

رسالة محمد



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-حفاری

بررسی آزمایشگاهی اثر نانو ذرات بر ویسکوزیته نفت دارای آسفالتین

به وسیله دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته در دما و فشار مخزن

سید حمید تقوی نژاد

اساتید راهنما

مهرداد سلیمانی منفرد

مسعود ریاضی

بهمن ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب سید حمید تقوی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " بررسی آزمایشگاهی اثر نانو ذرات بر ویسکوزیته نفت دارای آسفالتین بوسیله دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته در دما و فشار مخزن " تحت راهنمایی اساتید گرامی جناب آقایان دکتر مهرداد سلیمانی منفرد و دکتر مسعود ریاضی متعهد می شوم.

- تحقیقات این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood, University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته و یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

بهمن ۱۳۹۵

سید حمید تقوی نژاد

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایان-های، نرم افزار و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

تقریب به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم .

پروردگارا:

نه می‌توانم موهبایشان را که در راه عزت من سفید شد، سپاه کنم و نه برای دسته‌های پینه‌بسته‌شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم . پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارشان باشم و ثنیه‌های عمرم را در عیای دست بودنشان بگذرانم.

تقریب به

استیو جابز و همه کسانی که با جسارت در دنیا قدم برداشته و مرزهای نوآوری و خلاقیت را بیش‌ازپیش گسترش دادند و همواره الگوهای من در زندگی بوده‌اند.

شکر و سپاس خدا را که بزرگ‌ترین امید و پاور در لحظه‌لحظه زندگیست.

سپاس‌گزاری

جناب آقایان دکتر سلیمانی و دکتر ریاضی:

چگونه سپاس گویم مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است. چگونه سپاس گویم تأثیر علم آموزی شما را که چراغ روشن هدایت را بر کلبه‌ی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل این همه عظمت و شکوه شما مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف.

با تشکر و سپاس از اساتید دانشمند و پرمایه‌ام که از محضر پرفیضشان، بهره‌ها برده‌ام و با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی **سرکار خانم شجاعی** مسئول محترم مرکز ازدیاد برداشت دانشگاه شیراز و همچنین دوست عزیزم **یوسف کاظم‌زاده** که همواره راهنمای من در این مسیر بوده‌اند. با سپاس بی‌دریغ خدمت دوستان گران‌مایه‌ام که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده‌اند و اگر بخواهم نامی از ایشان ببرم ترسم که نامی از قلم بیافتد.

از تمام کارکنان و هیئت‌مدیره شرکت دانش‌بنیان **پتروآزما** به خاطر تمامی امکاناتی، راهنمایی‌ها و کمک‌هایی که برای ساخت دستگاه در اختیار بنده قرار دادند بی‌بدیل‌ترین تشکرات را دارم همچنین از شرکت **مناطق نفت‌خیز جنوب** برای در اختیار قرار دادن نفت مورد آزمون، نیز قدر دانم. و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به‌نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.

شماره: ۱۸۹۵، ۳۴۹۵-۲
 تاریخ: ۲۷/۱۱/۹۵
 ویرایش:

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خلیج / آقای سید حمید تقوی نژاد به شماره دانشجویی ۹۳۳۲۷۱۴ رشته مهندسی نفت گرایش مهندسی حفاری تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی اثر نانو ذرات بر ویسکوزیته نفت دارای آسفالتین بوسیله دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته در دما و فشار مخزن که در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز ۱۸۹۵) دفاع مجدد مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

- ۱- عالی (۲۰-۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸۹۹-۱۸) ۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹-۱۴) ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر مسعود ریاضی	دانشیار	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر آرزو عابدی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر کیومرث سیف پناهی شعبانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مجید محمدی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۲۷/۱۱/۹۵



چکیده

تشکیل رسوب آسفالتین به هنگام تولید و فرآیند هیدروکربن‌های طبیعی و سنتزی به‌عنوان یک مشکل بنیادی در سراسر دنیا شناخته شده است. مطالعات گسترده‌ای توسط محققان برای شناسایی علت تشکیل آسفالتین در نفت و قبل از هرگونه اقدام برای جداسازی آن انجام گرفته است. علت رسوب آسفالتین در شرایط ترمودینامیکی نظیر تغییر در درجه حرارت و تغییر در فشار می‌باشد که بر اثر آن تعادل ترمودینامیکی مواد سنگین آلی نظیر واکس و آسفالتین به‌هم‌ریخته و در نتیجه این مواد با مکانیزم‌های مختلف تشکیل و در اثر حرکت در محیط متخلخل سازند یا داخل لوله در چاه تولیدی و یا تأسیسات سطحی، رسوب می‌نمایند و زدودن آن‌ها گاهی غیرممکن و گاهی ممکن ولی با هزینه‌های زیاد همراه است. با توجه به موارد فوق، شناخت مشکل، شرایط جریان و پیش‌بینی تشکیل این‌گونه رسوبات دارای تأثیر بسزایی در موفقیت عملیات درازمدت تولید و همچنین پایداری جریان و تولید اقتصادی است.

همچنین با توجه به قدیمی بودن مخازن و چاه‌های نفتی کشور ما، ضرورت نوآوری در بخش ازدیاد برداشت از مخازن نفتی به‌خوبی احساس می‌شود و می‌توان با بومی کردن تجهیزات کارآمد و ضروری این بخش، و استفاده از قابلیت‌های جدید حوزه نانو تکنولوژی قدم‌های خوبی در جهت رشد و تعالی این بخش از صنعت نفت برداشت.

در این اثر به بررسی تأثیر نانو ذرات بر ویسکوزیته و نقطه شروع رسوب نفت آسفالتین‌دار پرداخته شده که برای انجام آزمون‌های موردنظر اقدام به ساخت دستگاه ویسکومترگوی غلتان شده است که این دستگاه قابلیت انجام آزمون در فشار ۷۰۰۰ psi و دمای 95°C را دارد.

برای مقایسه اثر نانو ذرات مختلف از شش نانوذره TiO_2 ، NiO ، Fe_3O_4 ، Co_3O_4 ، Al_2O_3 ، Co_2O_3 انتخاب و برای آزمون کاهش ویسکوزیته از درصد‌های وزنی ۰/۱-۰/۳-۰/۵-۰/۸-۰/۱ استفاده شد

و برای آزمون تأثیر در نقطه شروع رسوب آسفالتین برای هر نوع نانوذره از درصد وزنی ۰/۰۱ استفاده شده است.

نتایج کار نشان می‌دهد که هر نوع خاص از نانو ذرات عملکرد خاص به خود را داشته و در درصد وزنی خاصی بهترین عملکرد را در کاهش ویسکوزیته نشان داده‌اند که در مبحث کاهش ویسکوزیته به ترتیب نانو ذرات $\text{TiO}_2 < \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{NiO} < \text{Co}_3\text{O}_4 < \text{Co}_2\text{O}_3 < \text{Fe}_3\text{O}_4$ بهترین عملکرد را داشته‌اند و به ترتیب بیشترین میزان کاهش را ایجاد کرده‌اند و در حوزه نقطه شروع رسوب نیز به ترتیب نانو ذرات $\text{TiO}_2 < \text{NiO} < \text{Fe}_3\text{O}_4 < \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Co}_3\text{O}_4 < \text{Co}_2\text{O}_3$ بهترین عملکرد را در به تأخیر انداختن نقطه شروع رسوب آسفالتین نشان داده‌اند.

واژگان کلیدی: آسفالتین، نانو ذرات، کاهش ویسکوزیته، نقطه شروع رسوب

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول:.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱- نفت سنگین	۲
۱-۲- آسفالتین	۴
۱-۳- مشکلات رسوب آسفالتین	۵
۱-۴- عوامل عملیاتی مؤثر بر تشکیل یا تشدید رسوب آسفالتین	۶
۱-۵- مکانیزه‌ای تشکیل لخته‌های آسفالتین	۸
۱-۵-۱- مکانیزم حلالیت	۸
۱-۵-۲- مکانیزم کلوئیدی	۹
۱-۵-۳- مکانیزم انعقاد یا تشکیل توده	۹
۱-۵-۴- مکانیزم الکتروسینتیک	۱۰
۱-۶- روش‌های رفع مشکل رسوبات و معایب و مزایای آن‌ها	۱۰
۱-۶-۱- روش‌های مکانیکی	۱۱
۱-۶-۲- روش‌های شیمیایی	۱۲
۱-۶-۳- روش‌های حرارتی	۱۴
۱-۷- کاربرد فناوری نانو در صنعت نفت	۱۴
۱-۷-۱- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو سیالات	۱۵
۱-۷-۲- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو ذرات	۱۵
۱-۷-۳- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو سطح سازها	۱۶
۱-۷-۴- ازدیاد برداشت با استفاده از هیدروژل‌های نانوکامپوزیتی	۱۸
۱-۷-۵- کاربرد فناوری نانو در بهبود سیال حفاری	۱۹
۱-۷-۶- کاربرد نانو فیلترها و نانو جاذب‌ها	۲۱

۲۴	۷-۷-۱- فناوری نانو و روان کننده‌ها
۲۵	۸-۱- نانو ذرات راهی برای برداشت از مخازن نفت سنگین آسفالتین دار
۲۵	۹-۱- اهمیت ساخت تجهیزات نو در صنایع نفت و گاز
۲۷	فصل دوم:.....
۲۷	مروری بر تحقیقات گذشته.....
۳۲	فصل سوم:.....
۳۳	دستگاه‌ها و آزمایش‌ها.....
۳۴	۳-۱- انواع دستگاه‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته
۳۴	۳-۱-۱- ویسکومتر لوله موین
۳۶	۳-۱-۲- ویسکومتر بروکفیلد
۳۸	۳-۱-۳- مدت‌زمان تخلیه یک ظرف مخصوص
۳۹	۳-۱-۴- ویسکومترهای لرزشی
۴۱	۳-۱-۵- ویسکومترهای استابینگر
۴۲	۳-۱-۶- محاسبه ویسکوزیته به روش گوی غلتان
۴۵	۳-۲- کالیبراسیون
۴۵	۳-۳- قطعات دستگاه
۴۶	۳-۳-۱- پمپ دستی یا اتومات
۴۷	۳-۳-۲- محفظه آزمایش
۴۹	۳-۳-۲-۱- صفحه نگهدارنده دستگاه
۴۹	۳-۳-۲-۲- المنت‌های حرارتی
۵۰	۳-۳-۲-۳- سنسور دما
۵۱	۳-۳-۲-۴- استوانه‌های نگهدارنده سیال
۵۲	۳-۳-۲-۵- آهنربای الکتریکی
۵۲	۳-۳-۲-۶- سنسور فشار سیال

۵۳	..... سنسور رسیدن گوی به انتهای استوانه
۵۴	..... پمپ آب داغ
۵۴	..... ترمینال ریلی
۵۴	..... گوی
۵۵	..... صفحه مدرج برای تنظیم زاویه حرکت گوی
۵۵	..... جعبه کنترل
۵۵	..... کلید روشن و خاموش و سایر قسمت‌ها
۵۷	..... نمایشگر فشار
۵۷	..... تنظیم‌کننده دما
۵۷	..... زمان‌سنج
۵۷	..... دکمه ۱ (آهنربا)
۵۸	..... ریست کردن زمان
۵۸	..... چرخش آب دور سیلندر داخلی
۵۸	..... دستگاه آلتراسونیک
۵۹	..... دستگاه همزن مغناطیسی
۶۰	..... دستگاه ترازوی دیجیتالی با دقت بالا
۶۰	..... نحوه انجام آزمایش‌ها
۶۱	..... مواد مورد استفاده
۶۳	..... آماده کردن نمونه برای انجام آزمون‌های ویسکوزیته
۶۴	..... آماده کردن نمونه برای انجام آزمون‌های نقطه شروع رسوب
۶۵	..... وارد کردن سیال به ویسکومتر
۶۷	..... فصل چهارم:
۶۷	..... بحث در نتایج
۶۸	..... ۱-۴ مقدمه

- ۶۹-۲-۴- بررسی احتمال رسوب آسفالتین در نمونه نفت خام مورد آزمایش
- ۷۲-۳-۴- تأثیر نانو ذرات بر ویسکوزیته نفت خام مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۲-۳-۴-۱- تأثیر نانو ذرات اکسید آهن بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۴-۳-۴-۲- تأثیر نانو ذرات اکسید نیکل بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۵-۳-۴-۳- تأثیر نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۶-۳-۴-۴- تأثیر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۸-۳-۴-۵- تأثیر نانو ذرات اکسید کبالت (Co_2O_3) بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۸-۳-۴-۶- تأثیر نانو ذرات اکسید کبالت (Co_3O_4) بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین
- ۷۹-۳-۴-۷- مقایسه کلی نانو ذرات در مبحث کاهش ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین. ۸۰
- ۸۲-۴-۴- تأثیر نانو ذرات بر نقطه شروع رسوب آسفالتین در نفت خام مستعد رسوب آسفالتین
- ۸۲-۴-۴-۱- نقطه شروع رسوب آسفالتین برای نمونه نفتی بدون نانوذره در دماهای مختلف
- ۸۳-۴-۴-۲- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید آهن
- ۸۴-۴-۴-۳- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید نیکل
- ۸۴-۴-۴-۴- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم
- ۸۵-۴-۴-۵- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم
- ۸۶-۴-۴-۶- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید کبالت (Co_3O_4)
- ۸۷-۴-۴-۷- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید کبالت (Co_2O_3)
- ۸۸-۴-۴-۸- مقایسه کلی همه نمودارهای نقطه شروع رسوب آسفالتین نمونه های نفتی حاوی نانو ذرات
- ۹۱-۴-۴-۹- فصل پنجم:

۹۱.....	نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۲.....	۵-۱- نتیجه گیری
۹۶.....	منابع

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ - تعریف انواع نفت سبک تا فوق سنگین (UNITAR-1999).....	۲
جدول ۱-۳ - ویژگی‌های نفت چاه شماره ۲۶.....	۶۱
جدول ۲-۳ - خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام‌شده برای بررسی تأثیر نانو ذرات بر ویسکوزیته در دمای ۹۵°C.....	۶۳
جدول ۳-۳ - خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام‌شده برای بررسی تغییر نقطه شروع رسوب آسفالتین با افزودن نرمال‌هپتان در حضور ۰/۰۱ وزنی نانو ذرات در دمای محیط.....	۶۴
جدول ۱-۴ - بررسی احتمال رسوب آسفالتین در نمونه نفت مورد آزمایش با استفاده از شاخص ناپایداری کلئیدی و روش استانکویچ.....	۷۱
جدول ۲-۴ - تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید آهن در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.....	۷۲
جدول ۳-۴ - تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید نیکل در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.....	۷۴
جدول ۴-۴ - تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید آلومینیوم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.....	۷۵
جدول ۵-۴ - تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره دی اکسید تیتانیوم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.....	۷۷
جدول ۶-۴ - تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید کبالت سه‌ظرفیتی در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.....	۸۲

جدول ۴-۷- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید کبالت چهار

ظرفیتی در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد. ۸۴

جدول ۴-۸- مقادیر کمترین ویسکوزیته و همچنین درصد بهینه برای هر نانوذره. ۸۱

جدول ۴-۹- میزان افزایش درصد حجمی نرمال هپتان موردنیاز برای رسیدن به نقطه شروع رسوب

توسط هر نانوذره ۹۰

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱- ساختار مولکولی آسفالتین نفت ونزوئلا
۱۶	شکل ۱-۲- عملکرد نانو سطح‌سازها در امولسیون نفت و آب
۱۸	شکل ۱-۳- حذف امولسیون از محلول نفتی
	شکل ۱-۴- سیال حفاری دارای صفحات گرافن در حین عملیات حفاری (الف) و در حین عملیات برداشت (ب)
۲۱	
۲۳	شکل ۱-۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی پوششی از نانو الیاف PA6 الکتروریسی شده
۳۴	شکل ۳-۱- انواع ویسکومتر لوله موئین
۳۵	شکل ۳-۲- ویسکومتر لوله موئین
۳۶	شکل ۳-۳- ویسکومتر بروکفیلد
۳۷	شکل ۳-۴- شکل‌های مختلف اسپیندل
۳۸	شکل ۳-۵- نوع ساده ویسکومتر
۳۹	شکل ۳-۶- دو نوع از ویسکومترهای لرزشی
۴۲	شکل ۳-۷- طرح شماتیکی از ویسکومتر استابینگر
۴۳	شکل ۳-۸- طرح شماتیکی از ویسکومتر مدل گوی غلتان
۴۴	شکل ۳-۹- نیروهای وارد بر گوی در حال سقوط تحت زاویه ۹۰ درجه
۴۶	شکل ۳-۱۰- طرح شماتیک سه‌بعدی ویسکومتر گوی غلتان

- شکل ۳-۱۱ - نمایی از پمپ دستی برای بارگذاری فشار روی سیستم ۴۷
- شکل ۳-۱۲ - نمایی از دستگاه ساخته شده ۴۸
- شکل ۳-۱۳ - المنت‌های حرارتی استیل ۵۰
- شکل ۳-۱۴ - دماسنج PT100 ۵۰
- شکل ۳-۱۵ - نمایی از سیلندر خارجی و داخلی ۵۱
- شکل ۳-۱۶ - نمایی از دستگاه به صورت تفکیک شده ۵۱
- شکل ۳-۱۷ - آهنربای الکتریکی با قدرت بالا ۵۲
- شکل ۳-۱۸ - فشارسنج شرکت keller ۵۳
- شکل ۳-۱۹ - سنسور مجاورت حساس به فلز ۵۳
- شکل ۳-۲۰ - پمپ آب داغ Grundfos ۵۴
- شکل ۳-۲۱ - ترمینال ریلی ۵۴
- شکل ۳-۲۲ - نمایی از صفحه مدرج برای تنظیم زاویه ۵۵
- شکل ۳-۲۳ - نمای جلویی جعبه کنترل دستگاه ۵۶
- شکل ۳-۲۴ - نحوه قرارگیری نمونه داخل دستگاه التراسونیک ۵۹
- شکل ۳-۲۵ - همزن مغناطیسی ۶۰
- شکل ۳-۲۶ - نمایی از ترازوی دیجیتال با دقت بالا ۶۰
- شکل ۴-۱ - تغییرات ویسکوزیته نفت مورد آزمایش با دما در فشار محیط ۶۸
- شکل ۴-۲ - نمودار De Boer جهت تشخیص احتمال رسوب آسفالتین ۶۹
- شکل ۴-۳ - روش استانکوویچ برای تشخیص پایداری آسفالتین در نفت خام ۷۰

- شکل ۴-۴- نمودار شاخص پایداری آسفالتین ۷۱
- شکل ۴-۵- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید آهن در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد ۷۳
- شکل ۴-۶- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید نیکل در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد ۷۴
- شکل ۴-۷- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید آلومینیوم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد ۷۶
- شکل ۴-۸- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد ۷۷
- شکل ۴-۹- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید کبالت در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد ۷۹
- شکل ۴-۱۰- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید کبالت در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد ۸۰
- شکل ۴-۱۱- تغییرات ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین بر اساس درصد وزنی نانو ذرات افزوده شده (۶ نوع نانوذره) ۸۱
- شکل ۴-۱۲- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی در دماهای ۲۵، ۴۵ و ۹۵ درجه سانتیگراد ۸۳
- شکل ۴-۱۳- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آهن در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد ۸۴
- شکل ۴-۱۴- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید نیکل در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد ۸۵
- شکل ۴-۱۵- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد ۸۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد ۸۷

شکل ۴-۱۷- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱

درصد وزنی نانو ذرات اکسید کبالت در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد ۸۷

شکل ۴-۱۸- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱

درصد وزنی نانو ذرات اکسید کبالت در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد ۸۸

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- نفت سنگین

نفت سنگین یا فوق سنگین، به نفت خامی اطلاق می‌شود که به راحتی جریان پیدا نمی‌کند. علت استفاده از واژه "سنگین" برای این نوع نفت، بالا بودن چگالی آن در مقایسه با نفت سبک است. طبقه‌بندی مخازن نفتی به مخازن نفت سبک و سنگین، بر اساس درجه API^۱ سیال مخزن انجام می‌گیرد. اگرچه یک طبقه‌بندی یکسان بین‌المللی برای این منظور وجود ندارد، ولی به طور معمول نفت‌هایی با درجه API بین ۱۲-۲۰ را می‌توان به نفت سنگین و نفت‌هایی با درجه API بین ۸-۱۲ را به نفت فوق سنگین طبقه‌بندی کرد [۱].

طبقه‌بندی دیگری نیز از نفت خام بیان می‌کند که نفت خام سنگین نفت خامی است که چگالی API برابر ۲۵ (چگالی ویژه ۰/۹۰۴) یا کمتر داشته باشد و گرانروی آن تا چند هزار سانتی پواز برسد (جدول ۱) [۲].

جدول ۱-۱ - تعریف انواع نفت سبک تا فوق سنگین (UNITAR-1999).

سبک شیرین	سبک ترش	سنگین شیرین	سنگین ترش	خیلی سنگین	
۴۰-۳۰	۴۰-۳۰	۳۰-۱۰	۱۰-۳۰	<= ۱۰	API درجه
< ۰/۵	۰/۱-۵/۵	< ۰/۵	۳-۱	> ۳	محتوی گوگرد (درصد وزنی)
کم	کم	کم تا زیاد	کم تا زیاد	زیاد	محتوی فلزات (ppm)
متغیر	متغیر	متغیر	متغیر	متغیر	اسیدیته
تا ۲۰	متغیر	تا ۵۰	متغیر	زیاد	محتوی نیتروژن (ppm)

بزرگ‌ترین مخازن نفت سنگین دنیا در شمال ونزوئلا قرار دارد. اما به طور کلی بیش از ۳۰ کشور جهان دارای مخازن نفت سنگین هستند. بالا بودن گرانروی و چگالی نسبی و همچنین داشتن ترکیبات مولکولی سنگین‌تر این نوع از نفت خام، مهم‌ترین خواص فیزیکی هستند که بین نفت سنگین و سبک

^۱ American Petroleum Institute

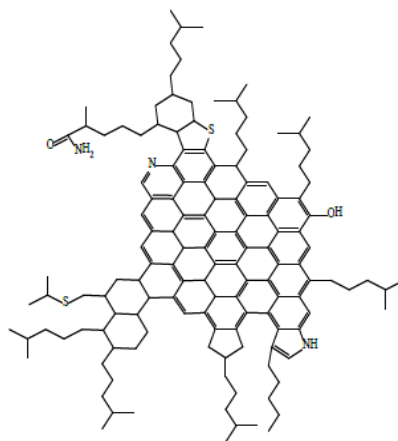
تمایز ایجاد می‌کنند. نفت فوق سنگین ونزوئلا دارای گرانشی بیش از ده هزار سانتی پواز و درجه API ۱۰ است. معمولاً برای انتقال این نوع از نفت خام در فواصل معین، با خط لوله، از رقیق‌کننده‌هایی استفاده می‌شود که باعث سهولت در جریان سیال می‌شوند [۳]. در نقاط مختلف جهان به‌خصوص در کشورهای کانادا، آمریکا، ونزوئلا، ایران، مکزیک، روسیه و بعضی از کشورهای تولیدکننده نفت خام در خاورمیانه، منابع عظیمی از نفت سنگین و بسیار سنگین وجود دارد. به‌طور کلی میزان کلی منابع نفت به شکل نفت سنگین و قیر طبیعی در جهان حدود ۶ تریلیون بشکه نفت درجا تخمین زده می‌شود که سه برابر ذخایر نفت معمولی جهان است. همچنین مطابق مطالعات انجام‌گرفته، مجموع ذخایر نفت سنگین ایران حدود ۸۵ میلیارد بشکه برآورد شده است. با وجود حجم زیاد ذخایر نفت سنگین و قیر طبیعی، تولید از این منابع انرژی به‌سادگی برداشت از ذخایر متداول نفت خام نبوده و با استفاده از فناوری‌های متداول به‌آسانی قابل بهره‌برداری نیستند. برداشت اولیه در تعداد کمی از مخازن نفت سنگین و قیر که دارای شرایط بهتری هستند، حداکثر به ۶ درصد نفت درجا می‌رسد. بنابراین استفاده از روش‌های بازیافت از همان ابتدای برداشت از این نوع مخازن، ضروری به نظر می‌رسد [۴، ۵].

تقاضای روزافزون جهانی برای نفت و فرآورده‌های آن و کاهش تولید طبیعی از مخازن نفت سبک و از سوی دیگر افزایش قیمت نفت در سال‌های اخیر باعث توجه روزافزون به روش‌های تولید از مخازن نفت سنگین و فوق سنگین شده است. این در حالی است که در کشور ایران با توجه به ذخایر قابل‌ملاحظه نفت سنگین، به دلیل عدم انتقال فناوری مربوطه، تولید از میدان‌ها نفت سنگین صورت نمی‌گیرد. به دلیل اینکه مخازن نفت سنگین و فوق سنگین دارای گرانشی بالا هستند، دارای بازیافت اولیه قابل‌توجهی نیستند، از این‌رو برای بازیافت مؤثر از چنین مخازنی ضرورت کاهش گرانشی نفت درجا با استفاده از روش‌های حرارتی احساس می‌شود، به‌طوری‌که بیش از ۸۰ درصد تولید نفت سنگین در مرحله ازدیاد برداشت از طریق روش‌های حرارتی انجام می‌گیرد [۶].

همان‌طور که گفته شد در ایران نیز منابع عظیم نفت سنگین نیز موجود است که می‌توان گفت شناخته‌شده‌ترین میدان‌ها نفت سنگین ایران عبارت‌اند از: کوه موند، زاغه، پایدار، پایدار غرب، سروش، پارس شمالی، فردوس، سوسنگرد، رامشیر، حوضه رسوبی زاگرس همانند شادگان، اهواز، منصوری، چشمه خوش و بوشهر. بخش عمده نفت سنگین ایران در کوه موند با ابعاد مخزن 16×90 کیلومتر مربع در 70 کیلومتری جنوب شرقی بوشهر واقع شده است. میزان نفت آن در سازند سروک $3/6$ میلیارد بشکه با درجه مرغوبیت API 8 تا 12 است [۷].

۱-۲- آسفالتین

آسفالتین، جزیره‌هایی از حلقه‌های به‌هم‌پیوسته آروماتیک می‌باشد که زنجیره‌های آلیفاتیک و آلیسیکلیک اطراف این جزیره را احاطه کرده‌اند. به دلیل وجود گروه‌های قطبی در ساختار آسفالتین و وزن مولکولی زیاد، از آن‌ها به‌عنوان بخش سنگین قطبی نفت خام یاد می‌کنند. شکل ۲ ساختار یک نمونه آسفالتین به‌دست‌آمده از نفت سنگین ونزوئلا را نشان می‌دهد. [۸]



شکل ۱-۱- ساختار مولکولی آسفالتین نفت ونزوئلا [۹]

آسفالتین مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات آلی می‌باشد که هر نوع ترکیب، مشخصه مربوط به خود را داراست. آسفالتین‌ها شامل کربن، هیدروژن و مقادیر جزئی اکسیژن، گوگرد و نیتروژن است. همچنین به آسفالتین فلزات گروه انتقالی مثل نیکل، وانادیم و جزئی آهن و مس می‌تواند جذب شده باشند. تا امروز از نقطه‌نظر اتمی دو نوع تعریف برای ترکیب آسفالتین ارائه شده است. تعریف اول بیشتر بر مبنای

ترکیبات مولکولی تشکیل دهنده مختلف آن، مستقل از نوع و منشأ نفت می باشد. یعنی در این تعریف اشاره به ویژگی های آسفالتین میدان نفتی بخصوصی نمی شود. این تعریف آسفالتین را به صورت هیدروکربن های با وزن مولکولی بالا که بر روی سطح هیدروکربن های با وزن مولکولی پایین جذب شده اند بیان می کند. تعریف دوم ترکیب آسفالتین را بر مبنای اختلاف پخش تشکیل دهنده های مختلف آن در نفت های به دست آمده از منابع مختلف بیان می کند. بنابر تعریف دوم، ترکیب آسفالتین به منشأ آن بستگی دارد [۱۰].

۱-۳- مشکلات رسوب آسفالتین

رسوب آسفالتین در خلال تولید، فرآیند و ازدیاد برداشت نفت، مشکل بسیار جدی برای صنعت بالادستی نفت در دنیاست. انتقال جریان چندفازی آب، گاز و نفت از مخزن تا پالایشگاه باید در یک شرایط پایدار تضمین شود. امکان رسوب آسفالتین از سازند نفتی شروع شده به چاه و تسهیلات سر چاهی و خطوط انتقال جریان و همه تجهیزات پایین دستی می رسد. تسهیلات سر چاهی و خطوط خط لوله انتقال نفت و همچنین ادوات و ابزارات در پالایشگاه های نفت نیز در معرض این مشکل قرار دارند. آسفالتین تمایل دارد تا در تمامی تجهیزات سطحی نشست کند. در یک مورد در دو جداکننده گاز-نفت در تسهیلات سرچاهی میدان یوتا در کشور کانادا بیش از ۲۵ تن آسفالتین پیدا شد [۱۱]. از جمله مهم ترین مشکلات رسوب آسفالتین در دستگاه های سر چاهی بر هم زدن شرایط ایمن برای تولید نفت است. در مواردی امکان مسدود شدن شیرهای اطمینان فشار و خرابی و حتی انفجار در اثر افزایش فشار پشت این شیرها را عامل شود. لذا شناخت این ماده نفتی و بررسی روش های جلوگیری و یا درمان رسوب از ضروریات صنایع بالادستی تولید نفت می باشد.

علی رغم توسعه قابل توجه دستگاه ها و روش های آزمایشگاهی شناسایی و مشخصه سازی سیالات نفتی و همچنین توسعه روزافزون مدل های ترمودینامیکی این سیالات، هنوز خواص دقیق فیزیکی، شیمیایی و همچنین ساختار مولکولی آسفالتین ها به خوبی مشخص نشده است. آسفالتین ها کریستاله

نمی‌شوند، به ترکیبات منفرد جدا نمی‌شوند و به کسرهای کوچک‌تر نیز تبدیل نمی‌شوند. بنابراین آنالیز نهایی این دسته ترکیبات خیلی معنادار نیست. بخصوص با در نظر گرفتن رزین‌ها که به شدت به آسفالتین‌ها می‌چسبند و به این راحتی از آسفالتین‌ها قابل جدا شدن نیستند [۱۲].

امروزه آسفالتین را به‌عنوان ماده نامحلول در پنتان و هپتان و محلول در حلال‌های آروماتیکی مانند تولوئن نیز تعریف می‌کنند [۱۳].

آسفالتین برای اولین بار توسط یک شیمیدان فرانسوی به نام بوسین گیل^۱ نام‌گذاری شد [۱۴]. وی در سال ۱۸۷۳ در بررسی اجزای بیتومن^۲ شرق فرانسه و پرو به اجزایی برخورد کرد که در الکل نامحلول و در ترپنتن^۳ محلول بودند و چون شباهت زیادی به آسفالت واقعی داشت آن را آسفالتین نام‌گذاری کرد. در سال ۱۹۲۴ نلنستین^۴ آسفالتین را به‌عنوان ماده‌ای که، نامحلول در پارافین-های سبک و حل‌شونده در تتراکلریدکربن و بنزن بود تعریف کرد [۱۵]. مارکوسن^۵ آسفالتین را دسته‌ای از ترکیبات معرفی کرد که در بنزن حل‌شوند، اما در اتر و گازوئیل‌های سبک حل‌نشوند. به‌رحال نقطه مشترک همه تعاریف آسفالتین این است که این ترکیب پیچیده نفتی بر اساس پارامتر حلالیت تعریف می‌شود. در واقع آسفالتین‌ها یک ترکیب با ساختار و خواص فیزیکی - شیمیایی مشخص نمی‌باشند، بلکه دسته‌ای از ترکیبات قطبی آروماتیکی نفت خام است.

۱-۴- عوامل عملیاتی مؤثر بر تشکیل یا تشدید رسوب آسفالتین

از جمله مهم‌ترین عواملی که در عملیات مختلف در جریان تولید و انتقال نفت سبب آغاز یا تشدید رسوب‌گذاری می‌شوند عبارت‌اند از:

الف) تزریق دی‌اکسیدکربن: از طریق برهم زدن تعادل شیمیایی نفت سبب ناپایداری آسفالتین (به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل ایجاد رسوب) می‌شود [۱۶].

¹ Boussingault

^۲ Bitumen

³ Turpentine

⁴ Nellensteyn

⁵ Marcusson

(ب) سیلاب زنی با گاز: کاهش نسبت کربن به هیدروژن در نفت سبب ناپایداری آسفالتین می‌شود [۱۷].

(ج) تغییرات pH: عمدتاً روی کشتش سطحی و واکنش‌های شیمیایی محیط اثر می‌گذارد [۱۸].
(د) به هم پیوستن جریان‌های نفت با ترکیب متفاوت: از طریق تغییر شیمیایی و برهم زدن تعادل ترمودینامیکی (به‌عنوان یکی از عوامل ایجاد رسوب) باعث تشکیل رسوب می‌شود [۱۹].

(ه) مواد شیمیایی آلی ناسازگار: موادی که ساختارشان فاقد مؤلفه آروماتیک است (مثل ایزوپروپیل الکل، متانول، استون و حتی برخی مواد که پایه آن‌ها گالیکول، الکل یا حلال‌های دوگانه است) می‌توانند با جذب رزین‌ها و مالته‌ها سبب تشکیل رسوب آسفالتین شوند [۱۶].

(و) تنش برشی: این مشکل اخیراً در پمپ‌های الکتریکی زیرآبی مشاهده شده است [۱۶].
(ز) پتانسیل جریانی: در محیط‌های متخلخل در کنار بار الکتریکی و افت فشار، یکی از دلایل تشکیل رسوب آسفالتین محسوب می‌شود [۱۶].

(ح) تغییرات دمایی: تغییرات دمایی نیز بر رسوب آسفالتین اثر می‌گذارند. سرد شدن جریان در طی انتقال می‌تواند منجر به تشکیل رسوب شود. افزایش دما در فشار ثابت معمولاً موجب پایداری آسفالتین در نفت می‌شود. بسته به ترکیب نفت می‌توان مواردی را یافت که در آن با افزایش دما، ابتدا رسوب کاهش و سپس افزایش یافته است [۱۸].

(ت) تغییرات فشار: با توسعه بهره‌برداری از چاه‌های نفت اختلاف فشار در سازند و نیروهای محرکه کاهش می‌یابد اما استفاده از روش‌های تکمیلی می‌تواند بخشی از افت فشار را تأمین کند. تغییر فشار به‌عنوان یکی از پارامترهای اصلی ترمودینامیکی و غالب طی تخلیه اولیه^۱ از مخزن می‌تواند سیستم کلئیدی نفت را از حالت پایدار خارج نموده و بر رسوب آسفالتین تأثیر گذارد.

1 Primary depletion

ی) با تخلیه فشار در دمای ثابت، تشکیل انبوهه‌های آسفالتینی در زیر و بالای نقطه حباب مشاهده و بررسی شده است. با افت فشار در طی بهره‌برداری از مخازن، با تغییر دانسیته که با تغییراتی در حلالیت آسفالتین‌های نفت خام همراه است، آسفالتین‌ها رسوب خواهند کرد. حداکثر رسوب آسفالتین در فشار نقطه حباب روی می‌دهد. در زیر نقطه حباب با خروج گازهای سبک از محلول حلالیت آسفالتین‌ها افزایش می‌یابد [۱۹].

۱-۵- مکانیزم‌های تشکیل لخته‌های آسفالتین

در یک مخزن، ذره‌های آسفالتین تشکیل لخته می‌دهند و سپس در حفرات نشست انجام می‌گیرد، بدین‌وسیله آسفالتین موجب کاهش تولید می‌شود. با توجه به اینکه تشکیل لخته ممکن است هیچ آسیبی به سازند نزند، تشخیص اینکه تشکیل لخته و یا نشست آسفالتین در حال انجام است بسیار مهم می‌باشد. در واقع تشکیل لخته به‌عنوان یک هشدار مهم به حساب می‌آید.

مکانیزم‌های متفاوتی برای لخته‌گذاری و نیز ته‌نشست آسفالتین در سال ۱۹۹۷ توسط منصور^۱ ارائه شده است. در ادامه به مرور این مکانیزم‌ها پرداخته می‌شود [۲۰].

۱-۵-۱- مکانیزم حلالیت

میزان پراکندگی اجزای آلی سنگین در نفت به ترکیب شیمیایی آن نفت بستگی دارد. عوامل اولیه که مسئول نگهداری و حفظ پایداری ترکیب نفتی می‌باشند عبارت‌اند از: نسبت مولکول‌های قطبی به غیر قطبی، نسبت مولکول‌های سنگین به سبک و نوع اجزای موجود در نفت. آشفستگی یا برهم زدن تعادل ترکیبات نفتی موجب رسوب اجزای آلی سنگین می‌شوند. عواملی مانند تغییر در دما، فشار و ترکیب نفتی (مانند اضافه شدن یک حلال به نفت) نیز می‌توانند نفت را ناپایدار کنند. به‌عنوان مثال به‌محض افزایش میزان هیدروکربن آروماتیکی به یک نفت خام (یک حلال قابل امتزاج قطبی) ذرات آسفالتین توده‌های مایسل را تشکیل می‌دهند که با افزایش غلظت از نظر اندازه رشد می‌کنند. این پدیده

عمدتاً به دلیل آرایش اتم‌ها و یون‌ها که از ساختار مولکولی پیچیده آسفالتین ناشی می‌شود رخ می‌دهد. از طرف دیگر با افزایش میزان هیدروکربن‌های پارافینی یک نفت خام، ذرات آسفالتین ممکن است به صورت فاز جامد از نفت جدا شوند. تکه‌های جدا شده که شامل ترکیبات گوگرد، نیتروژن و اکسیژن با پیوندهای هیدروژنی می‌باشند شروع به جمع شدن و انعقاد کرده و نهایتاً رسوب برگشت‌ناپذیر اجزای آلی سنگین را باعث می‌شوند [۲۰].

۱-۵-۲- مکانیزم کلوئیدی

اثبات شده است که بعضی از اجزاء نفت مخصوصاً آسفالتین‌ها تمایل شدیدی به تجمع خود به خودی دارند. به محض افزایش بیشتر میزان هیدروکربن‌های پارافینی در نفت خام، بعضی از اجزای آلی سنگین (خصوصاً آسفالتین) تشکیل کلوئید داده و سپس از فاز نفت به صورت توده (ذرات بزرگ) جدا شده و به وسیله بعضی عوامل پایدارکننده مثل رزین‌ها که بر روی سطح آسفالتین جذب شده و آن‌ها را شناور ساخته‌اند به صورت سوسپانسیون در نفت باقی می‌مانند. پایداری چنین کلوئیدهایی تابعی از غلظت عوامل پایدارکننده در محلول، غلظت ذرات اجزای آلی سنگین که سطح آن‌ها به وسیله عوامل پایدارکننده پوشیده شده و تعادل بین عوامل پایدارکننده در محلول و عوامل پایدارکننده بر روی سطح ذرات اجزای آلی سنگین در نظر گرفته می‌شود. تغییر در مقدار این عوامل در نفت باعث تغییر مقدار جذب شده آن‌ها بر روی سطح ذرات آلی سنگین می‌شود [۲۰].

۱-۵-۳- مکانیزم انعقاد یا تشکیل توده

تغییر در غلظت عوامل لخته‌زدا (مثل رزین) در نفت باعث تغییر میزان جذب ذرات آلی بر روی سطح ذرات سنگین می‌شود. غلظت این عوامل در نفت ممکن است آنقدر پایین باشد که میزان جذب شده آن برای پوشاندن سطح کل ذرات اجزای سنگین کافی نباشد. پوشیده نشدن کامل سطح ذرات آلی باعث توسعه مکان‌های آزاد فعال بر روی ذرات و ایجاد پتانسیل توده‌ای شدن یا گردآمدگی و تجمع ذرات آلی سنگین می‌شود. در نتیجه این امر، ذرات آلی سنگین به طرف هم می‌آیند و به هم می‌چسبند

(اجتماع و ایجاد توده رسوب) و بزرگ می‌شوند. ماهیت و شکل توده‌های ایجادشده، اثر آن‌ها بر روی حرکت سیالات نفتی در محیط متخلخل و خطوط انتقال را تعیین می‌کنند [۱۹].

۱-۵-۴- مکانیزم الکتروسینتیک

یک مکانیزم اضافی دیگر برای ته‌نشینی اجزای آلی سنگین کلوئیدی نفت زمانی به وجود می‌آید که نفت در یک مجرا و یا کانال (محیط‌های متخلخل، چاه و یا خط لوله) در حال جریان باشد. عواملی که بر روی این مکانیزم اثر می‌گذارند: خصوصیات گرمایی الکتریکی، قابلیت ترشوندگی مجرا، رژیم جریان، دما، فشار، خواص نفت جاری و خصوصیات اجزای آلی سنگین و ذرات کلوئیدی و اختلاط نفت می‌باشند [۲۰].

در اثر جریان نفت در خط جریان (از جمله از محیط متخلخل، درون چاه و یا خط لوله و...) به دلیل حرکت ذرات کلوئیدی آسفالتین که دارای بار مثبت هستند، اختلاف پتانسیل الکتریکی در طول مجرا به وجود می‌آید و در نتیجه در بالادست مجرا پتانسیل منفی و در پایین دست پتانسیل مثبت تولید می‌شود. پس از ورود نفت به مجرا، ذرات آسفالتین شروع به چسبیدن به دیواره می‌کنند، جایی که جداسازی فازها به طریقی صورت می‌گیرد که فازها پس از جدایی، بارهایی مخالف هم دارند. همچنان که نفت در مجرا پیش می‌رود، جدایی فاز بیشتری رخ می‌دهد و در نتیجه اختلاف بار بین دوفاز زیاد می‌شود. بنابراین بین دیواره‌ی مجرا و توده جریان و همچنین بین ورودی و خروجی مجرا میدان پتانسیل ایجاد می‌شود. انتقال ذرات باردار آسفالتین با جریان سبب یک جریان کلی و همچنین ایجاد اختلاف پتانسیل می‌شود. از سوی دیگر اختلاف پتانسیل با انتقال مکانیکی ذرات باردار مخالفت می‌کند. در طی جریان یافتن سیال، این تغییرات الکتریکی ممکن است سبب خنثی شدن محیط شوند و در نتیجه ناپایداری توده‌ها اتفاق می‌افتد، بنابراین با آستانه رسوب‌گذاری مواجه می‌شویم.

۱-۶- روش‌های رفع مشکل رسوبات و معایب و مزایای آن‌ها

عمده‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت رفع مشکل رسوب آسفالتین به سه دسته تقسیم می‌-

شوند که هر روش مزایا و معایبی دارد. این روش‌ها عبارت‌اند از:

الف) روش‌های مکانیکی،

ب) روش‌های شیمیایی،

ج) روش‌های حرارتی [۲۱].

در ادامه هر یک از روش‌های فوق به تفصیل شرح داده می‌شود:

۱-۶-۱- روش‌های مکانیکی

در این روش از ابزارهای مختلف مکانیکی جهت مقابله با رسوب آسفالتین در دهانه چاه استفاده می‌شود. همه این ابزارها با وارد کردن تنش برشی مستقیم بر رسوبات، آن‌ها را کنده و از محل خارج می‌کنند. تفاوت این روش‌ها تنها در نحوه ایجاد تنش، کندن رسوبات و راندن ابزار است. استفاده از توپکرانی^۱ عمدتاً جهت تمیز کردن رسوبات درون خطوط لوله استفاده می‌شود. در روش سیال پرفشار^۲ با استفاده از لوله مغزی سیار ابزار را به داخل چاه می‌فرستند. ابزار در حین چرخش، سیال تزریقی را با فشار زیاد به سطح رسوبات پمپ می‌کند. این جریان پرفشار، تنش متناوب به رسوبات وارد می‌کند که سبب ایجاد شکاف‌هایی در حد میکرومتر شده و باعث از هم پاشیدن ساختار آن‌ها می‌گردد. در روش حفاری با لوله منعطف^۳ نیز با نصب ابزارهای موردنیاز روی دستگاه لوله مغزی سیار، حفاری مجدد یا سایش رسوبات به انجام می‌رسد. مزایای روش‌های مکانیکی اطمینان از تمیز شدن و رفع کامل رسوبات است. این روش‌ها با حداقل آسیب‌سازندی، از دیدگاه مسائل زیست‌محیطی بسیار مناسب هستند. به‌علاوه صدمه آن‌ها به تجهیزات درون‌چاهی نیز بسیار اندک است.

از جمله معایب روش‌های مکانیکی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- به تأسیسات و سیستم تولید محدود می‌شوند و امکان استفاده درون سازند وجود ندارد.

^۱ Pigging

^۲ Jetting

^۳ Coil Tubing Drilling and Milling

- محدودیت‌های تجهیزاتی داشته، نیاز به سرویس منظم و نگهداری زیادی دارند و استفاده از آن‌ها نیز زمان‌بر است.
 - احتمال نقص سیستم‌های آن‌ها و از دست رفتن ابزار زیاد است که ممکن است خطر مانده-گذاری^۵ و تحمیل هزینه‌های اضافی به پروژه را به دنبال داشته باشد.
 - ممکن است سبب بسته شدن مشبک‌ها شوند.
 - ممکن است رسوبات کنده‌شده در ادامه فرآیند تولید در محل دیگری انباشته شوند و دوباره مشکل ایجاد کنند.
- این روش‌ها رسوبات را فقط از محل خود کنده و مشکل را موضعی رفع می‌کنند و پس از رفع رسوب باید سیستم تمیز شود. همه این روش‌ها برای درمان به کار می‌روند نه پیشگیری [۲۱].

۱-۶-۲- روش‌های شیمیایی

روش‌های شیمیایی که از متداول‌ترین روش‌های رفع مشکل رسوبات هستند شامل چهار دسته کلی از مواد شیمیایی می‌باشند:

حلال‌ها: اغلب برای رفع رسوب آسفالتین به کار می‌روند و مهم‌ترین آن‌ها زایلن و تولوئن هستند. برای رسوبات معدنی نیز از آب و اسیدها استفاده می‌شود.

زداینده‌ها: گروهی از مواد شیمیایی هستند که از نظر سطح بسیار فعال می‌باشند. این مواد برای شکستن ساختار رسوبات استفاده‌شده و از انباشتگی مجدد آن‌ها نیز جلوگیری می‌کنند.

پیراینده‌های کریستالی: پلیمرهایی هستند که برای تغییر سرعت رشد کریستال و شکل آن استفاده می‌شوند. این مواد با تغییر مکانیسم تشکیل هسته کریستال، تشکیل خود کریستال، کاهش سرعت رشد آن و پیشگیری از به هم پیوستن کریستال‌های کوچک مانع ایجاد مشکل توسط رسوبات می‌شوند.

پراکنده‌سازها و ممانعت‌کننده‌ها: در مورد آسفالتین این مواد نیز مثل رزین‌ها عمل کرده و با احاطه کردن مولکول‌های آسفالتین از رسوب آن‌ها جلوگیری می‌کنند.

از مزایای روش‌های شیمیایی نیز می‌توان موارد زیر را برشمرد:

- می‌توان در سراسر سیستم تولید (از سازند تا چاه و خطوط انتقال) از آن‌ها استفاده کرد.
- نیاز به فنآوری و تجهیزات پیشرفته‌ای ندارند و می‌توان با سیستم‌های ساده تزریق یا لوله مغزی سیار از آن‌ها استفاده کرد.
- در اکثر موارد مواد شیمیایی متنوعی ارائه می‌شوند که می‌توان با انجام آزمایش‌های لازم بهترین نوع آن‌ها را انتخاب و استفاده کرد.

روش‌های شیمیایی محدودیت‌هایی نیز دارند؛ از جمله اینکه:

- برای تمامی مواد شیمیایی باید مسائل زیست‌محیطی و ایمنی کارکنان مورد توجه قرار گیرد که این امر باعث محدودیت استفاده از این مواد خواهد شد. علاوه بر آن، مواد شیمیایی نسبت به سایر روش‌ها بیشترین آسیب را به تأسیسات و محیط‌زیست وارد می‌کنند.
- استفاده از حلال‌ها و مواد شیمیایی می‌تواند منجر به تشکیل امولسیون نفت-آب شود.
- استفاده مداوم و با حجم زیاد از مواد شیمیایی سبب افزایش هزینه‌های عملیاتی خواهد

شد

در طراحی یک سیستم تزریق همواره باید نکات زیر مورد توجه قرار گیرند:

- ضروری است در خصوص نوع سیال تزریقی، سیال تولیدی، سازگاری آن‌ها و انتخاب بهترین مواد مطالعات لازم انجام گیرد.
- نرخ تزریق مواد باید به‌دقت مشخص گردد تا هم در درازمدت، تزریق بیش‌ازاندازه سبب هدرروی مواد شیمیایی، زیان زیست‌محیطی و اقتصادی نشود و هم در اثر کمبود مواد شیمیایی تزریقی، رفع مشکل به‌صورت ناقص انجام نپذیرد.
- در صورتی که پسماندهای مواد شیمیایی دارای عوارض زیست‌محیطی باشند باید این پسماندها را به طرز صحیحی تفکیک و دفع کرد [۲۲].

۱-۶-۳- روش‌های حرارتی

این روش‌ها شامل سه نوع فن‌آوری هستند:

- استفاده از واکنش‌های شیمیایی گرمازا: در این روش مواد شیمیایی منتخب مانند کلرید آمونیوم و نیترات سدیم را به داخل چاه پمپ می‌کنند. واکنش شیمیایی در چاه سبب تولید حرارت می‌شود که این امر می‌تواند باعث از بین رفتن رسوبات گردد. این روش پرهزینه، نیاز به پایش دقیق داشته و احتمال بروز خطا و انجام ناقص عملیات نیز در آن وجود دارد.
- استفاده از هیدروکربن‌های داغ: در این روش نفت با حرارت زیاد به درون سیستم پمپ می‌شود. لازم به ذکر است این روش می‌تواند سبب آسیب‌سازندی سنگ مخزن شود؛ چراکه نفت تزریقی تمامی رسوبات را دوباره به ته چاه و درون سازند برمی‌گرداند و زمانی که حجم رسوبات قابل توجه باشد این روش بازده خوبی نخواهد داشت.
- استفاده از گرم‌کن‌های برقی درون چاه: در حال حاضر این روش به دلیل هدرروی زیاد گرما در چاه، نیاز به تعمیر و نگهداری مداوم و تأمین انرژی، چندان مورد توجه نیست [۲۳].

۱-۷- کاربرد فناوری نانو در صنعت نفت

علم نانو تاکنون باعث پیشرفت‌های بی‌نظیری در عرصه‌های مختلف صنایع شده است و صنعت نفت نیز از این جریان جدا نبوده و با فناوری نانو پیشرفت‌های زیادی در تمام بخش‌های این صنعت رخ داده است. به‌عنوان مثال با افزودن نانو ذرات، خواص سیال پایه از قبیل دانسیته، گرانروی، هدایت حرارتی و گرمای مخصوص افزایش می‌یابد. این افزایش در خواص فیزیکی سیال پایه، برای کاربردهای انتقال حرارتی مطلوب است [۲۴].

۱-۷-۱- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو سیالات

چنین سیالات هوشمندی می‌توانند با تغییر ترشوندگی، کاهش نیروی کششی و نیز استحکام ماسه، فرآیند ازدیاد برداشت از مخازن را بهبود دهند. برای مثال سولیمانوف^۱ و همکاران توانستند نشان دهند که استفاده از نانو ذرات باعث افزایش خواص رئولوژیکی و نیز افزایش تأثیر محلول سورفکتانت در پروسه برداشت نفت شده و در وهله اول موجب ایجاد تغییر در ضریب کشش سطحی مخلوط نفت و سورفکتانت می‌گردد [۲۵].

۱-۷-۲- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو ذرات

از جمله کاربردهای مهم نانو ذرات در این زمینه می‌توان به استفاده از نانو مواد جهت تسهیل جدایش نفت و گاز در داخل مخزن و همچنین استفاده از نانو ردیاب‌ها در داخل سنگ مخزن اشاره نمود. این نانو ذرات هنگامی که با سنگ‌های حاوی نفت خام تماس پیدا می‌کنند، محموله‌های خود را رها کرده و باعث بازیافت نفت خام می‌شوند [۲۵].

از سویی دیگر کنترل جریان سیال، یکی از مهم‌ترین فاکتورها در استخراج سیالات هیدروکربنی می‌باشد. در این حالت سیال تزریق شده باید تا حد امکان یکنواخت حرکت کند تا بتواند به صورت مناسب به درون سازند نفوذ کند. محققان به منظور بهبود این پروسه موفق به تولید عوامل سطحی و غیر نفوذکننده بر پایه نانو ذرات شده‌اند که می‌توانند میزان جریان را در عملیات استخراج و تولید بهبود دهند. در این حالت به نانو ذراتی نیاز است که:

۱. به هیچ وجه به بدنه ماتریس سازند نچسبند.

۲. در غلظت‌های بسیار پائین نیز قابل شناسایی باشد.

۳. بتوانند سبب تغییر شکل سیال درون حفره شود.

^۱ Suleimanov

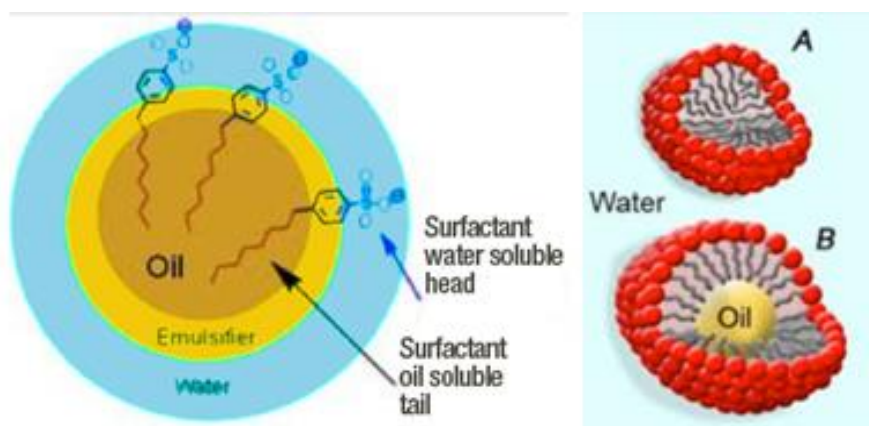
۴. بتواند سبب تغییر کشش سطحی بین هیدروکربن و آب شور و یا مابین سیال و سطح

سنگ مخزن گردد.

همچنین محققان دانشگاه MIT به تازگی کشف کرده‌اند که افزودن نانو ذرات مغناطیسی که آب را دفع می‌کنند می‌توانند در صورت مخلوط شدن با نفت، و در نهایت با استفاده از یک آهنربای قوی، سبب جداسازی آسان مخلوط نفت و آب شوند و این امر در پروسه تولید و بهره‌برداری از مخازن نفتی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. این پروسه باید خارج از مخازن بازیافت نفت صورت گیرد تا از آلودگی محیط توسط نانو ذرات جلوگیری شود [۲۶].

۱-۷-۳- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو سطح سازها

مواد فعال سطحی یا همان سورفکتانت^۱ به موادی اطلاق می‌شود که سبب کاهش کشش سطحی می‌شوند. در حالت کلی سورفکتانت‌ها را این‌گونه تعریف می‌کنند که مواد فعال سطحی و دارای یک سر آب دوست و یک دم آب‌گریز می‌باشند. این مواد با توجه به خصوصیت آب دوستی یا آب‌گریزی سایر مواد، از جهت مناسب خود به آن‌ها متصل شده و از سر دیگر آزاد باقی می‌مانند و سبب تغییر خواص سطحی آن‌ها می‌گردند [۲۷].

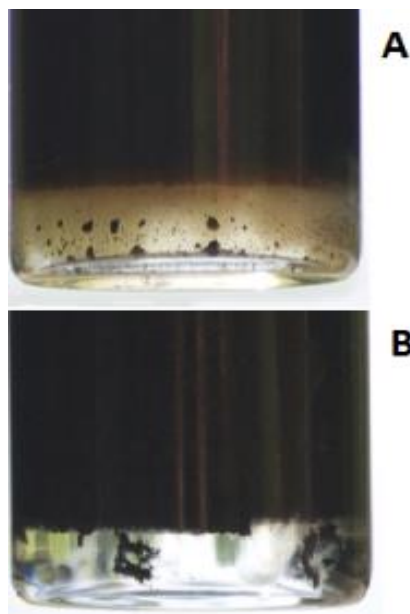


شکل ۱-۲- عملکرد نانو سطح سازها در امولسیون نفت و آب (A- نانو سورفکتانت در لحظه اولیه ورود به

امولسیون نفت-آب، B- احاطه مولکول نفت توسط نانو سورفکتانت و از بین رفتن امولسیون) [۲۷].

^۱ Surface active agent

هدف اولیه از استفاده از سورفکتانت‌ها در عملیات استخراج و تولید از مخازن، کاهش کشش سطحی و بهبود عملیات جداسازی سیال، تصحیح ترشوندگی سنگ مخزن و تبدیل آن از حالت نفت دوست به آب‌دوست که خود سبب تسهیل فرآیند جداسازی سیال هیدروکربوری از سازند می‌گردد، و نیز کاهش ویسکوزیته نفت می‌باشد. درعین حال این امر سبب متورم شدن و افزایش قطر و فضای بین لایه‌ها با استفاده از عرض زنجیره‌های طویل سورفکتانت می‌شود که به‌نوبه خود مسیرهای فیلتراسون سیال را مسدود می‌کند. همچنین سورفکتانت‌های با ابعاد بزرگ به دلیل ساختار نامناسب در فواصل ابتدائی سازند جذب‌شده و یا تأثیر معکوسی بر ترشوندگی دارند. بنابراین برخی خصوصیات این مواد سبب کاهش تأثیر آن‌ها در پائین آوردن فشار موئینگی می‌گردد. درحالی‌که هدف، کاهش فشار موئینگی و افزایش تراوانی سازند در ازدیاد برداشت می‌باشد. امروزه استفاده از نانوسورفکتانت‌ها به دلیل اندازه کوچک‌تر و سطح‌فعال بیشتر سبب بهبود فرآیند استفاده از این مواد گردیده است. زمانی که ابعاد این مواد در محدوده نانومتری قرار می‌گیرد، توانائی آن‌ها برای نفوذ به درون حفرات سازند و نیز سطح فعال آن‌ها افزایش چشمگیری می‌یابد. این مواد به‌صورت گسترده‌ای بر روی کشش سطحی سیال مخزن اثر گذاشته و میزان گرانروی آن را کاهش می‌دهند. در این حالت سیالی که گرانروی آن در داخل مخزن و چاه کاهش‌یافته باشد، سبک‌تر شده و بهتر در مسیر خروج از چاه جریان یافته و از سایر مواد موجود در چاه جدا می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهند که سورفکتانت‌ها بر روی نانوکمپلکس‌ها و ترکیبات پیچیده موجود در چاه تأثیر گذاشته و ساختار مخزن را تغییر می‌دهند. در این حالت توانائی نفوذ سورفکتانت در بین لایه‌های سازند امری بسیار مهم می‌باشد [۲۸]. یکی دیگر از مهم‌ترین خواص سورفکتانت‌ها، محو امولسیون‌ها یعنی قطرات و حباب‌های کوچکی است که از یک مایع در دیگر تشکیل می‌شود. برای مثال زمانی که از عملیات سیلاب زنی با سورفکتانت و پلیمر در مخازن استفاده می‌شود، امولسیون‌های آب-روغن شکل می‌گیرند که برای جداسازی آن‌ها مجدداً از انواع سورفکتانت‌ها استفاده می‌گردد [۲۷].



شکل ۱-۳- حذف امولسیون از محلول نفتی [۲۷].

۱-۷-۴- ازدیاد برداشت با استفاده از هیدروژل‌های نانوکامپوزیتی

طبق مطالعات چنانچه مقدار تولید آب همراه نفت به دلیل شکاف طبیعی مخزن یا افزایش تزریق آب برای ازدیاد برداشت، افزایش یابد و چاه به مرحله آبدهی برسد در این صورت، تأسیسات روزمینی قادر به جداسازی آب از نفت نخواهد بود. نانوزل‌ها ذراتی با ابعاد کمتر از میکرومتر هستند که در حضور آب متورم می‌شوند. در حقیقت این ذرات از یک شبکه سه‌بعدی از زنجیره‌های پلیمری آب‌دوستی که توسط پیوندهای پایدار کوالانسی متصل شده، تشکیل شده است. همچنین از آنجائی که اندازه و شکل این مواد مشابه تک ماکرو مولکول‌های خطی با ساختار مارپیچی می‌باشد، می‌توان آن‌ها را در زمره زنجیره‌های پلیمری که به صورت درونی اتصال عرضی پیدا کرده‌اند در نظر گرفت. دلیل اصلی استفاده از سیلاب زنی پلیمری در بهره‌برداری از چاه، کاهش گرانیوی آب تزریق شده به مخزن و از آنجا افزایش احتمال جاروب مخزن توسط آب می‌باشد. زیرا آبی که سرعت حرکت بیشتری دارد با سرعت بیشتری وارد نواحی با تراوانی بالا می‌شود و تأثیر کمتری در افزایش نسبت آب/نفت دارد. ولی درعین حال استفاده از پلیمرها دارای معایب خاص خود نیز می‌باشد که می‌توان با افزودن ژل و در حقیقت استفاده از ژل پلیمرها تا حدودی این معایب را برطرف نمود. علاوه بر آن استفاده از ژل پلیمرها نیز معایبی مانند تخریب

ژل در اثر صدمات حرارتی، مکانیکی، میکروبی، تنش و غیره به همراه دارد. در نهایت به منظور غلبه بر محدودیت‌های استفاده از ژل پلیمرهای موجود، نانو ژل‌های جدیدی بر پایه پلی اکریل آمید- خاک رس (MMT) توسعه پیدا کردند و خواص آن‌ها به صورت آزمایشگاهی آزمون شده و جهت استفاده در سیلاب زنی پلیمری مورد استفاده قرار گرفتند. این گونه نانوژل‌ها در مقایسه با ژل پلیمرهای معمولی نتایج مناسبی در آزمون‌های حرارتی، مقاومتی و مکانیکی از خود نشان دادند. این نانوژل‌ها می‌توانند از محلول آبی با غلظت کم تا یک جامد الاستیک طبقه‌بندی شوند و یا به عنوان عامل مسدودکننده شکاف‌ها و یا انواع منحرف‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در این روش به علت تشابه ویسکوزیته آب و ژل‌های پلیمری هزینه تزریق به چاه بسیار کمتر از سایر روش‌ها است. همچنین عمق نفوذ این نوع ژل‌ها به علت تشابه ساختاری با آب بسیار بیشتر از سیمان است. از سوی دیگر استحکام و ماندگاری این نوع ژل‌ها در قیاس با ژل‌های معمولی و در شرایط مشابه بیش از ده برابر است. همچنین باید توجه داشت که این نوع ژل‌ها دائمی نیستند و در صورت تزریق اشتباه، می‌توان با عامل شیمیایی دیگر اثر آن‌ها را خنثی کرد [۲۸].

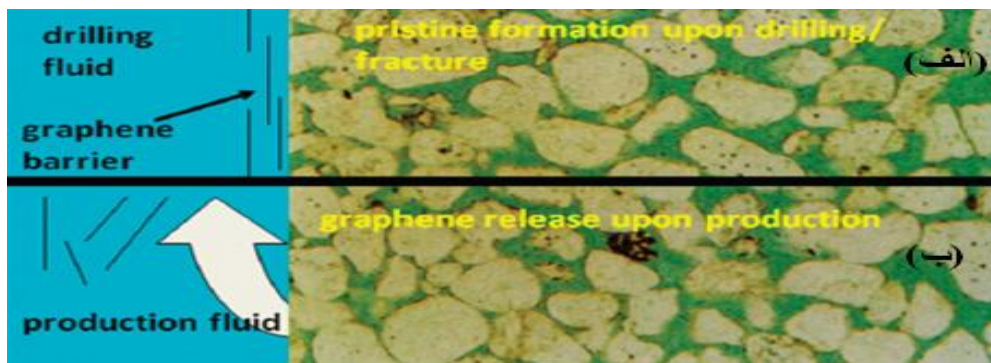
۱-۷-۵- کاربرد فناوری نانو در بهبود سیال حفاری

امروزه در صنعت حفاری سعی می‌شود از سیالاتی استفاده شود که کمترین اثرات سوء زیست‌محیطی را داشته باشند. برای مثال محققان به این نتیجه رسیده‌اند که حفاری سازندهای ماسه‌سنگی با استفاده از سیالات پایه آبی دارای فواید زیست‌محیطی و اقتصادی فراوان می‌باشد و در این حالت سیالات حاصل به گونه‌ای فرموله می‌شوند که دارای کمترین میزان هزینه باشند. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیالات پایه آبی با عملکرد بالا دارای مزایایی از جمله کاهش اثرات سوء محیط‌زیستی، هزینه‌های پائین تر و هرز روی کمتر می‌باشند. برای مثال محققان از سیالات پایه آبی با عملکرد بالا دارای پلی اکریل آمیدهای هیدرولیز شده و افزایه‌های پلی‌آمید در عملیات حفاری چندین چاه در خلیج فارس استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که دارای اثرات زیست‌محیطی مطلوبی می‌باشد. همچنین نانو موادی مانند نانوگرافن و سایر مواد نانو ساختار نیز به عنوان افزایه‌های سیال حفاری

وجود دارند که می‌توانند سیالات حفاری را به دو دسته : نانو سیالات ساده و نانو سیالات پیشرفته دسته‌بندی نمایند. استفاده از این نانو ذرات میزان مواد شیمیائی و جامدات موجود در سیال حفاری را به میزان چشمگیری کاهش داده و در نتیجه سبب کاهش هزینه کلی و اثرات سوء محیط‌زیستی عملیات می‌گردد [۲۹].

نیاز است تا از افزایشها و موادی در ساختار سیال حفاری استفاده گردد که تا حد ممکن از هرز روی آن که سبب آلودگی محیط‌زیست و نیز وارد نمودن آسیب به سازند می‌شود جلوگیری گردد. این افزایشها از طریق تشکیل فیلتر کیک در اطراف دیواره چاه سبب جلوگیری از هرزروی سیال حفاری می‌شوند. امروزه، گرافن به‌عنوان یک تک لایه از گرافیت به دلیل خواص مناسبی که دارد مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین خصوصیات این تک لایه داشتن سطح ویژه‌ای در حدود ۲۹۶۵ مترمکعب بر گرم است که می‌تواند به‌عنوان غشایی که حتی در برابر گاز هلیوم ناتراوا است عمل کند. به همین دلیل می‌تواند به‌عنوان فیلتر عمل کند. اما از آنجائی که توزیع قطعات بزرگ این ماده در محیط‌های آبی مشکلاتی را در گل حفاری پایه آبی ایجاد می‌کند، محققان پیشنهاد می‌کنند که از اکسید گرافن در این زمینه استفاده گردد. زیرا این ماده در محیط‌های آبی پایدارتر است و مورفولوژی صفحه‌ای خود را که سبب تشکیل فیلتر کیک مطلوب می‌شود حفظ می‌کند. یکی از خواص جالب این ماده این است که می‌تواند از محلول جدا شده و نوعی ماده کاغذی شکل قوی تولید نماید. این امر در تولید یک لایه ناتراوا به‌منظور جلوگیری از هرزروی سیال به داخل دیواره چاه بسیار مؤثر است. از آنجایی که این ذرات ساختار ورقه ورقه‌ای مناسب و ضخامت نانومتری دارند (نانو مواد دوبعدی) می‌توانند در مقایسه با افزایشهای دیگر، مانند خاک رس، فیلتر کیک‌های نازک‌تر و با کارایی بالاتری ایجاد نمایند. این نکته از این بابت نیز حائز اهمیت است که ضخامت فیلتر کیک تشکیل شده به‌صورت مستقیم و به‌شدت با گشتاور دیفرانسیلی مورد نیاز جهت چرخاندن لوله‌ها در حین عملیات حفاری، بازمان حفاری و با هزینه حفاری همبستگی دارد. همچنین از مزایای مهم دیگر این ماده می‌توان به این نکته اشاره نمود که خطرات زیست‌محیطی بسیار پائینی دارد و فناوری آن ارزان است. در شکل ۱ عملکرد گرافن

در حین عملیات حفاری (الف) و در حین عملیات برداشت (ب) نشان داده شده است. در حین حفاری زمانی که فشار بالا باشد صفحات گرافن یک فیلمی را تشکیل می‌دهند تا از نفوذ سیال حفاری به درون سازند جلوگیری نمایند. همچنین زمانی که در حین پروسه بازیافت فشار کاهش می‌یابد نفت و گاز موجود در سازند صفحات گرافنی را از روی دیواره چاه پس می‌زنند [۳۰].



شکل ۱-۴- سیال حفاری دارای صفحات گرافن در حین عملیات حفاری (الف) و در حین عملیات

برداشت (ب) [۳۰].

۱-۷-۶- کاربرد نانو فیلترها و نانو جاذبها

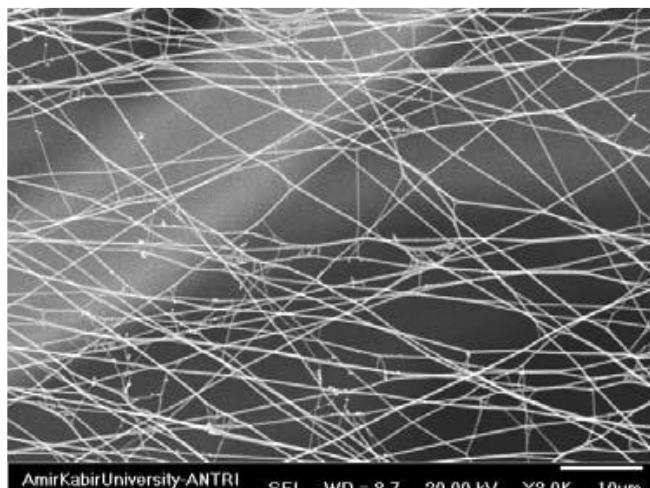
انواعی از افزودنی‌های نانو موجود است که مستقیماً به سوخت (بنزین، گازوئیل) اضافه می‌شوند. از جمله این نانو ذرات، می‌توان به افزودنی خاصی^۱ اشاره کرد که در صورت اضافه شدن به بنزین بیش از ۱۰٪ صرفه‌جویی در مصرف ایجاد خواهد کرد. همچنین در طی ۵۰ سال گذشته بسیاری از تحقیقات صنعتی، روی ذخیره و جداسازی و تصفیه گاز متمرکز شده است. نانولوله‌های کربنی به دلیل حجم زیاد در مقابل سطح کم توانایی انجام این کارها را دارند. در حال حاضر ذخیره‌سازی ایمن گاز هیدروژن برای استفاده در پیل‌های سوختی به‌عنوان سوخت تمیز و ذخیره انرژی و گاز طبیعی (متان) با استفاده از این نانولوله‌ها صورت می‌گیرد. فیلترهای نانویی نیز ساخته شده است که قادر به جداسازی آلودگی‌ها و حتی نمک از آب هستند و جرم‌گیرها و صافی‌هایی نانو ساختار برای برطرف کردن آلودگی‌ها از

^۱ F2-21 @ Nanoron

دورریزهای صنعتی، افزایش بهره‌وری و نگهداری و تعمیرات صنعتی با مواد و انرژی کمتر و افزایش امکان بازیافت مطرح هستند [۲۵].

از دیگر کاربردهای فناوری نانو می‌توان به هیدروژن سولفید که گازی بسیار خطرناک، سمی و خورنده است، اشاره کرد که می‌تواند در حین عملیات حفاری از درون سازند به داخل سیال حفاری نفوذ کرده و باعث آلودگی محیط‌زیست گردد. به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست، ایمنی کارکنان و نیز جلوگیری از خوردگی خط لوله و تجهیزات نیاز است تا این ماده از سیال حفاری جدا گردد. از آنجایی که نانو ذرات سطح ویژه بالائی دارند بسیار واکنش‌پذیر می‌باشند. محققان توانستند نشان دهند که استفاده از نانو ذرات اکسید روی با ابعادی در حدود ۲۵-۱۴ نانومتر و سطح ویژه ۴۴-۵۶ مترمکعب بر گرم که توسط روش پیرولیز پاششی تهیه‌شده‌اند در جداسازی هیدروژن سولفید از سیال حفاری پایه آبی می‌تواند بسیار مؤثر باشد. همچنین کارایی این نانو ذرات با ذرات بالک اکسید روی نیز مقایسه گردید و نتایج حاصل بیانگر آن است که در شرایط عملیاتی یکسان، نانو ذرات اکسید روی بکار برده شده قابلیت جداسازی کامل هیدروژن سولفید را در مدت ۱۵ دقیقه از سیال حفاری پایه آبی دارا هستند، درحالی که ذرات بالک در مدت ۹۰ دقیقه تنها قادر به جداسازی ۲/۵٪ از آلودگی هیدروژن سولفید هستند [۳۱].

همچنین حضور مواد هیدروکربنی در پساب‌های صنایع نفت و پتروشیمی بروز مشکلات عدیده‌ای را برای انسان‌ها و موجودات زنده آبی به همراه دارد. تحقیقات پیشین نشان داده است که جداسازی در فازهای یک امولسیون زمانی که اندازه قطرات فاز پراکنده کمتر از ۱۰۰ میکرومتر باشد (امولسیون ثانویه) بسیار زمان‌بر بوده و به‌کارگیری روش‌های شیمیایی و فیزیکی برای جداسازی آن‌ها بازدهی پایینی دارد. در این مورد از فیلترهای حاوی نانو الیاف پلیمری استفاده‌شده که این نانو الیاف از طریق الکترو ریسنده‌گی بافته‌شده‌اند که امروزه نانو الیاف تولیدشده به روش الکتروریسی به‌واسطه خواص منحصربه‌فرد، از جمله نسبت سطح به حجم بسیار بزرگی که دارا می‌باشند (شکل ۱-۵)، کاربردهای فراوانی را در صنایع مختلف از جمله در زمینه فیلتراسیون و حذف امولسیون در مایعات و گازها، به خود اختصاص داده‌اند [۳۲].



شکل ۱-۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از نانو الیاف PA6 الکتروریسی شده [۳۲].

طی این فرآیند فیلتراسیون ائتلافی قطرات بزرگتر از خلل و فرج فیلتر با برخورد به الیاف و حرکت در طول آن باهم ادغام شده و تشکیل قطرات بسیار بزرگتر را داده که در اثر اختلاف دانسیته از امولسیون جدا شده و تشکیل لایه نفتی را داده‌اند. قطرات نفت کوچکتر از خلل و فرج فیلتر عبور می‌کنند و از این طریق بازده جداسازی را کاهش می‌دهند. یکی از روش‌هایی که می‌توان بازده جداسازی را در این مورد بخصوص افزایش داد این است که مدت‌زمان ریسندگی نانو الیاف را افزایش دهیم تا با افزایش در مساحت سطح الیاف و همچنین کاهش در اندازه خلل و فرج فیلتر، به دام اندازی قطرات بسیار ریز را ممکن سازیم. گرچه این عمل بازده جداسازی را افزایش می‌دهد اما با افزایش افت فشار مضاعف در فیلتر همراه می‌شود که کیفیت و طول عمر فیلتر را کاهش می‌دهد. روشی که در اینجا برای افزایش بازده جداسازی پیشنهاد می‌شود استفاده از جاذب نانو رس اصلاح شده (آلی دوست کردن نانو رس) می‌باشد که می‌تواند قطرات بسیار ریز نفت و جزء محلول در آب را جذب نماید و بازده جداسازی را تا بیش از ۹۸٪ افزایش دهد. این فرآیند برای امولسیون‌های رقیق بسیار خوب عمل می‌کند [۳۳]. همچنین از این نوع فیلترهای نانو ساختار می‌توان در بخش‌های مختلف کارخانه‌های بهره‌برداری

برای جدایش بهتر و باکیفیت‌تر امولسیون آب در نفت تولیدشده در جداکننده‌ها^۱ استفاده نمود تا علاوه بر تولید نفت با API بالاتر، از خوردگی تجهیزات فرآورش و حمل‌ونقل جلوگیری کرد.

محققین کشورمان نیز در این زمینه تحقیقات جدیدی را انجام داده‌اند که از جمله آن می‌توان به ساخت نانو فیلتر حاوی نانولوله‌های کربن اشاره کرد که در این تحقیق که در دانشگاه کردستان صورت گرفته با قرار دادن نانولوله‌های کربن به حالت عمودی (به دلیل آب‌گریز بودن سطح زبر) بر روی توری-های فولادی موفق به جدایش امولسیون آب از نفت شدند [۳۴].

۷-۷-۱- فناوری نانو و روان‌کننده‌ها

امروزه روان‌کننده‌ها^۲ کارایی زیادی در صنایع مختلف دارند. استفاده از روان‌کننده‌های مایع یا گریسی به دلیل مشکلاتی که ایجاد می‌کنند به‌ویژه مشکلات زیست‌محیطی، محدود شده است. گزینه بسیار مطلوب در این زمینه این است که پوشش‌ها و روان‌کننده‌ها باهم سازگار شده و مکمل نقش یکدیگر باشند. نانو روان‌کننده‌ها دارای میلیاردها نانوذره کروی شکل هستند که به‌صورت قابل‌توجهی میزان اصطکاک و سایش و نیز خواص فشاری ماده روان‌کننده را بهبود می‌بخشند. از مزایای استفاده از این مواد بسته به نوع عملیات، می‌توان به افزایش سرعت و کاهش انرژی موردنیاز، افزایش طول عمر مواد و کاهش مضرات زیست‌محیطی با توجه به غیرخورنده بودن مواد اشاره نمود. روان‌کننده‌های جامد و لایه‌لایه از قبیل مولیبدن دی‌سولفید، گرافیت، هگزاگونال بورون نیتريد در گذشته جهت ایجاد لغزش مناسب بر روی سطوح بکار رفته‌اند و امروزه تلاش محققان بر استفاده از نانو پودرهای مولیبدن دی‌سولفید، تنگستن دی‌سولفید و گرافیت می‌باشد. زمانی که از این مواد در روغن یا گریس روان‌کننده استفاده می‌شود، کاهش شدیدی در اصطکاک و مقاومت سایشی سطوح لغزنده مشاهده می‌شود. در حالت کلی مواد دارای ساختار لایه‌لایه، مانند گرافیت، مولیبدن دی‌سولفید و تنگستن دی‌سولفید می‌توانند هم به‌عنوان روان‌کننده جامد و هم به‌عنوان افزایه در ساختار روان‌کننده‌های مایع بکار برده

¹ Separator

² Lubricants

شوند. مهم‌ترین مزایای استفاده از نانو ذرات تنگستن دی‌سولفید را می‌توان به کاهش اصطکاک در فرآیند نورد^۱ و استفاده از این ذرات به‌عنوان جداساز^۲ که سبب برطرف نمودن تماس سطحی بین دو فلز می‌گردد برشمرد [۳۵].

۱-۸- نانو ذرات راهی برای برداشت از مخازن نفت سنگین آسفالتین‌دار

امروزه علم و فن‌آوری در بسیاری از زمینه‌ها تقریباً به مرز نهایی خود نزدیک می‌شود و شاید دیگر جواب‌گوی توقعات روزافزون بشر نباشد. اینجاست که نانو تکنولوژی قابلیت‌های نهفته‌ی خود را یکی پس از دیگری به بشر عرضه نموده و به یکی از مهم‌ترین و جذاب‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی بشر در سال‌های اخیر تبدیل شده است. همه و همه‌ی خصوصیات که به آن‌ها اشاره شد تنها با دستیابی به دانش نانو تکنولوژی امکان‌پذیر است. از این‌رو شمار زیادی از کشورها به این موضوع مهم پی برده و توجه خاصی نسبت به آن دارند. این کشورها مبالغ هنگفتی را برای تحقیق و توسعه‌ی فناوری نانو اختصاص داده‌اند.

همان‌طور که در بالا ذکر شد از قابلیت‌های نانو ذرات در بخش‌های مختلف صنعت نفت استفاده می‌شود پس بسیار مهم و کلیدی است که در وضعیت حال حاضر مخازن و چاه‌های ایران، ما بتوانیم برای ازدیاد برداشت نفت از مخازن دارای نفت سنگین آسفالتین‌دار، علاوه بر کاهش گرانی‌های به دنبال جلوگیری از رسوب آسفالتین نیز باشیم و به نظر می‌رسد که شاید با افزودن نانو ذرات به این نوع از نفت بتوانیم بهره‌وری را به مقدار قابل توجهی افزایش دهیم.

۱-۹- اهمیت ساخت تجهیزات نو در صنایع نفت و گاز

بومی‌سازی قطعات و تجهیزات موردنیاز در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و دیگر صنایع وابسته به صنعت انرژی موضوعی است که سال‌ها از طرح آن می‌گذرد و امروزه با ورود به تحریم‌های گوناگون، به‌خصوص تحریم‌های حوزه انرژی، اهمیت ساخت و بومی کردن تجهیزات صنایع نفت و گاز، بیش از پیش

^۱ Rolling

^۲ Spacer

برای ما واضح و آشکار شده است. با توجه به قدیمی بودن مخازن و چاه‌های نفتی کشور ما، ضرورت نوآوری در بخش ازدیاد برداشت از مخازن نفتی به خوبی احساس می‌شود و می‌توان با بومی کردن تجهیزات کارآمد و ضروری این بخش، قدم‌های خوبی در جهت رشد و تعالی این بخش از صنعت نفت برداشت. البته همان‌طور که در سال‌های گذشته نیز دیدیم، توانمندی متخصصان داخلی در ساخت تجهیزات، نصب و راه‌اندازی صنایع پتروشیمی افزایش یافته، به گونه‌ای که درصد بالایی از قطعات صنایع پتروشیمی در داخل کشور ساخته می‌شود.

پس یکی از اهداف در این کار ساخت دستگاه ویسکومتر گوی غلتان با قابلیت دمایی و فشاری بالا بوده است تا در شرایط کنونی کشور و تحریم‌های اعمال شده، بتوان پروژه‌های ازدیاد برداشتی مرتبط با این دستگاه را با هزینه‌های خیلی کمتر انجام داد.

فصل دوم:

مروری بر تحقیقات گذشته

شناخت ماهیت مواد آلی سنگین موجود در نفت خام و نقش آن‌ها در استخراج، انتقال و فرآوری از اهمیت زیادی برخوردار است. مکانیسم تشکیل رسوب به کمک تحقیقات آزمایشگاهی جامع و پیوسته‌ای که در این زمینه در سرتاسر دنیا صورت گرفته است به خوبی درک شده است. این تحقیقات در مراحل مختلفی همچون اکتشاف، حفاری، بهره‌برداری و فرآوری نفت‌های باکیفیت پایین و مراحل ثانویه و ثالثیه ازدیاد برداشت در صنعت نفت در حال انجام می‌باشند. ترکیب شدن یا ورود یک سیال امتزاجی در نفت تغییرات زیادی در جریان سیال و رفتار فازی آن و همچنین در سنگ مخزن و مجراهای آن ایجاد خواهد کرد. رسوب مواد آلی سنگین نمونه‌ای از این تغییرات است که در نهایت روی بهره‌برداری از مخازن یا سرعت جریان نفت در چاه یا لوله تأثیر می‌گذارد. در بیشتر موارد رسوب مواد آلی سنگین موجب انسداد مجراها یا تغییر ترشوندگی سنگ مخزن می‌شود [۳۶]. روش‌های گوناگونی برای رفع مشکل آسفالتین ارائه و امتحان شده‌اند. یکی از راه‌های مقابله با این مشکل به خصوص زمانی که رسوب در درون چاه‌ها و لوله‌های انتقالی صورت می‌گیرد استفاده از روش‌های زدودن رسوب آسفالتین است. این روش‌ها شامل روش‌های کریستالی، مکانیکی، مواد شیمیایی گرمازا و استفاده از پدیده‌های مافوق صوت هستند که باعث جداسازی و حذف رسوب آسفالتین می‌باشد. رویکرد دیگر در مقابل آسفالتین، استفاده از حلال‌های مختلف آن است. همان‌طور که گفته شد، آسفالتین در تولوئن و حلال‌های حلقوی آروماتیک انحلال‌پذیر است. از این رو به‌طور سنتی استفاده از تولوئن و زایلن برای حل کردن رسوب آسفالتین کاربرد گسترده داشته است. روش‌های حل رسوب آسفالتین شامل موارد دیگری نیز می‌شود. روش‌هایی همچون ترکیب انواع حلال‌ها، مثل حلال‌های شیمیایی و زایلن به‌صورت مخلوط، استفاده از دیزل و مواد شیمیایی معلق ساز از جمله روش‌هایی هستند که برای انحلال آسفالتین به کار گرفته شده‌اند. اما این روش‌ها هرکدام به دلایلی در تمامی چاه‌ها و مخازن کاربردی نیستند. گران بودن، آلوده بودن، و بازدهی پایین از جمله معایبی است که روش‌های سنتی دارند. بنابراین استفاده از فناوری نانو که انتظار می‌رود این معایب را برطرف سازد، راهکاری نوین، عملی و مناسب به نظر می‌رسد.

تحقیقات زیادی در مورد تأثیر استفاده از فناوری نانو برای کاهش رسوب آسفالتین صورت پذیرفته است که در ادامه به صورت مفصل به آن‌ها پرداخته می‌شود.

در سال ۲۰۰۲، جو^۱ و دای^۲ به این نتیجه رسیدند که نانو ذرات پلی سیلیکونی می‌توانند ترشوندگی سطوح محیط متخلخل را تغییر دهند و در نتیجه تزریق نانو ذرات می‌تواند بر روی جریان آب و نفت اثر بگذارد. شاه^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه آلاسکا بر روی امکان بهبود تزریق گاز به وسیله نانو ذرات کار کرده‌اند [۳۳].

ساجین جین^۴ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۸ به بررسی کاهش ویسکوزیته نفت‌های سنگین با استفاده از نانوذره اکسید نیکل پرداختند که این آزمایش برای پلی پروپیلن انجام شده و در زمانی که مقدار نانوذره به اندازه ۰/۵ درصد وزنی در دمای 180°C برسد کاهش تا میزان ۹۰٪ را در بردارد و اساس این اتفاق برجذب انتخابی زنجیرهای بلند پلیمری است. باید توجه داشت که افزایش درصد وزنی به بیش از این درصد دوباره ویسکوزیته را افزایش داده و حتی ویسکوزیته را از حد اولیه نیز می‌تواند بالاتر ببرد. از آنجاکه ویژگی مشترک بین پلیمرها و نفت سنگین بلند زنجیر بودن آن‌ها است می‌توان پیش‌بینی کرد که این نتایج برای نفت سنگین نیز به دست آید. یک فرآیند موفقیت آمیز درجا، بسیاری از هزینه‌های عملیاتی، خطرهای محیط‌زیستی که به همراه تولید قیر می‌باشد را کاهش می‌دهد [۳۷]. البته تنها ایرادی که می‌توان در این مطالعه داشت درصد بالای غلظت بهینه می‌باشد. این امر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که این طرح بخواهد در صنعت عملی شود. تحت آن شرایط این درصد بالای غلظت بهینه نانوذره مقرون به صرفه نمی‌باشد. برای این منظور باید به دنبال راه‌حلی بود که این درصد را کم کرد.

پس از آن یانلینگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به مطالعه کاهش ویسکوزیته نفت سنگین با استفاده از نانو ذرات پرداختند که مطالعه جامع‌تری داشتند. در این روش در واقع نانو ذرات را با بخار آب با نفت

¹ Ju

² Dai

³ Shah

⁴ Sachin Jin

سنگین واکنش داده که این ذرات نقش کاتالیزوری داشته و باعث می‌شوند که پیوند بین هترواتم‌های^۱ (همه‌ی اتم‌ها به جز H و C) O، N، S با کربن سست و شکننده شود لذا ساختار کلی نفت سنگین تغییر کرده و باعث ایجاد ترکیباتی نظیر آروماتیک‌ها و هیدروکربن‌های اشباع می‌شود. همچنین باعث کاهش درصد رزین‌ها و آسفالتین‌ها می‌شوند. این اتفاق عمدتاً ناشی از شکسته شدن پیوند C-O در کل ملکول و پیوند C-C در زنجیره‌های مجاور و همچنین شکسته شدن پیوند C-S می‌باشد. در نتیجه اجزای سبک مانند حلال عمل کرده و ویسکوزیته نفت سنگین را کاهش می‌دهند همچنین با کوچک‌تر شدن اجزای سنگین مانند آسفالتین نیز ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند [۳۸].

همچنین در راستای کاهش رسوب آسفالتین با استفاده از فناوری نانو چندین تحقیق در سال‌های اخیر ارائه شده است از جمله اینکه نصار و همکاران در سال ۲۰۱۱ چندین آزمایش را برای بررسی اثر انواع نانو ذرات و پارامترهای مختلف بر روی بازیابی نفت با میزان آسفالتین بالا انجام دادند [۳۹]. نتایج این دسته آزمایش‌ها به صورت خلاصه در ادامه آمده است:

با مقایسه نانو ذرات شامل اکسیدهای نیکل و کبالت و آهن می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد مثبت این نانو ذرات به صورت روبرو می‌باشد: $NiO > Co_3O_4 > Fe_3O_4$. در اینجا منظور از عملکرد مثبت قابلیت اکسیداسیون، توانایی جذب و توانایی کاتالیستی بیشتر است. ذرات در اندازه میکرو قابلیت کاتالیستی بهتری از خود نشان می‌دهند. همچنین نانو ذرات توان جذب سطحی بیشتری دارند. جذب سطحی آسفالتین بر روی سطح نانو ذرات به صورت خودبه‌خودی است و ماهیتی گرمازا دارد. نصار^۲ در آزمایش‌های خود همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی همچون زمان تماس، اشباع اولیه آسفالتین، دما، میزان آب موجود و... را نیز بررسی کرده است [۳۹].

ابوتربوش^۳ و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای بر روی جذب آسفالتین درون نفت سنگین توسط نانو ذرات اکسید نیکل نشان دادند که این ذرات ظرفیت جذب بالایی دارند و نانو ذراتی که به صورت

¹ Hetroatoms

^۲ Nassar

³ Abu Tarboush

درجا آماده‌سازی شده‌اند (آماده‌شده در ماتریکس نفتی) میزان ۲/۸ گرم آسفالتین بر گرم نانوذره قابلیت جذب دارند و اکسید نیکل تجاری ۱۵٪ این میزان قابلیت جذب دارد [۴۰].

هاینداده^۱ و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که به‌وسیله میدان مغناطیسی ناشی از لوله‌های جداری، ذرات نانو که در فضای حلقوی قرار می‌گیرند، شروع به لرزش می‌کنند. این لرزش باعث گرم شدن می‌شود و این گرما از طریق جابه‌جایی به لوله‌های چاه منتقل می‌شود. افزایش دمای لوله‌ها باعث ذوب شدن واکس و جریان یافتن آن می‌شود [۴۱].

گرف^۲ و بابادگلی^۳ (۲۰۱۱) عنوان کردند که ذرات نانو فلزی به‌عنوان کاتالیزور در فرآیند شکستن پیوند بین کربن و گوگرد اثر می‌گذارند که این موضوع باعث کاهش میزان آسفالتین و افزایش میزان مواد اشباع و آروماتیک می‌شود، که این امر در نهایت سبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ی ویسکوزیته نفت می‌شود [۴۲].

در سال ۲۰۱۳، حامدی^۴ و بابادگلی به مقایسه بین نانو ذرات خالص نیکل و ذرات در حد میکرون Raney nickel پرداختند و به دو نتیجه مهم و کلی زیر دست یافتند:

(الف) عملکرد کاتالیستی ذرات خالص نانو بهتر است.

(ب) قابلیت تزریق ذرات نانو بهتر است و میزان جذب این ذرات به سطح سنگ و نگه‌داشته شدنشان در حفرات نیز کمتر است.

در تحقیقاتی که در این مورد صورت گرفته است ذرات نانو بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها شامل اکسیدهای فلزات مختلف از جمله: Fe_3O_4 ، Al_2O_3 ، Co_3O_4 ، TiO_2 ، MgO ، CaO و NiO می‌باشد. این نانو ذرات خاصیت کاتالیزوری داشته و می‌توانند با تولید گاز فشار مخزن را تا ۴ برابر افزایش دهند. نانو ذرات آهن و آلومینیم را به شکل مایع در بنتونیت حل کرده و به چاه نفت

1 Haindade

2 Greff

3 Babadagli

4 Hamedi

تزریق می‌کنند. با اضافه کردن مقدار کمی از نانو ذرات آهن و آلومینیم، فشار مخزن به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. ذرات در مخزن از بین نمی‌روند و خاصیت کاتالیزوری خود را حفظ می‌کنند. در یک کار پژوهشی انجام شده، برای تهیه نانو ذرات آلومینیم و آهن از روش پلاسما شیمی استفاده شده است که در مقایسه با روش‌های دیگر افزایش بهره استخراج، این سیستم از مشکلات کمتری برخوردار است. در این پژوهش، از نانو ذرات آهن و آلومینیم تولید شده برای افزایش بهره تولید استفاده شده است. به نظر می‌رسد با توجه به خواص کاتالیزوری ذرات، این ذرات باعث آزاد شدن گازهای هیدروژن، استیلن و گازهای ترش می‌شوند، که در نتیجه آن فشار مخزن افزایش می‌یابد. تحت شرایط دما و فشار بالای مخازن تحت فرآیندهای کاتالیستی در حضور نانو ذرات می‌توان گازهایی نظیر H_2 ، CO_2 و متان را شاهد بود. این گازها از طریق حل شدن در هیدروکربن‌ها موجب افزایش فشار مخزن، افزایش حرکت و بهبود جابجایی سیالات مخزن، کاهش گرانی و چگالی هیدروکربن‌ها و تسهیل در حرکت آن‌ها موجب افزایش بازیابی نفت می‌گردند [۴۳].

هارون^۱ و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه تزریق هوشمند آب و نانو ذرات پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در یک مخزن که ضریب بازیافت به وسیله تزریق آب بین ۴۶ تا ۶۳ درصد است و اگر نانوذره مناسب انتخاب شود می‌توان ضریب بازیافت را تا محدوده ۵۷ تا ۸۵ افزایش داد [۴۴].

1 Haroun

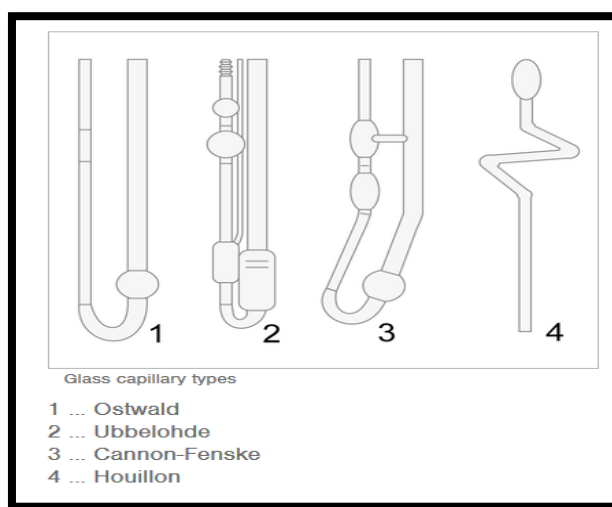
فصل سوم :

دستگاه‌ها و آزمایش‌ها

۳-۱- انواع دستگاه‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته

۳-۱-۱- ویسکومتر لوله موئین^۱

این نوع ویسکومترها بیشتر به افتخار ویلیام استوالد^۲ با عنوان ویسکومتر استوالد^۳ شناخته می‌شوند که به ویسکومترهای شیشه‌ای موئین هم مشهورند. روش‌های متداول برای اندازه‌گیری ویسکوزیته سینماتیک در آزمایشگاه از ویسکومتر لوله موئین بهره می‌برد (شکل ۳-۱). در این روش، نمونه روغن در داخل لوله موئین U شکل شیشه‌ای قرار می‌گیرد و نمونه توسط یک دستگاه مکش از داخل لوله حرکت می‌کند تا اینکه به نقطه شروع که بر روی لوله مشخص شده است برسد. عمل مکش متوقف شده و اجازه داده می‌شود تا نمونه در خلاف جهت مکش تحت تأثیر نیروی جاذبه حرکت کند. منطقه باریک لوله موئین سرعت جریان نفت را کنترل می‌کند. دستورالعمل‌های استاندارد انجام این روش ASTM D445 و ISO 3104 می‌باشند [۴۵].



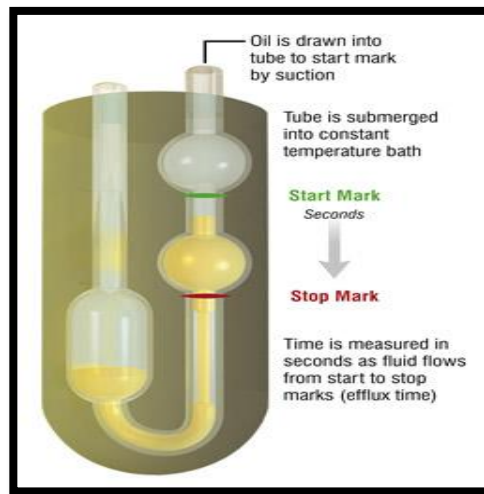
شکل ۳-۱- انواع ویسکومتر لوله موئین [۴۵].

^۱ U-tube Viscometers

^۲ Wilhelm Ostwald

^۳ Ostwald Viscometers

به خاطر اینکه سرعت جریان در داخل لوله موئین به وسیله مقاومت نفت در برابر جاری شدن تحت تأثیر نیروی جاذبه تعیین می گردد. این آزمون در حقیقت ویسکوزیته سینماتیک روغن را اندازه گیری می کند. ویسکوزیته نوعاً بر حسب سانتی استوک (cSt)، برابر با 2 mm/s در واحد SI گزارش می شود و از مدت زمان جریان روغن از نقطه شروع تا پایان و استفاده از ثابت کالیبراسیون نفت محاسبه می شود [۴۶].



شکل ۳-۲- ویسکومتر لوله موئین [۴۶].

مزایا:

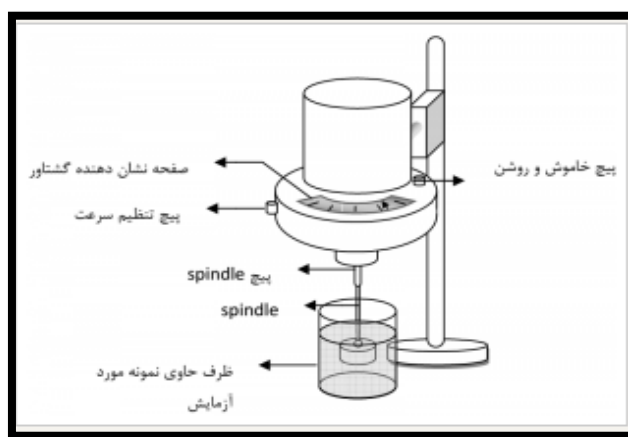
- ۱- قابلیت تکرارپذیری بالا و در نتیجه دقت بالا،
- ۲- قابلیت تنظیم دما،
- ۳- روش کار راحت.

معایب:

- ۱- عدم توانایی تنظیم فشار،
- ۲- کثیف شدن لوله موئین و غیرقابل تشخیص شدن لحظه عبور سیال،
- ۳- دقیق نبودن داده ها.

۳-۱-۲- ویسکومتر بروکفیلد

یکی از انواع این ویسکومترها، ویسکومترهای چرخشی با استوانه‌های هم‌محور می‌باشد (شکل ۳-۳). در این ویسکومترها یک استوانه مانند سیلندر^۱ درون استوانه دیگری^۲ قرار گرفته، سیال در حجم محصور بین این دو استوانه ریخته می‌شود و یکی از استوانه‌ها را با سرعت زاویه‌ای (Ω) معینی چرخانده، گشتاور (T) را بر روی استوانه چرخان یا استوانه ثابت اندازه می‌گیرد. بنابراین رابطه گشتاور و سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید. اما از طرفی تنش وارده از طرف سیال بر روی دیواره استوانه‌ها با گشتاور رابطه مستقیم داشته و سرعت برش نیز با سرعت درون استوانه متناسب است. در نهایت از روی این روابط، ارتباط تنش و سرعت برش به دست می‌آید.



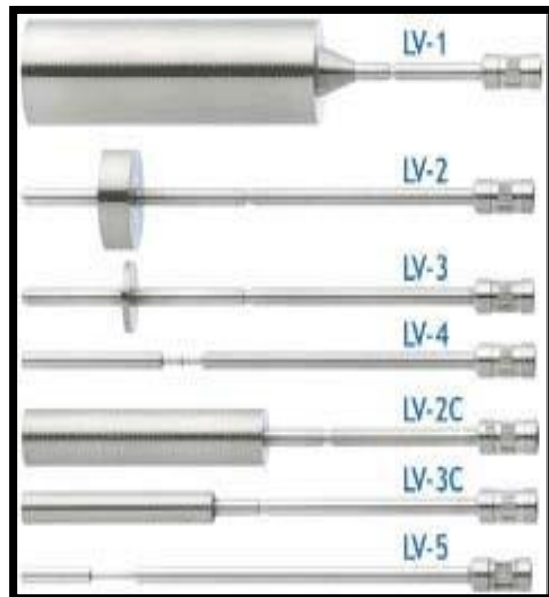
شکل ۳-۳- ویسکومتر بروکفیلد [۴۷].

ویسکومتر بروکفیلد در سرعت‌های برشی بسیار کم به کار می‌رود. اجزای این ویسکومتر در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در ویسکومتر بروکفیلد استوانه چرخان که اسپیندل نامیده می‌شود، شبیه دوک بوده و توسط یک پیچ که در انتهای دسته آن قرار دارد، به موتور دستگاه متصل می‌شود. استوانه ثابت نیز ظرفی می‌باشد که نمونه در آن ریخته شده است. اسپیندل به دستگاه متصل می‌شود، در ظرف حاوی نمونه قرار می‌گیرد و با سرعت‌های زاویه‌ای معینی چرخانده می‌شود. ویسکومتر این

^۱ Bob

^۲ Cup

امکان را می‌دهد تا به وسیله پیچ تنظیم سرعت، داده‌های مربوط به سرعت‌های زاویه‌ای مختلف از قبیل ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ دور بر دقیقه به دست آید. در هر سرعت زاویه‌ای، ویسکومتر گشتاور وارد بر اسپیندل را اندازه گرفته و عقربه روی آن، مقدار گشتاور را نشان می‌دهد [۴۷].



شکل ۳-۴: شکل‌های مختلف اسپیندل [۴۷].

مزایا:

۱- تکرارپذیری بالا،

- ۲ قابل استفاده برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی،
- ۳ عدم تماس سنسور با سیال و در نتیجه ماندگاری دقت در تعداد بالای آزمایش.

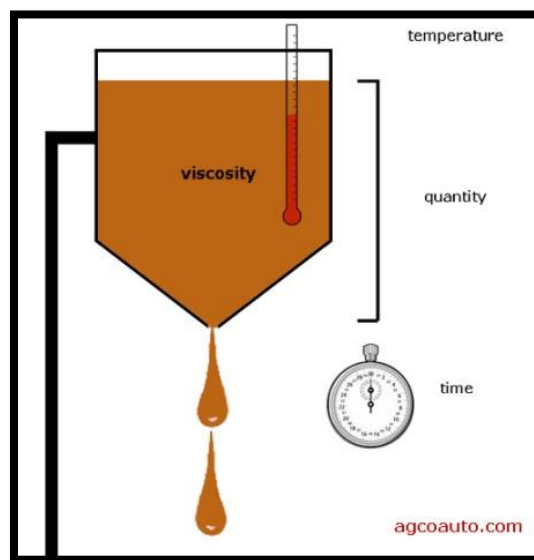
معایب:

- ۱ عدم شبیه سازی فشار سازند،
- ۲ عدم کنترل دمایی،
- ۳ نیازمند حجم بالایی از سیال مورد آزمون.

۳-۱-۳- مدت زمان تخلیه یک ظرف مخصوص

در این روش به حجم خاص از سیال را درون ظرف مخصوص ریخته و مدت زمان خالی شدن آن را محاسبه کرده و طبق فرمول های خاص و کالیبراسیون صورت گرفته ویسکوزیته محاسبه می شود

[۴۸].



شکل ۳-۵- نوع ساده ویسکومتر [۴۸].

۳-۱-۴- ویسکومترهای لرزشی^۱

مبنای کار ویسکومترهای لرزشی اندازه‌گیری مقدار کاهش نوسانات الکترومغناطیسی لرزاننده هنگام لرزش در داخل سیال مورد آزمایش است. لرزاننده معمولاً به‌صورت دورانی (به‌وسیله یک سگدست متصل به یک موتور الکتریکی) یا ارتعاشی (به‌صورت دیاپازونی) کار می‌کنند. هر قدر ویسکوزیته سیال بالا باشد به همان میزان هم میزان افت لرزش‌های ایجادشده توسط لرزاننده بیشتر خواهد بود.



شکل ۳-۶- دو نوع از ویسکومترهای لرزشی [۴۹].

^۱ Vibrational Viscometers

میزان کاهش ارتعاشات لرزاننده می تواند با یکی از روش های زیر اندازه گرفته شود :

۱. اندازه گیری مقدار انرژی لازم جهت ثابت نگه داشتن دامنه ارتعاشات نوسانگر در یک دامنه

ارتعاشی مشخص. در این روش باید متذکر شد در سیالاتی با ویسکوزیته بالا انرژی بیشتری جهت ثابت ماندن دامنه ارتعاشی نوسانگر باید مصرف شود.

۲. اندازه گیری زمان لازم جهت توقف کامل نوسانگر بعد از خاموش شدن آن. در این روش باید

متذکر شد زمان لازم جهت توقف نوسانگر با ویسکوزیته سیال متناسب است و هر اندازه ویسکوزیته بالا باشد مدت زمان لازم جهت توقف نوسانگر نیز کمتر خواهد بود.

۳. اندازه گیری فرکانس نوسانگر به صورت تابعی از کنش وارد شده به سیال و واکنش سیال نسبت

به آن که در این روش هم سیالاتی با ویسکوزیته بالا به نسبت تغییر فرکانس بیشتری هنگام تغییر فاز از خود نشان می دهند.

نتیجه ارائه شده توسط دستگاه های سنجش ویسکوزیته با روش ارتعاشی به دلیل عدم اندازه گیری

تنش سطحی^۱ جهت اندازه گیری ویسکوزیته سیالاتی که رفتار جریانی آن برای کاربر نامشخص است نمی تواند قابل اطمینان باشد [۴۹].

ویسکومترهای لرزشی برای اندازه گیری ویسکوزیته در طی فرآیندهای صنعتی به کار می رود. در

اینگونه ویسکومترها سنسور به میله نوسانگر متصل می شود. تغییرات دامنه نوسانگر با ویسکوزیته سیالی

که بخش لرزاننده ویسکومتر را می پوشاند متناسب است. این روش برای اندازه گیری ویسکوزیته سیالات

ژلاتینی و سیالاتی با ویسکوزیته بالا (بالای 1000 pa.s) کاربرد دارد. در حال حاضر به دلیل کارایی

بالای این ویسکومترها صنایع توجه خود را معطوف به استفاده بهینه از اینگونه ویسکومترها نموده و

سعی در افزایش دقت و کارایی این نوع دارند. این دسته از ویسکومترها بسیار مستحکم بوده و تمام

اجزای آن از مقاومت بالایی برخوردار هستند و تنها قسمت حساس آن ها حسگر کوچک تعبیه شده در

^۱shear field

بخش لرزاننده است. به همین دلیل می توان ویسکوزیته انواع مواد مختلف بخصوص سیالات اسیدی را با این نوع اندازه گرفت به شرط آنکه یا سیال را در داخل یک پوشش خاص قرارداد و یا حسگر را از مواد مقاوم در برابر اسید ساخت [۴۹].

مزایا:

- ۱- استحکام بالای تمامی قطعات،
- ۲- قابلیت اندازه گیری ویسکوزیته سیالات اسیدی،
- ۳- کاربرد راحت (استفاده بدون نیاز به کاربر).

معایب:

- ۱- عدم توانایی تنظیم فشار،
- ۲- عدم تنظیم دما،
- ۳- دقت کم،
- ۴- کاربرد برای سیالات خیلی ویسکوز و عدم اندازه گیری سیالات با ویسکوزیته

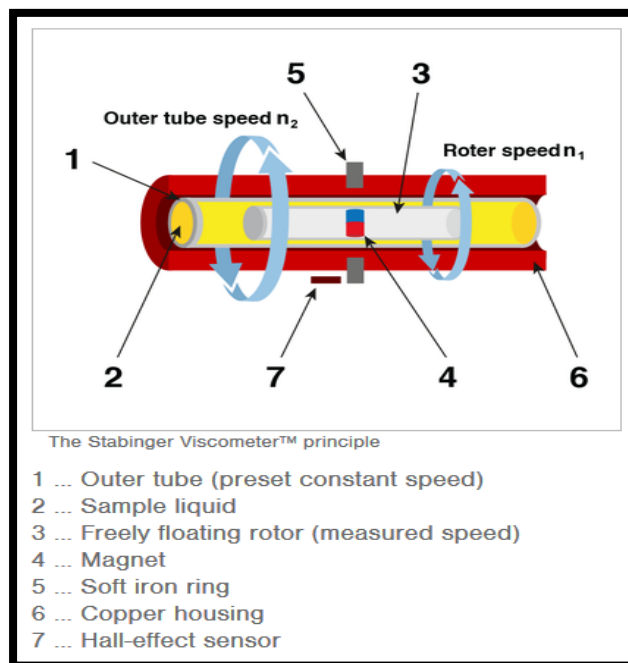
کم.

۳-۱-۵- ویسکومترهای استابینگر^۱

با تغییر ویسکومترهای نوع چرخشی و ساخت این نوع ویسکومترها به دقت بسیار بالایی در اندازه گیری ویسکوزیته جنبشی سیال می توان دست یافت. سیلندر داخلی ویسکومترهای استابینگر گودتر و نسبت به ویسکومترهای نوع قبلی سبک تر طراحی شده اند به همین دلیل به آسانی در داخل نمونه شناور می گردند و به دلیل نیروی گریز از مرکز دقیقاً در بخش مرکزی قرار می گیرند. اندازه گیری سرعت و گشتاور در این نوع با اندازه گیری چرخش میدان مغناطیسی و حرکات گردابی و بدون هیچگونه تماس مستقیمی صورت می گیرد که این امر دقت فوق العاده 50 m.pN و دامنه وسیع سنجش

^۱Stabinger Viscometer

۰/۲ - ۲۰۰۰۰ mPa·s را برای این نمونه امکان پذیر نموده است [۴۹].



شکل ۳-۷- طرح شماتیکی از ویسکومتر استابینگر [۴۹].

۳-۱-۶- محاسبه ویسکوزیته به روش گوی غلتان

دستگاه ویسکومتر گوی غلتان که در شرکت دانش بنیان پتروآزما، به عنوان بخشی از پایانه بررسی و ساخته شد، به عنوان دستگاه مرجع برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه‌ی این فصل مباحث تئوری و قسمت‌های مختلف دستگاه آورده شده است. روند انجام آزمون ویسکوزیته به این صورت است که ابتدا سیلندر از سیال مورد آزمایش پر می‌شود و پس از قرار دادن گوی درون سیلندر و بستن درپوش سیلندر، سیال از طریق پمپ (دستی یا برقی) به درون سیلندر تزریق شده تا علاوه بر هواگیری فشار سیال درون سیلندر به فشار مورد نظر برسد. پس از آن با تنظیم دمای مورد نظر در نرم افزار دستگاه، با استفاده از المنت‌هایی که بر روی سیلندر تعبیه شده‌اند، دمای سیال مورد آزمون به دمای مورد نظر می‌رسد، البته برای رسیدن به دمای مورد نظر و همچنین یکنواختی دما در تمام سیال باید زمان لازم به دستگاه داده شود و چند بار گوی درون سیال به حرکت درآید تا سیال هم بخورد و دمای آن یکنواخت شود. پس از یکنواخت شدن دمای سیال، با زدن کلید استارت

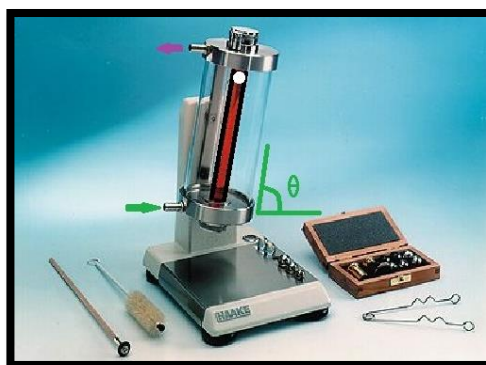
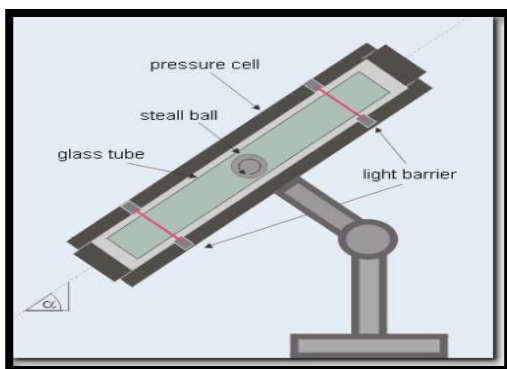
مگنت الکتریکی نگهدارنده گوی، آن را رها کرده و زمان در نرم افزار استارت می خورد و گوی درون سیلندر شروع به حرکت می کند تا به انتهای سیلندر برسد. لحظه رسیدن گوی به انتهای سیلندر را سنسور تعبیه شده در آن مشخص می کند که با این تفاسیر سرعت گوی به دست می آید.

پس از به دست آمدن سرعت گوی با توجه به روابطی که در نرم افزار دستگاه نوشته شده، با استفاده از سرعت و چگالی و دیگر پارامترها ویسکوزیته سیال مشخص می شود. این دستگاه در عین شرایط عملیاتی بالا ($80^{\circ}\text{C} - 50 \text{ bar}$) دقت بالایی داشته و سرعت شما را در انجام آزمون بالا می برد. از جمله مزایای این نمونه از ویسکومتر می توان موارد زیر را برشمرد:

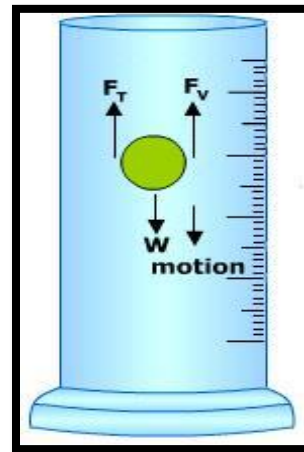
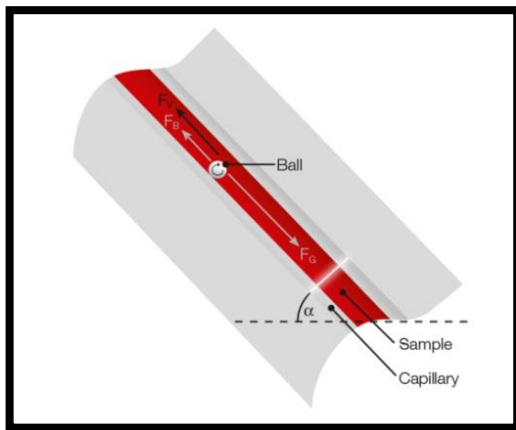
- ۵- قابلیت شبیه سازی فشار سازند،
- ۶- قابلیت تنظیم دما،
- ۷- امکان تکرار آزمون و بالا بردن دقت،
- ۸- امکان کم کردن شیب سقوط برای سیالات با ویسکوزیته کم،
- ۹- استفاده از گوی های فلزی در قطرهای متفاوت برای بالا بردن دقت،
- ۱۰- قابلیت اندازه گیری ویسکوزیته سیالات نیوتونی و غیر نیوتونی،
- ۱۱- حجم کم سیال برای انجام آزمون.

قابل ذکر است که جنس مواد بکار رفته در اکثریت قسمت های دستگاه از نوع فولاد ضدزنگ بوده

که همگی قابلیت تحمل فشاری و دمایی بالایی دارند و در هر شرایط عملیاتی کارایی خود را دارد.



شکل ۳-۸- شماتیکی از ویسکومتر مدل گوی غلتان [۴۹].



شکل ۳-۹ - نیروهای وارد بر گوی در حال سقوط تحت زاویه ۹۰ درجه [۴۹].

نیروهای وارد شده بر گوی شامل نیروی گرانش^۱ F_w ، نیروی شناوری^۲ F_b و نیروی پسار^۳ F_d است.

هر یک از نیروها از روابط روبرو محاسبه می‌شوند:

$$F_w = mg = \rho_{\text{sphere}} Vg \quad (\text{معادله ۳-۱})$$

$$F_b = \rho_{\text{fluid}} Vg \quad (\text{معادله ۳-۲})$$

$$F_d = 6\pi r\mu U \quad (\text{معادله ۳-۳})$$

که در روابط بالا، m جرم گوی، g شتاب گرانش، ρ_{sphere} چگالی گوی، V حجم گوی، ρ_{fluid} چگالی سیال، r شعاع گوی، μ ویسکوزیته سیال و U سرعت حرکت گوی می‌باشد.

در ابتدا گوی به حالت سکون قرار دارد. بعد از رها شدن، نیروی گرانش باعث حرکتی شتابدار می‌شود. نیروی پسار یا دراگ با افزایش سرعت زیاد می‌شود. رابطه آن که از قانون استوک به دست می‌آید به صورت ۳-۴ می‌باشد:

$$F_d = 6 \pi r\mu U \sin\Theta \quad (\text{معادله ۳-۴})$$

^۱ Gravity Force
^۲ Buoyancy Force
^۳ Drag Force

بعد از مدتی برآیند نیروها با یکدیگر برابر می‌شوند و حرکت به صورت سرعت ثابت ادامه پیدا می‌کند و شتاب صفر خواهد شد و می‌توانیم برابری زیر را بنویسیم:

$$F_w \sin \Theta + F_b \sin \Theta + F_d = 0 \quad (\text{معادله ۳-۵})$$

که با جایگذاری روابط در برابری بالا و ساده‌سازی آن‌ها به تساوی زیر می‌رسیم:

$$\mu = \frac{g(\rho_s - \rho_f)d^2}{18U} \quad (\text{معادله ۳-۶})$$

در این معادله می‌توان سرعت را به صورت روبرو قرارداد: $U = x / t$

$$\mu = K(\rho_s - \rho_f) \quad (\text{معادله ۳-۷})$$

رابطه بالا در حالتی برقرار می‌باشد که نیروی اصطکاک وجود نداشته باشد. در آزمایش نیروهای مختلفی از جمله اصطکاک و نیرویی که به گوی بر اثر تغییر پروفایل سرعت ایجاد می‌شود، برابری بالا را از بین می‌برد. از این رو به ضریب تصحیحی نیاز می‌باشد که تساوی را برقرار کند [۵۰]. رابطه ۳-۷، رابطه‌ای می‌باشد که در اندازه‌گیری ویسکوزیته در این دستگاه استفاده می‌شود:

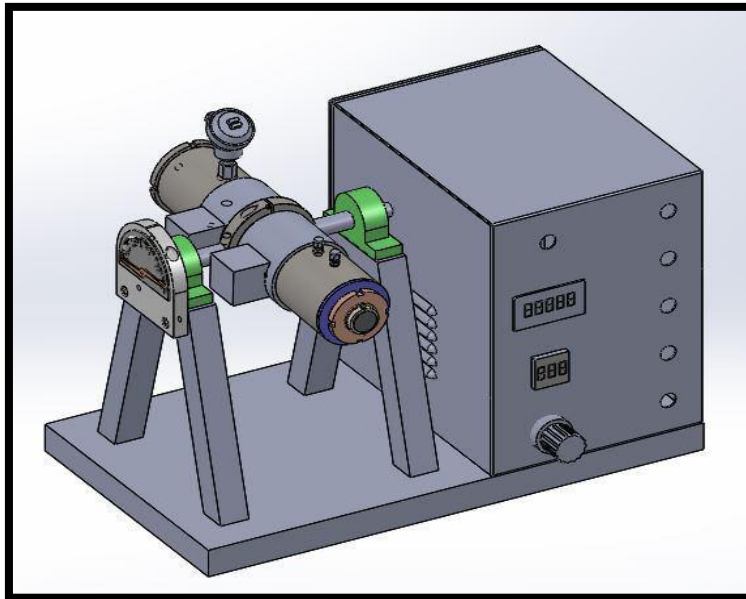
برای به دست آوردن ضریب K از سیال استاندارد با ویسکوزیته مشخص استفاده می‌شود. در بخش کالیبراسیون نحوه به دست آوردن آن توضیح داده شده است.

۳-۲ - کالیبراسیون

برای کالیبره کردن دستگاه به یک مایع استاندارد با ویسکوزیته مشخص در دماهای مختلف نیاز دارید. می‌توان از مایع‌هایی با پایه سیلیکون استفاده کرد. ضریب K که در روابط تعیین ویسکوزیته نیاز می‌باشد در زاویه‌ها و قطرهای مختلف گوی به دست می‌آید. پس نیاز است که برای ۳ زاویه ۲۳، ۴۵ و ۷۰ درجه نسبت به افق برای هر گوی ضرایب ثابت K را محاسبه نماییم به طوری که برای یک گوی در هر زاویه یک ثابت باید به دست آید و برای هر ۳ گوی ما باید ۹ ضریب K را محاسبه کنیم.

۳-۳ - قطعات دستگاه

در این بخش به تشریح قسمت‌های اصلی دستگاه می‌پردازیم.



شکل ۳-۱۰- طرح شماتیک سه‌بعدی ویسکومتر گوی غلتان.

دستگاه از سه بخش زیر تشکیل شده است:

- پمپ دستی یا اتومات،
- محفظه آزمایش،
- جعبه کنترل.

۳-۳-۱- پمپ دستی یا اتومات

پمپ دستی یا اتومات به منظور انتقال سیال به محفظه آزمایش و ایجاد فشار می‌باشد. این پمپ از یک سیلندر و پیستون تشکیل شده است که با چرخش اهرم عمل پر و خالی کردن را انجام می‌دهد. نگهدارنده پمپ توسط چهار پیچ به قطر ۱۰ میلی‌متر و بلندی مناسب به میز متصل می‌شود. توجه شود برای استفاده بهینه از پمپ، آن را به میز متصل کنید. به علت نیروی زیادی که به پمپ وارد می‌شود هنگامی که می‌خواهید سیال را در فشارهای بالای ۵۰ bar مورد آزمایش قرار دهید، بدون اتصال آن به میز این کار امکان‌پذیر نمی‌باشد. دو سر پمپ با کلاهک مسدود شده است. به کلاهک جلویی،

اتصال ورود و خروج سیال متصل است و برای جلوگیری از نشت سیال از واشر^۱ مناسب استفاده شده است. کلاهک عقبی، پیچ متصل به اهرم را نگه می‌دارد. دقت شود هنگام استفاده از پمپ بر روی پیچ اهرم ذرات فیزیکی وجود نداشته باشد.

در شکل زیر نمایی از پمپ دستی آورده شده است:



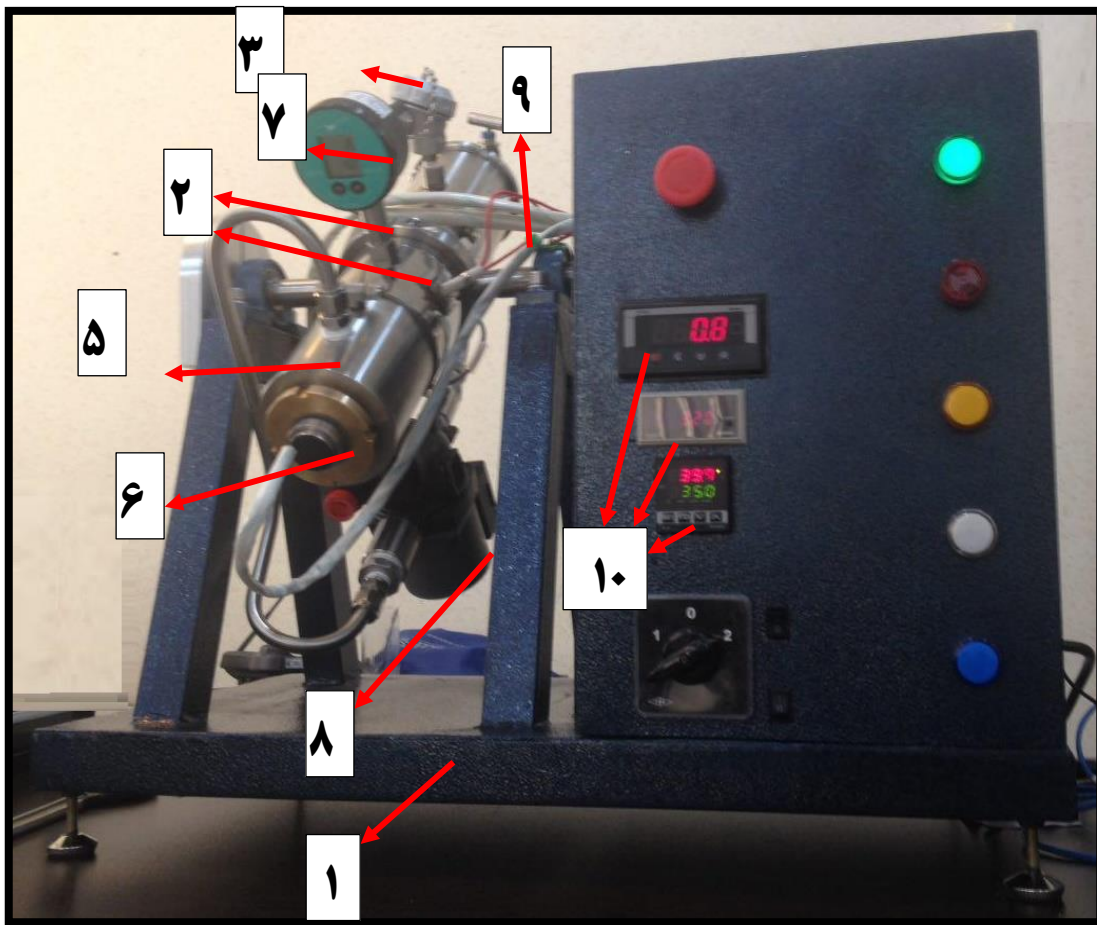
شکل ۳-۱۱ - نمایی از پمپ دستی برای بارگذاری فشار روی سیستم.

پمپ دستی با یک شلنگ منعطف که تحمل ۶۵۰ bar را دارد به محفظه آزمایش متصل است. هنگام بستن اتصالات این شیلنگ، حتماً از وجود واشر اطمینان حاصل نموده و از آچار مناسب استفاده نمایید.

۳-۳-۲- محفظه آزمایش

فرایند آزمایش در این محفظه انجام می‌شود. محفظه آزمایش به‌طور کلی از قطعات زیر تشکیل شده است:

^۱ O-ring



شکل ۳-۱۲- نمایشی از دستگاه ساخته شده

- ۱- صفحه نگهدارنده دستگاه،
- ۲- المنتهای حرارتی،
- ۳- سنسور دما،
- ۴- استوانه اصلی نگهدارنده سیال،
- ۵- استوانه بیرونی،
- ۶- آهنربای الکتریکی،
- ۷- سنسور فشار سیال،
- ۸- پمپ آب داغ،

۹- سنسور رسیدن گوی به انتهای مسیر(سنسور مجاورت)^۱،

۱۰- نمایشگرهای دما، فشار و زمان،

۱۱- صفحه مدرج برای تنظیم زاویه.

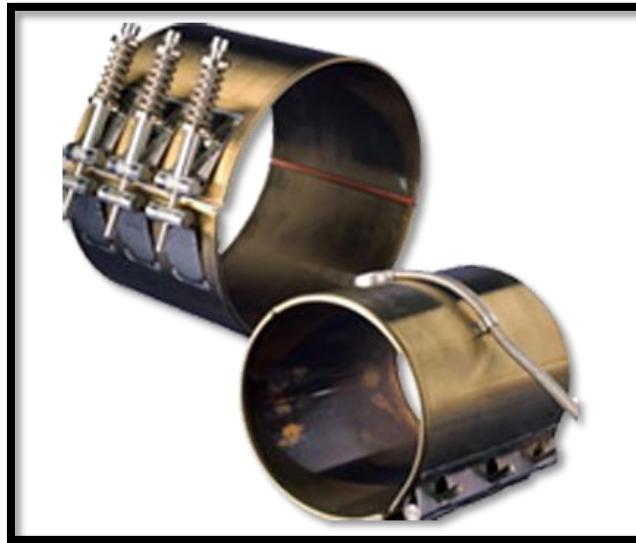
۳-۳-۲-۱- صفحه نگهدارنده دستگاه

این بخش وظیفه نگه داشتن قسمت‌های مختلف را دارد. تراز موجود در صفحه نگهدارنده، وضعیت تعادل دستگاه را نشان می‌دهد. قبل از استفاده از دستگاه حتماً با استفاده از پایه‌های موجود، از تراز بودن آن اطمینان حاصل می‌شود. با تنظیم کردن پایه‌ها حباب لغزان تراز در مرکز دایره آن هدایت می‌شود. مقاله نصب‌شده بر روی ستون نگهدارنده، زاویه غلتیدن گوی را نشان می‌دهد. زاویه‌های استاندارد جهانی ۲۳، ۴۵ و ۷۰ درجه نسبت با افق با قرار دادن دستگاه در وضعیت مشخص، ثابت می‌شوند. برای داشتن دیگر زوایا می‌توان از نشانگر زاویه استفاده کرد.

۳-۳-۲-۲- المنت‌های حرارتی

برای تنظیم سیال در دمای موردنظر، از المنت‌های حرارتی که در دو طرف بالا و پایین سیلندر تعبیه شده استفاده می‌شود، که این المنت‌ها به‌طور مستقیم با سیلندر داخلی ارتباط نداشته و درواقع المنت‌ها وظیفه گرم کردن آب اطراف سیلندر داخلی را دارند و این عدم انتقال مستقیم حرارت، برای انتقال یکنواخت حرارت به تمام سیال مورد آزمایش می‌باشد، بنابراین اول آب اطراف سیلندر داخلی داغ شده و همواره توسط پمپ آب داغ به گردش درمی‌آید و حرارت از طریق آب به سیلندر داخلی و سپس سیال مورد آزمایش انتقال می‌یابد، و سنسور دما بجای قرار گرفتن در حمام آب در خود سیال مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

¹ Proximity



شکل ۳-۱۳- المنت‌های حرارتی استیل.

۳-۲-۳-۳ - سنسور دما

این سنسور درون سیلندر حاوی سیال مورد آزمایش قرار می‌گیرد و به کمک جعبه کنترل، دما را نشان می‌دهد و نمایشگر این سنسور قابلیت تنظیم دما از طریق دست و نرم‌افزار را دارد و پس از دستور تنظیم دما، با ارتباط با المنت‌های حرارتی، دستور روشن شدن المنت‌های حرارتی را تا رسیدن به دمای مورد نظر داده و سپس آن‌ها را خاموش می‌کند.



شکل ۳-۱۴ - سنسور دمای PT100

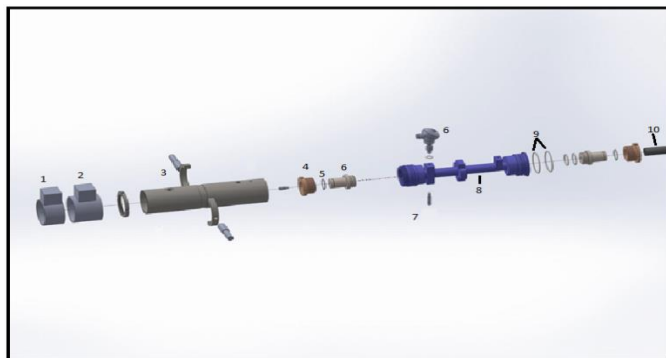
۳-۲-۴- استوانه‌های نگهدارنده سیال

در مرکز محفظه آزمایش، استوانه‌های اصلی نگهدارنده سیال وجود دارند که در واقع دو استوانه بوده که روی هم سوار شده‌اند. استوانه داخلی به حجم ۷۰ CC، برای نگهداری سیال اصلی مورد آزمایش بوده و استوانه توخالی دیگری که روی آن سوار شده‌است، برای نگهداری آب که مسئول انتقال حرارت از المنت‌ها به دیواره سیلندر داخلی است، می‌باشد. با توجه به حجم‌های بالا، ۷۰ CC حداقل برای آزمایش مورد نیاز است و بهتر است برای بالا بردن فشار، که توسط پمپ دستی انجام می‌شود، حجم نمونه و آنچه داخل قسمت‌های دستگاه تزریق می‌گردد بیشتر از این باشد.



شکل ۳-۱۵- نمایی از سیلندر خارجی و داخلی.

در ادامه نیز نمایی انفجاری از سیلندرها و قطعات متصل به آن‌ها آورده شده است که قطعات را به شکل بهتری ارائه می‌کند.



شکل ۳-۱۶- نمایی از دستگاه به صورت تفکیک شده.

در شکل ۳-۱۶، قسمت ۱ و ۲ المنت‌های حرارتی می‌باشند، قسمت ۳ سیلندر بیرونی و در واقع محفظه قرارگیری آب می‌باشد، قسمت ۴، ۵ و ۶ مجموعه درپوش سیلندر می‌باشد، قسمت ۶ سنسور دمای دستگاه است که به سیلندر داخلی (قسمت ۸) مرتبط است، قسمت ۷ سنسور مجاورت و نشانگر گوی استیل است که بازهم به سیلندر داخلی مرتبط است، قسمت ۹ اورینگ‌های درپوش بوده و قسمت ۱۰ آهنربای الکتریکی سیستم می‌باشد.

۳-۳-۲-۵- آهنربای الکتریکی

یک آهنربای الکتریکی گوی را در بالاترین قسمت از مسیر خود نگه می‌دارد و هنگام قطع جریان، آهنربا گوی را رها کرده و همزمان با آن زمان سنج شروع به کار می‌کند. لازم به ذکر است این آهنربا آبکاری شده و در مقابل زنگ زدن مقاومت بالایی دارد و همچنین این آهنربا با سیال داخلی سیلندر هیچگونه تماس مستقیمی نداشته و از فاصله ۱۱ میلی‌متری جداره سیلندر داخلی، گوی را نگه می‌دارد.



شکل ۳-۱۷- آهنربای الکتریکی با قدرت بالا.

۳-۳-۲-۶- سنسور فشار سیال

یک سنسور، فشار سیال موجود در دستگاه را اندازه‌گیری می‌کند. این سنسور در بازه فشار bar ۵۰۰-۰ قادر به اندازه‌گیری می‌باشد و فشار علاوه بر نمایشگر نصب‌شده روی جعبه کنترل دستگاه، روی فشارسنج نصب‌شده بر سیلندر نیز نمایش داده می‌شود.



شکل ۳-۱۸- سنسور فشار شرکت keller.

۳-۲-۷- سنسور رسیدن گوی به انتهای استوانه

هنگامی که گوی به انتهای مسیر خود می‌رسد، این سنسور مجاورت، زمان سنج را متوقف می‌کند. لازم به ذکر است که این سرور دقت بالایی دارد و قابلیت تحمل دمایی و فشاری بالایی دارد و در انواع سیالات و گستره‌های دمایی متفاوت قابل استفاده است که این قابلیت خود این سنسور را منحصر به فرد می‌کند.



شکل ۳-۱۹- سنسور مجاورت حساس به فلز.

۳-۳-۲-۸- پمپ آب داغ

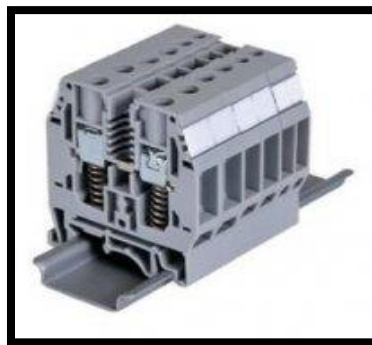
برای انتقال یکنواخت تر گرما از آب به سیلندر داخلی، نیاز به چرخش آب است که برای این کار از یک پمپ آب داغ بهره استفاده شده که زیر سیلندر بیرونی نصب شده و در حین داغ شدن آب با به چرخش درآوردن آن دما را به شکل بهتری منتقل می کند.



شکل ۳-۲۰- پمپ آب داغ Grundfos.

۳-۳-۲-۹- ترمینال ریلی

برای جمع آوری سیم‌های اتصالات مختلف از جمله سنسور فشار، سنسور رسیدن گوی و ... و انتقال آن‌ها به جعبه کنترل از ترمینال ریلی استفاده می شود.



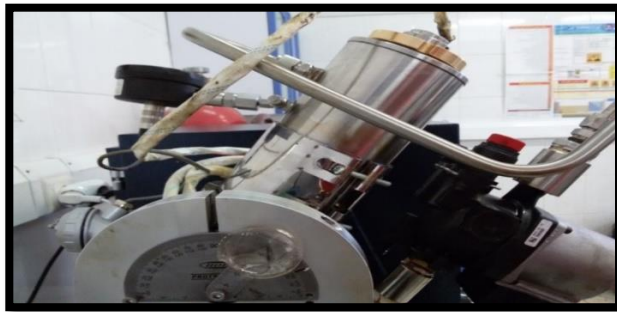
شکل ۳-۲۱- ترمینال ریلی.

۳-۳-۲-۱۰- گوی

برای این دستگاه از گوی آهنی با روکش نیکل-کروم با قابلیت مقاومت در برابر شرایط دمایی و خوردگی، استفاده شده است.

۳-۳-۲-۱۱- صفحه مدرج برای تنظیم زاویه حرکت گوی

برای تنظیم مسیر حرکت و در واقع زاویه حرکت گوی به سمت پایین، صفحه مدرجی قرار داده شده است که در ۳ زاویه ۲۳، ۴۵ و ۷۰ درجه نسبت به افق علامت‌گذاری شده است. در زیر نمایی از این صفحه مدرج آمده است.



شکل ۳-۲۲- نمایی از صفحه مدرج برای تنظیم زاویه.

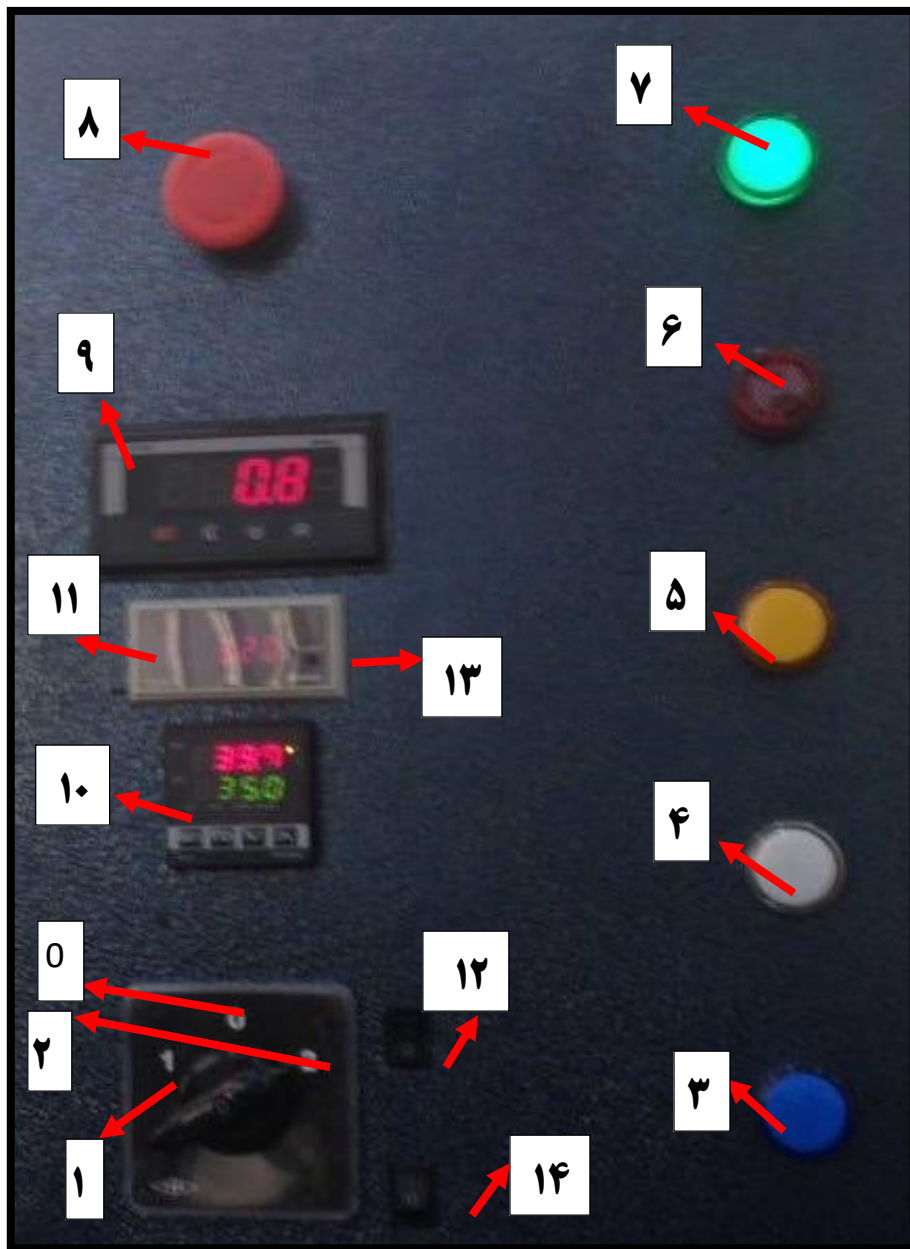
۳-۳-۳- جعبه کنترل

به منظور تأمین دما، نمایش فشار، وصل یا قطع کردن آهنربای الکتریکی از جعبه کنترل استفاده می‌شود. در ادامه قسمت‌های مختلف جعبه کنترل را توضیح می‌دهیم.

۳-۳-۳-۱- کلید روشن و خاموش و سایر قسمت‌ها

برق اصلی دستگاه با این کلید کنترل می‌شود. با چرخاندن آن به سمت راست (عدد ۲) جریان الکتریکی متصل می‌شود و دستگاه به حالت استفاده دستی وارد می‌شود و در صورت چرخاندن به سمت چپ (عدد ۱) دستگاه به حالت اتومات وارد شده و تمامی محاسبات توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد، همچنین برای خاموش کردن ویسکومتر، کلید را در وضعیت خاموش (عدد ۰) قرار دهید. همچنین عدد ۳ نشان‌دهنده چراغ آبی است که نشانگر و هشداردهنده رسیدن گوی به انتهای مسیر است که همان‌طور که قبلاً گفته شد باعث متوقف شدن تایمر می‌شود. عدد ۴ نشان‌دهنده چراغ سفید است که نشانگر و هشداردهنده روشن بودن آهنربای الکتریکی می‌باشد که با خاموش شدن کلید آهنربا، چراغ نیز خاموش شده و هم‌زمان تایمر شروع به کار می‌کند. عدد ۵ نشان‌دهنده چراغ زرد است که

نشانگر روشن بودن و کار کردن المنت‌های حرارتی است که برای تنظیم دما مورد استفاده قرار می‌گیرند. عدد ۶ نشان‌دهنده‌ی چراغ قرمز است که نشانگر و هشداردهنده‌ی خرابی در سیستم بوده و در صورت وقوع هرگونه نقص در سیستم، روشن می‌شود. عدد ۷ نشان‌دهنده‌ی چراغ سبز است که نشانگر روشن بودن و ورود برق به سیستم دستگاه می‌باشد و همچنین عدد ۸ نشان‌دهنده دکمه قطع اضطراری است که در صورت وقوع مشکل ناگهانی می‌توان با زدن این دکمه برق کل سیستم را بلافاصله قطع کرد.



شکل ۳-۲۳- نمای جلویی جعبه کنترل دستگاه.

۳-۳-۳-۲- نمایشگر فشار

هنگامی که ویسکومتر روشن باشد، نمایشگر (عدد ۹)، فشار دستگاه را برحسب واحد bar با دقت ۰/۱ نمایش می‌دهد. این در حالی است که نمایشگر مختص خود فشارسنج که به آن متصل است و روی سیلندر قرار دارد، فشار را برحسب psi نمایش داده و در نرم‌افزار نیز واحد نمایش فشار قابل انتخاب می‌باشد.

۳-۳-۳-۳- تنظیم‌کننده دما

این قسمت از جعبه کنترل، وظیفه نمایش و تنظیم دمای حمام آب دور سیلندر داخلی را دارد (عدد ۱۰). مقدار مشاهده‌شده، دما برحسب واحد °C می‌باشد. برای وارد کردن دمای دلخواه یکی از دکمه‌ها فشار داده می‌شود تا رقم مشاهده‌شده به حالت چشمک‌زن تغییر وضعیت دهد. با استفاده از همان دکمه‌ها مقدار دلخواه را وارد شده و بعد از آن کلید SET را فشار داده می‌شود.

۳-۳-۳-۴- زمان سنج

بعد از رها شدن گوی از آهن‌ربا، زمان سنج (عدد ۱۱) شروع به کار می‌کند تا سنسور مجاورت دستور توقف زمان را بدهد. دقت زمان سنج بسیار بالا بوده و تا ۲ رقم اعشار ثانیه را نمایش خواهد داد. در صورتی که سیال شما دارای ویسکوزیته کمتر و یا از زاویه بیشتر دستگاه استفاده می‌کنید، امکان دارد زمان رسیدن گوی به انتهای مسیر خیلی کم باشد، پس بهتر است که برای اطمینان از نتایج آزمایش‌های، سیالاتی که پیش‌بینی می‌شود ویسکوزیته خیلی کمی دارند تحت زاویه کمی نسبت به افق رها شوند تا زمان طی کردن مسیر توسط گوی بیشتر باشد و دقت کار بالاتر برود.

۳-۳-۳-۵- دکمه ۱ (آهن‌ربا)

با روشن کردن این دکمه (عدد ۱۲)، جریان آهن‌ربا متصل شده و چراغ سفید روشن شده و این نشان می‌دهد که گوی توسط آهن‌ربا گرفته شده است. با خاموش کردن این دکمه، جریان آهن‌ربا قطع

می‌شود و چراغ سفیدرنگ روشن شده آن، خاموش می‌شود. گوی رهاشده و هم‌زمان با آن زمان‌سنج شروع به کار می‌کند.

۳-۳-۳-۶- ریست کردن زمان

در هر بار آزمون، به‌صورت اتومات با روشن و خاموش کردن دکمه آهن‌ریا که منجر به رهاسازی گوی می‌شود، زمان‌سنج ریست می‌شود. البته این کار با فشار دادن دکمه‌ای که روی نمایشگر زمان هست (عدد ۱۳) نیز شدنی است.

۳-۳-۳-۷- چرخش آب دور سیلندر داخلی

همچنین برای چرخش آب دور سیلندر داخلی، می‌توان با زدن دکمه پمپ (عدد ۱۴)، انتقال حرارت را به‌صورت یکنواخت‌تر انجام داد.

۳-۴- دستگاه التراسونیک

کلمه التراسونیک^۱ به معنای مافوق صوت است. محدوده فرکانس شنوایی انسان ۲۰ هرتز تا ۲۰ هزار هرتز است. محدوده فرکانسی امواج مافوق صوت ۴۰ کیلوهرتز تا چندین مگاهرتز می‌باشد. امواج مافوق، کاربردهای فراوانی از جمله در لیزر، تخلیه الکتریکی برای بهبود خواص سطحی و افزایش نرخ باربرداری، سنجش فاصله، عمق مخزن، شستشوی دقیق ظروف آزمایشگاهی، تعیین فشارخون بیمار، همگن کردن مواد مذاب، جوشکاری مواد غیر هم‌جنس، ریخته‌گری، تراشکاری، فرزکاری، سوراخ‌کاری و غیره دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای امواج فراصوت در شستشوی التراسونیک است.

برای این کار قطعه موردنظر برای شستشو در مایعی که معمولاً آب است، غوطه‌ور می‌کنند. مایعی که قطعه در آن غوطه‌ور است با فرکانس و شدت بسیار بالایی به ارتعاش درمی‌آید و این ارتعاشات منجر به مرتعش شدن قطعه درون مایع شده و آلودگی‌ها را از آن جدا می‌کند. همچنین از دیگر کاربردهای مهم دستگاه التراسونیک در مباحث آزمایشگاهی می‌توان به پخش کردن و همگن کردن یک مخلوط

^۱ Ultrasonic

اشاره کرد که می‌توان نانو ذرات را بدون هیچ‌گونه نگرانی با آن در نفت پخش کرد که نه ته‌نشین شود و نه حالت کلوخه‌ای به خود بگیرد. در ادامه نمایی از دستگاه آلتراسونیک موجود در مرکز ازدیاد برداشت دانشگاه شیراز آورده شده که قسمت‌های مختلف آن به‌خوبی نمایش داده شده است. دستگاه آلتراسونیک مورد استفاده از نوع پراب دار^۱، ۴۰۰ وات می‌باشد که پراب آن را باید داخل نمونه فرورد تا عملیات همگن کردن را انجام دهد.



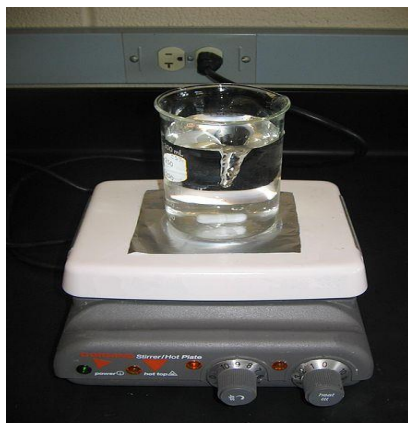
شکل ۳-۲۴- نحوه قرارگیری نمونه داخل دستگاه آلتراسونیک.

۳-۵- دستگاه همزن مغناطیسی

دستگاه همزن مغناطیسی^۲ که از یک دستگاه برقی مغناطیسی و یک آهنربای ثابت تشکیل شده، برای جلوگیری از ته‌نشینی و همچنین کمک به همگن شدن بیشتر مخلوط استفاده می‌شود.

^۱ Probe

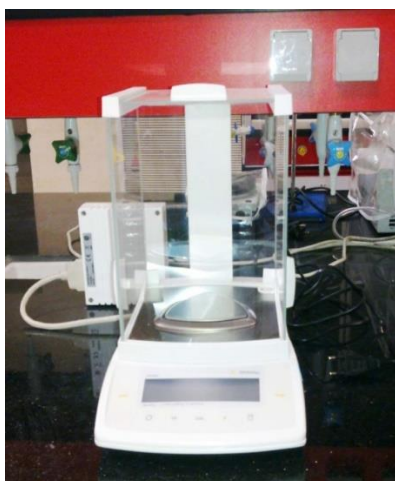
^۲ magnetic stirrer



شکل ۳-۲۵ - همزن مغناطیسی.

۳-۶- دستگاه ترازوی دیجیتال با دقت بالا

برای اندازه‌گیری وزن نانوهای مورد استفاده از ترازوی بسیار دقیق استفاده شده است که به تبع دقت بالای این ترازو، دقت آزمایش‌های نیز بالا خواهد رفت.



شکل ۳-۲۶- نمایی از ترازوی دیجیتال با دقت بالا.

۳-۷- نحوه انجام آزمایش‌ها

در ابتدا باید همه مواد مورد نیاز که در ادامه به صورت تشریح شده آورده شده‌اند، را فراهم شود تا در مدت زمان انجام آزمون، سیال بدون درنگ مراحل را پشت سر بگذارد و همه موارد ایجادکننده خطا برطرف شوند.

۳-۷-۱- مواد مورد استفاده

در این آزمایش‌ها از نفت چاه شماره ۲۶ میدان منصوری استفاده شده است که ویژگی‌های این نفت در ادامه آمده است. لازم به ذکر است که میدان نفتی منصوری از میادین نفتی ایران است که در استان خوزستان، در فاصله ۵۰ کیلومتری از جنوب شرقی اهواز و در حدود ۶۰ کیلومتری شمال خلیج فارس مستقر می‌باشد. این میدان از شمال غربی در همسایگی میدان نفتی اهواز، از غرب با میدان آب تیمور و از شمال شرقی در مجاورت میدان نفتی شادگان قرار دارد.

جدول ۳-۱- ویژگی‌های نفت چاه شماره ۲۶.

شاخص ناپایداری کلوئیدی	هیدروکربن‌های اشباع	آروماتیک	رزین‌ها	آسفالتین‌ها	گروه
۰/۹۴۴۷	۴۰/۸۵	۴۸/۷۹	۲/۱	۷/۷۱	درصد وزنی

تولوئن مورد استفاده دارای خلوص ۹۹ درصد بوده که برای شستشوی دستگاه از تولوئن صنعتی استفاده شده است. نانو ذرات مورد استفاده که در ادامه آورده می‌شوند همگی از بهترین نوع و خالص‌ترین نوع موجود در بازار بوده‌اند. نانو ذرات استفاده شده در این مطالعه شامل ۶ نانوذره TiO_2 , NiO , Al_2O_3 , Fe_3O_4 , Co_2O_3 , Co_3O_4 می‌باشد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی هر یک از نانو ذرات مورد استفاده در ادامه شرح داده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود سایز نانو ذرات (هر ۶ نانوذره) کمتر از ۵۰ نانومتر می‌باشد. نسبت سطح اشغال شده به وزن نانو ذرات با کمیت SSA نمایش داده شده و بعضاً میزان سطح به وجود آمده نیز معرفی می‌گردد که با (BET^1) نمایش می‌دهند. هر کدام از نانو ذرات دارای SSA خاص خود هستند، اما همگی در محدوده‌ی ۴۰ تا ۱۳۸ مترمربع بر گرم هستند. در ادامه ویژگی‌های هر نانوذره آورده شده است:

¹ Brunauer-Emmett-Teller

۱-Aluminum Oxide Nano powder

APS	SSA	Color	Density
۲۰ nm	>۱۳۸ m ² /g	white	۳۸۹۰ Kg/m ³

۲-Cobalt Oxide (Co2O3)

APS	SSA	Color	Bulk Density
۵۰ nm	۷۵m ² /g	black	۰/۷۳۲g/cm ³

۳-Cobalt Oxide (Co3O4)

APS	SSA	Color	True density
۳۰-۱۰ nm	۱۵۰-۵۰ m ² /g	dark brown	۶/۱۱ g/m ³

۴-Nickel Oxide Nano powder (NiO)

APS	SSA	Color	True Density
۲۰-۱۰ nm	۱۰۰-۵۰ m ² /g	Gray-Black	۶/۶۷ g/cm ³

۵-Titanium Oxide Nano powder (TiO₂)

APS	SSA	Color	True density
۳۰ nm	۳۵-۶۰ m ² /g	white	۴/۲۳ g/cm ³

۶-Iron Oxide Nano powder (Fe_rO_r)

APS	SSA	Color	True Density
۲۰- ۳۰ nm	۶۰-۴۰ m ² /g	Dark Brown	۵/۴-۱/۸ g/cm ³

همچنین برای رسوب آسفالتین در آزمون‌های تعیین نقطه رسوب، از نرمال هپتان خالص استفاده شده است.

۳-۷-۲- آماده کردن نمونه برای انجام آزمون‌های ویسکوزیته

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نمونه‌های نفت حاوی نانو ذرات، ابتدا 70°C از نفت موردنظر وزن شده و نسبت به درصدی که قرار است نانو ذرات اضافه شود، وزن نانوذره موردنیاز به دست آورده شده و به نفت اضافه می‌شود. در مرحله بعد برای اینکه نانو ذرات درون نمونه ته‌نشین یا کلوخه‌ای نشوند و به خوبی نقش کاتالیستی خود را نشان دهند، نفت حاوی نانو ذرات درون دستگاه آلتراسونیک قرار داده و به مدت ۱۰ دقیقه با قدرت ۱۰۰ کیلووات گذاشته شده تا نانو ذرات به خوبی درون نفت پخش شوند. بعد از تمام شدن زمان آلتراسونیک، به مدت یک ساعت به نمونه زمان داده شده تا اثرگذاری نانو ذرات به بیشترین حد ممکن برسد و پس از آن نمونه آماده آزمون می‌باشد و نمونه‌ها پس از آماده‌سازی وارد ویسکومتر می‌شود و زمان داده می‌شود تا به دمای 95°C درجه‌سانتیگراد برسد و پس از آن آزمون‌های ویسکوزیته انجام می‌شود.

جدول ۳-۲- خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده برای بررسی تأثیر نانو ذرات بر ویسکوزیته در

دمای 95°C .

					درصد وزنی نانوذره
۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱	
√	√	√	√	√	Fe_3O_4
√	√	√	√	√	NiO
√	√	√	√	√	Al_2O_3
√	√	√	√	√	Co_2O_3
√	√	√	√	√	Co_3O_4
√	√	√	√	√	TiO_2

درصدهای نانو مورد استفاده در این مرحله از آزمایش‌ها به این صورت است که ۶ نمونه نانوذره را با درصدهای مختلف وزنی به نمونه‌ی نفتی اضافه کرده و پارامتر تغییر ویسکوزیته را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۷-۳- آماده کردن نمونه برای انجام آزمون‌های نقطه شروع رسوب

برای آماده کردن نمونه‌ها برای تعیین نقطه شروع رسوب، ابتدا نمونه نفت مورد نظر را به مقدار ۷۰CC آماده می‌شود.

جدول ۳-۳- خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده برای بررسی تغییر نقطه شروع رسوب آسفالتین با

افزودن نرمال هپتان در حضور ۰/۱٪ وزنی نانو ذرات در دمای محیط.

Ti O	Co ₃ O ₄	Co ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	NiO	Fe ₃ O ₄	نانوذره درصد نرمال هپتان
√	√	√	√	√	√	۰
√	√	√	√	√	√	۲
√	√	√	√	√	√	۴
√	√	√	√	√	√	۸
√	√	√	√	√	√	۱۰
√	√	√	√	√	√	۱۲
√	√	√	√	√	√	۱۳
√	√	√	√	√	√	۱۴
√	√	√	√	√	√	۱۵
√	√	√	√	√	√	۱۶
√	√	√	√	√	√	۱۸
√	√	√	√	√	√	۲۰
√	√	√	√	√	√	۲۲

در مرحله بعد با محاسبه وزن نفت و حجم آن، وزن موردنیاز نانو ذرات را محاسبه کرده و به آن اضافه می‌شود و پس از پخش کردن نانو ذرات درون نفت، در مرحله بعد نرمال هپتان مطابق درصد حجمی که در جدول ۳-۳ آورده شده است، به نمونه اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی درون پیرکس‌های دربسته قرار داده تا نرمال هپتان به خوبی درون نفت پخش شده، و سپس نمونه آماده آزمون بوده و وارد دستگاه می‌شود. باید توجه نمود که نرمال هپتان را بعد مرحله آلتراسونیک باید اضافه نمود زیرا فرار بوده و امکان دارد مقداری از آنچه اضافه می‌کنیم، از محلول خارج شود.

۳-۷-۴- وارد کردن سیال به ویسکومتر :

قبل از شروع آزمایش باید قطعات ویسکومتر در جای خود به صورت تراز قرار گرفته باشند. اطمینان حاصل شود که اتصالات مکانیکی و الکتریکی برقرار باشد و هیچگونه نشستی در سیستم نباشد. اگر قطعات از هم باز باشد، مراحل زیر باید به ترتیب انجام شود:

- ۱- در ابتدا سیلندر خشک و تمیز شده تا هیچگونه ناخالصی وارد سیال مورد آزمون نشود.
- ۲- در مرحله بعد کلاهکی از سیلندر را که آهنربای الکتریکی در آن قرار دارد محکم بسته می‌شود.
- ۳- پس از قرار دادن گوی درون سیلندر کلاهک سمت دیگر نیز بسته می‌شود.
- ۴- سپس از سه‌راهی که روی بدنه ویسکومتر تعبیه شده سیال به درون سیلندر تزریق شده و خروجی که در کلاهک برای هواگیری تعبیه شده باز شده تا هوای سیلندر به بیرون هدایت شود.
- ۵- دمای موردنظر تنظیم شده تا به وسیله المنت‌های کار گذاشته شده بر روی سیلندر، دمای سیال به مقدار موردنظر برسد. برای یکنواختی دمای درون سیلندر بهتر است که در مدت زمان انتظار برای رسیدن به دمای موردنظر، چندین بار زاویه سیلندر را عوض شود تا با به حرکت درآمدن گوی، دمای سیال درون سیلندر نیز یکنواخت شود.
- ۶- در مرحله بعد به وسیله پمپ و اتصال آن به قسمت ورودی سیال که روی سیلندر تعبیه شده، باید فشار سیال را به مقدار موردنظر رساند.

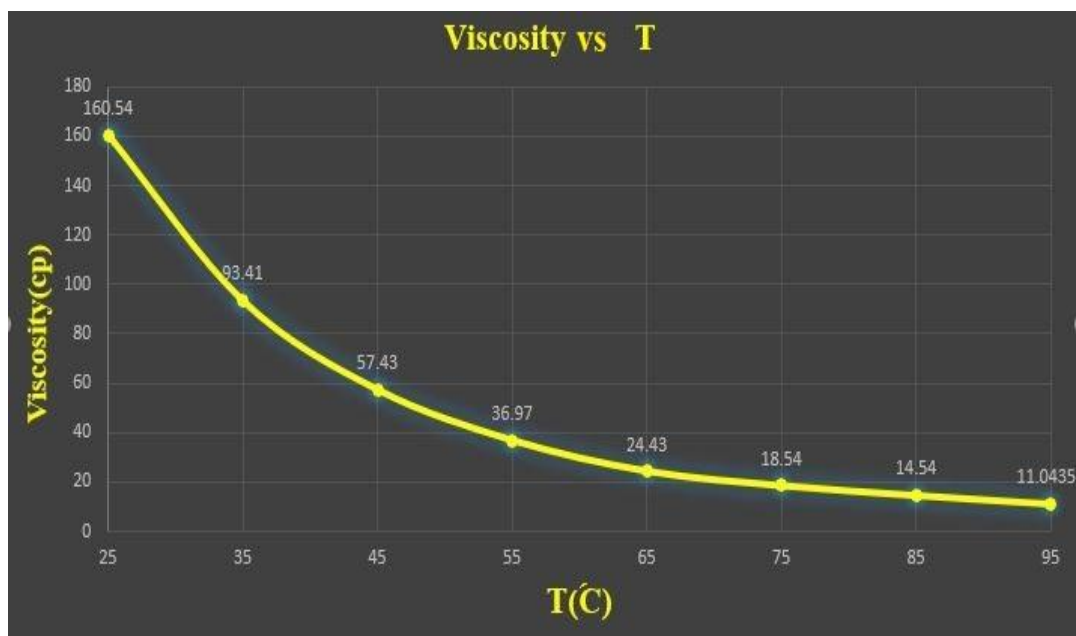
- ۷- حال باید سیلندر به حالت عمودی به نحوی که قسمت مگنت در پایین باشد قرار گیرد و زمان داده شود تا اطمینان حاصل شود که گوی به قسمت انتهایی سیلندر یعنی سمت مگنت رسیده باشد.
- ۸- در این مرحله ابتدا مگنت الکتریکی روشن شده تا گوی را نگهدارد و پس از تنظیم زاویه سیلندر مگنت را خاموش می‌شود تا گوی به حرکت دربیاید، که با روشن شدن مگنت زمان سنج به صورت اتومات ریست شده و عدد صفر را نشان می‌دهد و بلافاصله پس از خاموش شدن مگنت الکتریکی زمان سنج شروع به کار می‌کند تا گوی به آخر سیلندر برسد و پس از آن زمان سنج متوقف می‌شود.
- ۹- پس از واکنش سنسور مجاورت و مشخص شدن زمان طی شده مسیر توسط گوی و به تبع آن به دست آوردن سرعت و ویسکوزیته، در صورت عدم نیاز به انجام دوباره آزمون در زوایای دیگر، باید سیال تخلیه و سیلندر تمیز گردد.
- پس از به دست آوردن زمان غلتیدن گوی، روش اول این است که می‌توان با وارد کردن فرمول‌ها به نرم‌افزار اکسل و جای گذاری زمان، ویسکوزیته را محاسبه کرد. روش دوم این است که فقط زاویه را تنظیم کرده و با نرم‌افزار دستور رها کردن گوی را صادر شود، بقیه محاسبات به صورت اتوماتیک صورت می‌گیرد.

فصل چهارم:

بحث در نتایج

۴-۱- مقدمه

پس از اجرای آزمایش‌ها طراحی‌شده، به تحلیل نتایج آزمایش‌ها و همچنین بررسی تأثیر نانو ذرات مختلف بر ویژگی‌های مهم نفت خام دارای استعداد رسوب آسفالتین، پرداخته می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، طراحی و ساخت دستگاه ویسکومتر گوی غلتان با قابلیت تحمل دمایی و فشار بالا و همچنین بررسی تأثیر نانو ذرات مختلف بر ویسکوزیته و نقطه شروع رسوب آسفالتین در آن، انجام شده که نتایج آزمایش‌ها صورت گرفته با دستگاه ویسکومتر گوی غلتان در ادامه به تفصیل آورده شده است. شکل ۴-۱، تغییرات ویسکوزیته نمونه نفت سنگین مورد آزمایش (حالت پایه) بر حسب دما را در فشار محیط نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- تغییرات ویسکوزیته نفت مورد آزمایش با دما در فشار محیط.

(معادله ۴-۱)

$$\mu = 124594T^{-2.039}$$

$$R^2 = 0.9963$$

در معادله ۴-۱ که نشان‌دهنده تغییرات ویسکوزیته با دما می‌باشد، μ ویسکوزیته بر حسب سانتی-

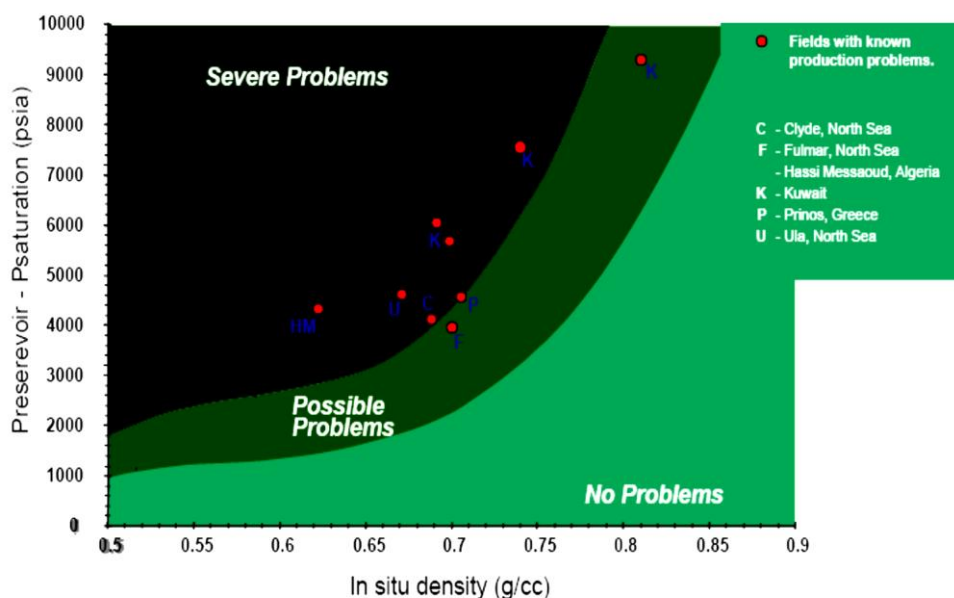
پواز و T دما می‌باشد بر حسب درجه سانتیگراد و R^2 میزان تطابق نمودار را با فرمول نشان می‌دهد.

۴-۲- بررسی احتمال رسوب آسفالتین در نمونه نفت خام مورد آزمایش

به طور کلی ۴ روش تخمینی بر پایه معادلات تجربی جهت تشخیص امکان رسوب آسفالتین وجود دارد. این ۴ روش شامل: نمودارهای De-Boer، روش‌های استانکویچ^۱، شاخص ناپایداری کلوئیدی و شاخص پایداری آسفالتین می‌باشد. در ادامه به طور خلاصه این روش‌ها تشریح می‌گردد.

الف) نمودار De Boer

در این نمودارها احتمال رسوب آسفالتین با استفاده از اختلاف فشار مخزن و فشار اشباع و دانسیته نفت درجا، به ۳ ناحیه مختلف تقسیم‌بندی می‌گردد که در شکل ۴-۲ مشخص شده است.



شکل ۴-۲- نمودار De Boer جهت تشخیص احتمال رسوب آسفالتین.

ب) شاخص ناپایداری کلوئیدی

در این روش با استفاده از فرمول زیر شاخص CII تعیین می‌گردد.

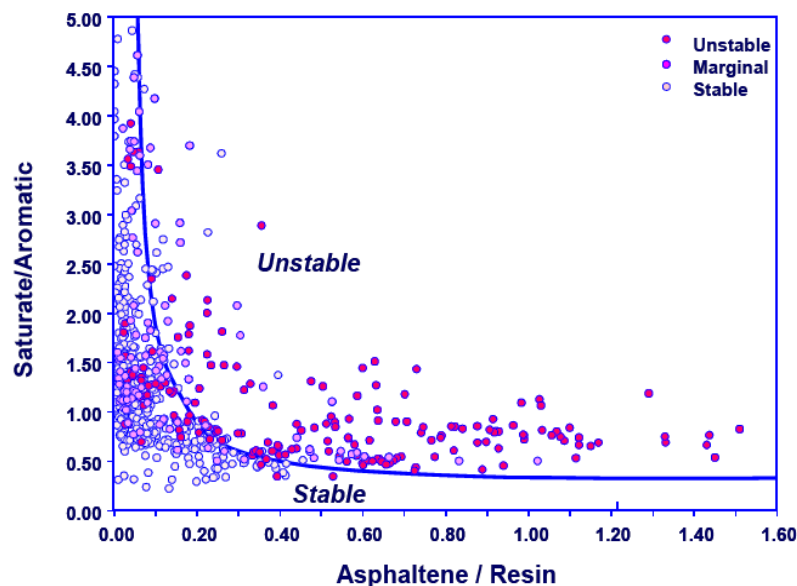
$$CII = \frac{S_{aturated} + A_{sphalrene}}{A_{romatic} + R_{esin}} \quad \text{(معادله ۴-۲)}$$

^۱ Stankiewicz

با توجه به شاخص معرفی شده در معادله ۲-۴، در این معادله S_{aturated} درصد وزنی ترکیبات اشباع، $A_{\text{spphaltene}}$ درصد وزنی آسفالتین، A_{romatic} درصد وزنی ترکیبات آروماتیک و R_{esin} درصد وزنی رزین را نشان می‌دهد. در صورتی که CII کمتر از ۰,۷ باشد احتمال رسوب آسفالتین نمی‌رود. در صورتی که این شاخص بین ۰,۷ تا ۰,۹ باشد؛ احتمال رسوب وجود دارد و در صورتی که این شاخص بیشتر از ۰,۹ باشد احتمال رسوب آسفالتین شدید می‌باشد [۵۱].

ج) روش استانکوویچ

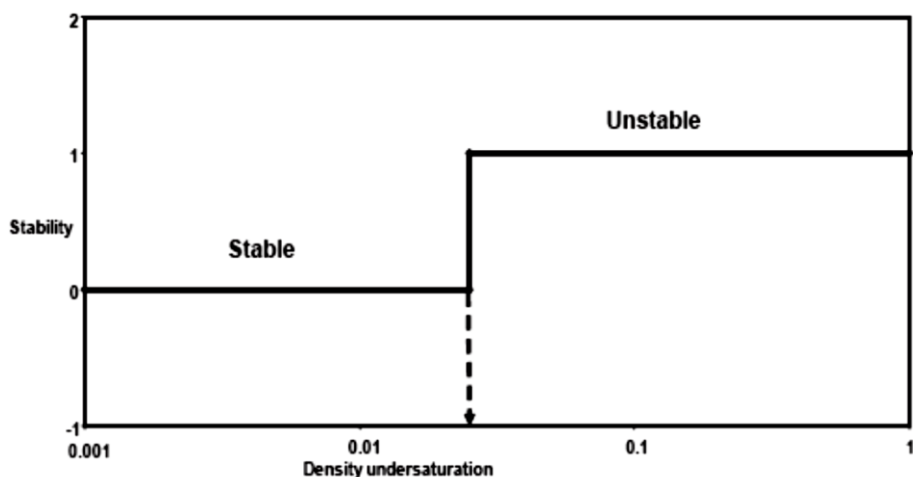
در این روش با استفاده از دو نسبت اشباع/آروماتیک و آسفالتین/رزین احتمال ناپایداری رسوب آسفالتین پیش‌بینی می‌گردد که از شکل ۳ جهت مشخص شدن پایداری آسفالتین استفاده می‌گردد.



شکل ۳-۴- روش استانکوویچ برای تشخیص پایداری آسفالتین در نفت خام.

د) روش شاخص پایداری آسفالتین

در این روش با استفاده از اختلاف دانسیته نفت در شرایط اولیه و شرایط اشباع احتمالاً رسوب آسفالتین با توجه به شکل ۴-۴ تشخیص داده می‌شود.



شکل ۴-۴- نمودار شاخص پایداری آسفالتین.

با توجه به شکل ۴-۴ در صورتی که اختلاف دانسیته نفت در شرایط اولیه مخزن به دانسیته نفت در شرایط اشباع بیشتر از ۰/۰۲۵ باشد آسفالتین ناپایدار می‌باشد [۵۱].

در ادامه با استفاده از روش‌های استانکویچ و شاخص ناپایداری کلئیدی احتمال رسوب آسفالتین از لحاظ ترکیبات تشکیلی در نمونه نفت خام مورد آزمایش بررسی می‌شود.

جدول ۴-۱- بررسی احتمال رسوب آسفالتین در نمونه نفت مورد آزمایش با استفاده از شاخص

ناپایداری کلئیدی و روش استانکویچ.

اشباع	آروماتیک	رزین	آسفالتین	CII	روش استانکویچ
۴۰/۸۵	۴۸/۷۹	۲/۶۱	۷/۷۱	۰/۹۴۴۷۴۷	ناپایدار

همان‌طور که جدول ۴-۱ نشان می‌دهد، نفت مورد آزمایش از لحاظ ترکیبات شیمیایی آن مستعد رسوب آسفالتین می‌باشد. بنابراین به هر دلیل با برهم خوردن شرایط تعادلی حاکم بر سیال (تغییرات شرایط ترمودینامیکی یا تغییر ترکیبات هیدروکربوری طی تزریق مواد مختلف به مخزن جهت بهبود شرایط تولید)، امکان رسوب آسفالتین وجود دارد. بنابراین بررسی قدرت بازدارنده‌ها، عوامل رسوب آسفالتین (همچون نرمال آلکان‌ها) و همچنین پیش‌بینی شرایط رسوب بسیار الزامی می‌باشد.

در این پژوهش به بررسی شرایط رسوب آسفالتین با استفاده از اندازه‌گیری ویسکوزیته پرداخته شده و نقش نانو ذرات در جهت کاهش رسوبات آسفالتین آنالیز می‌گردد.

۴-۳- تأثیر نانو ذرات بر ویسکوزیته نفت خام مستعد رسوب آسفالتین

طبق تحقیقات انجام‌شده، پیش‌بینی می‌شود که افزودن نانو ذرات به نفت مستعد رسوب آسفالتین موجب تغییرات در ویسکوزیته و همچنین نقطه شروع رسوب آسفالتین شود. آزمایش‌ها برای تعداد محدودی نانوذره انجام شده است و هدف اصلی، بررسی و سنجش میزان تأثیر نانو ذرات مختلف بر پارامترهای ذکرشده، است. تمامی آزمون‌های تغییرات ویسکوزیته در فشار اتمسفر و دمای ۹۵ درجه سانتیگراد انجام شده تا به‌نوعی دمای مخزن شبیه‌سازی شود.

۴-۳-۱- تأثیر نانو ذرات اکسید آهن بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین

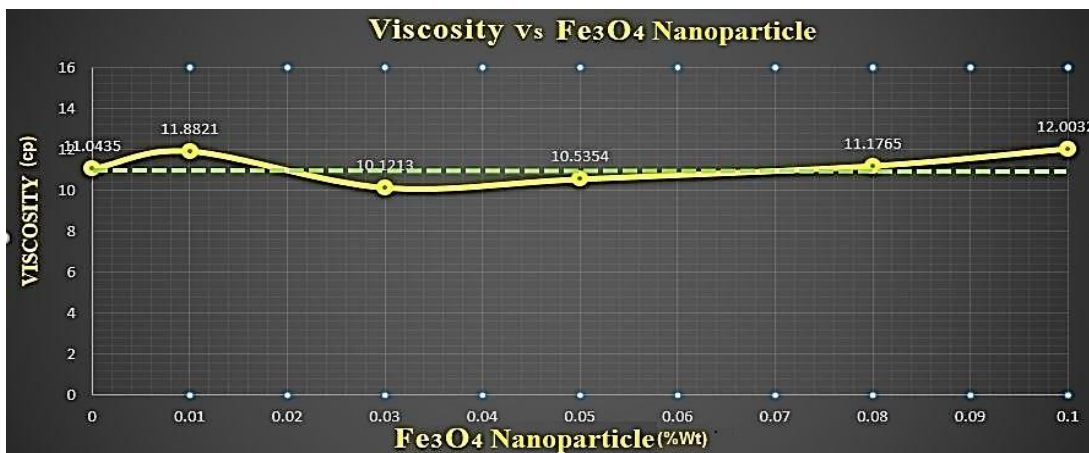
نانو ذرات اکسید آهن در دهه گذشته به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نانو ذرات در صنایع مختلفی مورداستفاده و بهره‌برداری قرار گرفته است. پس از اضافه نمودن نانو ذرات اکسید آهن بر اساس درصد وزنی‌های از پیش تعیین شده به نمونه نفت موجود، تغییراتی قابل‌ذکر مشاهده شده، که در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید آهن در

دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

ویسکوزیته (سانتی پواز)	نانوذره (درصد وزنی)
۱۱/۰۴۳۵	۰
۱۱/۸۸۲۱	۰/۰۱
۱۰/۱۲۱۳	۰/۰۳
۱۰/۵۳۵۶	۰/۰۵
۱۱/۱۷۶۵	۰/۰۸
۱۲/۰۰۳۲	۰/۱

داده‌های جدول ۴-۲ تغییرات ویسکوزیته نفت مورد آزمایش را بر اساس درصد وزنی نانو ذرات افزوده شده، نمایش می‌دهد و در ادامه در شکل ۴-۵ نیز به‌وضوح این تغییرات قابل مشاهده است که با افزودن نانو ذرات در ابتدای کار ویسکوزیته افزایش یافته و با افزایش درصد نانو ذرات به نمونه نفتی تا درصد خاصی، ویسکوزیته کاهش خواهد یافت.



شکل ۴-۵- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید آهن در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد. همان‌طور که از شکل ۴-۵ مشخص است، یک نقطه مینیمم برای کاهش ویسکوزیته مشاهده می‌شود که در نقطه ۰/۰۳ درصد وزنی نانوذره اتفاق افتاده است و پس از آن با افزودن نانو ذرات روند افزایشی ویسکوزیته وجود دارد. نانو ذرات اکسید آهن عملکرد چندگانه‌ای را از خود نشان می‌دهند. اضافه کردن ماده جامدی همچون نانوذره اکسید آهن به خودی خود، سبب افزایش ویسکوزیته سیال می‌گردد. اما از طرفی نانو ذرات با جذب آسفالتین بر سطح خود مانع از تجمع و در نهایت رسوب آن‌ها می‌گردد و به دنبال آن ویسکوزیته را کاهش می‌دهد. این دو مکانیزم به‌صورت غیرهمسو عمل می‌کنند. بنابراین پیدا کردن نقطه بهینه در جهت کاهش ویسکوزیته نفت حائز اهمیت می‌باشد. در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود که در غلظت ۰/۰۳ درصد وزنی از نانو ذرات در محلول نفت خام مستعد رسوب آسفالتین، کمترین ویسکوزیته وجود دارد.

۴-۳-۲- تأثیر نانو ذرات اکسید نیکل بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین

همانند نانو ذرات اکسید آهن، نانو ذرات اکسید نیکل را به نمونه نفت مستعد رسوب آسفالتین اضافه کرده و همان طور که در گذشته نیز ذکر شده، به مدت ۱ ساعت به همه آزمون‌ها زمان داده می‌شود تا واکنش‌های احتمالی به‌خوبی صورت گرفته و نانو ذرات خود را به‌خوبی نشان دهند. داده‌های آزمایش‌ها مربوط به نانو ذرات اکسید نیکل در جدول ۴-۳ آورده شده است.

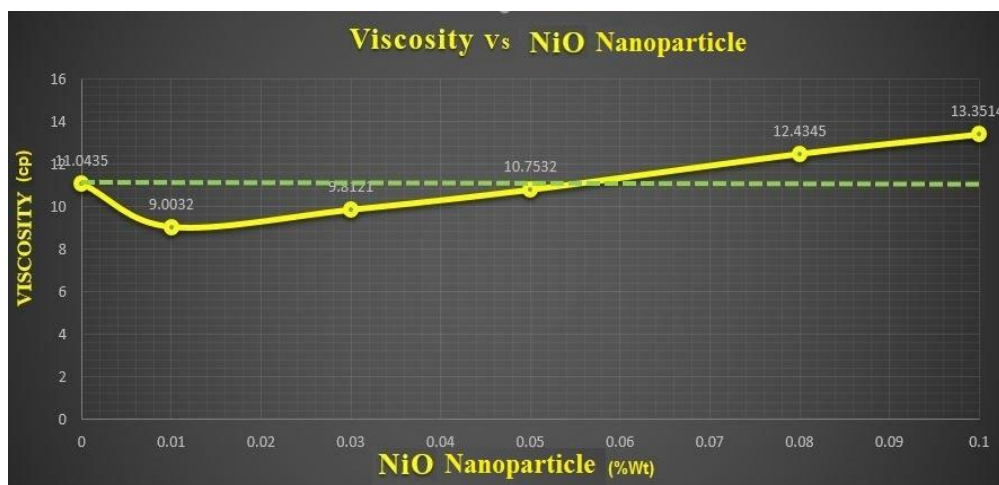
جدول ۴-۳- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید نیکل در

دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

ویسکوزیته (سانتی پواز)	درصد نانو (درصد وزنی)
۱۱/۰۴۳۵	۰
۹/۰۰۳۲	۰/۰۱
۹/۸۱۲۱	۰/۰۳
۱۰/۷۵۳۲	۰/۰۵
۱۲/۴۳۴۵	۰/۰۸
۱۳/۳۵۱۴	۰/۱

طبق داده‌های به‌دست‌آمده از جدول ۴-۳، نمودار تغییرات ویسکوزیته نفت مستعد رسوب

آسفالتین، بر اساس نانو ذرات نیکل در شکل ۴-۶ رسم شده است.



شکل ۴-۶- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید نیکل در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

همانند نانو ذرات اکسید آهن، برای نمودار اکسید نیکل نیز یک نقطه مینیمم وجود دارد که در این نقطه از نمودار کمترین میزان ویسکوزیته مشاهده می شود و پس از آن با افزودن نانو ذرات نه تنها کاهش ویسکوزیته ای نشان داده نمی شود بلکه افزایش ویسکوزیته نفت را نیز در پی خواهد داشت. نقطه مینیمم نمودار نانو ذرات اکسید نیکل در ۰/۰۱ درصد وزنی نانو رخ داده و بقیه درصدهای افزوده شده، نتوانسته اند روند بهتری را ارائه دهند. بنابراین تزریق سیال حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی از نانو ذرات نیکل بهترین نتایج را از جهت کاهش ویسکوزیته را نشان می دهد.

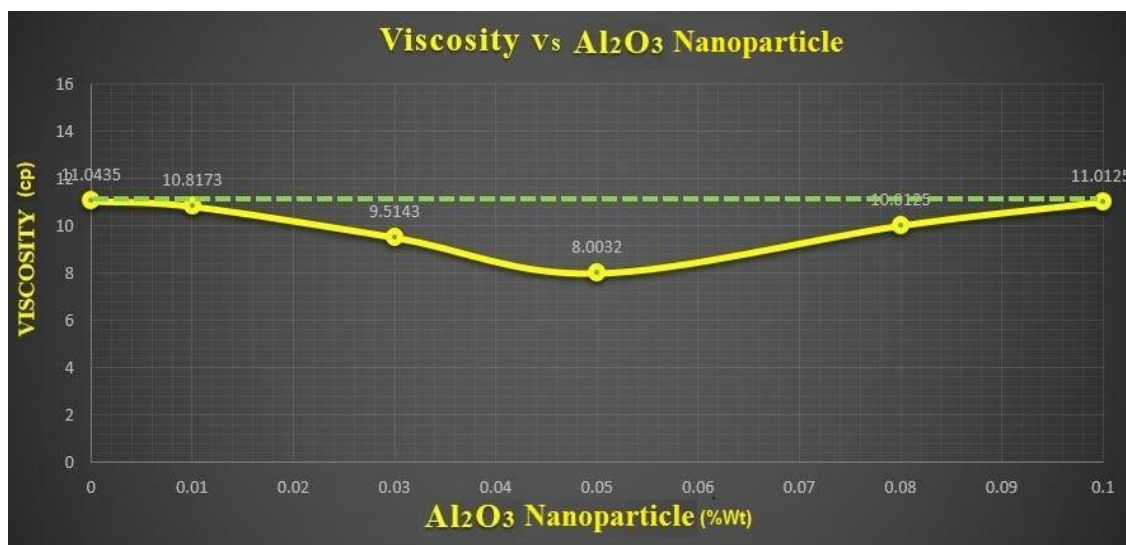
۳-۳-۴- تأثیر نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین

نانو ذرات اکسید آلومینیوم یکی از مواد سرامیکی است که به دلیل ارزان بودن هزینه تولید، پایداری حرارتی خوب، سطح ویژه و قدرت اسیدی سطحی بالا و برهمکنش با فلزات واسطه در بسیاری از صنایع و واکنشها مورد توجه واقع شده است. این ماده به عنوان جاذب سطحی، کاتالیست و کمک کاتالیست در بسیاری از فرآیندهای پتروشیمی و تصفیه نفت مورد استفاده قرار می گیرد. آزمونهای مربوط به تغییرات ویسکوزیته نفت حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم را نیز در دمای ۹۵ درجه انجام داده و نمودار مربوط به آن در شکل ۴-۷ آورده شده که به خوبی روند این تغییرات را نشان می دهد.

جدول ۴-۴- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی های مختلف نانوذره اکسید آلومینیوم

در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

ویسکوزیته (سانتی پواز)	درصد نانو (درصد وزنی)
۱۱/۰۴۳۵	۰
۱۰/۸۱۷۳	۰/۰۱
۹/۵۱۴۳	۰/۰۳
۸/۰۰۳۳	۰/۰۵
۱۰/۰۱۲۵	۰/۰۸
۱۱/۰۱۲۷	۰/۱



شکل ۴-۷- تغییرات ویسکوزیته بر اساس ذرات نانو اکسید آلومینیوم در دمای ۹۵

درجه سانتیگراد.

با توجه به نمودار شکل ۴-۷ مشاهده می شود که نمودار تغییرات ویسکوزیته نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم نیز در یک نقطه خاص دارای کاهش ویسکوزیته بوده اند و پس از آن روند افزایش خواهد شد. نقطه مینیمم نمودار نانو اکسید آلومینیوم در ۰/۰۵ درصد وزنی رخ داده و بیشترین کاهش ویسکوزیته در این نقطه نشان داده است.

۴-۳-۴- تأثیر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین

یکی از اکسیدهای معدنی که در سال های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، دی اکسید تیتانیوم می باشد. این ماده در صنایع نفت و گاز کاربردهای فراوان دارد و ذرات کوچک نانومتری آن به دلیل داشتن خواص فوق العاده و منحصر به فرد (مانند خواص الکتریکی، نوری و فوتوکاتالیستی)، موارد استفاده بسیاری پیدا کرده است.

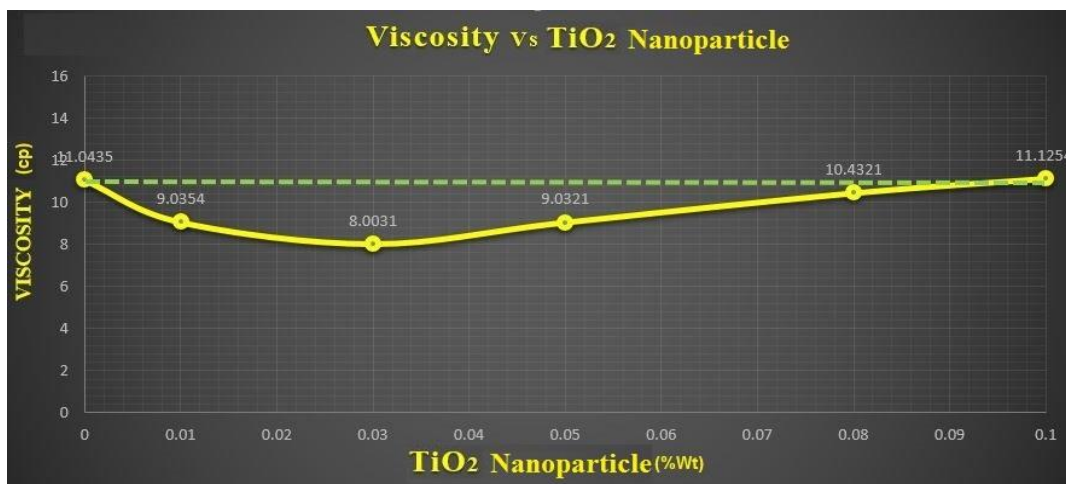
با افزودن نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم به نفت، همانند دیگر نانو ذرات تغییراتی در ویسکوزیته ایجاد کرده ولی با این تفاوت که میزان این تغییرات متفاوت بوده و همان طور که از نمودار رسم شده (شکل ۴-۸)، می توان به خوبی دید که در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد حجمی باعث کاهش ویسکوزیته

به مقدار قابل توجهی شده و همچنین نقطه مینیمم و در واقع بیشترین کاهش ویسکوزیته در نقطه ۰/۰۳ درصد حجمی رخ داده است.

جدول ۴-۵- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی های مختلف نانوذره دی اکسید تیتانیوم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

ویسکوزیته (سانتی پواز)	درصد نانو (درصد وزنی)
۱۱/۰۴۳۵	۰
۹/۰۳۵۴	۰/۰۱
۸/۰۰۳۱	۰/۰۳
۹/۰۳۲۱	۰/۰۵
۱۰/۴۳۲۱	۰/۰۸
۱۱/۱۲۵۴	۰/۱

داده های جدول ۴-۵ میزان تغییرات ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین را بر اساس درصد نانو درات افزوده شده نمایش می دهد و در ادامه در شکل ۴-۵ نیز به وضوح این تغییرات قابل مشاهده است.



شکل ۴-۸- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

۴-۳-۵- تأثیر نانو ذرات اکسید کبالت (Co_2O_3) بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب

آسفالتین

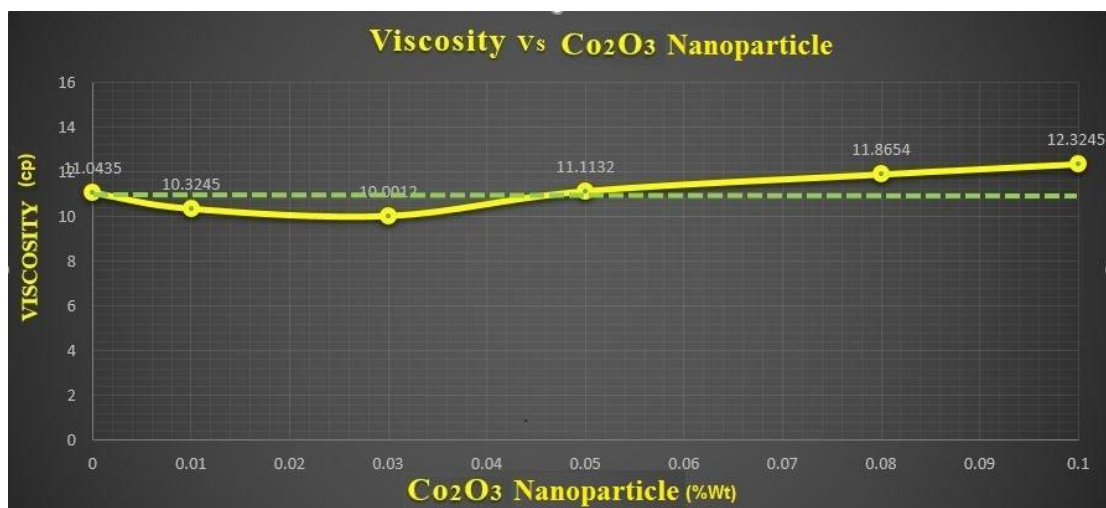
برای بررسی بیشتر و گسترده‌تر سایر نانو ذرات در کاهش ویسکوزیته نفت، از نانو ذرات کبالت نیز استفاده شده است که این نانو ذرات نیز عملکرد خاص خود را نشان داده‌اند. داده‌های مربوط به آزمایش‌ها در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۶- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی‌های مختلف نانوذره اکسید کبالت در

دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

ویسکوزیته (سانتی پواز)	درصد نانو (درصد وزنی)
۱۱/۰۴۳۵	۰
۱۰/۳۲۴۵	۰/۰۱
۱۰/۰۰۱۲	۰/۰۳
۱۱/۱۱۳۲	۰/۰۵
۱۱/۸۶۵۴	۰/۰۸
۱۲/۳۲۴۵	۰/۱

داده‌های جدول ۴-۶ میزان تغییرات ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین را بر اساس درصد نانو ذرات اکسید کبالت افزوده شده به خوبی نمایش می‌دهد و در ادامه در شکل ۴-۹ نیز به وضوح این تغییرات قابل مشاهده است. همان‌طور که شکل ۴-۹ نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود میزان ویسکوزیته در نقطه ۰/۰۳ در صد وزنی نانوذره، کاهش کمی از ویسکوزیته را مشاهده می‌کنیم و بقیه در صدهای افزوده شده عملکرد بدتری داشته و نقطه ۰/۰۳ در صد وزنی نانو اکسید کبالت، نقطه مینیمم برای این نوع نانوذره به حساب می‌آید.



شکل ۴-۹- تغییرات ویسکوزیته بر اساس نانو ذرات اکسید کبالت در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

۴-۳-۶- تأثیر نانو ذرات اکسید کبالت (Co₃O₄) بر ویسکوزیته نفت مستعد رسوب

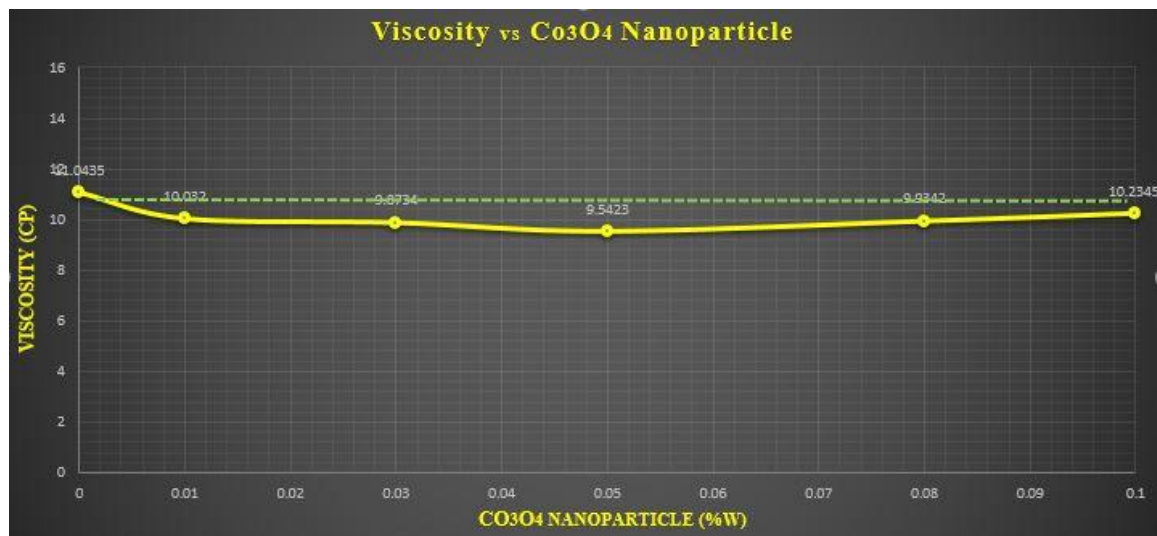
آسفالتین

علاوه بر آزمایش نانو ذرات کبالت ۳ ظرفیتی، جهت قیاس، نانو ذرات کبالت ۴ ظرفیتی را نیز مورد آزمایش انجام داده و نتایج و تأثیرات ناشی از آن در کاهش ویسکوزیته نفت در جدول زیر آمده است.

جدول ۴-۷- تغییرات ویسکوزیته نفت بر اساس درصد وزنی های مختلف نانوذره اکسید کبالت در

دمای ۹۵ درجه سانتیگراد.

ویسکوزیته (سانتی پواز)	درصد نانو (درصد وزنی)
۱۱/۰۴۳۵	۰
۱۰/۰۳۲	۰/۰۱
۹/۸۷۳۴	۰/۰۳
۹/۵۴۲۳	۰/۰۵
۱۹/۹۳۴۲	۰/۰۸
۱۰/۲۳۳۳	۰/۱

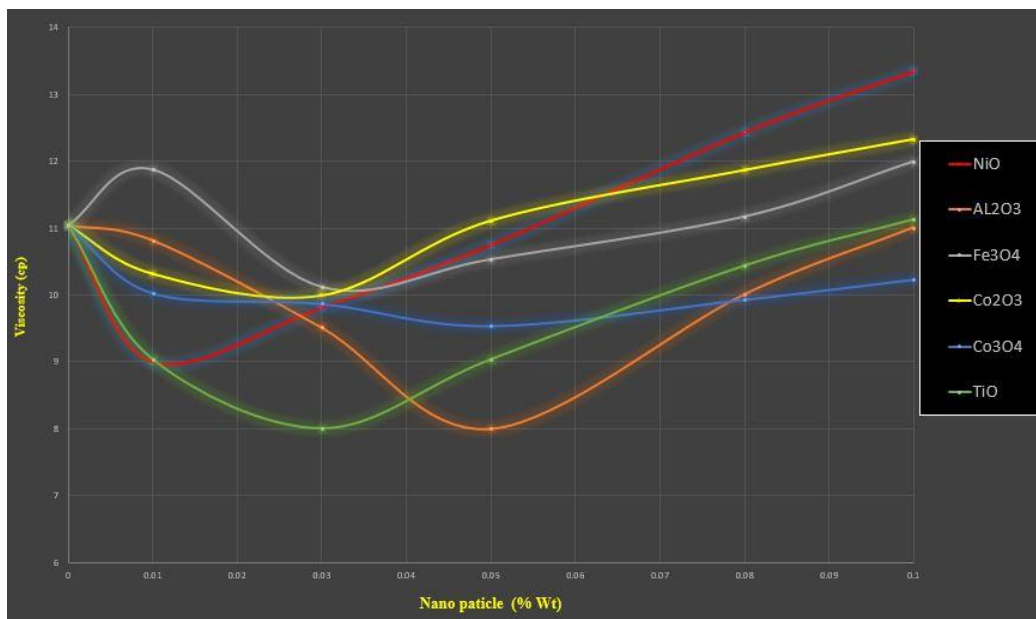


شکل ۴-۱۰- تغییرات ویسکوزیته بر اساس ذرات اکسید کبالت در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد. از شکل ۴-۱۰ مشخص است که ذرات ۴ ظرفیتی کبالت نیز در جهت کاهش ویسکوزیته، عملکرد چندان خوبی از خود نشان نداده‌اند ولی باین حال می‌توان نقطه مینیمم نمودار کاهش ویسکوزیته را در ۰/۰۵ درصد وزنی تعیین نمود، این درحالی‌که است که سایر درصدهای مورد آزمایش نیز همگی کاهش ویسکوزیته را نشان داده‌اند ولی میزان این کاهش چشمگیر نبوده است.

۴-۳-۷- مقایسه کلی ذرات در مبحث کاهش ویسکوزیته نفت مستعد رسوب

آسفالتین

در شکل ۴-۱۱ برای مقایسه بهتر تأثیر ذرات در جهت کاهش ویسکوزیته، نمودارهای مربوط به کاهش ویسکوزیته در یک نمودار آورده شده است. همان‌طور که شکل ۴-۱۱ نشان می‌دهد، محلول‌های حاوی همه‌ی ذرات با افزایش میزان نانوذره موجود در محلول، به یک نقطه بهینه (کمترین میزان ویسکوزیته نسبت به حالت فاقد نانوذره) سوق پیدا کرده و سپس روند افزایشی با شیب تند را به خود می‌گیرند. نقطه بهینه‌ای که در آن نقطه میزان کاهش ویسکوزیته بیشترین مقدار می‌باشد، برای هر نانوذره غلظت متفاوتی می‌باشد.



شکل ۴-۱۱- تغییرات ویسکوزیته نفت مستعد رسوب آسفالتین بر اساس درصد وزنی نانو ذرات مختلف افزوده شده.

این عملکرد متفاوت و به دلیل جرم مولکولی و نسبت سطح به حجم متفاوت نانو ذرات می باشد.

جدول ۴-۸- مقادیر کمترین ویسکوزیته و همچنین درصد بهینه برای هر نانوذره.

ردیف	نانوذره	درصد وزنی بهینه	درصد کاهش ویسکوزیته
۱	TiO ₂	۰/۰۳	٪ ۲۷/۵۳
۲	Al ₂ O ₃	۰/۰۵	٪ ۲۷/۵
۳	NiO	۰/۰۱	٪ ۱۸/۵
۴	Co ₃ O ₄	۰/۰۵	٪ ۱۳/۶
۵	Co ₂ O ₃	۰/۰۳	٪ ۹/۴
۶	Fe ₃ O ₄	۰/۰۳	٪ ۸/۴

با افزایش جرم مولکولی نانو ذرات، افزایش ویسکوزیته به دلیل اضافه شدن جسم جامد به نمونه

سیال وجود خواهد داشت. از طرفی دیگر با افزایش نسبت سطح به حجم نانو ذرات، میزان جذب ذرات

آسفالتین توسط نانو ذرات افزایش یافته و ویسکوزیته نمونه نفت خام نیز با کاهش مواجه می شود. از

طرفی دیگر نانو ذرات علاوه بر ویژگی جذب سطحی، قادر خواهند بود با استفاده از فرآیند کرکینگ

مولکول‌های آسفالتین را شکسته و بالطبع ویسکوزیته سیال را کاهش دهند. به همین دلیل هر نانوذره با توجه به خصوصیات سطحی و شیمیایی خود در غلظتی مشخص کمترین ویسکوزیته را ایجاد می‌کنند. جدول ۴-۸ میزان غلظت بهینه برای هر یک از ۶ نانوذره مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

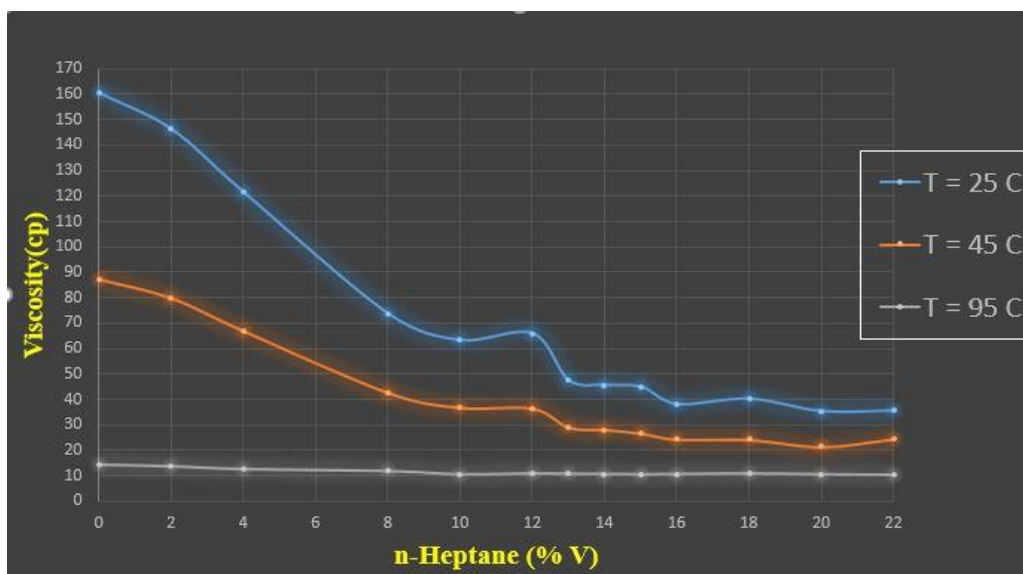
۴-۴- تأثیر نانو ذرات بر نقطه شروع رسوب آسفالتین در نفت خام مستعد

رسوب آسفالتین

پس از محاسبات و آزمایش‌ها مربوط به تغییرات در ویسکوزیته نمونه نفت ناشی از افزودن نانو ذرات، حال با افزودن نانو ذرات به نمونه نفت مورد آزمایش، تغییرات نقطه شروع رسوب آسفالتین بررسی می‌شود. برای هر ۶ نوع نانوذره که در آزمایش‌ها ویسکوزیته مورد استفاده قرار گرفته شده، آزمایش‌ها مربوط به تعیین نقطه شروع رسوب نیز انجام شده تا عملکرد هر نانو ذرات چه از جهت کاهش ویسکوزیته، چه از جهت کاهش رسوب آسفالتین به خوبی نمایان شود.

۴-۴-۱- نقطه شروع رسوب آسفالتین برای نمونه نفتی بدون نانوذره در دماهای مختلف

ابتدا نمودارهای مربوط به رسوب آسفالتین با افزودن نرمال هپتان، در دماهای ۲۵، ۴۵، و ۹۰ درجه سانتیگراد مورد محاسبه قرار گرفته که نتایج در شکل ۴-۱۲ قابل مشاهده می‌باشد. ب-ا اضافه -ه کردن تدریجی نرمال هپتان به نمونه و اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیک، شکل ۴-۱۲ در دماهای مختلف ۲۵، ۴۵ و ۹۵ درجه سانتیگراد حاصل می‌شود. مطابق این شکل، در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، نقطه‌ی ۱۰ درصد حجمی به عنوان نقطه نرمال هپتان یا شروع رسوب ثبت شده است.



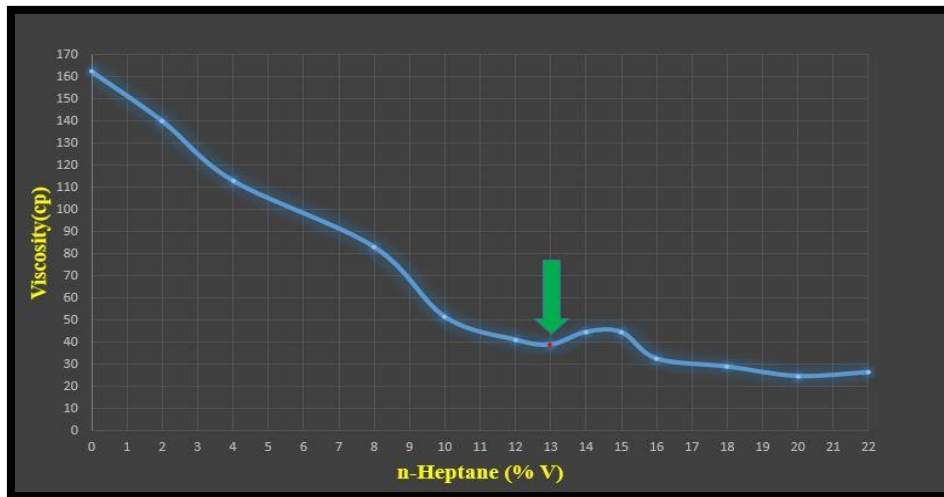
شکل ۴-۱۲ - نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی در دماهای ۲۵، ۴۵ و ۹۵ درجه سانتیگراد.

از این نقطه به بعد، افزایش تشکیل ذرات معلق در نمونه مشاهده شده است و با افزایش نرمال هپتان بیشتر به نمونه، مقدار رسوب آسفالتین پس از نقطه ته نشینی به سرعت افزایش می‌یابد و میزان ذرات معلق موجود در نمونه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با افزایش غلظت نرمال هپتان، قطر ذرات افزایش یافته و اثرات هیدرودینامیک نیز اهمیت پیدا می‌کند و تنش‌های برشی دستگاه ویسکومتر در طول اندازه‌گیری ویسکوزیته، سبب تجزیه لخته‌های با قطر بزرگ می‌شود. این موضوع رفتار نامنظم ویسکوزیته بعد از نقطه شروع رسوب را توجیه می‌نماید. با توجه به شکل ۴-۱۲ نمودارهای نقطه شروع رسوب آسفالتین در دماهای مختلف تقریباً یک مقدار، ۱۰ درصد حجمی نرمال هپتان را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان این استنباط را نمود که انحلال-پذیری آسفالتین در نمونه نفت تغییر زیادی نکرده و نقطه شروع رسوب با تغییر دما، تغییر نخواهد کرد.

۴-۲-۴- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید آهن

پس از به دست آوردن نقطه شروع رسوب آسفالتین نفت بدون هیچ‌گونه افزودنی (فاقد نانوذره) نوبت به بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین نمونه نفت حاوی نانو ذرات اکسید آهن می‌رسد که با

افزودن مقدار ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آهن به نمونه نفتی و سپس اضافه نمودن درصدی حجمی مختلف از نرمال هپتان به عنوان یک رسوب‌دهنده آسفالتین، نقاط شروع رسوب آسفالتین به دست آمده است.



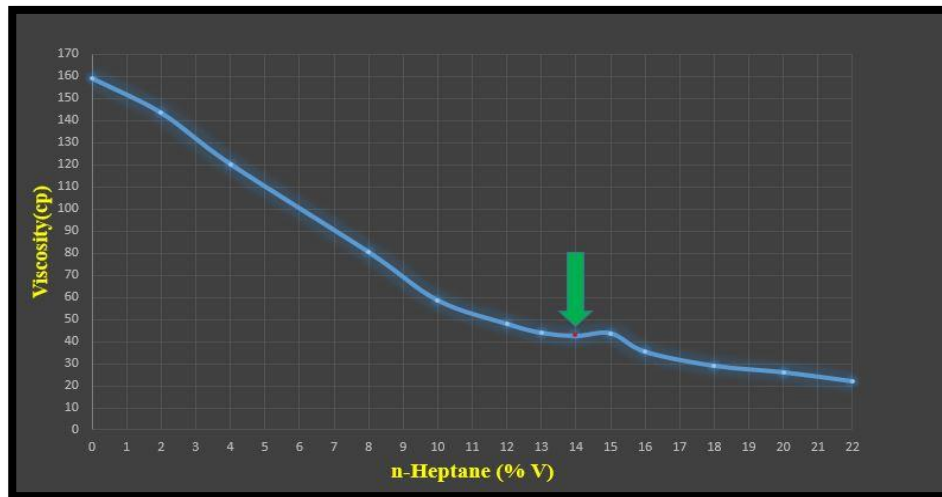
شکل ۴-۱۳- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفت حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آهن در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

در نمودار آورده شده در شکل ۴-۱۳ به خوبی مشاهده می شود که با افزودن نانو ذرات اکسید آهن به نفت مستعد رسوب آسفالتین، نقطه شروع رسوب تغییر کرده و از ۱۰ درصد حجمی نرمال هپتان به ۱۳ درصد حجمی نرمال هپتان افزایش پیدا کرده و این خود نشان از جذب سطحی بالای نانو ذرات اکسید آهن دارد. نانو ذرات با جذب مولکول‌های آسفالتین بر سطح خود مانع از رسوب آسفالتین می شوند. به عبارتی دیگر نقطه شروع رسوب آسفالتین را به تأخیر می اندازد. بنابراین برای شروع فرآیند عدم تعادلی و رسوب آسفالتین نیاز به میزان بیشتری رسوب‌دهنده آلی (نرمال هپتان) دارد.

۴-۳- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید نیکل

برای مشخص شدن تأثیرات نانو ذرات اکسید نیکل علاوه بر آزمون‌های ویسکوزیته، آزمون‌های نقطه شروع رسوب نیز انجام و بررسی شده است. برای این نوع از نانو ذرات نیز در ۰/۰۱ درصد وزنی

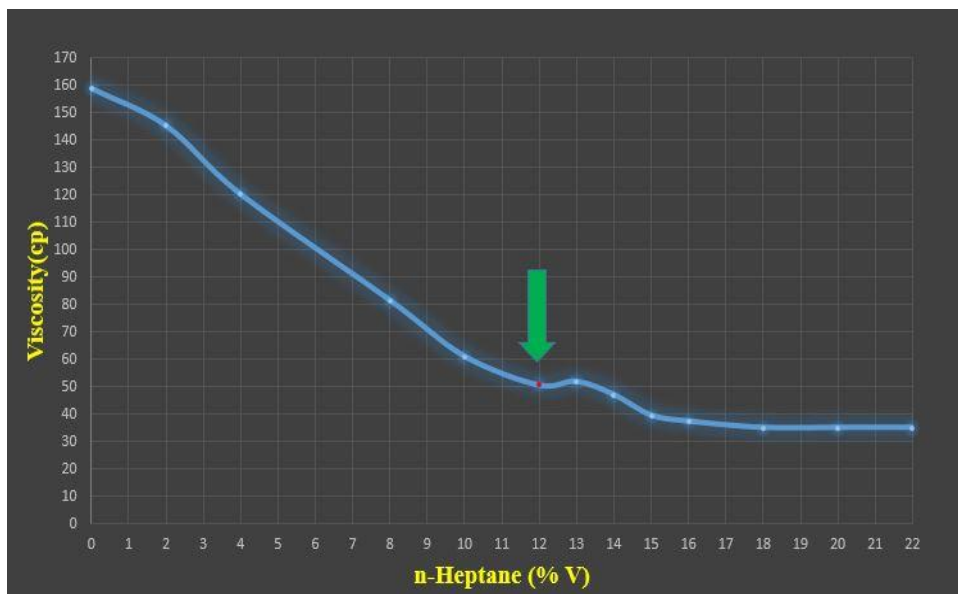
آزمایش‌ها مربوط به نقطه شروع رسوب آسفالتین انجام شده و با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، نمودار شکل ۴-۱۴ رسم می‌گردد.



شکل ۴-۱۴- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید نیکل در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

مطابق شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود که در ۱۴ درصد حجمی نرمال هپتان، آسفالتین‌ها شروع به همگرایی کرده و لخته‌های معلق آسفالتین در نفت به سمت هم کشیده می‌شوند و ویسکوزیته نفت بعد از این نقطه دارای یک پیک افزایشی خواهد بود و پس از آن به دلیل افزایش درصد نرمال هپتان همچنان روند کاهشی مشاهده می‌شود.

۴-۴-۴- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم
 آزمایش‌ها مربوط به نقطه شروع آسفالتین را برای نانو ذرات اکسید آلومینیوم نیز انجام داده و نمودار نشأت گرفته از نتایج آن در شکل ۴-۱۵ آورده شده است.



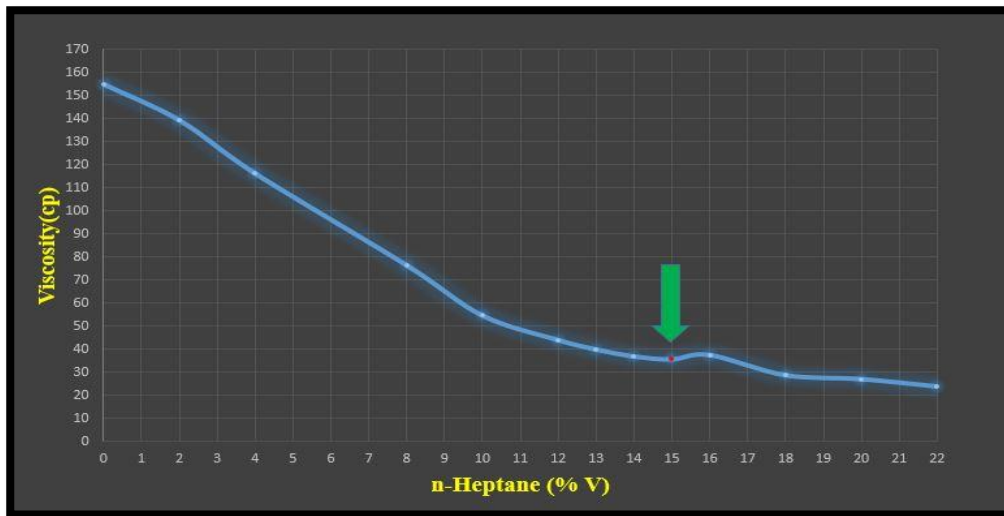
شکل ۴-۱۵- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱

درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

همان طور که از نمودار شکل ۴-۱۵ پیداست نقطه شروع رسوب آسفالتین ۱۲ درصد حجمی نرمال هپتان می باشد که طبق انتظار بعد از این نقطه یک افزایش ویسکوزیته مشاهده می شود و سپس نمودار دوباره به حالت نزولی درمی آید اما قابل ذکر است که شیب نمودار معمولاً در قبل و بعد از نقطه شروع رسوب باهم متفاوت بوده و بعد از این نقطه تشکیل لخته های آسفالتین و همگرایی آن ها به هم در برابر کاهش ویسکوزیته ناشی از افزودن نرمال هپتان، مقاومت کرده و این دو عامل در جهت مخالف هم اقدام می کنند و در عین حال که نمودار نزولی می باشد، شیب آن به مقدار قابل توجهی کمتر می شود.

۴-۴-۵- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم

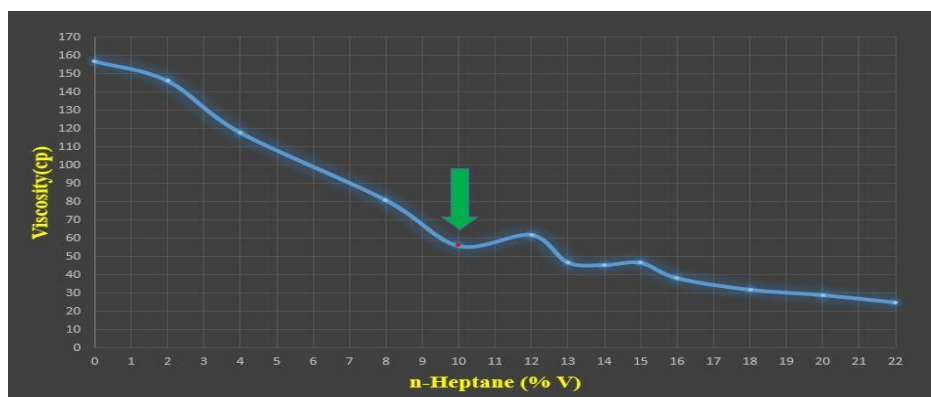
برای نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم نیز آزمایش ها مشابه با نانو ذرات دیگر نیز انجام می شود و نتایج تغییرات در نقطه شروع رسوب آسفالتین در ادامه آورده شده است. با توجه به نمودار بالا مشاهده می شود که نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم عملکرد قابل توجهی را از خود نشان داده اند و نقطه شروع رسوب آسفالتین را به ۱۵ درصد حجمی نرمال هپتان افزایش داده اند و همانند سایر نمودارهای مورد بحث پیک افزایشی وجود داشته، که پس از آن نمودار با شیب کمتر دوباره به حالت نزولی خود برگشته است (شکل ۴-۱۶).



شکل ۴-۱۶- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

۴-۴-۶- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید کبالت (C₀₃O₄)

با توجه به آزمایش‌ها و روند آن‌ها، نانو ذرات اکسید کبالت ۴ ظرفیتی نیز مورد آزمون برای تعیین نقطه شروع رسوب قرار می‌گیرد و در نمودار رسم شده (شکل ۴-۱۷) بر طبق داده‌های جدول می‌توان نقطه شروع رسوب را به‌خوبی دید.



شکل ۴-۱۷- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید کبالت (C₀₃O₄) در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

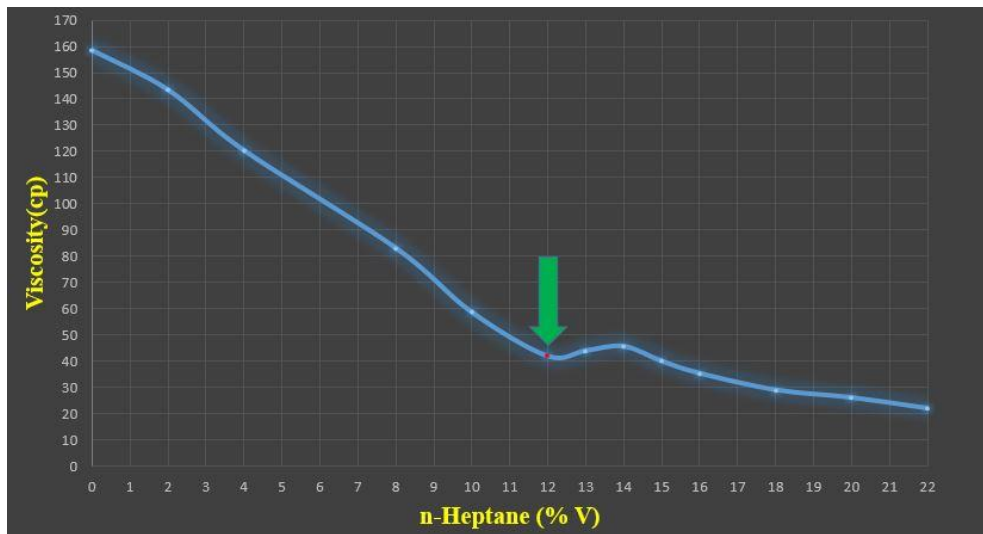
با توجه به شکل ۴-۱۷ تغییرات ویسکوزیته برحسب درصد نرمال هپتان افزوده شده که در واقع نمودار نقطه شروع رسوب آسفالتین به حساب می‌آید. قابل مشاهده است که نقطه شروع رسوب برای نانو ذرات اکسید کبالت ۴ ظرفیتی در ۱۰ درصد حجمی نرمال هپتان رخ می‌دهد و همچنین پس‌از آن نیز نو ساناتی در مقدار ویسکوزیته نیز نمایان است که مربوط به همگرایی و لخته شدن مولکول‌های آسفالتین می‌باشد.

۴-۷- بررسی نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید

کبالت ($C_{2}O_{3}$)

برای نانو ذرات اکسید کبالت ۳ ظرفیتی نیز ما آزمایش‌ها را انجام داده تا اثرات نانو ذرات کبالت

نیز واضح و آشکار شود.



شکل ۴-۱۸- نمودار حاصل از آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفتی حاوی ۰/۰۱

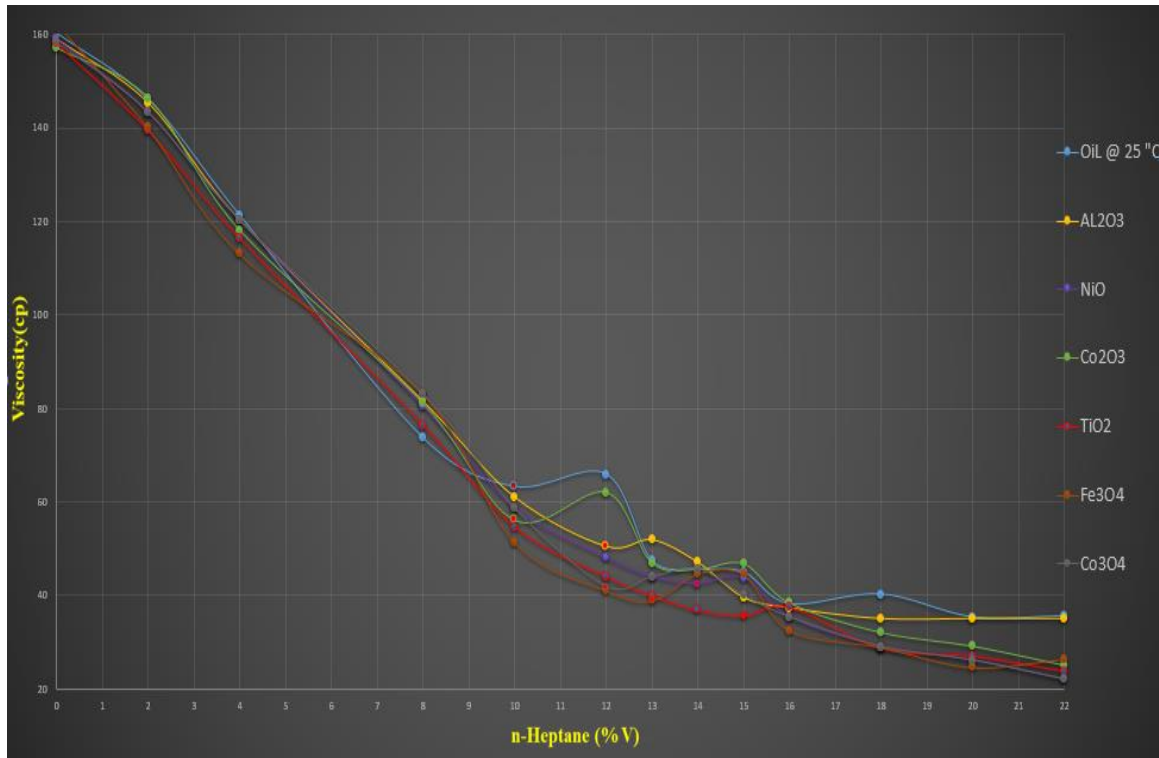
درصد وزنی نانو ذرات اکسید کبالت ($C_{2}O_{3}$) در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

با توجه به شکل ۴-۱۸، به وضوح مشخص است که نقطه شروع رسوب آسفالتین برای نمونه نفتی حاوی نانو ذرات اکسید کبالت ۳ ظرفیتی در ۱۲ درصد حجمی رخ داده و پس‌از آن تا ۱۴ درصد حجمی نرمال هپتان افزایش ویسکوزیته مشاهده می‌شود، که پس‌از آن روند نزولی با شیب کم ادامه می‌یابد.

۴-۴-۸- مقایسه کلی همه نمودارهای نقطه شروع رسوب آسفالتین نمونه‌های نفتی

حاوی نانو ذرات

در شکل ۴-۱۹ همه نموداری‌های مربوط به نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه‌های نفتی مورد آزمایش در حضور نانو ذرات آمده و می‌توان با مقایسه آن‌ها باهم نتایج ارزشمندی را کسب کرد.



شکل ۴-۱۹- نمودار کلی آزمایش نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه‌های نفتی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات در دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد.

همان‌طور که شکل ۴-۱۹ نشان می‌دهد، با اضافه نمودن نانوذره به محلول‌های نفت خام قدرت مقاومت سیال مورد آزمایش در برابر رسوب آسفالتین افزایش می‌یابد. در تمامی آزمایش‌ها هپتان به‌عنوان ناپایدار کننده آسفالتین به نمونه نفت خام مورد آزمایش اضافه شده است. حال در محلول‌هایی که ۰/۰۱ درصد وزنی نانو ذرات مختلف می‌باشد، میزان حجم نرمال هپتان مورد نیاز جهت شروع نقطه رسوب گذاری آسفالتین بیشتر می‌باشد. بنابراین نانو ذرات در جهت کاهش رسوب آسفالتین عمل می‌کنند. نانو ذرات با جذب سطحی آسفالتین بر سطح خود باعث می‌شوند که ذرات آسفالتین به دور

یکدیگر تجمع پیدا نکنند و در نتیجه میزان رسوب آن‌ها نیز کاهش یابد. قدرت جذب نانو ذرات با یکدیگر متفاوت می‌باشد. بعضی از نانو ذرات قدرت جذب بالاتری داشته و میزان بیشتری نرمال هپتان جهت شروع فرایند رسوب‌گذاری نیاز دارند. بعضی از نانو ذرات نیز هم قدرت جذب کمتری داشته و در نقطه شروع رسوب آسفالتین تغییرات زیادی را به وجود نمی‌آوردند و با توجه به نمودار شکل ۴-۱۹ قدرت جذب نانو ذرات و تأثیرگذاری بر نقطه شروع رسوب آسفالتین، به ترتیب در جدول ۴-۹ آورده شده است.

جدول ۴-۹- میزان افزایش درصد حجمی نرمال هپتان موردنیاز برای رسیدن به نقطه شروع رسوب

توسط هر نانو ذره

افزایش درصد حجمی نرمال هپتان برای شروع رسوب	نانو ذره	ردیف
۵٪	TiO ₂	۱
۴٪	NiO	۲
۳٪	Fe ₃ O ₄	۳
۲٪	Al ₂ O ₃ =Co ₂ O ₃	۴
۰٪	Co ₃ O ₄	۵

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

• بومی سازی قطعات و تجهیزات مورد نیاز در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و دیگر صنایع وابسته به صنعت انرژی موضوعی است که سال‌ها از طرح آن می‌گذرد و امروزه با ورود به تحریم‌های گوناگون، به خصوص تحریم‌های حوزه انرژی، اهمیت ساخت و بومی کردن تجهیزات صنایع نفت و گاز، بیش از پیش برای ما ضرورت پیدا می‌کند.

• نتایج آزمایش‌ها به خوبی نشان داد که هر نانوذره با توجه به ویژگی‌های خاص خودش عملکرد متفاوتی نشان می‌دهد و این متفاوت بودن عملکرد بین نانو ذرات در صورت تغییر دادن پارامتر مورد بررسی، خود را دوباره نشان می‌دهد و نمی‌شود بیان کرد که یک نوع نانوذره در همه پارامترهای مورد اندازه‌گیری بهترین عملکرد را داشته است، بلکه هر نانوذره در مبحث خاصی بهترین عملکرد را دارد و شاید باید با توجه به بررسی شرایط و موقعیت مخزن، ببینیم بهبود کدام پارامترها در اولویت کار ما هستند.

• همچنین از نتایج آزمایش‌ها واضح و آشکار است که بین مقدار اضافه کردن نانو ذرات و میزان کاهش ویسکوزیته رابطه مستقیمی برقرار نیست و با افزودن نانو ذرات به نفت آسفالتین‌دار برای کاهش ویسکوزیته، تا یک درصد وزنی خاصی از نانوذره، ویسکوزیته نفت کاهش می‌یابد و در واقع این مقدار بهینه برای هر نانوذره است که در آن نقطه بیشترین میزان کاهش ویسکوزیته را مشاهده می‌کنیم و با افزودن بیشتر یا کمتر از مقدار نقطه بهینه، کاهش ویسکوزیته نفت به مقدار کمتری اتفاق افتاده و لازم به ذکر است که این مقدار بهینه برای همه نانو ذرات یکسان نبوده و برای هر نانوذره مقدار خاص و ویژه‌ای است.

• برای تعیین نقطه شروع رسوب آسفالتین در نمونه نفت مورد آزمایش، طبق روش ویسکومتری باید به نمونه نفت مواد رسوب‌دهنده‌ای مثل نرمال هپتان افزود و با رسم نمودار ویسکوزیته نفت بر حسب میزان درصد حجمی نرمال هپتان افزوده‌شده، نموداری با شیب نزولی به دست می‌آید که در نقطه‌ای خاص ویسکوزیته افزایش پیدا می‌کند که به عنوان نقطه شروع رسوب در نظر گرفته می‌شود.

● با اندازه گیری و رسم نمودار تعیین نقطه شروع رسوب آسفالتین برای نمونه نفت مورد آزمایش در دماهای مختلف، اثبات شد که تغییر دما در انحلال پذیری آسفالتین‌ها در نفت تأثیر نداشته و در نتیجه نقطه شروع رسوب آسفالتین در دماهای بین ۲۵ و ۹۵ درجه سانتیگراد، تغییری نکرده است.

● همچنین از نمودارهای تعیین نقطه شروع رسوب نفت حاوی نانو ذرات به خوبی نمایان و آشکار است که برای این نمودارها نیز مقادیر خاصی راداریم و برای هر نوع از نانوذره، یک مقدار و در واقع در درصد خاصی از نرمال هپتان رسوب رخ می‌دهد و این مقدار برای هر نانوذره مقدار منحصر به فردی را دارد.

● خاصیت کاتالیستی نانو ذرات این چنین تعبیر و مستدل می‌شود که این نانو ذرات طی فعل و انفعالات کاتالیزوری، پیوند بین C—S که در همه انواع آسفالتین وجود دارد و کمترین میزان انرژی برای شکستن پیوندش نیاز است، را شکسته و باعث می‌شود مولکول‌های آسفالتین دچار تجزیه شده و ویسکوزیته نفت را کاهش می‌دهد.

● طبق آزمایش‌ها مشخص شد که نانو ذرات اکسید آهن در مقابل سایر نانو ذرات، کاهش کمتری در میزان ویسکوزیته ایجاد کرده و خاصیت کاتالیستی متوسطی داشته است ولی در مقابل در به تأخیر انداختن نقطه شروع رسوب، عملکرد خوبی داشته و این نشان از خاصیت جذب سطحی بالای آن دارد که با چسبیدن به مولکول‌های آسفالتین، عملکردی شبیه رزین داشته و از به هم پیوستگی مولکول‌های آسفالتین و در نتیجه رسوب آن‌ها جلوگیری می‌کند.

● با بررسی نتایج به خوبی مشخص است که نانو ذرات نیکل در کاهش ویسکوزیته یکی از بهترین عملکردها را داشته و این نشان از خاصیت کاتالیستی بالای این نانوذره و همچنین با به تأخیر انداختن نقطه شروع رسوب آسفالتین، خاصیت جذب سطحی خوبی نیز نشان داده است.

● نانو ذرات اکسید آلومینیوم تقریباً بیشترین میزان کاهش ویسکوزیته را به همراه داشته‌اند، اما در تغییر نقطه شروع رسوب نسبت به سایر نانو ذرات عملکرد بدی داشته‌اند.

- همچنین نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به همراه نانو ذرات اکسید آلومینیوم بهترین عملکرد را برای کاهش ویسکوزیته از خود نشان دادند که در مبحث به تأخیر انداختن نقطه شروع رسوب، بازهم نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بهترین عملکرد را در جذب مولکول‌های آسفالتین به خود داشته و بیشتر از سایر نانو ذرات نقطه شروع رسوب را به تأخیر انداخت.
- با مقایسه و بررسی نمودارهای مربوط به نانو ذرات اکسید کبالت به خوبی مشخص است که در مبحث کاهش ویسکوزیته نفت نانو ذرات $C_0_3O_4$ عملکرد بهتری داشته‌اند و در به تأخیر انداختن نقطه شروع رسوب، $C_0_2O_3$ عملکرد بهتری داشته‌اند.
- نوسانات بعد از نقطه شروع رسوب در نمودار ویسکوزیته، ناشی از تنش‌های برشی بین گوی و لخته‌های آسفالتین می‌باشد که باعث برهم خوردن این لخته‌ها و تشکیل دوباره آن‌ها می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادها

- با توجه به شرایط مخزن و بسیاری از عوامل که همواره پیش‌بینی نمی‌شوند، اگر وقت کافی باشد تا آزمون‌ها در دما و فشار بالا (دما و فشار مخزن) زده شوند، اطمینان از جواب دادن آزمون‌ها بیشتر می‌شود.
- همچنین با دانستن این موضوع که نانو ذرات مختلف ویژگی‌های خاص خود را دارند و اصلاً هم قابل پیش‌بینی نیستند، می‌توان با آزمون نانوذره بیشتر؛ نانو ذراتی با کارایی بهتر را پیدا کرد.
- از آنجایی که یکی از روش‌های جلوگیری از رسوب آسفالتین، تزریق حلال می‌باشد و برای این مباحث نقطه جذب مؤثر حلال تعریف می‌شود، پس می‌توان با وارد کردن نانو ذرات به بررسی تغییرات نقطه جذب مؤثر پرداخت.
- یکی دیگر از پارامترهای مؤثر و تأثیرگذار میزان آسفالتین موجود در نفت می‌باشد، شاید با آزمون نفت‌های مختلف با درصد مختلف آسفالتین بتوان به نتایج ارزشمندی دست یافت.

● همچنین با آزمایش سایر پارامترهای مربوط به نفت شاید بتوان حوزه تأثیرگذاری نانو ذرات بر ویژگی‌های مختلف نفت را بهتر مشخص کرد که برای این کار می‌توان تأثیر این نانو ذرات را علاوه بر رسوب آسفالتین و کاهش ویسکوزیته، کشش سطحی، تغییرات ترشوندگی و ... نیز مورد بررسی قرارداد.

● با توجه به همه آنچه از اهمیت ساخت دستگاه و پیشرفت در حوزه‌ی دستگاه‌های آزمایشگاهی گفته شد، هنوز هم جا برای کار روی این مهم بسیار زیاد است و چه دستگاه‌های بسیار ارزشمندی که فقط در حوزه تسلط کشورهای بیگانه بوده و وارد کردن آن‌ها به کشور ارز بسیار هنگفتی را از کشور خارج می‌کند.

منابع

- 1- Hedrick, B., K. Seibert, and C. Crewe, 2006 A new approach to heavy oil and bitumen upgrading. UOP LLC, Meta Petroleum.
- 2- Leontaritis, K.J. and G.A. Mansoori, 1988 Asphaltene deposition: a survey of field experiences and research approaches. Journal of petroleum science and engineering. 1(3): p. 229-239
- ۳- شادمان, م؛ محسن وفایی سفتی و مهرداد سلیمانی، ۱۳۹۳، بررسی روش‌های تعیین نقطه آغاز پدیده رسوب آسفالتین از نفت خام, در سومین همایش علمی مهندسی فرآیند (نفت، گاز پالایش و پتروشیمی). تهران.
- 4- Leontaritis, K. and G. Mansoori. 1987 Asphaltene flocculation during oil production and processing: A thermodynamic colloidal model. in SPE International Symposium on Oilfield Chemistry.. Society of Petroleum Engineers.
- 5- Mansoori, G., T. Jiang, and S. Kawanaka, 1988 Asphaltene deposition and its role in petroleum production and processing. Arab. J. Sci. Eng., 13(1): p. 17.
- 6- Oballa, V. and R. Butler, 1989, An experimental study of diffusion in the bitumen-toluene system. Journal of Canadian Petroleum Technology. 28(02).
- ۷- جوادی, ع. ۱۳۹۰, تأثیر برنامه تولید بر مخروطی شدن آب درچاه یا آبرسانی عمقی در مخازن در نهمین همایش نفت و گاز و پتروشیمی, تهران.
- 8- Hirschberg, A., et al. 2000, Influence of temperature and pressure on asphaltene flocculation. Society of Petroleum Engineers Journal, 1:(03)24.984 p. 283-293.
- 9- Mansoori, G.A. 2009, A unified perspective on the phase behaviour of petroleum fluids. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2(2): p. 141-167.
- 10- Wang, S. and F. Civan. 2001, Productivity decline of vertical and horizontal wells by asphaltene deposition in petroleum reservoirs. in SPE international symposium on oilfield chemistry. Society of Petroleum Engineers.
- 11- Kokal, S.L. and S.G. Sayegh. 1995, Asphaltenes: The cholesterol of petroleum. in Middle East Oil Show.. Society of Petroleum Engineers.
- 12- Mansoori, G.A. 2005, Nanoscale structures of asphaltene molecule, asphaltene steric-colloid and asphaltene micelles & vesicles. Extract from Principles of Nanotechnology: p. 1-6.

۱۳- عدالت، م. ۱۳۸۳، توسعه ترمودینامیکی جهت تعیین میزان رسوب آسفالتین، در نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

- 14- Bridjanian, H. and A.K. Samimi, 2011, Bottom of the barrel, an important challenge of the petroleum refining industry. *Petrol. Coal.* 53: p. 13-21.
- 15- Long, R., J. Bungler, and N. Li, 1981, Chemistry of asphaltenes. *Advances in Chemistry Series.* 195: p. 17-27.
- 16- Nobakht, M., S. Moghadam, and Y. Gu, 2008, Mutual interactions between crude oil and CO₂ under different pressures. *Fluid phase equilibria.* 265(1): p. 94-103.
- 17- Escrochi, M., N. Mehranbod, and S. Ayatollahi, 2013, The gas-oil interfacial behavior during gas injection into an asphaltenic oil reservoir. *Journal of Chemical & Engineering Data.* 58(9): p. 2513-2526.
- 18- Andersen, S.I. 1995, Effect of precipitation temperature on the composition of n-heptane asphaltenes part 2. *Fuel science & technology international.* 13(5): p. 579-604.
- 19- Ashoori, S. 2005, Mechanisms of asphaltene deposition in porous media, University of Surrey.
- 20- Mansoori, G.A. 1997, Modeling of asphaltene and other heavy organic depositions. *Journal of petroleum science and engineering.* 17(1): p. 101-111.
- 21- Galoppini, M. 1994, Asphaltene deposition monitoring and removal treatments: an experience in ultra deep wells. in *European Production Operations Conference and Exhibition.* Society of Petroleum Engineers.
- 22- Karan, K., et al. 2000, Evaluation of asphaltene instability and a chemical control during production of live oils. *Petroleum science and technology,* 20 (3-4)21 :03p. 629-645.
- 23- De Boer, R., et al. 1995, Screening of crude oils for asphalt precipitation: theory, practice, and the selection of inhibitors. *SPE Production & Facilities.* 10(01): p. 55-61.
- 24- Shah, R.D. 2009, Application of nanoparticle saturated injectant gases for EOR of heavy oils. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* Society of Petroleum Engineers.
- 25- Suleimanov, B., F. Ismailov, and E. Veliyev, 2011, Nanofluid for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 78(2): p. 431-437.

- 26- Bicerano, J. 2008, Drilling fluid, drill-in fluid, completion fluid, and workover fluid additive compositions containing thermoset nanocomposite particles; and applications for fluid loss control and wellbore strengthening., Google Patents.
- ۲۷- کریمی، ع. ۱۳۸۹، تزریق نانوسیالات به عنوان شیوه جدید ازدیاد برداشت نفت. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران.
- 28- Jamaloei, B.Y. 2009, Insight into the chemistry of surfactant-based enhanced oil recovery processes. *Recent Patents on Chemical Engineering*. 2(1): p. 1-10.
- 29- Apaleke, A.S., A.A. Al-Majed, and M.E. Hossain. 2012, Drilling fluid: State of the art and future trend. in North Africa Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- 30- Kosynkin, D.V., et al. 2011, Graphene oxide as a high-performance fluid-loss-control additive in water-based drilling fluids. *ACS applied materials & interfaces*. 4(1): p. 222-227.
- 31- Sayyadnejad, M. 2008, H. Ghaffarian, and M. Saeidi, Removal of hydrogen sulfide by zinc oxide nanoparticles in drilling fluid. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 5(4): p. 565-569.
- ۳۲- فرشاد، م. ۱۳۸۸، استفاده از نانو رس در حذف مواد آلی از پسابهای صنعتی و بررسی عوامل مؤثر بر آن، پایان نامه کارشناسی ارشد. واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی.
- 33- Speth, H., et al. 2002, Coalescence of secondary dispersions in fiber beds. *Separation and purification technology*. 29(2): p. 113-119.
- ۳۴- فرمانی، کاظم؛ معصومه شرفی ماسوله و سعید بازگیر. ۱۳۹۰، بررسی تأثیر فیلترهای حاوی نانوالیاف پلیمری در عملکرد جداسازی نفت از آب، همایش کاربرد نانو تکنولوژی در صنایع نفت و پتروشیمی. ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر.
- 35- Singh, S.K., R.M. Ahmed, and F. Growcock. 2010, Vital role of nanopolymers in drilling and stimulations fluid applications. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- 36- Malayeri, M. and R. Matourian, 2012, Asphaltene in Oil Industry. Setayesh, Tehran, Iran.
- 37- Jain, S., et al. 2008, Strong decrease in viscosity of nanoparticle-filled polymer melts through selective adsorption. *Soft Matter*. 4(9): p. 1848-1854.
- 38- Chen, Y., et al. 2009, The viscosity reduction of nano-keggin-K 3 PMo 12 O 40 in catalytic aquathermolysis of heavy oil. *Fuel*. 88(8): p. 1426-1434.

- 39- Nassar, N.N., A. Hassan, and P. Pereira-Almao, 2011, Effect of the particle size on asphaltene adsorption and catalytic oxidation onto alumina particles. *Energy & Fuels*. 25(9): p. 3961-3965.
- 40- Tarboush, B.J.A. and M.M. Husein, 2012, Adsorption of asphaltenes from heavy oil onto in situ prepared NiO nanoparticles. *Journal of colloid and interface science*. 378(1): p. 64-69.
- 41- Haindade, Z.M.W., et al. 2012, Enhancing flow assurance using Co-Ni nanoparticles for dewaxing of production tubing. in *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- 42- Greff, J. and T. Babadagli. 2011, Use of nano-metal particles as catalyst under electromagnetic heating for viscosity reduction of heavy oil. in *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference.
- 43- Hamedi Shokrlu, Y. and T. Babadagli, 2013, In-situ upgrading of heavy oil/bitumen during steam injection by use of metal nanoparticles: A study on in-situ catalysis and catalyst transportation. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 16(03): p. 333-344.
- 44- Haroun, M.R., et al. 2012, Smart nano-EOR process for Abu Dhabi carbonate reservoirs. in *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- 45- Klaus, E., R. Johnson, and G. Fresco, 1966, Development of a precision capillary-type pressure viscometer. *ASLE TRANSACTIONS*. 9(2): p. 113-120.

۴۶- همت اسفه، محمد؛ سیف الله سعدالدین و سید هادی رستمیان، ۱۳۹۳، بررسی تجربی و ارائه مدل جدید به منظور تخمین لزجت دینامیکی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم، در بیست و دومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک. اهواز، انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز.

- 47- Fedorchenko, A.I., I. Stachiv, and W.-C. Wang, 2013, Method of the viscosity measurement by means of the vibrating micro-/nano-mechanical resonators. *Flow Measurement and Instrumentation*. 32: p. 84-89.

۴۸- مهرکش، امیر حسین؛ تورج توکلی و محمد صادق حاتمی پور، ۱۳۸۷، برازش یک مدل برای پیش بینی ویسکوزیته سینماتیک برش روان کننده نفت خام بر حسب دما، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران. تبریز، انجمن مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی سهند.

- 49- Bohdanecky, M. 1983, New method for estimating the parameters of the wormlike chain model from the intrinsic viscosity of stiff-chain polymers. *Macromolecules*. 16(9) :p. 1483-1492.
- 50- Fornell, C., Mithas, S., Morgeson III, F.V. and Krishnan, M.S., 2006. Customer satisfaction and stock prices: High returns, low risk. *Journal of marketing*, 70(1), pp.3-14.
- 51- Asomaning, S., 2003. Test methods for determining asphaltene stability in crude oils. *Petroleum Science and technology*, 21(3-4), pp.581-590.

Abstract

The formation of asphaltine precipitate during the production and process of the natural and synthetic hydro-carbons is known as a problem all around the world. Extensive studies has been done by researchers in order to identify the cause of asphaltine precipitation in oil before performing any action for its separation. The reason for this is the change in the thermodynamic conditions like change in crude oil content, temperature and the change in pressure which causes the disruption of thermodynamic balance between viscous organic material like wax and asphaltine resulting in the formation of these materials with different mechanisms and their precipitation by moving through the formation's porous medium or in the tubing inside the production well or surface level facilities which removing them sometimes can be impossible and sometimes with great financial costs. According to what was said above, identification of the problem, flow condition and predicting the formation of these precipitations is very effective in the success of long term production operations and also the flow stability and economical production .

So in the current state of Iran's wells and reservoirs, this is very important and essential that we pay attention to preventing the formation of asphaltine precipitation as well as reducing the viscosity when using enhanced oil recovery on reservoirs containing viscous oil with asphaltine. And it seems that with the addition of nano-particles to these type of oils we can increase the efficiency remarkably.

In this article we will discuss the effect of Nano-particles on viscosity and precipitation starting point of the oil with asphaltine. For performing the required test, we proceeded toward building a rolling viscometer reader which has the capability of performing tests in a pressure of 7000 psi and a temperature of 95 °C.

To compare the effects of different Nano-particles, six Nano-particles including TiO₂, NiO, Fe₃O₄, Co₃O₄, Al₂O₃ and Co₂O₃ were used, to test the reduction of viscosity the wt% of 0.01 – 0.03 – 0.05 – 0.08 – 0.1 were used, and to test of the effect on precipitation Onset point of asphaltine for each Nano-particle the wt% of 0.01 was used.

The results show that each specific type of Nano-particle has a specific performance and in a specific wt% has shown best performance in the reduction of viscosity, which in the viscosity reduction part respectively the Nano-particles of $\text{TiO}_2 > \text{NiO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{Co}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_3\text{O}_4$ had the best performance and induced the most reduction amount. And also in the field of precipitation starting point the Nano-particles of $\text{TiO}_2 > \text{NiO} > \text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{Co}_3\text{O}_4 = \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Co}_2\text{O}_3$ had shown the best performance in delaying the precipitation starting point of asphaltine.

Keywords: asphaltine, nano-particles, viscosity reduction, Onset point



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis petroleum Engineering-Drilling

**Experimental investigation of the impact of nanoparticles on
asphaltene oil viscosity with HPHT Viscometer**

Sayed Hamid Taghavi Nejad

Supervisors:

Dr. Mehrdad Solymani Monfared

Dr. Masoud Riazi

February 2017