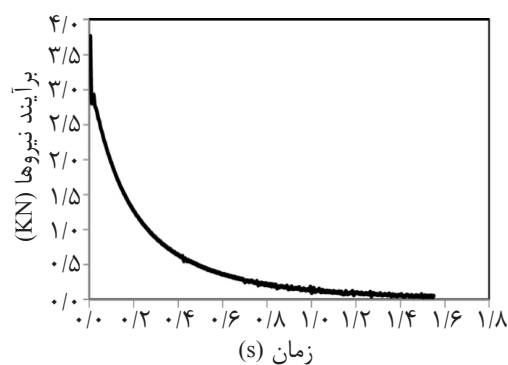
نتایج

در این تحقیق ضریب اصطکاک بین دیواره پیگ و لوله، برای ساده‌سازی، ثابت و ۰/۲ در نظر گرفته شده است. به دلیل کاهش سرعت نسبی بین پیگ و سیال، نیرویی که از طرف سیال به پیگ وارد می‌شود کاهش می‌یابد و به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود که تقریباً برابر با نیروی اصطکاک است و لذا برآیند نیروهای وارد بر پیگ به سمت صفر میل می‌کند. نمودار برآیند نیروهای وارد بر پیگ در شکل ۷ نشان داده شده است. در ابتدای حرکت پیگ، به علت بالا بودن نیروی وارد بر پیگ، شتاب پیگ زیاد است و به مرور زمان با جلو رفتن پیگ به علت کاهش نیروی وارد بر پیگ، شتاب پیگ نیز به سمت صفر میل می‌کند و لذا سرعت پیگ ثابت می‌شود. نمودار شتاب و سرعت پیگ در زمان‌های مختلف و سرعت پیگ در موقعیت‌های مختلف در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نمایش داده شده‌اند.

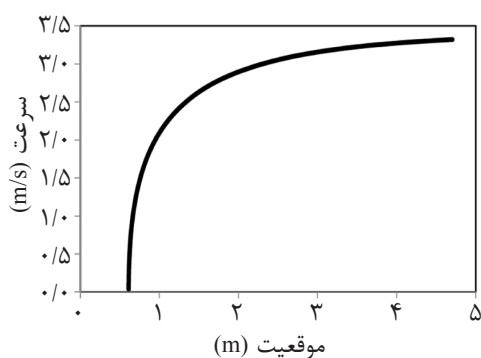
برای درک بهتر رفتار سیال اطراف پیگ متحرک در لوله، کانتور فشار در زمان‌های ۰/۰۳، ۰/۱، ۰/۳۵ و ۱/۵۵ ثانیه و نمودار فشار در محور لوله برحسب طول لوله در زمان‌های مختلف در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ می‌توان کانتور سرعت در زمان‌های فوق را به



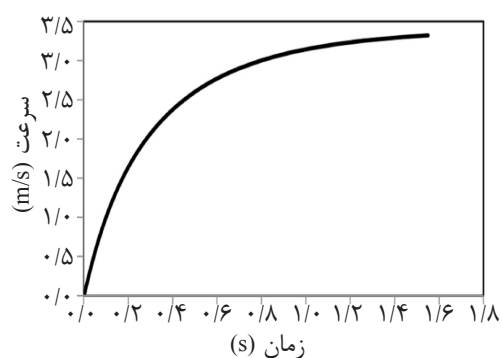
شکل ۸ شتاب پیگ در زمان‌های مختلف.



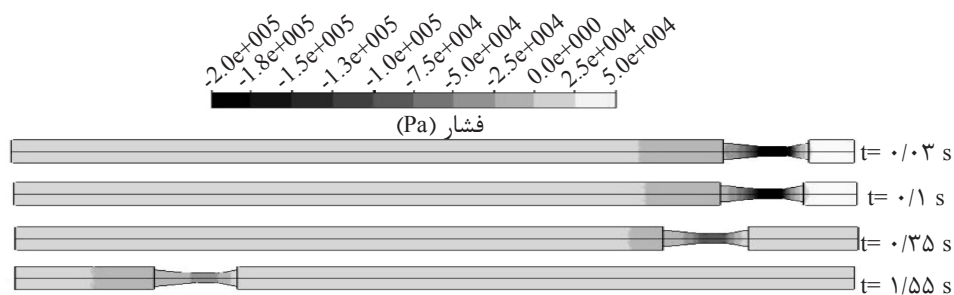
شکل ۷ برآیند نیروهای وارد بر پیگ در زمان‌های مختلف.



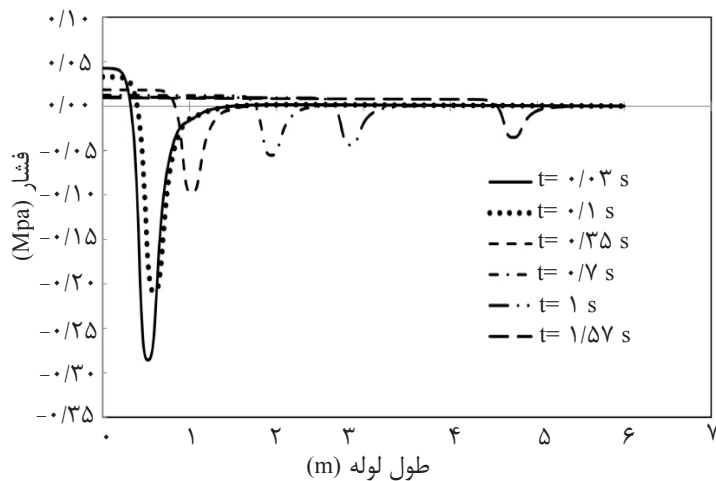
شکل ۱۰ سرعت پیگ در موقعیت‌های مختلف.



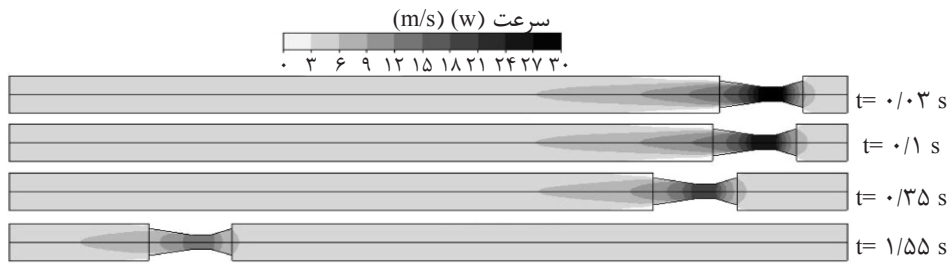
شکل ۹ سرعت پیگ در زمان‌های مختلف.



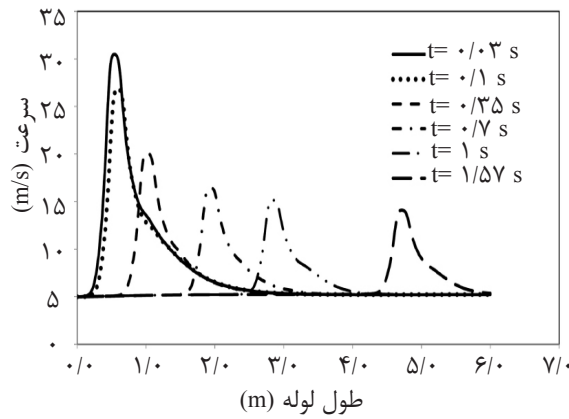
شکل ۱۱ کانتور فشار در طول لوله در زمان‌های مختلف.



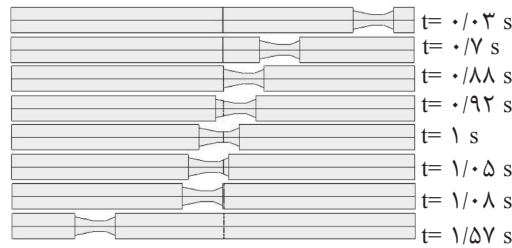
شکل ۱۲ نمودار فشار در محور لوله برحسب طول لوله در زمان‌های مختلف.



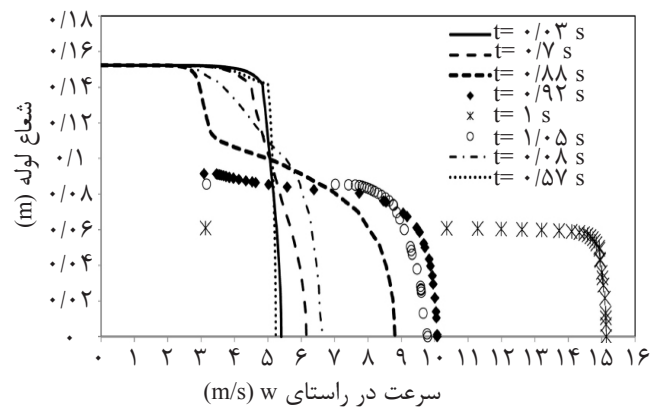
شکل ۱۳ کانتور سرعت در طول لوله در زمان‌های مختلف.



شکل ۱۴ نمودار سرعت در محور لوله برحسب طول لوله در زمان‌های مختلف.



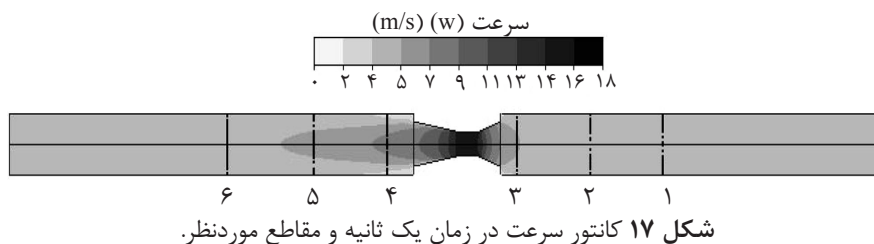
شکل ۱۵ موقعیت پیگ در زمان‌های مختلف و مقطع موردنظر.



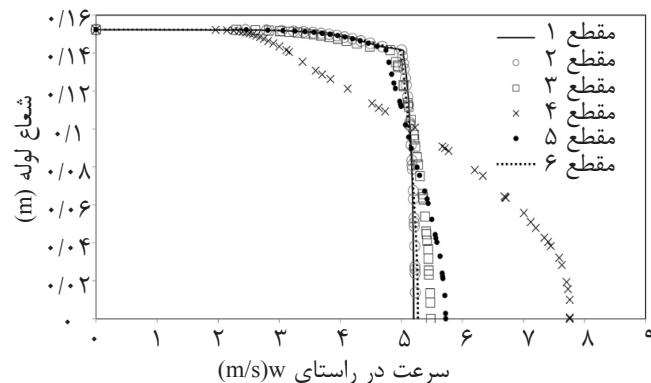
شکل ۱۶ منحنی سرعت در مقطع مشخص شده در زمان‌های مختلف.

سرعت در زمان یک ثانیه نمایش داده شده و چند مقطع مختلف به فاصله‌های ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳/۴، ۳/۹ و ۴/۵ متر از ابتدای لوله مشخص و شماره‌گذاری شده‌اند. شکل ۱۸ نیز منحنی سرعت را در مقاطع مشخص شده در زمان یک ثانیه نمایش می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌گردد، منحنی‌های سرعت برای مقاطع ابتدایی تا مقطع شماره ۳ و مقطع انتهایی لوله، از مقطع شماره ۵ به بعد، تقریباً یکسان‌اند که دلیل آن کاهش اثرات پیگ بر جریان در این فواصل است و بیشترین تغییرات در مقطع خروجی پیگ (مقطع شماره ۴) رخ می‌دهند. در شکل ۱۹ کانتورهای سرعت در مقاطع عمود بر محور لوله به فاصله‌هایی که در شکل ۱۷ نشان داده شده نمایش داده شده‌اند.

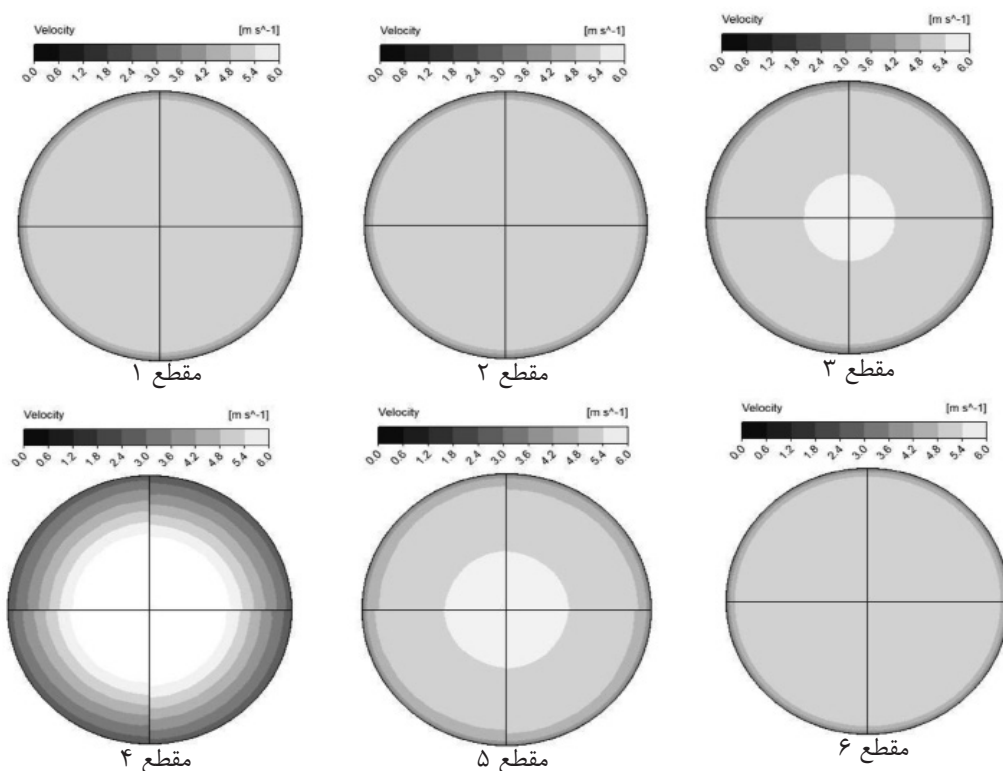
در مقطع خروجی پیگ و در زمان ۰/۸۸ ثانیه، با افزایش فاصله از محور لوله، مقدار سرعت کاهش می‌یابد و از نقطه خروج از پیگ تا دیواره لوله، به دلیل در مسیر جریان نبودن، تغییرات سرعت کند می‌شوند و در جداره لوله به صفر می‌رسند. در زمان‌های ۰/۰۳، ۰/۷ و ۱/۵۷ ثانیه به دلیل دور بودن از پیگ، منحنی‌های سرعت تخت‌تراند، ولی در این بین در زمان ۰/۷ ثانیه به علت این که مقطع موردنظر نسبت به دو زمان دیگر فاصله کمتری نسبت به پیگ دارد، تغییرات منحنی سرعت بیشتر است. در زمان ۱/۰۸ ثانیه نیز در ورودی پیگ، منحنی سرعت تغییرات بیشتری را نسبت به زمان‌های قبلی نشان می‌دهد. در مقاطع داخلی پیگ یعنی در زمان‌های ۰/۹۲، ۱ و ۱/۰۵ ثانیه، با افزایش فاصله از محور لوله، سرعت سیال کاهش می‌یابد تا در جداره پیگ به سرعت پیگ می‌رسد. در شکل ۱۷ کانتور



شکل ۱۷ کانتور سرعت در زمان یک ثانیه و مقاطع موردنظر.



شکل ۱۸ منحنی سرعت در مقاطع مشخص شده در زمان یک ثانیه.



شکل ۱۹ کانتورهای سرعت در مقاطع عمود بر محور لوله.

بر پیگ، شتاب پیگ کاهش می‌یابد و به سمت صفر میل می‌کند و سرعت پیگ ثابت می‌گردد. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که با گذشت زمان و با جلو رفتن پیگ، به علت کاهش شتاب پیگ، تغییرات سرعت و فشار در طول لوله نیز کاهش می‌یابند به طوری که شرایط جریان به سمت حالت دائم پیش می‌رود. با مقایسه منحنی سرعت در مقاطع مختلف مشخص می‌شود که ماکزیمم سرعت مربوط به باریک‌ترین مقطع بای‌پس است. همچنین در دو مقطع نزدیک به ورود و خروج پیگ به دلیل یکسان بودن تقریبی اندازه مقطع، منحنی‌های سرعت تقریباً یکسان هستند. در مقطع خروجی پیگ نیز با افزایش فاصله از محور لوله، مقدار سرعت کاهش می‌یابد و از نقطه خروج از پیگ تا دیواره لوله، به دلیل در مسیر جریان نبودن، تغییرات سرعت کند می‌شوند تا در جداره لوله به صفر می‌رسند. همچنین در مقطعی که از پیگ فاصله دارند، منحنی‌های

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا، نیروی وارد بر پیگ ساکن از طرف سیال با نتایج مرجع ۱۰ مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. سپس، حرکت پیگ دارای بای‌پس در لوله به کمک نرم‌افزار تجاری ANSYS CFX با موفقیت بررسی شده است. مدل پیگ شبیه‌سازی شده مدل پیشنهادی مرجع ۱۰ است و طول لوله ۶ m در نظر گرفته شده و با استفاده از روش شبکه‌بندی مجدد در تکنیک شبکه‌بندی دینامیک حرکت پیگ در سیال شبیه‌سازی شده است.

در بررسی حرکت پیگ داخل لوله، نتایج نشان داده‌اند که ابتدا، نیروی وارد بر پیگ از طرف سیال زیاد است و با گذشت زمان، به دلیل کاهش سرعت نسبی بین پیگ و جریان سیال، نیروی وارد بر پیگ کاهش می‌یابد، به طوری که با نیروی خارجی وارد بر آن (اصطکاک) برابر و برآیند نیروهای وارد بر پیگ صفر می‌شود. با کاهش برآیند نیروهای وارد

سرعت تخت‌تراند. در مقطع ورودی پیگ، منحنی سرعت تغییرات بیشتری را نسبت به مقطع‌های ما قبل خود نشان می‌دهد.

در بررسی تأثیر وجود پیگ بر سرعت جریان در طول لوله نیز مشخص می‌گردد که بیشترین تأثیر وجود پیگ بر سرعت جریان خروجی پیگ است و در فواصل دورتر از پیگ، تغییرات سرعت کمتراند.

P : فشار (Pa)
 t : زمان (s)
 V_G° : حرکت انتقالی مرکز جرم (m/s^2)
 ρ : چگالی سیال (kg/m^3)
 U : سرعت سیال (m/s)
 μ : ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)
 ν : ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)

علائم و نشانه‌ها

F_G : بردار نیرو (N)

m : جرم (kg)

مراجع

- [1]. McDonald A. and Baker O., "Multiphase flow in (Gas) pipelines," Oil & Gas Journal, Vol. 62, No. 24, pp. 68-71, Vol. 62, No. 25, pp.171-175, Vol. 62, No. 26, pp. 64-67, 1964.
- [2]. Kohda K., Suzukawa Y. and Furukwa H., "A new method for analyzing transient flow after pigging scores well," Oil and Gas Journal, Vol. 9, pp. 40-47, 1988.
- [3]. Azevedo L. F. A., Braga A. M. B. and Nieckele A. O., "Simple hydrodynamic models for the prediction of pig motions in pipelines," Offshore Technology Conference, Annual Proceedings, Vol. 4, pp. 729-739, 1996.
- [4]. Nieckele A. O., Braga A. M. B. and Azevedo L. F. A., "Transient pig motion through gas and liquid pipelines," Journal of Energy Resources, Vol. 123, pp. 260-269, 2001.
- [5]. Nguyen T. T., Kim S. B., Yoo H. R. and Rho Y. W., "Modeling and simulation for pig flow control in natural gas pipeline," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 15, No. 8, pp. 1165-1173, 2001.
- [6]. Hosseinalipour S. M., ZarifKhalili A. and Salimi A., "Numerical Simulation of Pig Motion through Gas Pipelines," 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia, pp. 971-975, 2007.
- [7]. Esmailzadeh F., Mowla D. and Asemani M., "Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 69, pp. 100-106, 2009.
- [8]. Lesani M., Rafeeyan M. and Sohankar A., "Dynamic analysis of Small Pig through two and three dimensional liquid pipeline," Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 5, No. 2, pp. 75-83, 2012.
- [9]. داوودیان م. "شبیه‌سازی حرکت توپک در خط لوله‌های نفت و گاز،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران، ۱۳۸۶.
- [10]. Ramirez R. and Dutra M., "Evaluating drag force and geometric optimisation of pipeline inspection gadget (PIG) body with bypass," Ingeniería E Investigación, Vol. 31, No. 2, pp. 152-159, 2011.
- [11]. "ANSYS CFX-Solver Theory Guide," Release 14, ANSYS Inc., 2011