

# تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با استفاده از روش پردازش تصویر

پژوهش‌نفت

سال نوزدهم

شماره ۶۰

صفحه ۱۷-۳، ۱۳۸۸

علی ناصری<sup>۱\*</sup>، منوچهر نیک‌آذر<sup>۱</sup>، بهرام دبیر<sup>۱</sup>، سیدعلی موسوی‌دهقانی<sup>۲</sup> و امید گوهری<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

۲- دانشگاه تربیت مدرس

naseria@ripi.ir

اندازه‌گیری نقطه ظهور رسوب آسفالتن در اغلب نفت‌های سبک تا سنگین آسفالتنی را دارد بلکه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قوی در مطالعات سینتیکی رشد ذرات آسفالتنی، حتی در نفت‌های زنده و در شرایط دما و فشار بالای مخزن نیز به‌کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالتن، تجمع، نقطه ظهور، پردازش تصویر

## مقدمه

برهم خوردن تعادل اجزای موجود در ترکیبات نفتی در اثر عوامل متعدد محیطی و عملیاتی، مشکلات و مسائل فراوانی را دربرخواهد داشت [۱]. از مهم‌ترین پیامدهای این نوع ناپایداری در سامانه تعادلی ترکیبات نفتی، می‌توان به تشکیل، رشد و رسوب اجزای آلی سنگین اشاره کرد. از مهم‌ترین این رسوبات که معضلات زیادی را نیز با خود به‌همراه دارد رسوب اجزای آسفالتنی می‌باشد. تشکیل و رشد رسوبات آسفالتنی یکی از مهم‌ترین معضلات صنعت بالادستی نفت می‌باشد [۱]. به هر حال در مراحل استحصال اولیه و ثانویه تولید نفت به‌علت تغییر در شرایط ترمودینامیکی

## چکیده

رسوب اجزای آلی هیدروکربنی و به‌ویژه آسفالتن یکی از مهم‌ترین معضلات صنایع بالادستی و پایین‌دستی نفت است که در سازندهای نفتی مخزن، تجهیزات بهره‌برداری تولید، خطوط لوله انتقال نفت و ذخیره‌سازی مشکلاتی را ایجاد می‌کند. بدین لحاظ شناخت سازوکار تشکیل رسوب (سینتیک رشد و توسعه ذرات جامد آلی) و تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن در نفت‌های آسفالتنی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، در ابتدا در محدوده وسیعی از درجه API نفت، نمونه‌هایی از مخازن مختلف هیدروکربنی ایران با سه روش متداول اندازه‌گیری آزمایشگاهی نقطه ظهور آسفالتن در نفت اتمسفریک، بررسی شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، این روش‌ها همواره در اندازه‌گیری نقطه ظهور رسوب آسفالتن، توانایی و یا دقت کافی برای تعیین نقطه شروع رسوب‌گذاری را ندارند. با استفاده از روش پردازش تصویر و محاسبات ریاضی بر روی تصاویر تهیه شده در مراحل مختلف رسوب‌گذاری و رشد ذرات کلونیدی که مبنای مطالعات سینتیکی رشد رسوب آسفالتن می‌باشد، می‌توان نقطه ظهور رسوب آسفالتن را با دقت بالا اندازه‌گیری کرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش جدید به‌کار برده شده نه تنها دقت قابل‌قبولی در

ساختار پیچیده و ناشناخته، باز می‌گردد. وجود پدیده‌هایی همانند تجمع و رشد این ذرات که به ماهیت آن مربوط می‌شود باعث شده که رسوبات هر مخزن یا چاه، منحصر به همان مخزن یا چاه بوده و تفاوتی ماهیتی با دیگر مخازن و یا چاه‌ها داشته باشد. محدودیت‌های موجود در ابزار و یا روش‌های رایج برای تعیین نقطه ظهور رسوب‌گذاری آسفالتن نیز این روش‌ها را محدود و در بعضی موارد غیر کارآمد کرده است.

برای تعیین نقطه شروع رسوب‌گذاری آسفالتن در دامنه وسیعی از نفت با دانسیته و خواص مختلف بر روی تصاویر گرفته شده در مراحل مختلف، تشکیل و رشد ذرات آسفالتن، پردازش تصویر و محاسبات ریاضی انجام شده و نقطه شروع رسوب‌گذاری با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌شود. فرایندهای پردازش تصویر در مطالعات ترکیبات سنگین هیدروکربنی همچون آسفالتن‌ها توسط چند شرکت سرویس دهنده همچون DBR و Vinci به صورت محدود، برای تعیین توزیع اندازه ذرات و کلوئیدهای آسفالتنی به کار گرفته شده است. به هر حال تلاش به منظور بهره‌گیری از این روش در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن کاملاً جدید بوده و می‌توان گفت، از اولین تلاش‌ها در این زمینه می‌باشد. مشابه با هر کار جدید، این روش نیز با استفاده از نفت‌های آسفالتنی که متعلق به مخازن هیدروکربنی ایران بوده و گزارش‌های متعددی درباره مشکلات ناشی از انسداد رسوبات آسفالتنی آن رسیده است، آزمایش و درجه دقت و اعتبار روش جدید، تعیین خواهد شد.

### نفت‌های آسفالتنی مورد مطالعه

نفت‌های آسفالتنی استفاده شده در این مطالعه به گونه‌ایی انتخاب شده‌اند که با مطالعه محدود و وسیع‌تری از درجه API نفت، اعتبار بیشتری به مطالعات بدهند. این موضوع در نفت‌های سبک که مشکلات بیشتری با تشکیل رسوبات آسفالتنی دارند [۹]، حائز اهمیت است. جدول ۱، بخشی از خواص ترکیبات سنگین نفت‌های آسفالتنی مورد مطالعه را که متعلق به مخازن نفتی ایران می‌باشند، نشان می‌دهد.

سیال هیدروکربنی، نظیر تغییر در ترکیب درصد نفت، درجه حرارت و فشار سیال، تعادل پایدار ترمودینامیکی مواد آلی آسفالتنی بهم خورده و در نتیجه رسوبات آسفالتنی با سازوکارهای مختلف تشکیل و در اثر حرکت در محیط متخلخل سازند، در ستون چاه و تأسیسات انتقال و فراورش نفت ایجاد انسداد می‌کنند [۲]. موارد فوق و اثرات فنی - اقتصادی ناشی از آن سبب شده که پدیده تشکیل و رشد رسوب آسفالتن در صنایع نفتی، به صورت حاد مطرح و تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در این زمینه آغاز شود [۳].

از آنجایی که میزان آسفالتن اندازه‌گیری شده در یک نمونه نفتی به نوع عامل رسوب‌دهنده استفاده شده بستگی دارد، نمی‌توان میزان کل آسفالتن موجود در یک نمونه نفتی را به طور دقیق اندازه‌گیری کرد [۴] و بهتر است در کل آزمایش‌ها از یک عامل رسوب‌دهنده مشخص و ثابت استفاده شود. در این مطالعه از عامل رسوب‌دهنده نرمال هپتان استفاده شده است [۵]. این امر سبب می‌شود تا خطای خاصی در مقایسه روند تشکیل رسوب آسفالتن ایجاد نشود.

برای انتقال فازی اجزای سنگین هیدروکربنی از ترکیبات نفتی، هفت نقطه ظهور رسوب یا فاز جدید که از نفت جدا شده است، تعریف می‌شود که یکی از آنها نقطه ظهور رسوب آسفالتن<sup>۱</sup> می‌باشد [۶]. در هر حال تعیین دقیق این نقطه که در حقیقت نقطه ظهور لخته‌های اجزای سنگین آسفالتنی در فاز نفت است، برای پیش‌بینی و پیش‌گیری مسائل و مشکلات ناشی از رسوبات آسفالتنی در طیف وسیعی از نفت‌های سبک و سنگین، لازم و ضروری می‌باشد [۶].

در این تحقیق در ابتدا با مرور مراجع قبلی [۷]، به بررسی روش‌های مختلف ارائه شده برای تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن پرداخته و از میان آنها روش‌های متداول‌تر انتخاب و به کمک ابزارهای آزمایشگاهی و نفت‌های آسفالتنی در دسترس، بررسی می‌شوند [۸] تا درجه دقت و کارایی آنها در اندازه‌گیری نقطه ظهور رسوب آسفالتن تجدید بررسی شوند. وجود مشکلات در مطالعه رسوبات آسفالتنی تا اندازه زیادی به ماهیت و

جدول ۱- نفت‌های آسفالتنی مورد مطالعه به همراه یک سری از خواص فیزیکی آنها

نفت آسفالتنی	مقدار آسفالتن IP143 (درصد وزنی)	مقدار رزین SARA (درصد وزنی)	مقدار پارافین‌ها SARA (درصد وزنی)	مقدار آروماتیک‌ها SARA (درصد وزنی)	درجه API نفت	شاخص ناپایداری نفت (CII)
A	۶	۸	۳۶	۴۵	۲۸/۲	۰/۷۹
B	۵۲/۴۲	۳۲/۳۹	۶/۷۰	۸/۴۹	۲۸	۱/۴۵
C	۰/۹۹	۵/۴۸	۴۱/۰۴	۵۲/۴۹	۴۵	۰/۷۳
D	۱۶/۸۵	۵/۶۲	۳۱/۴۶	۴۶/۰۷	۱۵	۰/۹۳

سیال آسفالتنی توسط یک رسوب‌دهنده مشخص تیترا شده و نقطه‌ایی که کلوئیدهای آسفالتن از بالک نفتی خارج شده و شروع به تجمع و رشد می‌کنند به نام نقطه ظهور رسوب آسفالتن با رسوب‌دهنده شناخته می‌شود [۸ و ۱۲]. این نقطه مهم‌ترین پارامتر اندازه‌گیری شده در مطالعه نفت‌های اتمسفریک آسفالتنی می‌باشد و می‌توان در نفت‌های زنده سیال مخزن نیز این مراحل را انجام داد و نقطه ظهور رسوب آسفالتن را برای سیال زنده نیز مشخص کرد [۱۳]. در تعیین این نقطه، روش‌های متعددی توسط محققین بیان شده [۱۵] که در ابتدا با مرور این روش‌ها و انجام آزمایش‌های متعدد بر نفت‌های آسفالتنی منتخب و عامل رسوب‌دهنده نرمال هپتان، نقاط قوت و ضعف این روش‌ها مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند. چند روش متداول در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن که مراجع متعدد نیز به آن اشاره کرده‌اند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵] عبارتند از: روش‌های ویسکومتری [۱۵]، جذب نور لیزر تابیده شده [۱۴] و مشاهده میکروسکوپی [۱۶] که در آنها از تغییرات بعضی از خواص فیزیکی، برای تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با رسوب‌دهنده، بهره گرفته می‌شود. نتایج آزمایش‌ها در روش‌های فوق به منظور تعیین کارایی و نقاط قوت و ضعف آنها برای محدوده وسیعی از نفت‌های آسفالتنی، به شرح زیر می‌باشد:

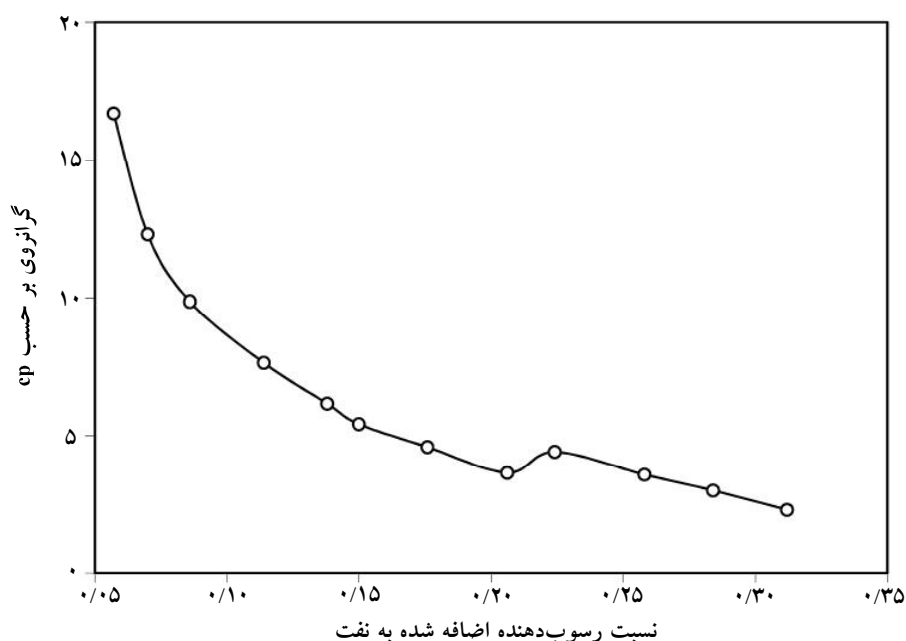
در روش ویسکومتری [۱۵]، گرانروی نفت‌های آسفالتنی حین فرایند تیتراسیون با عامل رسوب‌دهنده نرمال هپتان، اندازه‌گیری می‌شود. فرایند تیتراسیون با نرمال هپتان برای ۳ نفت آسفالتنی A، C و D در هر مرحله تیتراسیون تحت آزمایش اندازه‌گیری گرانروی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های گرانروی انجام شده با دستگاه Antom-Paar مدل SVM3000

در نفت‌های اتمسفریک فوق الذکر، شاخص ناپایداری کلوئیدهای آسفالتنی، CII [۱۰] به کمک داده‌های آزمایشگاهی، تست SARA، یعنی مقادیر ترکیبات سنگین اشباع‌شده، آروماتیک‌ها، رزین‌ها و آسفالتن‌ها محاسبه شده که در جدول ۱ آورده شده است. این شاخص به‌عنوان نسبت مجموع مقادیر اشباع‌شده‌ها و آسفالتن‌ها به مجموع آروماتیک‌ها و رزین‌ها شناخته و محاسبه می‌شود. اگر مقادیر CII کمتر از مقدار ۰/۷ باشد، نفت آسفالتنی به‌لحاظ تشکیل رسوبات سنگین پایدار است درحالی‌که برای مقادیر CII بین ۰/۷ تا ۰/۹، نفت آسفالتنی ناپایدار بوده و تحت شرایطی از سیستم نفتی خارج می‌شوند. برای مقادیر شاخص ناپایداری بالای مقادیر ۰/۹، نفت آسفالتنی کاملاً ناپایدار خواهد بود. با مشاهده این اعداد در جدول، مشاهده می‌شود که شاخص ناپایداری کلوئیدی در سیالات هیدروکربنی مشخص شده، بیشتر از عدد ۰/۷ است. بنابراین نفت‌های مورد نظر به لحاظ تشکیل رسوب آسفالتن، ناپایدار می‌باشند [۱۰] که در این میان نفت آسفالتنی B کاملاً ناپایدار است.

در ابتدای آزمایش‌ها، به‌منظور حذف هرگونه آلودگی و جامدات هیدروکربنی و یا غیرهیدروکربنی احتمالی موجود در نفت‌های اتمسفریک انتخاب شده، نفت‌ها با دور ۳۰۰۰ rpm، سانتریفیوژ شده تا ناخالصی‌های احتمالی، از بالک نفتی خارج شود که در طی فرایند تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با ذرات آسفالتنی تشکیل شده، اشتباه نشوند [۱۱].

### روش‌های مختلف تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با رسوب‌دهنده

در فرایند تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با رسوب‌دهنده،



شکل ۱- گرانروی بر حسب cp در مقابل درصد رسوب دهنده در نفت معمولی A

در صورت استفاده از ابزارهای رایج اندازه‌گیری گرانروی، تأثیر ترکیبات سنگین هیدروکربنی هر چند در یک نفت سنگین مانع از حصول به نتیجه می‌شود لیکن در یک نفت معمولی سبب عدم تکرارپذیری آزمایش خواهد شد مگر آنکه ابزارهای اندازه‌گیری گرانروی به کار گرفته شده دارای چنان دقتی باشند که افزایش نسبتاً کوچک مقادیر گرانروی، هرچند به صورت افزایش نقطه‌ای باشد را نیز اندازه‌گیری کنند. علاوه بر این همواره می‌بایست فرایند تیتراسیون با گام‌های بسیار کوتاه دنبال شود تا از نقطه ظهور رسوب آسفالتن که به صورت یک افزایش نقطه‌ای است، عبور نکنیم. این امر سبب افزایش زمان و هزینه آزمایش‌ها خواهد شد. به هر حال از قابلیت‌های این روش که اولین روش نسبتاً موفق در اندازه‌گیری نقطه ظهور رسوب آسفالتن می‌باشد، تعیین دقیق این نقطه در فرایند تیتراسیون آسفالتن خالص استخراج شده از نفت آسفالتنی می‌باشد [۱۸]. هرچند در گزارش‌ها و اندازه‌گیری‌های گرانروی نفت‌های زنده آسفالتنی، افزایش‌هایی در حین فرایند تشکیل رسوب آسفالتن گزارش شده است لیکن اندازه‌گیری گرانروی این نفت‌های زنده آسفالتنی تاکنون منجر به ارائه روشی برای تعیین این نقطه نشده است. در روش پرتولیزر تاییده شده به سیال اتمسفریک و یا

و در دمای ثابت و استاندارد ۶۰ درجه فارنهایت بوده است. با ارزیابی نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که روش ویسکومتری در نفت‌های اتمسفریک سبک و یا سنگین قادر به تعیین این نقطه برای رسوب آسفالتن با رسوب دهنده نبوده و تنها در نفت‌های معمولی، این نقطه را به کمک یک افزایش نقطه‌ای (Peak) در گرانروی نمایش می‌دهند. شکل ۱، نتایج حاصل شده را برای نفت معمولی A، نشان می‌دهد. در نفت‌های اتمسفریک سبک مقادیر عددی گرانروی غالباً کوچک می‌باشد، علاوه بر این تعداد کلونیدهای آسفالتن تشکیل شده در آنها کم تعداد ولی به لحاظ اندازه بزرگ می‌باشند به طوری که ابزارهای رایج آزمایشگاهی در اندازه‌گیری گرانروی، قادر به تشخیص و اندازه‌گیری افزایش نقطه‌ای ناشی از تشکیل رسوب آسفالتن نیستند. در مقابل، نفت‌های سنگین دارای عدد گرانروی بالاتری است لیکن وجود مقادیر نسبتاً بالای ترکیبات سنگین هیدروکربنی و از آن جمله آسفالتن‌ها در نفت سنگین مانع از مشاهده و اندازه‌گیری افزایش نقطه‌ای آزمایشگاهی و نسبتاً کوچک تشکیل رسوب آسفالتن، در نقطه ظهور خواهد شد. نکته دیگر و مهم در این خصوص عدم اطمینان به تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها به همان دلایل مربوط به نفت‌های سنگین می‌باشد. به عبارت دیگر

این روش، اندازه‌گیری‌های دقیق و تکرارپذیر آن، برای محدوده‌ای از نفت‌های مرده و یا زنده آسفالتنی می‌باشد. به عنوان پیشنهاد برای مرتفع‌سازی بخشی از محدودیت‌ها برای نفت‌های سنگین آسفالتنی، می‌توان به دنبال تقویت لیزر استفاده شده بود. همچنین با رقیق‌سازی نفت سنگین با یک ترکیب امتزاج‌پذیر، با کاهش دانسیته نفت و بدون اثرات جانبی دیگری بر نفت می‌توان قدرت لیزر را در عبور از بالک نفت افزایش داد.

در روش مشاهده میکروسکوپی [۱۶]، نفت آسفالتنی با کمک رسوب‌دهنده تیترا شده و در هر مرحله تیتراسیون پس از صرف زمان مناسب، به منظور تأثیرگذاری کامل رسوب‌دهنده بر سیال آسفالتنی، مقدار کمی از نفت تیترا شده، با کمک لام و لامل در زیر میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی‌های X4، X10 و X40 مشاهده و از هر مقیاس ۳ عکس مختلف از کل محدوده لامل تهیه می‌شود تا در مرحله مقایسه عکس‌ها بتوان با مشاهده آنها به نقطه ظهور رسوب آسفالتن پی‌برد. میکروسکوپ چشمی استفاده شده در این روش کاملاً متداول بوده و مجهز به دوربین دیجیتال برای تهیه عکس‌های دیجیتالی می‌باشد. فرایند تیتراسیون نفت آسفالتنی به کمک رسوب‌دهنده تا آنجا ادامه می‌یابد تا با مشاهده عکس‌های گرفته شده در زیر میکروسکوپ،

زنده آسفالتنی [۱۴]، مقداری از سیال نفتی درون سلول مجهز به سیستم تابش لیزر تزریق شده و نور لیزر با شدت ثابت درون بالک نفتی تابیده می‌شود. عبور نور از محیط تیره نفت، سبب کاهش شدت آن می‌شود به طوری که شدت نور دریافت شده کاهش محسوسی خواهد داشت. به هر حال با کاهش درجه API نفت به زیر حدود عدد ۲۵، شدت نور دریافتی به حدی کاهش می‌یابد که تغییرات آن در حین آزمایش قابل اندازه‌گیری نبوده و عملاً این روش کارایی ندارد. همچنین در نفت‌های سبک با درجه API بالای حدود ۳۸ نیز اغلب مقدار آسفالتن کاهش یافته و در صورت تشکیل رسوب، کلوخه‌هایی با تعداد به مراتب کم‌تر ولی بزرگ‌تر خواهیم داشت. لذا شدت نور لیزر دریافتی هر چند بالاست ولی کاهش محسوسی در حین فرایند تشکیل رسوب نداشته و بنابراین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با رسوب‌دهنده قابل تشخیص نخواهد بود. پرهزینه بودن آزمایش‌ها و ابزارهای آن و نیز در دسترس نبودن آنها از محدودیت‌های دیگر این روش می‌باشد. با رسم نمودار مقادیر قدرت نور دریافتی در مقابل نسبت حجمی تزریق رسوب‌دهنده می‌توان به نقطه ظهور رسوب دست یافت. شکل ۲، چنین موردی را در نفت معمولی A نشان می‌دهد. از جمله قابلیت‌های



شکل ۲- شدت نور لیزر دریافتی بر حسب Watt در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت معمولی A

۱- ابزارهای آزمایشگاهی مورد نیاز و در دسترس برای اندازه‌گیری‌ها از محدودیت‌های بعضی از این روش‌هاست، به طوری که به دلیل پرهزینه بودن آنها، تنها در اختیار گروه محدودی از محققین می‌باشند.

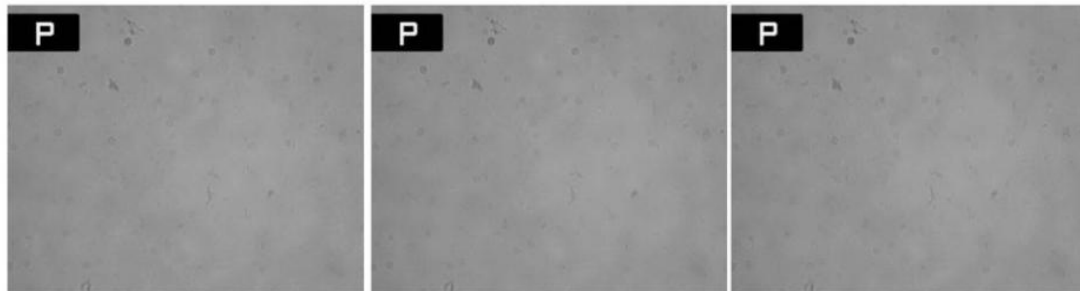
۲- گروهی از روش‌های تعیین نقطه ظهور رسوب، توانایی تکرارپذیری برای تعیین این نقطه را در شرایط یکسان ندارند و تکرار مجدد روش منجر به تعیین عدد دیگری می‌شود.

۳- بعضی از روش‌ها هر چند برای گروه مشخصی از نفت‌های با درجه API کارایی دارند، ولی برای محدوده وسیعی از نفت‌های آسفالتنی، از نفت سنگین تا نفت سبک چندان موفق نبوده‌اند.

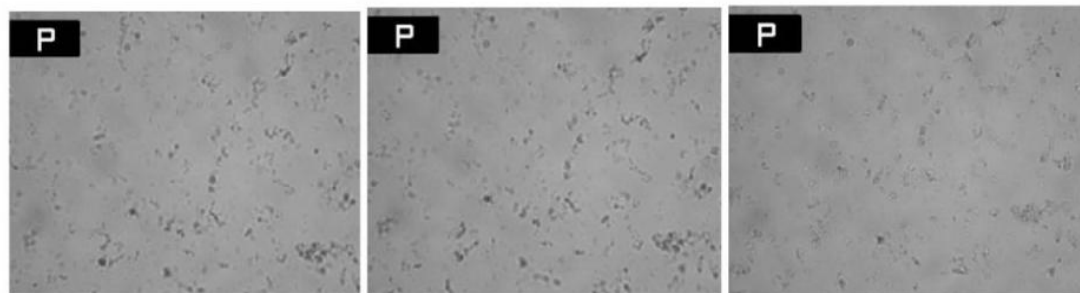
۴- غالباً تعیین دقیق این نقطه با روش‌های قبلی امکان‌پذیر نبوده و این امر در مطالعاتی همچون مطالعه تأثیرات

از وجود ذرات آسفالتنی در بالک نفتی اطمینان حاصل شود. شکل ۳، نمونه‌ای از فرایند فوق را به صورت عکس‌های تهیه شده در کنار یکدیگر و نقطه ظهور رسوب آسفالتن، برای نفت آسفالتنی A را نشان می‌دهد. از جمله قابلیت‌های مهم این روش استفاده وسیع آن در نفت اتمسفریک و با تغییراتی در نفت‌های زنده و در شرایط دما و فشار بالای مخزن می‌باشد که علاوه بر قدرت تکرارپذیری نتایج، در مطالعات مهم و جدیدی همچون مطالعات سینتیکی رشد ذرات رسوبی [۱۷] نیز کارایی خوبی دارد.

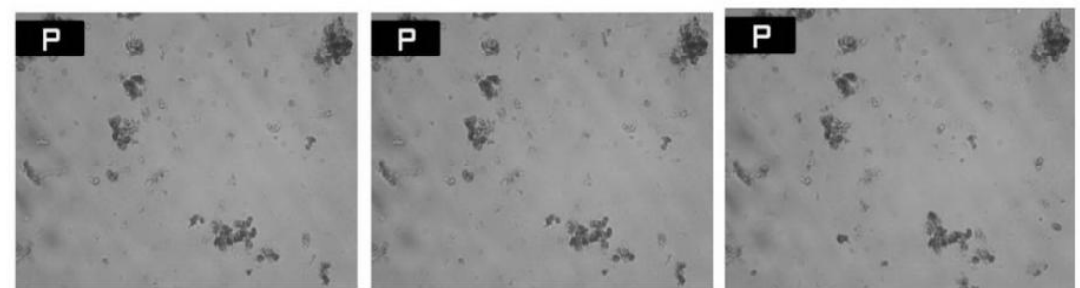
با نگاهی اجمالی به نتایج آزمایش‌ها در روش‌های فوق، خواهیم دانست که علیرغم بعضی قابلیت‌های آنها در مطالعه رسوب آسفالتن، روش‌های قبلی در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن [۱۵]، دارای نقاط ضعف عمده و متعددی هستند که عبارتند از:



۲۰ درصد وزنی نرمال هپتان در نفت آسفالتنی A (بزرگنمایی ۱۴۰۰ برابر)



۲۵ درصد وزنی نرمال هپتان در نفت آسفالتنی A (بزرگنمایی ۱۴۰۰ برابر)



۳۰ درصد وزنی نرمال هپتان در نفت آسفالتنی A (بزرگنمایی ۱۴۰۰ برابر)

شکل ۳- تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن با رسوب‌دهنده به روش مشاهده میکروسکوپی در نفت معمولی A

اتمام هر آزمایش کوتاهتر خواهد شد و این امر از تعداد خطاهای ناشی از طولانی تر شدن آزمایشها و خطاهای آزمایش کننده نیز می‌کاهد. به‌عنوان نمونه در آزمایش پیش‌رو که نفت آسفالتنی A، تیترا می‌شود و در آن نقطه ظهور رسوب آسفالتن در نمونه نفتی حدود ۲۳ درصد حجمی نرمال هپتان می‌باشد، افزایش نرمال هپتان به نفت آسفالتنی A از ۲۷ درصد حجمی شروع شده و تا حدود ۳۷ درصد حجمی نرمال هپتان ادامه می‌یابد. علاوه بر این، در ابتدای فرایند تیتراسیون می‌بایست از نفت آسفالتنی اولیه و بدون اضافه کردن رسوب‌دهنده توسط میکروسکوپ و در مقیاس بزرگ‌نمایی مورد نظر عکس گرفته شود تا به‌عنوان شاهد و مرجع در ادامه فرایند تعیین نقطه ظهور رسوب از آن استفاده شود.

### روش انجام کار در فرایند پردازش تصویر

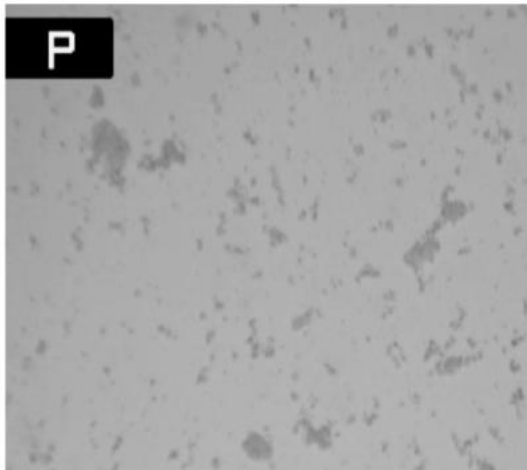
در این روش یکی از نمونه‌های نفت آسفالتنی (نمونه نفتی A) برای بررسی روش مذکور انتخاب شد. با ادامه فرایند تیتراسیون نفت آسفالتنی و در مقادیر بالاتر از نقطه ظهور رسوب آسفالتن، همواره مشاهده می‌شود که با تزریق بیشتر رسوب‌دهنده، درصد مساحت اشغال شده توسط ذرات آسفالتنی به کل مساحت صفحه تصویر تحلیلی، بزرگ و بزرگتر می‌شود، بنابراین چنین به‌نظر می‌رسد که رابطه‌ای مستقیم بین درصد نرمال هپتان اضافه شده و مساحت نسبی رسوبات آسفالتنی وجود دارد. به‌عنوان نمونه تصاویر میکروسکوپی برای تنها ۲ مرحله از کل ۵ مرحله تیتراسیون نفت آسفالتنی A در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. برای تجزیه و تحلیل عکس‌ها به کمک فرایند پردازش تصویر، از برنامه کوچکی که در نرم‌افزار Matlab نسخه شماره 7.6.0.324 (R2008a) و با استفاده از برنامه‌های کمکی آن نوشته شده است، یاری گرفته شد. برای توضیح کاملتر فرایند پردازش تصویر، به عنوان نمونه، شکل ۴ تحت فرایند پردازش تصویر قرار گرفت. در مرحله نخست، با استفاده از برنامه نوشته شده، تصویر رنگی گرفته شده به یک عکس خاکستری تبدیل می‌شود. بر خلاف یک عکس سیاه-سفید که طیف‌های آن تنها دارای دو حد آستانه صفر و یک می‌باشند، در عکس‌های

بازدارنده‌ها بر نقطه ظهور رسوب آسفالتن حائز اهمیت می‌باشد، زیرا در این آزمایشها، اختلاف تاثیرگذاری هر چند کم بازدارنده‌ها، می‌بایست قابل اندازه‌گیری و تشخیص باشد.

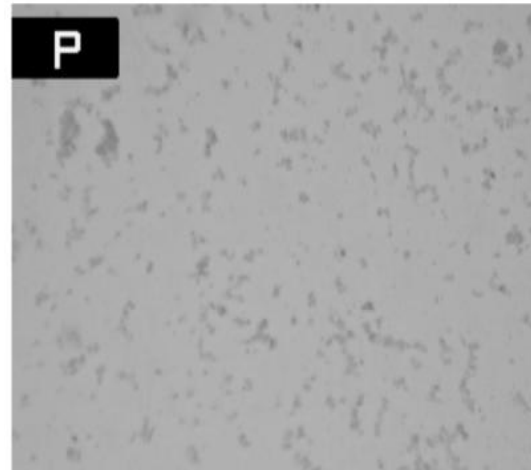
لذا با در نظر گرفتن دلایل فوق، برای تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن، ارائه روشی دقیق‌تر، کاراتر، تکرارپذیرتر و قابل کاربرد برای تمامی نفت‌های آسفالتنی به‌همراه ابزارهای آزمایشگاهی در دسترس، احساس می‌شود.

### کاربرد روش پردازش تصویر در تعیین نقطه ظهور رسوب

در این روش برای انجام مراحل اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، از همان ابزارهای روش مشاهده میکروسکوپی استفاده می‌شود. لذا در هر مرحله از فرایند تیتراسیون، نفت آسفالتنی به‌کمک عامل رسوب‌دهنده تیترا شده، سپس مخلوط نفتی تیترا شده، توسط میکروسکوپ و با بزرگ‌نمایی ۱۰X مشاهده و تصویربرداری می‌شود. مقدار بزرگ‌نمایی ۱۰X براساس تجارب آزمایشگاهی حین آزمایش نفت‌های آسفالتنی گوناگون به‌دست آمده است. به‌هرحال مقادیر بالاتر بزرگ‌نمایی سبب می‌شود تا بر سطح کوچکتری از آسفالتن تمرکز و مطالعه صورت گیرد که این امر سبب می‌شود تا کلوئیدهای کمتری در فرایند اندازه‌گیری سطوح ذرات آسفالتنی دخالت داده شود که نهایتاً منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری‌های سطوح کلوئیدها می‌شود. در مقادیر کوچک بزرگ‌نمایی هرچند سطح مورد مطالعه وسیع‌تر شده و کلوئیدهای آسفالتنی بیشتری در اندازه‌گیری‌ها دخالت داده می‌شوند لیکن در این میان کلوئیدهای خرد و کوچک آسفالتن به‌دلیل اندازه خیلی کوچکشان مشاهده نخواهند شد و این نیز سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها خواهد شد. البته روش جدید پردازش تصویر بر مبنای عکس‌های گرفته شده برای پس از تشکیل رسوب آسفالتن و تنها برای تعداد مراحل تیتراسیون حدود ۴ و یا ۵ مرحله و آن‌هم با گام‌های کوتاه در تیتراسیون می‌باشد تا با تجزیه و تحلیل آنها به نقطه ظهور رسوب آسفالتن پی‌بریم. بنابراین نه تنها تعداد مراحل تیتراسیون کاهش می‌یابد، بلکه زمان لازم برای



شکل ۵- نمونه نفت A با ۲۹ درصد حجمی نرمال هپتان

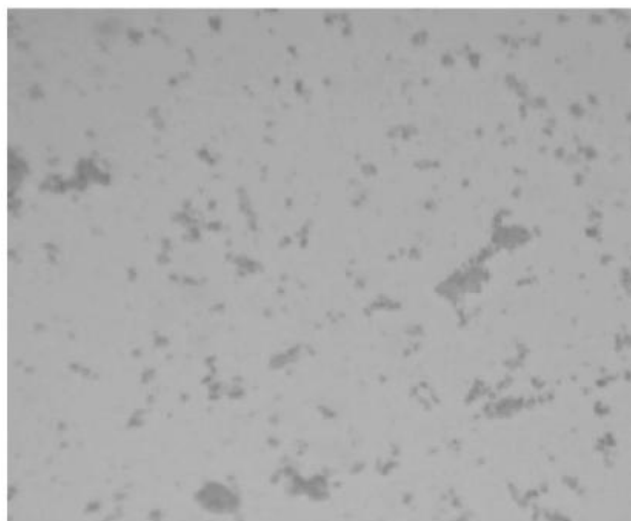


شکل ۴- نمونه نفت A با ۲۷ درصد حجمی نرمال هپتان

حال به منظور تجزیه و تحلیل نمودار هیستوگرام تهیه شده، لازم است که ذرات و ناخالصی‌های اضافی موجود در نمونه نفتی و نیز رنگ پس‌زمینه و آلودگی‌های احتمالی آن حذف شوند. برای این منظور از تصویر اولیه نفت آسفالتنی و بدون اضافه شدن هرگونه بازدارنده‌ای استفاده می‌شود. لذا در ابتدا می‌بایست تمامی مراحل قبل را بر روی تصویر نمونه نفت آسفالتنی بدون بازدارنده نیز انجام داد تا هیستوگرام طیف‌های نمونه نفت آسفالتنی بدون بازدارنده نیز به دست آید.

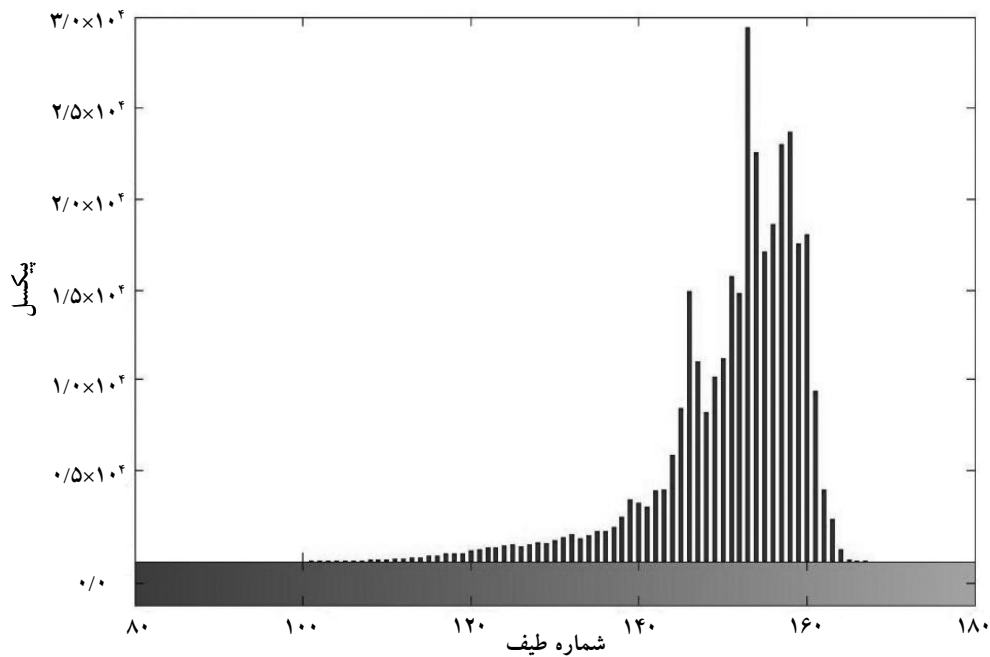
در این مرحله فرایند نرمالایز کردن طیف‌های حاصل از نفت آسفالتنی در دو مرحله پی‌درپی بدین صورت انجام می‌گیرد که در مرحله نخست، طیف‌های موجود در

خاکستری، طیف‌های موجود تمامی طیف‌ها در محدوده صفر تا یک را در بر می‌گیرند. همچنین به دلیل آنکه اغلب در عکس گرفته شده علاماتی همچون اندازه بزرگ‌نمایی عکس، مشخصات میکروسکوپ و یا دوربین دیده می‌شود، این قسمت‌ها از تصویر بریده شده و یک تصویر خاکستری و بدون هیچ‌گونه اضافاتی از عکس اولیه تهیه خواهد شد. نتیجه فرایند فوق، در شکل ۶ آمده است. در مرحله دوم، هیستوگرام طیف‌های شکل ۶ محاسبه شده است که نتیجه آن به صورت شکل ۷ می‌باشد. در این نمودار، محور افقی بیانگر طیف‌های خاکستری و محور عمودی نشان دهنده تعداد پیکسل‌های شمارش شده برای هر طیف می‌باشد.



شکل ۶- تصویر پردازش شده برای خاکستری کردن و حذف اضافه‌ها از عکس اولیه

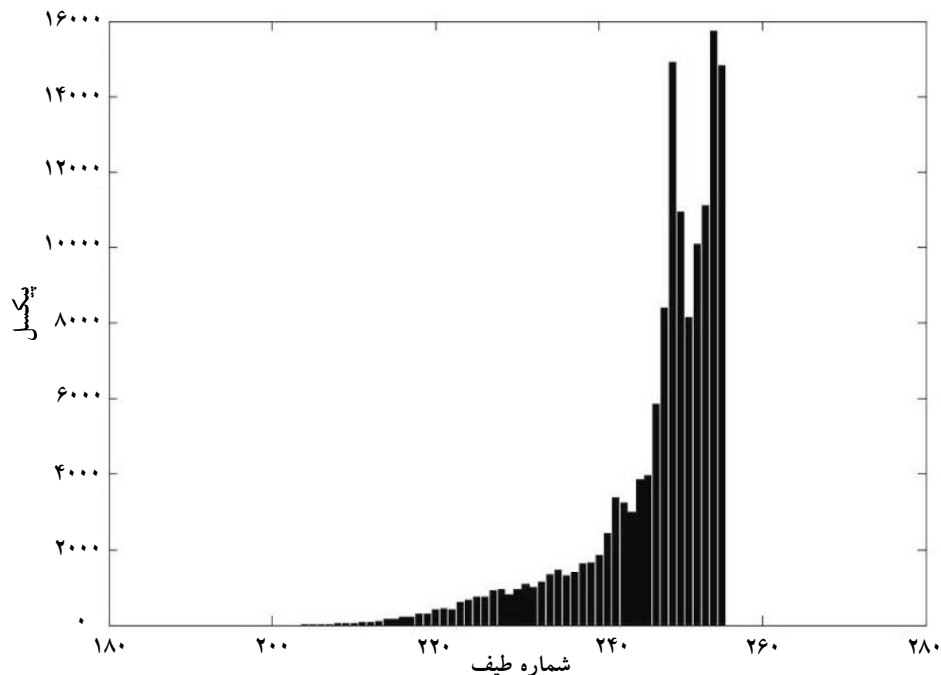




شکل ۷- نمودار هیستوگرام شکل ۶ بر مبنای تعداد پیکسل‌های شمرده شده برای هر طیف

ولی فراوانی به مراتب کمتری را نسبت به رنگ پس زمینه دارند، می‌توان تمامی طیف‌هایی را که دارای عدد فراوانی بزرگتری نسبت به طیف پیشینه دارند را توسط فرایند نرمالیزاسیون مرحله اول، به عنوان ناخالصی در نظر گرفت و حذف کرد که در نمودار ۸ این فرایند مشاهده می‌شود. حال پس از مرحله نخست نرمالیزاسیون، لازم است که

هیستوگرام هر دو نفت آسفالتنی مورد مطالعه و نفت اولیه بدون بازدارنده را نسبت به طیف پیشینه خود نرمالایز می‌کنیم که در اینجا طیف پیشینه طیفی است که بیشترین فراوانی را در نمودار هیستوگرام دارا است. به عبارت دیگر از آنجایی که طیف پیشینه همان طیف پس زمینه بوده و با توجه به این نکته که همواره ذرات آسفالتنی تیره‌تر



شکل ۸- نمودار نرمالایز شده بر مبنای طیف پیشینه برای حذف ناخالصی‌ها

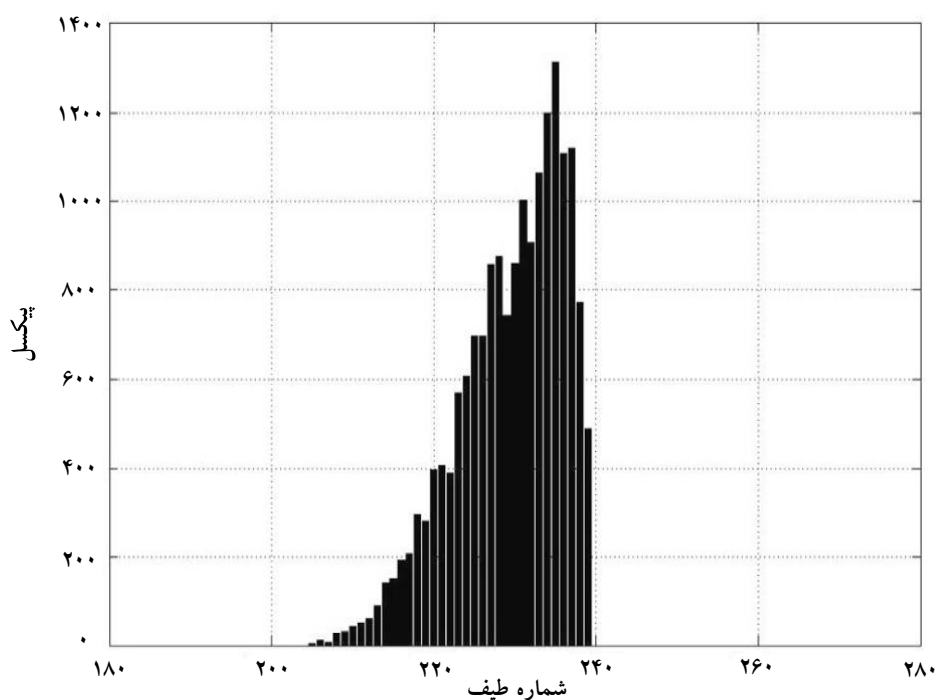
در شکل پردازش شده ۹ نیز به دنبال رسیدن به تعداد ذرات آسفالتنی موجود در سطح مورد مطالعه هستیم. برای این منظور دو عامل سطح ذره آسفالتنی و تیرگی سطح ذره را به عنوان ضریبی از تجمع بیشتر ذرات آسفالتنی در واحد سطح و به طور همزمان در نظر می‌گیریم. ضریب وزنی  $w_i$  برابرست با نسبت شماره طیف بیشینه به طیف شماره  $i$  ام که همواره مقادیر کوچکتر و یا مساوی یک دارد،  $A_i$  برابر مساحت کل صفحه بررسی شده و  $A_i$  برابر مساحت طیف  $i$  ام در همان صفحه است. با حاصل ضرب مساحت هر طیف در ضریب وزنی  $w_i$  آن طیف و نرمالایز کردن آن توسط رابطه زیر، به عددی که به نام عدد پردازشی ذرات آسفالتنی به کل طیف‌های بررسی شده ( $N$ ) است، خواهیم رسید. مقادیر عددی  $N$  همواره بزرگتر و یا مساوی صفر می‌باشند که مقدار حدی صفر برای  $N$ ، بیانگر آغاز تشکیل ذرات رسوب آسفالتن بوده و درصد حجمی و یا وزنی متناظر با آن به عنوان نقطه شروع تشکیل رسوب آسفالتن شناخته خواهد شد.

$$N = \frac{1}{A_i} \sum w_i A_i \quad (1)$$

مراحل فوق به عنوان متدولوژی فرایند پردازش تصویر برای تحلیل عکس‌های میکروسکوپی و همچنین برای سایر

تنها طیف‌های مربوط به ذرات آسفالتنی مورد ارزیابی قرار گیرند. در ابتدا انجام نرمالیزاسیون مرحله دوم که به منظور حذف طیف‌های موجود در نمونه اولیه نفتی که نفت بدون رسوب‌دهنده و یا هر افزودنی دیگری است، انجام می‌شود. مقیاس محورهای افقی در هر دو نفت، یکی نفت آسفالتنی مورد مطالعه با بازدارنده و دیگری نفت اولیه آسفالتنی بدون بازدارنده، با یکدیگر یکی می‌شوند و بدین ترتیب اعداد طیف بیشینه در هر دو نفت یکی شده تا طی فرایند نرمالیزاسیون، تنها طیف‌های همسان در نفت آسفالتنی مورد مطالعه حذف شوند. بدین دلیل مقیاس محور افقی در نمودار ۸ و نتیجه آن در شکل ۹، به طوری تغییر یافته‌اند که در هر دوی آنها، طیف بیشینه، مشابه با طیف بیشینه نفت اولیه بدون بازدارنده، عدد ۲۵۵ خواهد بود.

پس از طی مقدمات و آماده‌سازی‌های فوق و رسیدن به طیف‌های ذرات آسفالتنی در نفت آسفالتنی مورد مطالعه، به تحلیل شکل ۹ می‌پردازیم. از آنجا که هر چه ذرات آسفالتنی تجمع بیشتری داشته باشند و کلوئیدهای بزرگتر و منسجم‌تری را تشکیل دهند، نه تنها سطح بزرگتری را اشغال کرده بلکه در بالک نفتی نیز تیره‌تر مشاهده می‌شوند.



شکل ۹- طیف‌های ذرات آسفالتنی بعد از حذف طیف‌های نفت اولیه بدون بازدارنده از طیف‌های شکل ۸

جدول ۲- عدد پردازشی ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب دهنده در نفت معمولی A

درصد حجمی رسوب دهنده (vol %)	عدد پردازشی ذرات آسفالتنی
۲۳/۰ نقطه ظهور رسوب	۰/۰۰
۲۷/۰	۳/۴۴
۲۹/۰	۵/۱۶
۳۳/۰	۶/۸۲
۳۵/۰	۷/۳۵
۳۷/۰	۷/۴۴

آنها با یکدیگر متفاوت باشد که به نظر می‌رسد، تابع نوع و سایر مشخصات نفت آسفالتنی می‌باشند. لذا در صورت تولید داده‌های بیشتر آزمایشگاهی و تعیین مقادیر ثابت A، B و C برای نفت‌های گوناگون، می‌توان به روابط تجربی قابل کاربرد و مهمی در این زمینه دست یافت.

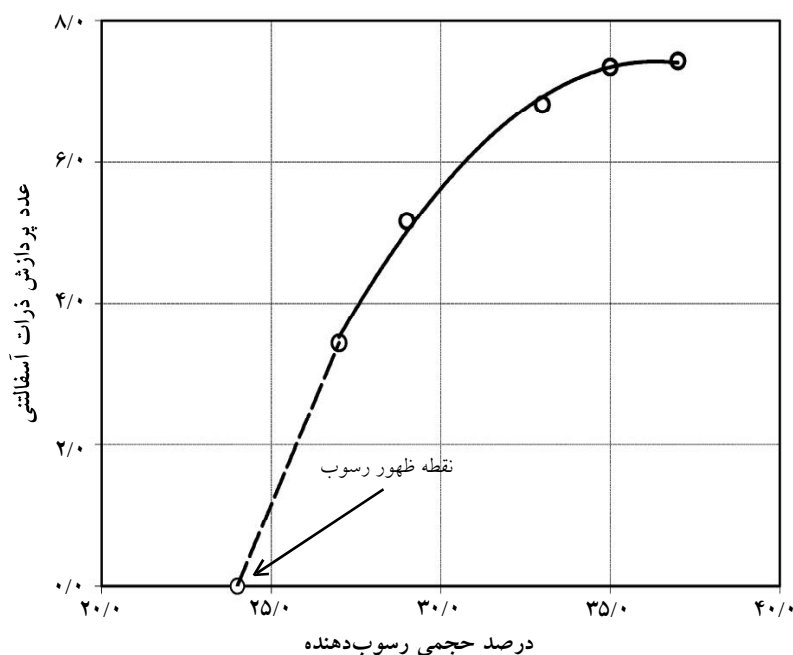
به منظور اعتبارسنجی روش و تعیین میزان درجه دقت روش، با تیتراسیون دقیق نفت، برای نقاط ۲۲/۰، ۲۴/۰ و یا ۲۶/۰ درصد حجمی با رسوب دهنده، روش مشاهده میکروسکوپی و پردازش تصویر به صورت موازی به کار گرفته شد. لذا با تکرار مراحل روش پردازش تصویر برای درصدهای حجمی فوق، نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

غلظت‌های مختلف تیتراسیون با نرمال هپتان در نمونه نفت آسفالتنی نیز به انجام می‌رسد و از هر عکس، در مقایسه با نفت آسفالتنی اولیه بدون رسوب دهنده، عددی که نشان دهنده عدد پردازش ذرات آسفالتنی (N) برای آن مرحله است، حاصل خواهد شد. جدول ۲ و شکل ۱۰، نتایج حاصل از پردازش‌های متعدد تصاویر را برای سایر عکس‌ها و در سایر غلظت‌های تیتراسیون نشان می‌دهد.

در این نمودار محور افقی نشان دهنده درصد حجمی نرمال هپتان اضافه شده و محور عمودی عدد پردازشی ذرات آسفالتنی (N) طی فرایند تیتراسیون می‌باشد. نقاط آزمایشگاهی که بر روی نمودار ۱۰ مشاهده می‌شوند، هرکدام با استفاده از روش جدید پردازش تصویر به دست آمده‌اند. معادله داده شده، بهترین معادله عبوری از این نقاط است:

$$F(x) = A \times \sin(B \times X + C) \quad (2)$$

مقادیر A، B و C در معادله ۲، اعداد ثابتی بوده که تابع مشخصات نفت خام آسفالتنی مورد مطالعه می‌باشند. آزمایش‌هایی که برای سایر نفت‌های آسفالتنی با روش فوق به انجام رسیده، نشان می‌دهد که بهترین معادله عبوری برای سایر نفت‌ها نیز معادلاتی مشابه با معادله ۲ خواهند داشت، تنها با این تفاوت که ضرایب ثابت A، B و C در



شکل ۱۰- عدد پردازش ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب دهنده در نفت معمولی A

جدول ۵- عدد پردازشی ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت C

درصد حجمی رسوب‌دهنده (vol %)	عدد پردازش ذرات آسفالتنی
۳۵/۰ نقطه ظهور رسوب	۰/۰۰
۳۷/۰	۰/۵۲
۳۹/۰	۰/۹۸
۴۳/۰	۱/۳۴
۴۹/۰	۱/۶۴

جدول ۶- عدد پردازشی ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت D

درصد حجمی رسوب‌دهنده (vol %)	عدد پردازش ذرات آسفالتنی
۸/۰ نقطه ظهور رسوب	۰/۰۰
۱۰/۰	۷/۳۸
۱۲/۰	۱۴/۰۳
۱۶/۰	۱۹/۱۵
۲۲/۰	۲۳/۴۶

با روش پردازش تصویر، آزمایش شده است. نتایج حاصل در جداول ۴، ۵ و ۶ و نیز شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ برای نفت‌های مختلف در حین تیتراسیون با درصدهای حجمی مختلف نرمال هپتان، نشان داده شده است که این روش در تمامی نفت‌ها از سنگین تا سبک معتبر و دقت کافی برای تعیین نقطه ظهور رسوب را داراست.

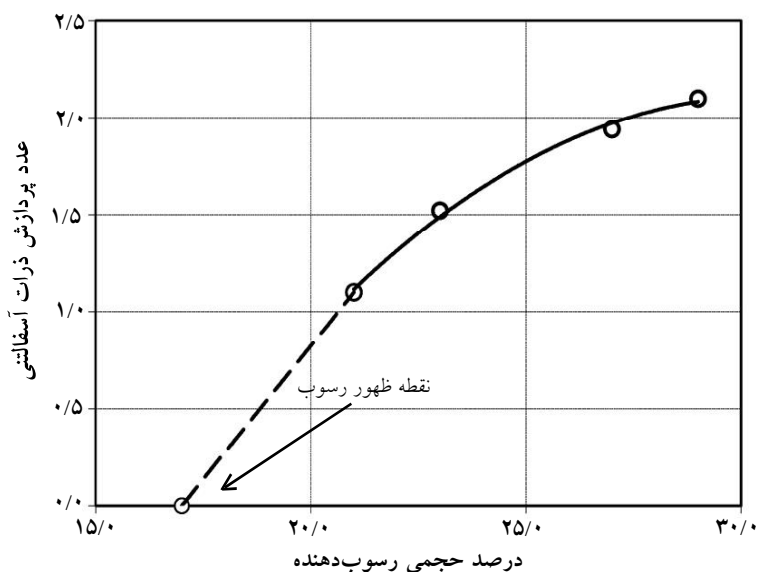
جدول ۳- عدد پردازشی ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت معمولی A

درصد حجمی رسوب‌دهنده (vol %)	عدد پردازش ذرات آسفالتنی
۲۲/۰	۰/۰۰
۲۴/۰	۰/۴۱
۲۶/۰	۱/۱۷

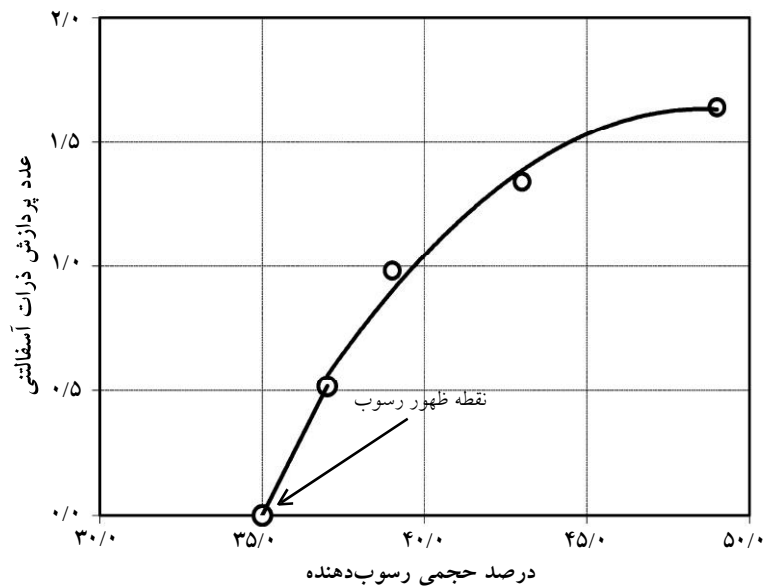
جدول ۴- عدد پردازشی ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت B

درصد حجمی رسوب‌دهنده (vol %)	عدد پردازش ذرات آسفالتنی
۱۷/۰ نقطه ظهور رسوب	۰/۰۰
۲۱/۰	۱/۱۰
۲۳/۰	۱/۵۲
۲۷/۰	۱/۹۴
۲۹/۰	۲/۱۰

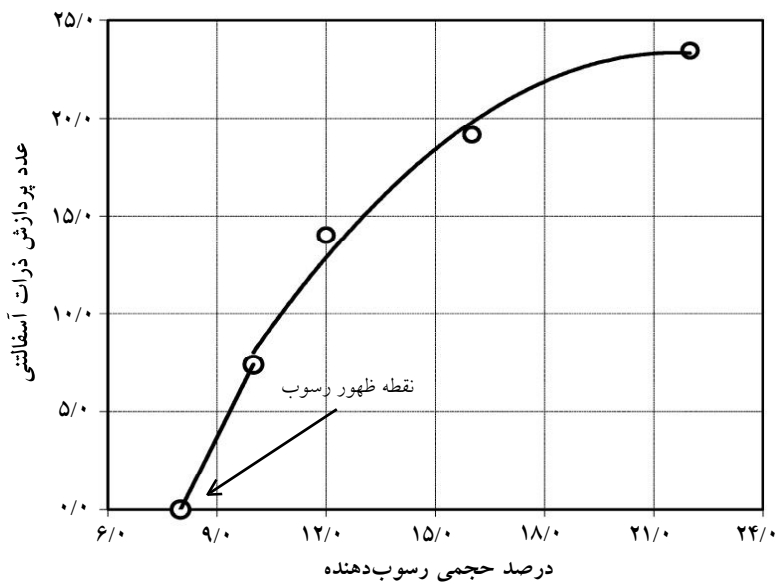
مطابق با نتایج این جدول، اعداد محاسبه شده علاوه بر تأیید روش مشاهده میکروسکوپی، با نتایج حاصل از روش پردازش تصویر نیز (جدول ۲) تطابق قابل قبولی دارند. به منظور اعتبار بخشی به روش جدید پردازش تصویر در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن برای محدوده وسیعی از نفت‌ها با درجه API متفاوت، این فرایند برای ۳ نفت دیگر انتخابی یعنی B، C و D با مشخصات گفته شده در جدول ۱،



شکل ۱۱- عدد پردازش ذرات آسفالتنی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت B



شکل ۱۲- عدد پردازش ذرات آسفالتی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت سبک C



شکل ۱۳- عدد پردازش ذرات آسفالتی (N) در مقابل درصد حجمی رسوب‌دهنده در نفت D

مورد پردازش بایستی در تمامی تصویرها برابر و تا حد ممکن بزرگتر باشد تا دقت اندازه‌گیری بیشتر شود.

### ارزیابی فرایند پردازش تصویر در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن

با انجام آزمایش‌ها و نتایج آن، قابلیت‌های روش جدید پردازش تصویر در مقایسه با روش‌های قبلی به صورت زیر است:

۱. ابزارهای مورد نیاز آزمایشگاهی و پردازش تصویر کاملاً

یکی از نکات مهم در ارزیابی یک روش جدید آزمایشگاهی، تعیین میزان تکرارپذیری آن در شرایط یکسان می‌باشد که در این مطالعه با تکرار آزمایش‌های فوق برای نفت سنگین D، نفت سبک C و نفت معمولی B، قابلیت تکرارپذیری روش برای تعیین نقطه ظهور رسوب آزمایش شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد.

لازم به توضیح است که در فرایند پردازش تصویر، رنگ پس‌زمینه مهم نیست و تفاوت رنگ ذرات به رنگ پس‌زمینه ملاک عمل قرار می‌گیرد. همچنین سطوح تصویر

برای یافتن نقطه ظهور رسوب آسفالتن، با درصد کمتری خطا نسبت به روش‌های موجود قدیمی معرفی شد. تجزیه و تحلیل نمودارهای حاصل از این روش، درک بهتری از رفتار و سازوکار رشد رسوبات آسفالتنی را در برابر افزایش عامل رسوب‌دهنده و یا سایر تغییرات ترمودینامیکی سیال ارائه می‌دهد، به طوری که با در دست داشتن اطلاعات آزمایشگاهی بیشتر از سایر نفت‌های آسفالتنی و توسعه روش پردازش تصویر، می‌توان به رابطه تجربی برای بیان الگوی رشد رسوبات و حتی تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن دست یافت. نکته مهم اینکه دقت بالا و چشمگیر روش پردازش تصویر در مقایسه با سایر روش‌ها، در مطالعاتی که تفاوت نقاط ظهور رسوب چندان زیاد نیست و این تفاوتها بایستی با دقت اندازه‌گیری شوند، کارایی خوبی دارد.

آنچه مسلم است روش ارائه شده در این مقاله کاملاً جدید بوده و توانایی تکمیل و تعمیم آن به تمامی نفت‌های زنده سیال مخزن را داراست.

#### علائم و نشانه‌ها

API: درجه سبکی نفت

CII: شاخص ناپایداری کلوئیدهای آسفالتنی

SARA: تست سارا

$W_1$ : ضریب وزنی

$i$ : شماره طیف

$A_T$ : مساحت کل صفحه بررسی شده

$A_i$ : مساحت طیف  $i$  ام در همان صفحه

$N$ : عدد پردازشی ذرات آسفالتنی

موجود، متداول و در دسترس می‌باشد.

۲. از آنجا که فرایند پردازش تصویر بر مبنای عکس‌های گرفته شده در تعداد تیتراسیون تنها حدود ۴ یا ۵ مرحله پس از عبور از نقطه ظهور رسوب آسفالتن می‌باشد، لذا نه تنها زمان کل فرایند آزمایش و تیتراسیون کاهش می‌یابد بلکه زمان کوتاه مراحل و آزمایش‌ها سبب کاهش انواع خطاهای آزمایشی خواهد شد.

۳. روش پردازش تصویر بر خلاف سایر روش‌های موجود در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن برای محدوده وسیعی از نفت‌ها با درجات API مختلف کارایی دارد.

۴. تکرارپذیری روش جدید در تعیین نقطه ظهور رسوب آسفالتن از نکات مهمی است که نه تنها برای مطالعات تحقیقاتی و دانشگاهی مناسب است بلکه تأییدی در زمینه درستی اعداد اندازه‌گیری شده می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری

مطالعه در زمینه سازوکارهای رشد کلوئیدهای آسفالتنی از موارد مهم در زمینه مطالعه رسوب آسفالتن بوده که این‌گونه مطالعات رشد و سینتیکی رسوب، به دلیل در اختیار نبودن ابزارهای آزمایشگاهی و یا ابزارهای تحلیل‌کننده رشد رسوب، کمتر مورد توجه بوده است. روش ارائه شده، پردازش تصویر نه تنها روشی کارآمد برای تعیین نقطه شروع رسوب‌گذاری بوده بلکه الگویی را در زمینه نحوه رشد کلوئیدهای آسفالتنی پس از تشکیل رسوب در اختیار می‌گذارد که با تکمیل آن، ابزار تحلیلی خوبی در این گونه مطالعات ایجاد خواهد کرد.

در این تحقیق با کمک ابزارهای فوق، روش جدیدی

#### منابع

- [1] Leontaritis K.J. & Mansoori G.A., "Asphaltene flocculation during oil production and processing: A thermodynamic-colloidal model", SPE Paper 16258, SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, San Antonio, TX, 4-6 February 1989.
- [2] Leonarities K.J., Amaeflue J.O. & Charles R.E., "A systematic approach for the prevention and treatment of formation damage caused by asphaltene deposition", SPE 5376, Texas, 13-16 August 1994.

- [3] Wang J.X. & Buckley J.S., "Anticipating asphaltene problems offshore-A practical approach", SPE 15254, Texas, 5–8 May 2003.
- [4] Pfeifeer J.Ph. & Saal R.N.J., "Asphaltic bitumen as colliod system", J. of Phys. Chem., Vol. 44, pp. 139-49, 1995.
- [5] Rassamdana H., Dabir B., Nematy M., Farhani M. & Sahimi M., "Asphalt flocculation and deposition: I. The onset of precipitation", AIChEJ, Vol. 42(1), pp. 10, 1996.
- [6] Mousavi-Dehghani S.A., Riazi M.R., Vafaie-Sefti M. & Mansoori G.A., "An analysis of methods for determination of onsets of asphaltene phase separations", J. Petrol. Sci. Eng., Vol. 42, pp. 145–156, 2004.
- [7] Gholoum E.F., Oskui G.P. & Salman M., "Investigation of asphaltene onset conditions for kuwaiti reservoirs", SPE paper 81571, Presented at the SPE 13th Middle East Oil Show Conference in Bahrain 5-8, April 2003.
- [8] Yen A., Yin Y.R., "Evaluating asphaltene inhibitors: laboratory tests and field studies", SPE 5376, Texas, 13–18 February 2001.
- [9] Al-Sahhaf T.A., Fahim M.A. & Elkilani A.S., "Retardation of asphaltene precipitation by addition of toluene, resins, deasphalted oil and surfactants", Fluid Phase Equilibria, pp. 194–197, 1045–1057, 2002.
- [10] Rogel E., León O. & Espidel J., "Asphaltene stability in crude oils", SPE 53998, April 1999.
- [11] Maham Y., Chodakowski M.G., Zhang X. & J.M. Shaw, "Asphaltene phase behavior: prediction at a crossroads", Fluid Phase Equilibria, pp. 228–229, 21–26, 2005.
- [12] Vafaie-Sefti M., Mousavi-Dehghani S.A. & Mohammad-Zadeh M., "A simple model for asphaltene deposition in petroleum mixtures", Fluid Phase Equilibria, Vol. 206, pp. 1–11, 2003.
- [13] Correr S., "Living and dead theories for asphaltene stability", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 267, pp. 178–193, 2003.
- [14] Zekri A.Y., Shedid Sh.A. & Alkashef H., "A novel technique for treating asphaltene deposition using laser technology", SPE 70050, Texas, 15–16 May 2001.
- [15] Reubush S.D., *Effects of storage on the linear viscoelastic response of polymer-modified asphalt at intermediate to high temperatures*, Master of Science Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, November 1999.
- [16] Junior L.C.R., Ferreira M.S. & Ramos A.C.S., "Inhibition of asphaltene precipitation in Brazilian crude oils using new oil soluble amphiphiles", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 51, pp. 26–36, 2006.
- [17] Spiecker P.M., Gawrys K.L. & Kilpatrick P.K., "Aggregation and solubility behavior of asphaltenes and their subfractions", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 267, pp. 178–193, 2003.
- [18] Escobedo J. & Mansoori G.A., "Theory of viscosity as a criterion for determination of onset of asphaltene flocculation", SPE 28729, Texas, 20–26 August 1996.