

شبیه سازی اثر نانو و میکرو ذره ها بر میزان افت فشار درون خطوط انتقال نفت

علی قمرطالع، رحمت الله صبوری، صمد صباغی*⁺

بخش نانومهندسی شیمی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: نفت سنگین به دلیل بالا بودن گرانشی، افت فشار زیادی در انتقال آنها توسط خطوط لوله به وجود می آورد. روش های گوناگونی برای جلوگیری از این افت فشار موجود می باشد، که یکی از آنها تزریق مواد شیمیایی برای کاهش گرانشی و سرانجام کاهش افت فشار می باشد. در این پژوهش به شبیه سازی اثر تزریق نانو و میکرو ذره ها به نفت و بررسی میزان کاهش افت فشار در خطوط انتقال نفت توسط نرم افزار پایپ سیم پرداخته شده است. همچنین اثر پارامترهای مهمی از جمله نوع و درصد تزریق ذره ها، دما، سرعت نفت، قطر داخلی لوله و نوع جریان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه های شبیه سازی نشان می دهد که میکرو ذره مس با ۰/۱ درصد وزنی کم ترین افت فشار بر واحد طول را به همراه داشته است. در دماهای پایین اثر میکرو ذره بیش تر و در دماهای بالا اثر دما غالب می باشد. این روند برای قطر داخلی لوله انتقال نیز برقرار می باشد. قابل بیان است که با افزایش سرعت، میزان افت فشار در حضور ذره کم تر از بدون حضور ذره می باشد. برای جریان به طور کامل آرام و آشفته، با کاهش گرانشی، افت فشار کاهش می یابد اما در جریان گذرا روند وارونه بوده و با کاهش گرانشی، افت فشار افزایش پیدا می کند. نتیجه های به دست آمده از شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی توافق خوبی را نشان داده است.

واژه های کلیدی: نانو/میکرو ذره ها؛ افت فشار؛ خط لوله؛ نفت؛ گرانشی، پایپ سیم.

KEYWORDS: Nano/micro-particles; Pressure drop; Pipeline; Oil; Viscosity; Pipesim.

مقدمه

به سراغ منبع های جدید، مانند مخازن غیر معمولی رفت. اما به دلیل شرایط خاص این نوع مخزن ها، بهره برداری و استخراج از این مخزن ها با مشکل هایی همراه می باشد [۴]. از جمله مخزن های غیر معمولی می توان به مخزن های نفت سنگین اشاره کرد که به علت گرانشی بالای نفت، تولید از این مخزن ها با مشکل هایی همراه می باشد. همچنین انتقال آن از مبدأ به مقصد نیز به دلیل افت فشار شدید در طول مسیر با مشکل هایی همراه می باشد. روش ها و مواد شیمیایی بسیاری برای برطرف کردن این مشکل ها

با توجه به پیشرفت علمی در جهان و بالا رفتن میزان مصرف انرژی، از یک طرف نیاز به منابع انرژی با وجود انرژی های نو مانند انرژی هسته ای بیش تر می شود و از طرف دیگر نیاز روز افزون بشر به منابع انرژی هیدروکربنی و سوخت های فسیلی قابل چشم پوشی نیست [۱]. به طوری که نیاز به این سوخت ها تا ۲۰ سال آینده ۵۰٪ افزایش خواهد یافت [۲، ۳]. نفت استخراج شده از مخازن، تا به امروز، بیشتر از مخازن معمولی بوده ولی به دلیل کاهش مقدار ذخایر مخازن معمولی جهان و ایران، باید

+E-mail: sabbaghi@shirazu.ac.ir

*عقد دار مکاتبات

کاهش یافته است [۲۰ - ۱۸، ۱۵]. چن^(۳) و همکاران با بررسی دو میدان نفتی دیده شده با استفاده از نانو کژین^(۴) با آسان تر کردن فرایند اکواترمولایسیس به طور میانگین ۱۰٪ مولکول‌های سنگین نفت به مولکول‌های سبک تبدیل شده و گرانیوی نفت فوق سنگین مورد بررسی به طور میانگین تا ۹۰٪ کاهش یافته است [۲۱]. مطالعه‌های انجام شده تا به امروز، تأثیر نانو ذره‌های فلزی و اکسیدهای فلزی زیادی از جمله آهن، مس، نیکل، اکسید روی، آلومینا، تیتانیا، اکسید آهن، اکسید تنگستن (III) بر روی گرانیوی نفت سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. شکرلو با بررسی نانو ذره‌های گوناگون در اندازه‌های گوناگون و دماهای گوناگون دید که ذره‌ها با اندازه نانو نسبت به ذره‌های با اندازه میکرو بهتر واکنش داده و گرانیوی را بهتر کاهش می‌دهند و همچنین نانو ذره‌های فلزی نیز می‌توانند باعث کاهش گرانیوی شوند [۱۶]. *افزل*^(۵) و همکاران با بررسی نانو ذره‌های گوناگون در درصد‌های وزنی گوناگون و دماهای گوناگون دیدند که در برخی موردها گرانیوی نمونه حتی به زیر ۵۰٪ حالت اولیه کاهش یافته است و همچنین تأثیرگذارترین نانو ذره‌ها در کاهش گرانیوی نیکل اکسید و آهن اکسید می‌باشند [۲۲]. همچنین لی^(۶) و همکاران طی پژوهش‌هایی متوجه شدند که نانو ذره نیکل می‌تواند به شدت گرانیوی نمونه را کاهش دهد [۲۳]. جین^(۷) و همکاران توانسته‌اند با افزودن نانو ذره سیلیکا به پلیمر در یک درصد وزنی خاص گرانیوی آن را تا ۹۰٪ کاهش دهند [۲۴]. اسماعیلی با استفاده از مدل خطی سازی^(۸) به بررسی پارامترهای قطر لوله، فشار ورودی و همچنین چگونگی تغییر دما را در خط لوله گاز در خلیج فارس با جریان لخت^(۹) پرداخته است.

نرم افزار پایپ سیم^(۱۰) یکی از فرآورده‌های معروف شرکت شلمبرگر^(۱۱) می‌باشد که کاربرد بیش تر آن در زمینه شبیه سازی انواع چاه‌ها و تاسیسات سطح الارضی در عرصه مهندسی نفت می‌باشد. این نرم افزار در محاسبه‌های افت فشار جریان سیالات تک فازی، دوفازی و چند فازی درون خط‌های لوله روی زمینی، لوله جداری، لوله مغزی و غیره مورد استفاده بسیاری از مهندسان

در مخزن‌ها و خط‌های انتقال وجود دارد. با استفاده از تزریق آب داغ، بخار، حلال و ... به مخزن‌های نفتی و کاهش گرانیوی نفت، تولید افزایش پیدا می‌کند. البته در زمان رسیدن این نفت بر روی زمین دوباره گرانیوی نفت افزایش پیدا می‌کند. برای کاهش دادن افت فشار در خطوط انتقال نیز روش‌هایی از جمله تزریق مواد شیمیایی (ماده DRA) در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶، ۵].

فناوری نانو از جمله روش‌های نوینی می‌باشد، که کم‌تر از یک دهه در تمامی بخش صنایع نفت و گاز از جمله استخراج، بهره برداری، حفاری، انتقال، ازدیاد برداشت و ... رخنه کرده است. با وجود عمر کوتاه این علم در صنعت بالا دستی و پایین دستی نفت؛ توانسته است به روش‌های گوناگونی، از جمله تغییر در ویژگی‌های نفت و سنگ مخزن (کاهش کشش سطحی [۸، ۷]، تغییر تر شوندگی [۹، ۱۰]، کاهش گرانیوی و ...) باعث سادگی و بهبود در برداشت نفت و همچنین با کاهش نیروی دراگ، اصطکاک بین سطح داخلی خطوط لوله و نفت کاهش یافته و در نتیجه باعث کاهش افت فشار در مسیر انتقال می‌شود. قابل بیان است که نانو ذره‌های تزریق شده در خطوط انتقال نفت بایستی پیش از ورود به صنایع نفتی (پالایشگاه، پتروشیمی، واحدهای بهره‌برداری و غیره) از نفت جدا شده تا باعث ایجاد مشکل‌هایی در فرآورده‌های نفتی و همچنین تجهیزات فرایندی نشود.

نانو ذره‌های با قرار گرفتن در بین لایه‌های نفت، اجازه حرکت راحت تر لایه‌های نفت روی یکدیگر را می‌دهد و در نتیجه گرانیوی کاهش می‌یابد [۱۱]. از سویی طبق رابطه انیشتین^(۱) به طور کلی وجود ذره‌های جامد در سیال باعث افزایش گرانیوی سیال می‌شود [۱۲]. حال آن‌که در کنار این افزایش گرانیوی واکنش شیمیایی به نام اکواترمولایسیس^(۲) در حال انجام شدن است که توانایی کاهش گرانیوی سیال را دارا می‌باشد [۱۳]. بیش تر نانو ذره‌های مورد استفاده برای کاهش گرانیوی نانو ذره‌های فلزی و اکسید فلزی می‌باشند [۱۶ - ۱۴]. شکرلو و همکاران مشاهده کردند که در حضور نانو ذره نیکل مقدار درصد آسفالتین موجود در نفت و در نتیجه گرانیوی سیال

(۱) Eninstein

(۲) Aquathermolysis

(۳) Chen

(۴) kegin

(۵) Afzal

(۶) Li

(۷) Jain

(۸) Linearization

(۹) Slug

(۱۰) Pipesim

(۱۱) Schlumberger

جدول ۱- ویژگی‌های خط لوله.

مقدار	ویژگی‌ها	ردیف
۵۰، ۳۰، ۱۵	قطر (in)	۱
۵/۱	زبری (μm)	۲
۱۰۰۰	طول (m)	۳
۰/۵	ضخامت (in)	۴

جدول ۲- ویژگی‌ها و شرایط نفت.

مقدار	ویژگی‌ها	ردیف
۱۴	API	۱
۹۶۲/۷۸	دانسیته (kg/m^3)	۲
۸، ۴، ۲	سرعت (m/sec)	۳
۸۰، ۵۰، ۲۵	دما ($^{\circ}\text{C}$)	۴

در همه مرحله‌ها با استفاده از اطلاعات موجود در جدول‌های ۱ تا ۳ آماده و به عنوان ورودی به نرم افزار می باشد. ابتدا برای تأیید مدل تهیه شده نتیجه‌های افت فشار به دست آمده از شبیه سازی پایه با نتیجه‌های آزمایشگاهی افت فشار موجود در منبع [۲۶] با در نظر گرفتن شرایط همانند فرایند آزمایشگاهی در شبیه ساز مقایسه شده و پس از اطمینان از درستی مدل، تأثیر ذره‌های موجود در جدول ۴ بر روی میزان افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. قابل بیان است که تأثیر نوع ذره، درصد ماده تزریقی، دما، شدت جریان نفت و قطر داخلی لوله بر روی مدل شبیه سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است.

نتیجه‌ها و بحث

نتیجه‌های به دست آمده از مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار پایپ‌سیم با نتیجه آزمایشگاهی [۲۶] مطابقت قابل پذیرشی دارد. همچنین میزان خطای نسبی افت فشار به دست آمده از مدل شبیه سازی شده با نتیجه آزمایشگاهی ناچیز می‌باشد. جدول ۵ مقایسه داده‌های به دست آمده از این کار را با داده‌های آزمایشگاهی کارهای گذشته نشان می‌دهد. قابل بیان است که در فرایند شبیه سازی، نانو ذره به عنوان یک فاز جداگانه تعریف نشده است، بلکه به طور غیر مستقیم تأثیرهای آن بر گرانروی نفت در نظر گرفته شده است.

و متخصصان صنایع نفت و گاز قرار دارد. همچنین این نرم افزار توانایی و قابلیت زیادی در طراحی، حساسیت سنجی و بهینه‌سازی فرایند دارد [۲۵].

در این پژوهش شبیه سازی اثر تزریق نانو و میکرو ذره‌ها به نفت و بررسی میزان تغییرهای افت فشار در خط‌های انتقال نفت از نرم افزار پایپ سیم استفاده شده است. همچنین اثر نوع نانو و میکرو ذره، اندازه ذره‌ها، درصد نانوذره تزریقی، دما، سرعت (شدت جریان) نفت، قطر داخلی لوله و نوع جریان نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اطمینان از صحت نتیجه‌های مدل شبیه‌سازی شده از اطلاعات تجربی چاپ شده در مقاله‌های معتبر استفاده شده است.

شبیه سازی

برای شبیه‌سازی خط انتقال نفت از نرم افزار پایپ سیم ۲۰۰۸،۱ استفاده شده است [۲۵]. در این شبیه سازی یک خط لوله افقی که ویژگی‌های این خط لوله در جدول ۱ آورده شده، در نظر گرفته شده است. سیال عبوری از آن نفت می‌باشد که به صورت تک فاز در این خط لوله جریان دارد (جدول ۲). گرانروی نفت خام وابسته به دما می‌باشد که در جدول ۳ گرانروی برای سه دما آورده شده است. در جدول ۴، ذره‌ها و ویژگی‌های آن که برای تزریق به نفت خام در حال جریان در خط لوله مورد استفاده قرار گرفته است، آورده شده است. مدل پایه شبیه سازی برای استفاده

جدول ۳- گرانیروی نفت در دماهای متفاوت.

ردیف	دما (°C)	گرانیروی (cP)
۱	۲۵	۸۴۹۲
۲	۵۰	۱۲۱۴
۳	۸۰	۲۳۴

جدول ۴- اندازه نانو ذره‌ها.

ردیف	نوع ماده	اندازه نانو ذرات (nm)
۱	آهن (Fe)	۶۰۰۰-۹۰۰۰
۲	آهن (Fe)	۶۰-۴۰
۳	اکسید آهن (Fe _۳ O _۴)	< ۵۰
۴	نیکل (Ni)	< ۱۰۰
۵	مس (Cu)	۱۰۰۰۰

جدول ۵ - مقایسه داده‌های به دست آمده با کارهای گذشته.

ردیف	گرانیروی (cp)	دما (°C)	افت فشار (Pa/m) (آزمایشگاهی)	افت فشار (Pa/m) (کار حاضر)	درصد خطای نسبی
۱	۳۰۶۴	۶۰	۳۳/۴۳	۳۱/۶۶	۵/۲۸
۲	۱۲۸۷	۷۰	۱۳/۵۶	۱۳/۳۹	۱/۲۹
۳	۶۰۶	۸۲	۶/۲۹	۷/۵۸	-۲۰/۶۴
۴	۳۱۹	۹۵	۳/۲۲	۴/۱۶	-۲۹/۴۷

اثر نوع نانو/ میکرو ذره و درصد آن بر افت فشار

در شکل ۱ اثر نوع و اندازه ذره‌ها بر افت فشار خط لوله انتقال نفت حاوی ذره به افت فشار بدون ذره ($\Delta P_N/\Delta P_C$) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و شدت جریان ۰/۹۱۲ مترمکعب بر ثانیه آورده شده است. همان‌گونه که از این شکل قابل دیدن می‌باشد، بهترین ذره در کاهش میزان افت فشار درون خط لوله، میکروذره مس با غلظت ۰/۱٪ می‌باشد.

اثر دما بر افت فشار

در شکل ۲ اثر دما بر میزان افت فشار بر واحد طول برای میکروذره مس با غلظت ۰/۱٪ مورد بررسی قرار داده شده که با افزایش دما افت فشار کاهش می‌یابد. قابل بیان است که با افزایش دما میزان افت فشار برای دو حالت نفت خام بدون

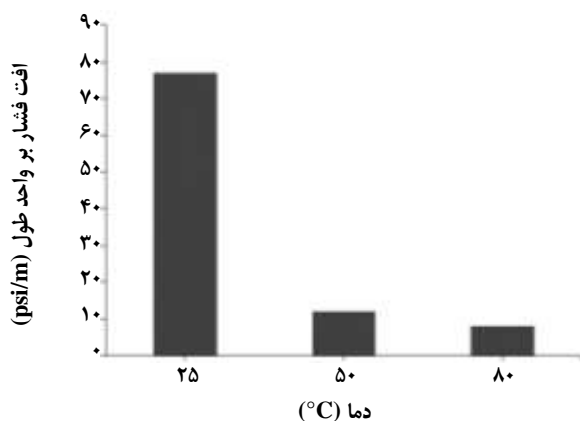
میکروذره و نفت خام با میکروذره به هم نزدیک می‌باشند. به عبارتی دیگر نشانگر این می‌باشد که در دماهای بالا وجود میکرو ذره تأثیر کمی بر میزان افت فشار داشته و اثر دما بر میکرو ذره غالب بوده، ولی در دماهای پایین عکس این عمل برقرار است. به عبارت دیگر در دماهای پایین تأثیر میکرو ذره بر تأثیر دما غالب بوده که این قضیه در جدول ۶ قابل دیدن می‌باشد. بنابراین می‌توان مکانیزم افت فشار را تابعی از ذره و دما (در صورت ثابت ماندن بقیه پارامترهای مورد بررسی) بیان نمود که این پدیده در تمامی قطرها برقرار است.

اثر قطر داخلی بر افت فشار

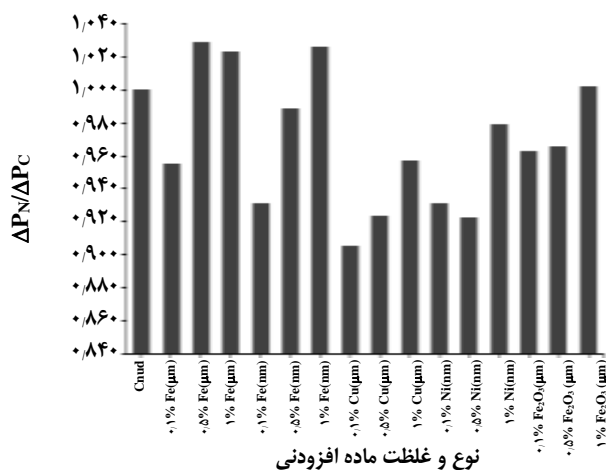
در شکل ۳ اثر قطر داخلی لوله بر میزان افت فشار در واحد طول برای میکرو ذره مس با غلظت ۰/۱٪ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

جدول ۶ - تأثیر دما بر افت فشار در لوله ۳۰ اینچی و دبی ۰/۹۱۲ مترمکعب بر ثانیه.

ردیف	نوع سیل	میکرو/نانو	میزان (درصد وزنی)	میزان افت فشار بر واحد طول (psi/m) در دماهای		
				۲۵ °C	۵۰ °C	۸۰ °C
۱	نفت خام	-----	-----	۸۵/۱۴۱	۱۲/۴۷۳	۸/۱۲۸
۲	نفت خام	میکرو	۰/۱	۷۷/۰۴۲	۱۱/۸۸۸	۸/۰۰۸



شکل ۲- اثر دما بر میزان افت فشار بر واحد طول برای نفت حاوی ذره مس.



شکل ۱- تأثیر نوع و اندازه ذره‌ها بر میزان افت فشار در دما ۲۵ درجه سلسیوس.

این شکل و جدول نشان دهنده افزایش افت فشار با افزایش میزان سرعت می‌باشد. همچنین وجود ذره باعث کاهش میزان افت فشار می‌شود. شایان ذکر است روند کلیه پارامترها موجود در نمودارها و جداول برای تمامی ذره‌های ذکر شده در جدول ۴، در مقیاس میکرو و نانو یکسان می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتیجه‌های به دست آمده در این پژوهش، از تأثیر نوع نانو/ میکرو ذره‌ها، دما، قطر داخلی خط لوله، رژیم جریان و شدت جریان بر کاهش میزان افت فشار در خط لوله توسط نرم‌افزار پایپ‌سیم می‌توان پیشنهاد کرد که:

- میکروذره مس با درصد وزنی ۰/۱ بیش‌ترین کاهش در افت فشار را به همراه داشته است.

- با افزایش دما میزان تأثیر نانو/ میکرو ذره بر گرانش و در نتیجه افت فشار کاهش یافته و مکانیزم غالب افزایش دما می‌باشد.

- با افزایش قطر داخلی، افت فشار کاهش می‌یابد و در قطرهای بالا، مکانیزم غالب قطر داخلی خط لوله می‌باشد و تأثیر نانو/ میکرو ذره کاهش می‌یابد.

قابل دیدن است که با افزایش قطر داخلی، افت فشار کاهش می‌یابد چون مکانیزم افت فشار تابعی از قطر لوله و میزان ذره (در صورت ثابت ماندن بقیه پارامترهای مورد بررسی) است. با افزایش قطر داخلی لوله، مکانیزم غالب بر کاهش میزان افت فشار، قطر داخلی خط لوله و در قطرهای پایین مکانیزم قالب حضور ذره می‌باشد که در جدول ۷ آورده شده که این پدیده در تمامی قطرها برقرار است.

اثر نوع جریان بر افت فشار

در جدول ۸ روند تغییر افت فشار با تغییر گرانش ناشی از وجود میکرو ذره مس مورد بررسی قرار گرفته است. در این جدول قابل دیدن است که برای جریان به طور کامل آرام و به طور کامل آشفته، با کاهش گرانش، افت فشار کاهش می‌یابد اما در جریان گذرا روند بر عکس بوده و با کاهش گرانش، افت فشار افزایش پیدا می‌کند.

اثر شدت جریان بر افت فشار

اثر شدت جریان بر روی میزان افت فشار بر واحد طول خط انتقال نفت برای میکروذره مس با غلظت ۰/۱ درصد وزنی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در جدول ۹ و شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۷- تأثیر قطر داخلی خط لوله بر افت فشار در دمای ۲۵°C و شدت جریان ۰/۹۱۲ مترمکعب بر ثانیه.

ردیف	ماده	میزان افت فشار بر واحد طول (psi/m) برای قطر داخلی خط لوله های		
		۱۵in	۳۰in	۵۰in
۱	نفت خام	۱۳۰۵/۷۷	۸۵/۱۰۵	۱۱/۰۶۳
۲	نفت خام + ۰/۱٪ میکرو مس	۱۱۸۵/۷۸	۷۷/۰۴۲	۱۰/۰۰۸

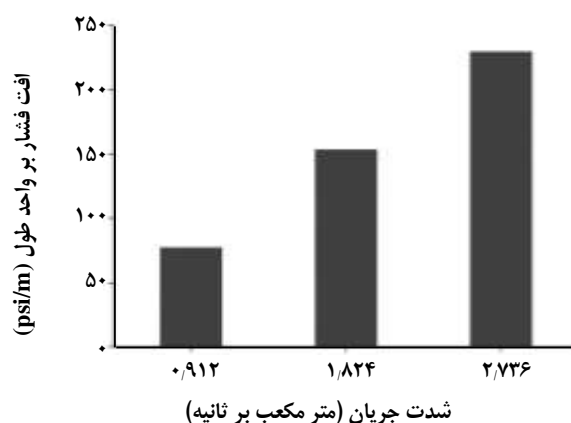
جدول ۸- تغییر افت فشار بر واحد طول با گرانیوی و رژیم جریان.

ردیف	سرعت (m/sec)	نوع جریان	افت فشار بر واحد طول (psi/m)	
			نفت خام	نفت خام + ۰/۱٪ میکرو مس
۱	۲	آرام	۱۲/۴۷۳	۱۱۵۷cP
۲	۴	گذرا	۲۹/۷۳۳	۳۰/۱۳۶
۳	۶	گذرا	۷۶/۱۴۳	۷۷/۵۰۷
۴	۸	آشفته	۱۳۷/۲۵۵	۱۳۵/۳۶۳

جدول ۹- اثر سرعت بر افت فشار بر واحد طول.

ردیف	ماده	میزان افت فشار بر واحد طول (psi/m) برای سرعت های		
		۲(m/sec)	۴(m/sec)	۶(m/sec)
۱	نفت خام	۸۵/۱۰۵	۱۶۹/۷۱۷	۲۵۳/۷۲۵
۲	نفت خام + ۰/۱٪ میکرو مس	۷۷/۰۴۲	۱۵۳/۶۱۹	۲۲۹/۷۳۱

- در جریان به طور کامل آرام و به طور کامل آشفته با کاهش گرانیوی، افت فشار کاهش می یابد ولی در جریان گذرا بر عکس.
- برای بهبود میزان افت فشار، از میکرو ذره مس با درصد وزنی ۰/۱ استفاده شود.
- در لوله های با قطر معمولی مکانیسم دما، غالب می شود.
- در لوله های با قطر داخلی زیاد، مکانیسم غالب قطر داخلی است.



شکل ۴- اثر دبی بر افت فشار بر واحد طول.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۱

مراجع

- [1] Green D. W., Willhite G. P., "Enhanced Oil Recovery", Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, (1998).
- [2] Energy Information Administration, "International Energy Annual", Product: DOE/EIA-0219, (2002).
- [3] Energy Information Administration, "System for the Analysis of Global Energy Markets". Appendix 1 of the International Energy Outlook. Report: DOE/EIA-0484, (2006).
- [4] The Many Technological and Economic Challenges of Extra-Heavy Oil- See More at: <http://www.total.com>.
- [5] Hao H.R., Su H.J., Chen G., Zhao J.R., Hong L., Viscosity Reduction of Heavy Oil by Aquathermolysis with Coordination Complex at Low Temperature. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, **8**: 93-98 (2015).
- [6] Chen Y., Wang Y., Lu J., Wu C., The Viscosity Reduction of Nano-keggin- $K_3PMo_{12}O_{40}$ in Catalytic Aquathermolysis of Heavy Oil. *Fuel*, **88**(8): 1426-1434 (2009).
- [7] Torsater O., Engeset B., Hendraningrat L., Suwarno S., Improved Oil Recovery by Nanofluids Flooding: An Experimental Study, "SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition", 10-12 December, Kuwait City, Kuwait, (2012).
- [8] Kazemzadeh Y., Malayeri M.R., Riazi M., Parsaei R., Impact of Fe_3O_4 Nanoparticle on Asphaltene Precipitation During CO_2 Injection, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **22**: 227-234 (2014).
- [9] Onyekonwu M.O., Ogolo N.A., Investigating the use of Nanoparticles in Enhancing Oil Recovery, "Nigeria Annual International Conference and Exhibition", 31 July - 7 August, Tinapa - Calabar, Nigeria, (2010).
- [10] Karimi A., Fakhroueian Z., Bahramian A., Pour Khiabani N., Babae Darabad J., Azin R., Arya S., Wettability Alteration in Carbonates using Zirconium Oxide Nanofluids: EOR Implications, *Energy Fuels*, **26** (2): 1028-1036 (2012).
- [11] Etefaghi E., Ahmadi H., Rashidi A., Mohtasebi S., Alaei M., Experimental Evaluation of Engine Oil Properties Containing Copper Oxide Nanoparticles as a Nanoadditive, *International Journal of Industrial Chemistry*, **4** (1): 28-33 (2013).
- [12] Eistein A., On the Motion – Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat – of Small Particle Suspended in a Stationary Liquid, *Annalen Der Physic*, **17**(4): 549-560 (1905).
- [13] Hyne J.B., "Aquathermolysis", Synopsis Report No. 50. AOSTRA Contracts No. 11, 103, 103 B/C, 1986.
- [14] Alboudwarej H., Pole D., Svrcek W.Y., Yarranton H. W., Adsorption of Asphaltenes on Metals, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**: 5585-5592 (2005).
- [15] Hamedi Shokrlu Y., Babadagli T., Transportation and Interaction of Nano and Micro Sized Metal Particles Injected to Improve Thermal Recovery of Heavy Oil, "SPE Annual Technical Conference and Exhibition", 30 October-2 November, Denver, Colorado, USA, (2011).

- [16] Hamed Shokrlu Y., Babadagli T., [Effect of nano Sized Metals on Viscosity Reduction of Heavy Oil/Bitumen During Thermal Applications](#), “Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference”, 19-21 October, Calgary, Alberta, Canada, (2010).
- [17] Omole O., Olieh M.N., Osinowo T., [Thermal Visbreaking of Heavy Oil from Nigerian Tar Sand](#), *Fuel*, **78** (12): 1489-1496 (1999).
- [18] Ogolo N.A., Olafuyi O.A., Onyekonwu M.O., [Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles](#), “SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition”, 8-11 April, Al-Khobar, Saudi Arabia, (2012).
- [19] Skauge T., Spildo K., Skauge A., [Nano sized particles for EOR](#), “SPE Improved Oil Recovery Symposium”, 24-28 April, Tulsa, Oklahoma, USA, (2010).
- [20] Qiu F., [The Potential Applications in Heavy oil EOR with the Nano Particle and Surfactant Stabilized Solvent-based Emulsion](#), “Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference”, 19-21 October, Calgary, Alberta, Canada, (2010).
- [21] Chen Y., Wang Y., Lu J., Wu C., [The Viscosity Reduction of Nano-Keggin- \$K_3PMO_{12}O_{40}\$ in Catalytic Aquathermolysis of Heavy oil](#), *Fuel*, **88**: 1426–1434 (2009).
- [22] Afzal S., Ehsani M.R., Nikookar M., Khodabandeh-Shahraki A.R., Roayaei E., Mohammadi A.H., [Reduction of Heavy Oil Viscosity Using Nanoparticles in Book Enhanced Oil Recovery: Methods, Economic Benefits and Impacts on the Environment](#)”, Nova Science Publishers, Inc., Alicia Knight, NY, USA, (2015).
- [23] Li W., Zhu J., Qi J., [Application of Nano-Nickel Catalyst in the Viscosity Reduction of Liaohe-Heavy Oil by Aquathermolysis](#), *J. Fuel ChemTechnol*, **35** (2): 176-180 (2007).
- [24] Jain S., Goossens J.G.P., Peters G.W.M., Duin M.V., Lemstra P.J., [Strong Decrease in Viscosity of Nano Particle-Filled Polymer MLTs Through Selective Adsorption](#), *Soft Matter*, **4**(9): 1848-1854 (2008).
- [25] Schlumberger, [“Pipesim User Manual”](#), Well Design, Drilling and Petroleum, (2009).
- [26] Bjørnseth F., [“Heavy Oil Production Technology Challenges and the Effect of Nano Sized Metals on the Viscosity of Heavy Oil: A Literature Review and an Experimental Study”](#), Norwegian University of Science and Technology, (2013).