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

علی قمرطالع، رحمت الله صبوری، صمد صباغی*+

بخش نانومهندسی شیمی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: نفت سنگین به دلیل بالا بودن گرانروی، افت فشار زیادی در انتقال آنها توسط خطوط لوله به‌وجود می‌آورد. روش‌های گوناگونی برای جلوگیری از این افت فشار موجود می‌باشد، که یکی از آن‌ها تزریق مواد شیمیایی برای کاهش گرانروی و سرانجام کاهش افت فشار می‌باشد. در این پژوهش به شبیه‌سازی اثر تزریق نانو و میکرو ذره‌ها به نفت و بررسی میزان کاهش افت فشار در خطوط انتقال نفت توسط نرم‌افزار پایپ‌سیم پرداخته شده‌است. همچنین اثر پارامترهای مهمی از جمله نوع و درصد تزریق ذره‌ها، دما، سرعت نفت، قطر داخلی لوله و نوع جریان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میکرو ذره مس با ۰٫۱ درصد وزنی کم‌ترین افت فشار بر واحد طول را به همراه داشته است. در دماهای پایین اثر میکرو ذره بیش‌تر و در دماهای بالا اثر دما غالب می‌باشد. این روند برای قطر داخلی لوله انتقال نیز برقرار می‌باشد. قابل بیان است که با افزایش سرعت، میزان افت فشار در حضور ذره کم‌تر از بدون حضور ذره می‌باشد. برای جریان به طور کامل آرام و آشفته، با کاهش گرانروی، افت فشار کاهش می‌یابد اما در جریان گذرا روند وارونه بوده و با کاهش گرانروی، افت فشار افزایش پیدا می‌کند. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه سازی با داده‌های آزمایشگاهی توافق خوبی را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: نانو/میکرو ذره‌ها؛ افت فشار؛ خط لوله؛ نفت؛ گرانروی، پایپ سیم.

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

مقدمه

با توجه به پیشرفت علمی در جهان و بالارفتن میزان مصرف انرژی، از یک طرف نیاز به منابع انرژی با وجود انرژی‌های نو مانند انرژی هسته‌ای بیش‌تر می‌شود و از طرف دیگر نیاز روز افزون بشر به منابع انرژی هیدروکربنی و سوخت‌های فسیلی قابل چشم پوشی نیست [۱]. به طوری که نیاز به این سوخت‌ها تا ۲۰سال آینده ۵۰٪ افزایش خواهد یافت [۳، ۲]. 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 به سراغ منبع‌های جدید، مانند مخازن غیر معمولی رفت. اما به دلیل شرایط خاص این نوع مخزن‌ها، بهره‌برداری و استخراج از این مخزن‌ها با مشکل‌هایی همراه می‌باشد [۴]. از جمله مخزن‌های غیر معمول می‌توان به مخزن‌های نفت سنگین اشاره کرد که به علت گرانروی بالای نفت، تولید از این مخزن‌ها با مشکل‌هایی همراه می‌باشد. همچنین انتقال آن از مبدأ به مقصد نیز به دلیل افت فشار شدید در طول مسیر با مشکل‌هایی همراه می‌باشد. روش‌ها و مواد شیمیایی بسیاری برای برطرف کردن این مشکل‌ها

*عهده دار مکاتبات

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

Archive of SID

www.SID.ir

در مخزن‌ها و خط‌های انتقال وجود دارد. با استفاده از تزریق آب داغ، بخار، حلال و ... به مخزن‌های نفتی و کاهش گرانروی نفت، تولید افزایش پیدا می‌کند. البته در زمان رسیدن این نفت بر روی زمین دوباره گرانروی 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 [۱۰، ۹]، کاهش گرانروی 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 فراورده‌های نفتی و همچنین تجهیزات فرایندی نشود.

نانو ذره‌های با قرار گرفتن در بین لایه‌های نفت، اجازه حرکت راحت‌تر لایه‌های نفت روی یکدیگر را می دهد و درنتیجه گرانروی کاهش می‌یابد [۱۱]. از سویی طبق رابطه انیشتین[۱] به طور کلی وجود ذره‌های جامد در سیال باعث افزایش گرانروری سیال می‌شود [۱۲]. حال آن‌که در کنار این افزایش گرانروی واکنش شیمیایی به نام اکواترمولایسیس[۲] در حال انجام شدن است که توانایی کاهش گرانروی سیال را دارا می‌باشد [۱۳]. بیش‌تر نانو ذره‌های مورد استفاده برای کاهش گرانروی نانوذره‌های فلزی و اکیسد فلزی می‌باشند [۱۶ ـ ۱۴]. *شکرلو* و *همکاران* مشاهده کردند که در حضور نانو ذره نیکل مقدار درصد آسفالتین موجود در نفت و در نتیجه گرانروی سیال کاهش یافته است [۲۰ ـ ۱۸، ۱۵]. *چن*[۳] و همکاران با بررسی دو میدان نفتی دیده شده با استفاده از نانو کژین[۴] با آسان‌تر کردن فرایند اکواترمولایسیس به طور میانگین ۱۰٪ مولکول‌های سنگین نفت به مولکول‌های سبک تبدیل شده و گرانروی 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 گرانروی 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 گرانروی را بهتر کاهش می‌دهند و همچنین نانو ذره‌های فلزی نیز می‌توانند باعث کاهش گرانروی شوند [۱۶]. *افزل*[۵] و *همکاران* با بررسی نانو ذره‌های گوناگون در درصدهای وزنی گوناگون و دماهای گوناگون دیدند که در برخی موردها گرانروی نمونه حتی به زیر ۵۰٪ حالت اولیه کاهش یافته است و همچنین تأثیرگذار ترین نانوذره‌ها در کاهش گرانروی نیکل اکسید و آهن اکسید می‌باشند [۲۲]. همچنین *لی*[۶] و *همکاران* طی پژوهش‌هایی متوجه شدند که نانو ذره نیکل می‌تواند به شدت گرانروی نمونه را کاهش دهد [۲۳]. *جین*[۷] و *همکاران* توانسته‌اند با افزودن نانو ذره سیلیکا به پلیمر در یک درصد وزنی خاص گرانروی 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 فراورده‌های معروف شرکت شلمبرژه[۱۱] می‌باشد که کاربرد بیش‌تر 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

(۱) Enistein
(۲) Aquathermolysis
(۳) Chen
(۴) keggin
(۵) Afzal
(۶) Li
(۷) Jain
(۸) Linearization
(۹) Slug
(۱۰) Pipesim
(۱۱) Schlumberger

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱ـ ویژگی‌های خط لوله.

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

جدول ۲ـ ویژگی‌ها و شرایط نفت.

ردیف	ویژگی‌ها	مقدار
۱	API	۱۴
۲	دانسیته (kg/m^3)	۹۶۲/۷۸
۳	سرعت (m/sec)	۲، ۴، ۶، ۸
۴	دما (°C)	۲۵، ۵۰، ۸۰

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 میکروذره، 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 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 به‌دست 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 تاثیرهای آن بر گرانروی نفت در نظر گرفته شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳ـ گرانروی نفت در دماهای متفاوت.

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

جدول ۴ـ اندازه نانو ذره‌ها.

ردیف	نوع ماده	اندازه نانو ذرات (nm)
۱	آهن (Fe)	۶۰۰۰–۹۰۰۰
۲	آهن (Fe)	۶۰-۴۰
۳	اکسید آهن (Fe_2O_3)	< ۵۰
۴	نیکل (Ni)	< ۱۰۰
۵	مس (Cu)	۱۰۰۰۰

جدول ۵ ـ مقایسه داده‌های به‌دست آمده با کارهای گذشته.

ردیف	گرانروی (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 ۰٫۹۱۲مترمکعب 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 بر قرار است.

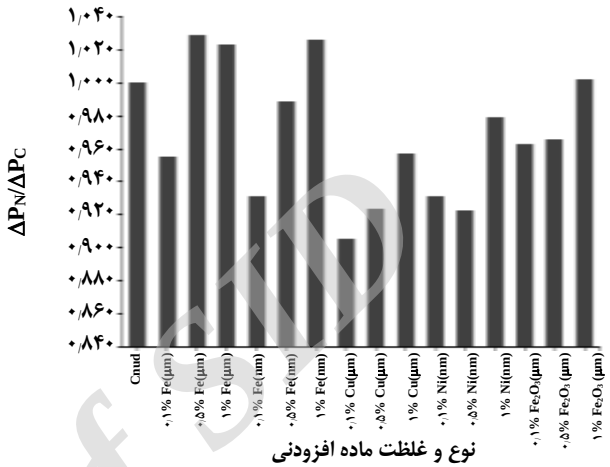
اثر قطر داخلی بر افت فشار

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

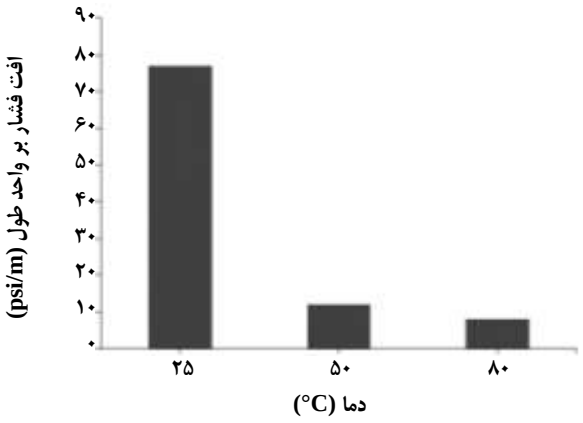
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۶ ـ تأثیر دما بر افت فشار در لوله ۳۰اینچی 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 ۱ـ تأثیر نوع و اندازه ذره‌ها بر میزان افت فشار در دما ۲۵ درجه سلسیوس.



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

قابل دیدن است که با افزایش قطر داخلی، افت فشار کاهش می‌یابد چون مکانیسم 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 مکانیسم قالب حضور ذره می‌باشد که در جدول ۷ آورده شده که این پدیده در تمامی قطرها بر قرار است.

اثر نوع جریان بر افت فشار

در جدول ۸ روند تغییر افت فشار با تغییر گرانروی 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 گرانروی، افت فشار کاهش می‌یابد اما در جریان گذرا روند بر عکس بوده و با کاهش گرانروی، 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.

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 به‌دست 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 خظ لوله توسط نرم‌افزار پایپ‌سیم می‌توان پیشنهاد کرد که:

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

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

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

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۷ـ تأثیر قطر داخلی خط لوله بر افت فشار در دمای $25^{o}C$ و شدت جریان ۰/۹۱۲مترمکعب 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 ـ تغییر افت فشار بر واحد طول با گرانروی و رژیم جریان.

ردیف	سرعت (m/sec)	نوع جریان	افت فشار بر واحد طول (psi/m)	
			نفت خام	نفت خام+ ۰/۱ %میکرومس
			۱۲۱۴cP	۱۱۵۷cP
۱	۲	آرام	۱۲/۴۷۳	۱۱/۸۸۸
۲	۴	گذرا	۲۹/۷۳۳	۳۰/۱۳۶
۳	۶	گذرا	۷۶/۱۴۳	۷۷/۵۰۷
۴	۸	آشفته	۱۳۷/۲۵۵	۱۳۵/۳۶۳

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

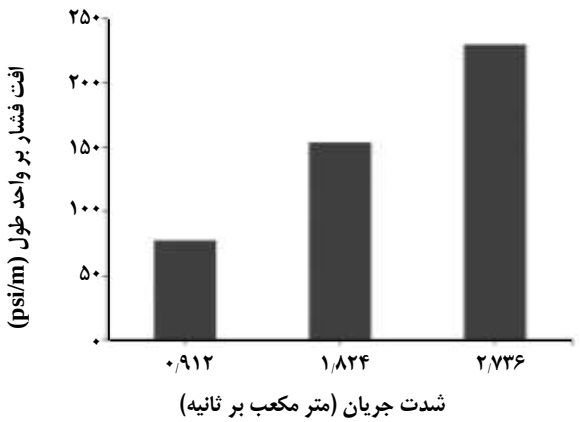
ردیف	ماده	میز ان افت فشار بر واحد طول (psi/m) برای سرعت های		
		۲(m/sec)	۴(m/sec)	۶(m/sec)
۱	نفت خام	۸۵/۱۰۵	۱۶۹/۷۱۷	۲۵۳/۷۲۵
۲	نفت خام+ ۰/۱٪ میکرو مس	۷۷/۰۴۲	۱۵۳/۶۱۹	۲۲۹/۷۳۱

ـ در جریان به طور کامل آرام و به طور کامل آشفته با کاهش گرانروی، افت فشار کاهش می‌یابد ولی در جریان گذرا بر عکس.

ـ برای بهبود میزان افت فشار، از میکرو ذره مس با درصد وزنی ۰/۱ استفاده شود.

ـ در لوله‌های با قطر معمولی مکانیسم دما، غالب می‌شود.

ـ در لوله‌های با قطر داخلی زیاد، مکانیسم غالب قطر داخلی است.



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

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

Archive of SID
www.SID.ir

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., Babaee Darabad J., Azin R., Arya S., Wettability Alteration in Carbonates using Zirconium Oxide Nanofluids: EOR Implications, *Energy Fuels*, **26** (2): 1028–1036 (2012).

[11] Ettefaghi 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).

Archive of SID
www.SID.ir

[16] Hamedi 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., P eters 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).

Archive of SID

www.SID.ir