

# توسعه روش های مناسب و کاربردی کنترل و پایش تشکیل واکس به منظور بهبود انتقال نفت خام در خطوط لوله

علی اصغر پاسبان، سرود زاهدی عبقری\*، علی اکبر میران بیگی

پژوهشکده توسعه فناوری های پالایش و فراورش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

**چکیده:** یکی از ویژگی های بسیار با اهمیت که در انتقال نفت خام، نفت کوره و گازوییل از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، نقطه ظهور واکس می باشد. در این کار برای تعیین این ویژگی روش های نوآورانه متفاوتی بررسی شد و سرانجام ترکیبی از روش های تجربی و مدل سازی مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله اول، با آزمایش های میکروسکوپی نقطه ظهور واکس در نمونه های نفت خام و برش های سنگین تعیین شد. سپس با استفاده از روش ویسکومتری این نقطه ها اندازه گیری و اثر آب، رسوب و وجود بلورهای واکس در این روش بررسی شد. این مطالعه ها نشان داد که در نقطه ظهور واکس، تغییر های بسیار زیادی در مقدار گرانیوی رخ خواهد داد. با توجه به سادگی، هزینه پایین و دقت کافی این آزمایش ها، این روش در تعیین نقطه ظهور واکس می تواند کاربرد بسیار زیادی در مناطق عملیاتی داشته باشد. افزون بر این نشان داده شد که ظهور واکس می تواند با تغییر وزن ویژه، نقطه ریزش، واکس و مقدار آسفالتین همراه باشد. همچنین برای تخمین ارتباط مناسب بین متغیر های ورودی و متغیر دمای ظهور واکس از روش های مدل سازی متفاوت در این مطالعه استفاده شد. این روش ها شامل، روش الگوریتم شبکه عصبی، روش الگوریتم منطق فازی و روش مدل های برازش می باشد. بررسی مدل های توسعه داده شده و آزمون آماری آن ها نشان داد که بهترین روش برای توسعه مدل مناسب برای تخمین این ویژگی استفاده از مدل برازش می باشد. نتیجه های برآمده از این مدل نشان داد که بیشترین تأثیر عامل منفرد در تخمین ویژگی دمای ظهور واکس مربوط به میزان غلظت ترکیب های آسفالتین در نمونه و مهم ترین تأثیر درونی نیز مربوط به درون وزن ویژه و نقطه ریزش نمونه های نفت خام می باشد.

**کلمات کلیدی:** نفت خام، نقطه ظهور واکس، روش ویسکومتری، شبکه عصبی، مدل ANFIS، مدل برازش.

**KEYWORDS:** Crude oil, Wax appearance temperature, Viscometry method, Artificial neural network model, ANFIS model, Regression model.

## مقدمه

واکس (WAT) یا Wax Appearance Temperature (WPP) یا Wax Precipitation Point (WPP) در صنایع نفت

به دمایی که در آن اولین بلور واکس در هنگام برودت نمونه نفت خام و فراورده های سنگین نفتی تشکیل می شود، نقطه ظهور

\*E-mail: zahedis@ripi.ir

\* عهده دار مکاتب

روش (DSC) Differential scanning calorimeter برای اندازه‌گیری WAT استفاده نمود [۱۰]. در این راستا، در نمونه‌های گوناگون پژوهشی این روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که برای تعیین تجربی تأثیر ساختار ماده مورد نظر در میزان WAT انجام شده‌اند [۱۱، ۱۲].

وابستگی مقدار گرانیوی به تشکیل بلورهای واکس از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین مقدار WAT می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. به‌علت ارزان بودن روش ویسکومتری نسبت به سایر روش‌ها و در دسترس بودن امکانات آن در آزمایشگاه‌های گوناگون نفتی، این روش، بسیار کاربردی در صنایع مرتبط نفتی بوده و به منظور تعیین تأثیر تغییر ویژگی‌های برش‌های نفتی و نفت خام بر مقدار WAT، در این پژوهش از این روش استفاده شد. در حقیقت از این روش برای اندازه‌گیری WAT برای چند نفت خام تثبیت شده ایران استفاده شده و این روش برای نفت خام‌هایی با ساختارهای نفت ایران صحت‌گذاری شده است. در این پژوهش به منظور افزایش دقت برای تعیین نقطه WAT به روش ویسکومتری بر روی نمونه‌های تیره، نخست با استفاده از روش اندازه‌گیری استاندارد نقطه ابری [۱۸]، بر روی نمونه‌های شفاف گازوئیل، چگونگی تعیین نقطه WAT در منحنی تغییر گرانیوی بر حسب دما [۲۲] مشخص شده و در ادامه با استفاده از این روش نقطه ظهور واکس در نفت‌های خام و نمونه‌های تیره اندازه‌گیری و درستی آن بررسی شده است. شایان ذکر است در زمینه اهمیت تعیین نقطه WAT می‌توان گفت تعیین این نقطه در مقایسه با سایر پارامترها و مشخصات کیفی ارزیابی نفت خام از اهمیت ویژه‌ای خصوصاً در مناطق عملیاتی برخوردار است بطوری‌که امروزه به عنوان یکی از الزامات اساسی در گزارش مشخصه‌های عمومی نفت‌های خام صادراتی و خوراک ورودی به پالایشگاه‌های درونی و خارجی قرار گرفته است [۱۰، ۱۱]. اهمیت تعیین دقیق این پارامتر فیزیکوشیمیایی به چند عامل اقتصادی و فنی بر می‌گردد. با کنترل و تعیین دقیق این نقطه می‌توان مانع گرفتگی خطوط انتقال نفت خام از مبدا تا مقصد شد [۱۲]. افزون بر این، اطلاعات بهتری را در اختیار مهندسان کنترل فرایند قرار داد تا در مصرف انرژی صرفه جویی شود و خسارت ناشی از انجماد سیال به ویژه در مناطق سردسیر کشور با اتخاذ برنامه‌هایی برای فصول سرد سال کاهش یابد. همه تدبیرهای صورت گرفته می‌تواند سرانجام بر چرخه اقتصاد تولید و مصرف سوخت تأثیر به‌سزایی داشته باشد [۹]. افزون بر این، تاکنون فعالیت‌های انجام شده در پژوهش‌ها به‌طور عمده بر تحلیل تجربی و آزمایشگاهی در رابطه با تعیین مقدار WAT در برش‌های نفتی و نفت خام بوده است و استخراج

تشکیل بلور واکس سبب مشکل‌های گسترده‌ای در ارتباط با فرآورش نفت خام و تصفیه فراورده‌های سنگین نفتی مانند نفت کوره، گازوئیل و برش‌های روغنی می‌شود. از آن جمله می‌توان به ته نشینی واکس در مخزن‌های ذخیره، لوله‌های انتقال و تغییر در ویژگی‌های رئولوژیکی فراورده‌ها اشاره کرد [۲، ۳]. یکی از موردهایی که در رویه تعیین مقدار WAT بسیار مؤثر می‌باشد، تأثیرپذیری گرانیوی از این ویژگی می‌باشد. در دمای بالاتر از نقطه WAT گرانیوی نفت خام به تنش برشی وابسته نبوده و ویژگی‌های رئولوژیکی مایع نزدیک به ویژگی‌های سیالات نیوتنی فرض می‌شود ولی با تشکیل بلور واکس در نفت خام رفتار رئولوژیکی مایع، بسیار شبیه سیالات غیر نیوتنی خواهد بود [۴، ۵].

وقتی که نفت خام یا یک برش نفتی سرد می‌شود هیچگاه مانند اجسام خالص در یک دمای مشخص، از حالت مایع به حالت جامد تغییر فاز نمی‌دهد. در فرایند کاهش دما نخست، در یک دمای مشخص اولین بلور واکس تشکیل می‌شود که این بلور در نمونه‌های شفاف نفتی با چشم قابل دیدن می‌باشد. به این دما نقطه ابری شدن می‌گویند [۶]. با افزایش برودت سیال بلور تشکیل شده رشد نموده و نمونه به حالت ژله‌ای تبدیل می‌شود. در این حالت گرانیوی سیال به مقدار چشمگیری افزایش پیدا کرده و با کاهش بیش‌تر دما حرکت برش نفتی به‌طور کامل متوقف شده و به حالت جامد می‌رسد. به دمایی که این پدیده فیزیکی در آن رخ می‌دهد، دما نقطه ریزش گفته می‌شود [۷]. اهمیت شناخت نقطه ظهور واکس از نظر بررسی رفتار فازی در فرایند استخراج و تولید نفت خام در مناطق دریایی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، زیرا گاهی دمای آب در کف دریا تا حدود ۵ درجه سلسیوس نیز کاهش می‌یابد و این مسئله در انتقال نفت خام از سکوی دریایی تا ساحل مشکل‌های زیادی را ایجاد خواهد نمود. بالا بودن مقدار ترکیب‌های پارافینی در نفت خام و برش‌های نفتی باعث افزایش نقطه ابری آن‌ها می‌شود. به‌طور عمده این مشکل در نفت خام واکسی اتفاق می‌افتد. ساختار مولکول واکس شامل پارافین‌های زنجیری با طول بلند می‌باشند که ساختار مولکول آنها می‌تواند از ۱۵ تا ۷۵ اتم کربن و حتی بیش‌تر تشکیل شده است [۸].

با استفاده از روش‌های گوناگونی می‌توان WAT را در نفت خام تثبیت شده (که گاز همراه و آب و نمک آن پس از استخراج از آن جدا شده و بیش‌ترین فشار بخار آن در دمای ۳۷/۸ درجه سلسیوس ۵۰ کیلو پاسگال باشد [۹]) اندازه‌گیری و گزارش نمود. در حال حاضر می‌توان از روش‌های مانند روش ترمومیکروسکوپی (Thermomicroscopy)، روش Cross polarization microscopy، روش Fluidity point و

نقطه ابری در واقع همان نقطه WAT می‌باشد [۹]. از این رو در این مطالعه از روش استاندارد اندازه‌گیری نقطه ابری به‌عنوان روش مبنا برای تحلیل تعیین نقطه WAT به‌روش ویسکومتری در هیدروکربن‌های تیره از جمله نفت خام استفاده شد.

بدین منظور، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نقطه ریزش مدل LT/RB-53100/M ساخت شرکت Linetronic Technologies از کشور سوئد این ویژگی بروی ۳ نمونه گازوئیل اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های آزمایش نقطه ابری و نقطه ریزش و سایر پارامترهای نمونه‌های گازوئیل مورد مطالعه در جدول ۱ گزارش شده است. پس از تعیین مشخصه‌های نمونه‌های انتخابی به‌روی آن‌ها آزمایش تغییر گرانی دینامیکی در دماهای گوناگون انجام شد، این کار با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری دانسیته و گرانی دینامیک مدل SVM 2000 ساخت شرکت Anton Paar از کشور اتریش و با دقت ک درجه سلسیوس انجام شد. با توجه به دمای ابری شدن هر نمونه برای تعیین نقطه ظهور واکس دمای دستگاه ۵ درجه سلسیوس بالاتر از نقطه ابری شدن تنظیم شد و آزمایش شروع شد. با هر درجه کاهش دما مقدار گرانی دینامیکی اندازه‌گیری شد. در ادامه آزمایش تا حد ممکن در زیر نقطه ابری شدن ادامه یافته است که نتیجه‌های برآمده در منحنی‌های شکل ۲ نشان داده شده است.

### آماده‌سازی نمونه‌های نفت خام

نمونه‌گیری نفت خام از خطوط لوله یا از مخازن باید با دقت بالا و در شرایط استاندارد گرفته شود. در این پژوهش نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از روش دستی و از مخازن نمونه‌گیری شدند [۲۱]. وجود آب و رسوبات در نمونه‌های نفت خام در تعیین WAT به روش ویسکومتری مشکل ساز بوده و می‌بایست مقدار آن به کم‌تر از ۰/۰۲۵ درصد حجمی کاهش یابد. دلیل اصلی این موضوع امکان جدایش آب از فاز نفتی با فرایند برودت و سرعت دورانی بالا در هنگام تعیین گرانی دینامیکی نفت خام توسط دستگاه می‌باشد. همچنین در فرایند سرد کردن نمونه در دمای صفر درجه سلسیوس امکان انجماد آب وجود دارد که باعث خطای بیش‌تر در انجام آزمایش خواهد شد. از این رو می‌بایست از نبود آب و رسوب در نمونه نفتی اطمینان شود. در این پژوهش برای جداسازی آب و رسوبات از روش سانتریفوژ استفاده شد [۱۶].

### روش اندازه‌گیری WAT نمونه نفت خام بروش ویسکومتری

به‌علت ماتریکس پیچیده و احتمال وجود انواع ترکیب‌های واکنشی با نقطه ذوب بالا در نفت خام مانند روش تعیین نقطه ریزش نفت خام

رابطه‌های در زمینه تعیین تأثیر تغییر ویژگی‌های گوناگون بر این ویژگی تاکنون صورت نگرفته است. یکی از ابزار مهم در تخمین تأثیر متغیرهای ورودی بر متغیر خروجی در فرایندها و پدیده‌های گوناگون، مدل‌سازی می‌باشد. نمونه‌هایی از کاربردهای این ابزار در فرایندهای شیمیایی و بررسی پدیده‌های رخ داده در این فرایندها می‌باشد. از جمله این موارد می‌توان به تأثیر متغیرهای ورودی در فرایند شکست کاتالیستی [۱۳]، تصفیه هیدروژنی [۱۴] و تبدیل کاتالیستی [۱۵] اشاره داشت. افزون بر موارد توسعه روش‌های تجربی آزمایشگاهی در این پژوهش، به منظور تعیین تأثیر تغییرات متغیرها و مشخصات پایه‌ای گوناگون تأثیر گذار برش‌های نفتی و نفت خام بر خاصیت مقدار WAT، مدل‌های گوناگون با استفاده از روش مدل‌سازی رگرسیون، شبکه عصبی و همچنین ANFIS انجام خواهد شد و از بهترین مدل برای تدوین تأثیر خواص گوناگون بر مقدار WAT استفاده خواهد شد.

### بخش تجربی

#### تجهیزات، معرف ها و مواد شیمیایی

- دستگاه اندازه‌گیری نقطه ریزش مدل LT/RB-53100/M ساخت شرکت Linetronic Technologies از کشور سوئد
- دستگاه اندازه‌گیری دانسیته و گرانی دینامیک مدل SVM 2000 ساخت شرکت Anton Paar از کشور اتریش
- میکرو پیپت ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میکرولیتری
- ترازوی الکتریکی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم ساخت شرکت میتلر
- محلول استاندارد مرجع نقطه ریزش ساخت شرکت ایونیک
- محلول استاندارد تعیین دانسیته و گرانی دینامیکی از شرکت اروپایی کون
- گازوئیل تجارتي پالایشگاه تهران
- گازوئیل تجارتي EuroIV پالایشگاه نفت اراک
- روغن پایه شماره ۱۰ از گروه پژوهش روغن پژوهشگاه صنعت نفت
- نفت خام صادراتی سروش، لاوان، سیری و بهرگان صادراتی

#### بررسی تعیین نقطه ظهور واکس بروش ویسکومتری

در مقایسه با نمونه‌های شفاف مانند گازوئیل سبک و سنگین و انواع روغن‌ها، تعیین WAT در نمونه‌های تیره مانند نفت خام و نفت کوره با چشم غیر مسلح امکان‌پذیر نبوده و نیاز به ابزار ویژه و گران دارد [۱۷]. انجام آزمایش تعیین نقطه ابری شدن در مواد سنگین و شفاف نفتی اجباری بوده و یکی از پارامترهای اصلی و اجباری در استانداردهای ملی و بین‌المللی برای گازوئیل و روغن بوده که می‌بایست اندازه‌گیری شود. مقدار برآمده از اندازه‌گیری

تاریخچه نمونه‌گیری، چگونگی حمل و نقل آن از محل نمونه‌گیری تا آزمایشگاه

جدول ۱- مجموعه داده‌های تجربی مورد استفاده

نام نمونه	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )	واکس (wt%)	نقطه ریزش (°C)	آسفالتین (wt %)	WAT (°C)
نفت خام ۱	۰/۹۲۱۲	۱/۴	-۴۲	۸/۴	۲
نفت خام ۲	۰/۹۰۳۰	۱/۲	-۵۱	۸/۲	۱۲
نفت خام ۳	۰/۹۳۷۱	۱/۵	-۳۳	۱۰/۱	۲۲
نفت خام ۴	۰/۸۹۵۶	۴/۲	-۵۱	۵/۶	۲۰
نفت خام ۵	۰/۹۲۹۷	۱/۴	-۴۸	۸/۱	۲۷
نفت خام ۶	۰/۹۳۴۰	۱/۱	-۴۵	۱	-۵
گازوئیل ۱	۰/۸۴۰۴	۴	-۱	۰/۰۵	۲
گازوئیل ۲	۰/۸۴۳۳	۷/۲	-۳	۰/۰۵	۰
گازوئیل ۳	۰/۸۳۴۸	۶/۴	-۲	۰/۰۵	-۱
نفت خام ۷	۰/۹۴۰۴	۴	-۳۰	۹/۴	۱
نفت خام ۸	۰/۸۹۳۳	۷/۲	-۳	۴/۵	۲۳
نفت خام ۹	۰/۸۳۴۸	۶/۴	-۱۹	۱/۱	۶/۴
نفت خام ۱۰	۰/۸۹۴۰	۶/۲	-۶	۳/۹۵	۹
نفت خام ۱۱	۰/۸۸۲۷	۵/۸	-۱۵	۲/۶۲	۷
نفت خام ۱۲	۰/۸۵۶۷	۴/۹	-۱۲	۰/۵	۹
نفت خام ۱۳	۰/۹۱۲۴	۶/۳	۳	۵/۹۷	۲۴
نفت خام ۱۴	۰/۸۷۶۳	-۳	-۲۴	۱/۱۳	-۱
نفت خام ۱۵	۰/۸۹۴۰	۶	-۱۵	۲/۵۶	۶
نفت خام ۱۶	۰/۹۱۵۷	۳	-۳۶	۶/۵۷	۳
نفت خام ۱۷	۰/۸۶۱۲	-۳	-۲۷	۰/۹۷	-۳
نفت خام ۱۸	۰/۸۶۰۴	-۴	-۳۳	۰/۶۲	-۴
نفت خام ۱۹	۰/۸۸۲۲	۳	-۲۱	۰/۵	۳
نفت خام ۲۰	۰/۸۵۷۳	-۲	-۳۰	۰/۶۸	-۲

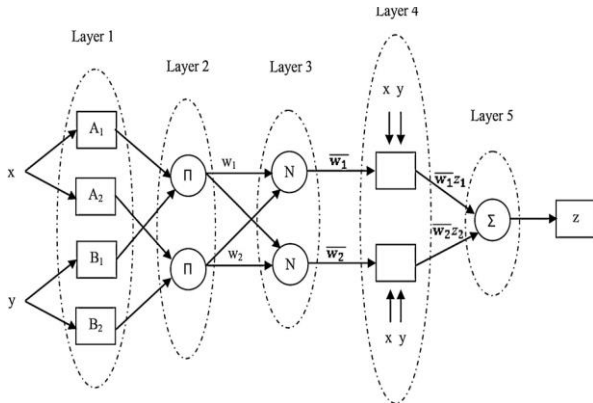
عمل هواگیری در درون سرنگ انجام شود. در این پژوهش از ۱۷ نمونه نفت خام برای بررسی WAT استفاده شد که برخی از ویژگی‌های مهم آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین نتیجه‌های برآمده از انجام آزمایش بررسی تغییر گرانی و برحسب دما برای تعیین WAT بر روی نفت‌های خام یاد شده در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.

با استفاده از روش استاندارد ASTM D2500 [۱۸] نقطه ابری شدن و با استفاده از روش ASTM D97 [۱۹] نقطه ریزش گازوئیل‌های مورد استفاده در این پژوهش اندازه‌گیری شد.

بلورهای واکس در نفت خام و برش‌های نفتی وقتی تشکیل می‌شوند همیشه سفید رنگ می‌باشند. به همین دلیل در نمونه‌های روشن مانند گازوئیل، با کاهش دما، امکان دیدن تشکیل اولین بلور واکس با چشم غیرمسلح در لوله آزمایش هست. با اندازه‌گیری تشکیل بلور واکس بر روی نمونه‌های مورد مطالعه، در این پژوهش دوباره از روش ویسکومتری [۱۹] برای اندازه‌گیری WAT در آن‌ها استفاده شد تا بتوان ابتدا صحت روش گرانی را از این طریق بررسی نمود. نتیجه‌های آزمون ویسکومتری نشان داد که در زمان تشکیل بلور واکس، مقدار گرانی افزایش دارد و دمای افزایش مقدار گرانی با دمای نقطه ریزش واکس تعیین شده با استفاده از روش استاندارد مطابقت داشته است. این نقطه‌ها در شکل ۱ برای دو نمونه گازوئیل مورد مطالعه با علامت ستاره نشان داده شده است. در نمونه‌های گازوئیل پس از تشکیل اولین بلور واکس، هنگامی که دمای نمونه کاهش می‌یابد سرعت تشکیل بلورهای واکس زیاد شده و نمونه خیلی زود منجمد می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۱ آمده است فاصله دمای نقطه ابری شدن تا نقطه ریزش گازوئیل‌های مورد مطالعه کمینه ۳ و بیشینه ۶ درجه سلسیوس می‌باشد. این پدیده نشان می‌دهد که فاصله دمایی تشکیل اولین بلور واکس در گازوئیل تا کامل شدن شبکه بلور و جامد شدن آن اختلاف دما کم بوده و انجماد گازوئیل خیلی تند اتفاق افتاده است.

از آنجاکه در نمونه‌های تیره نمی‌توان بلور واکس را با چشم غیر مسلح دید در این پژوهش روش ویسکومتری برای این منظور مورد بررسی قرار گرفت. از آنجاکه نفت خام نسبت به گازوئیل از ماتریکس بسیار پیچیده‌تری برخوردار بوده و افزون بر ترکیب‌های سبک، مقداری آسفالتین و رزین نیز در آن موجود بوده که این ترکیب‌ها در فرایند بلوری شدن ترکیب‌های واکسی در نفت خام تأثیرگذار می‌باشند از این رو برای استفاده از روش ویسکومتری می‌بایست نخست نقطه ریزش نفت خام مورد مطالعه اندازه‌گیری شود که مقدار آن برای سه نمونه نفت خام

و شیوه نگه داری نمونه در ظرف نمونه‌گیر، در اندازه‌گیری WAT دارای اهمیت زیادی می‌باشد [۱۰]. در صورتی که دمای نمونه از نقطه WAT پایین تر باشد مقداری از واکس‌های سنگین رسوب و به جداره ظرف نمونه‌گیر چسبیده می‌شود. این پدیده موجب خطای زیادی در نتیجه آزمایش خواهد شد از این رو در این پژوهش، نمونه‌های نفت خام در درون یک ظرف فلزی تا دمای ۶۰ درجه سلسیوس گرم و سپس به مدت ۱۵ دقیقه هم زده شده است. این کار باعث می‌شود بلورهای واکسی که شاید در نمونه از قبل تشکیل شود در نفت خام حل شود. به برای حفظ ترکیب‌های سبک نفتی درون نمونه، پس از کاهش دمای نفت خام به کم‌تر از ۴۰ درجه سلسیوس، درب ظرف باز شد و برای هر نفت خام، حدود ۵ میلی‌لیتر از نمونه با استفاده از یک سرنگ تمیز به دستگاه تزریق شد. پیش از تزریق نمونه به دستگاه می‌بایست



شکل ۱- ساختار ANFIS

$$\text{Hyperbolic Tangent Sigmoid} = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$$

$$\text{Log - Sigmoid} = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$$\text{Linear} = x$$

به منظور آسان کردن فرایند آموزش شبکه عصبی و در نظر گرفتن وزن و اهمیت تمامی متغیرها از نرمال کردن این متغیرها استفاده می‌شود. در این شرایط نرمال کردن در محدوده ۰/۱ الی ۰/۹ صورت می‌گیرد. به همین منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$A_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} + 0.1$$

که در آن  $\min(X_i)$  و  $\max(X_i)$  مقادیرهای کمینه و بیشینه متغیر  $X_i$  می‌باشند [۲۳].

### مدل ترکیبی شبکه عصبی و منطق فازی

فناوری منطق فازی (Neuro-Fuzzy) از ترکیب دو الگوریتم شبکه عصبی و منطق فازی برآمده است. ترکیب ظرفیت بالای آموزش دیدن شبکه عصبی با دانشی که در منطق فازی دیده می‌شود، فوایدی است که از ترکیب هر دو این الگوریتم‌ها به دست می‌آید. الگوریتم ANFIS از مجموعه الگوریتم‌های منطق فازی براساس سامانه نوع استنتاج فازی از نوع Takagi-Sugeno و براساس تولید یک خروجی عمل می‌نماید. در شکل ۱ ساختار کلی برای عملکرد یک نوع از الگوریتم ترکیبی شبکه عصبی - منطق فازی دیده می‌شود.

اولین قدم در توسعه مدل‌های ANFIS، تعیین تعداد و نوع تابع‌های عضویت (Membership) می‌باشد. بیش‌ترین تابع‌های مورد استفاده شامل Triangular، Gaussian، Generalized bell و Trapezoidal می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

مورد مطالعه در این پژوهش با استفاده از روش استاندارد اندازه گیری شد که نتیجه‌ها در جدول ۱ آمده است. تعیین نقطه ریزش کمک زیادی در انتخاب دمای مبنا برای تعیین گرانیروی می‌نماید و پیش بینی می‌شود در نفت خام دمای تشکیل واکس حدود ۲۰ درجه سلسیوس بالاتر از نقطه ریزش می‌باشد [۱۰]. برای اطمینان بیش‌تر در این مطالعه دمای مبنا در حدود ۳۰ درجه بالاتر از نقطه ریزش نفت خام انتخاب شده است.

به منظور صحت سنجی روش ویسکومتری از میکروسکوپ مجهز به حمام سرد کننده استفاده شد. به همین منظور انجام این آزمایش‌ها، نخست نمونه مورد نظر سانتیفریوژ شده تا ناخالصی‌های موجود در آن جدا شوند. در هنگام جداسازی نفت خام و برش‌های نفتی از آب و ناخالصی‌ها در سانتیفریوژ دما ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت سانتیفریوژ ۲۰۰۰ دور در دقیقه بوده است.

سپس به منظور یکنواخت شدن نمونه و همچنین ذوب شدن واکسی که امکان دارد در محلول رسوب کرده باشد، دمای نمونه تا حدود ۴۰ درجه سلسیوس بالاتر از دمای WAT بالا برده شد. پس از آن یک قطره از نمونه را در زیر میکروسکوپ قرار داده در هر دقیقه با میزان سرعت مشخص دما را کاهش داده پس از رسیدن به دمای ۳۰ درجه سلسیوس بالاتر از نقطه ریزش نمونه، همانند روش ویسکومتری و به ازای هر یک درجه کاهش دما، وضعیت ظاهری نمونه زیر میکروسکوپ بررسی می‌شود.

## بخش نظری

### مدل سازی

به منظور تخمین هر چه بهتر تأثیر تغییرات متغیرهای با اهمیت شامل دانسیته، واکس، نقطه ریزش، آسفالتین در زمان تشکیل بلور واکس در این پژوهش مدل سازی صورت گرفته است. به همین منظور سه الگوریتم گوناگون شامل شبکه عصبی، الگوریتم‌های ترکیبی شبکه عصبی و منطق فازی و از مدل‌های چند جمله‌ای استفاده شد که در ادامه، توضیح داده شده است.

### مدل شبکه عصبی (ANN)

مدل‌های توسعه داده شده بر این اساس شامل مجموعه از واحدهای به هم مرتبط به نام یاخته عصبی مصنوعی می‌باشد. این واحدها توانایی تغییر در اعداد ورودی را دارند. برای تخمین رفتار فرایندها از تابع‌های خطی و غیر خطی گوناگونی در این واحدها می‌شود، از جمله این روابط می‌توان به نمونه‌های زیر اشاره نمود:

مقدارهای پارامترهای آماری تأثیر بسیار زیادی در تعیین ساختار مدل‌های برگرفته شده از شبکه عصبی و ANFIS می‌باشد. در این رابطه برای تعیین بهترین ساختار مدل ANFIS تعداد زیادی از توابع Membership مورد استفاده قرار گرفت و بهترین آن‌ها براساس مقدارهای پارامترهای آماری تعیین شدند. براین اساس، بهترین چیدمان ترکیبی از دو تابع گاوسین و سه تابع Linguistic می‌باشد. مقدارهای پارامترهای آماری برای مدل‌های خطی، شبکه عصبی و ANN در جدول ۳ نمایش داده شده است.

### نتیجه‌ها و بحث

همانگونه که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است، با کاهش دما سرعت افزایش گرانیوی تغییر محسوس می‌نماید. این تغییر منحنی را به دو قسمت با شیب متفاوت در قبیبش و پس از WAT جدا می‌کند. این نقطه در مورد گازوییل‌های مورد آزمایش به‌طور کامل مشخص است. ولی در مورد نفت خام با توجه به پیچیدگی آن این نقطه به سادگی قابل تشخیص نمی‌باشد.

برای تعیین نقطه WAT می‌توان از برازش دو منحنی بر نقطه‌های آزمایشگاهی استفاده نمود. برای این منظور دو خط گوناگون بر نقطه‌های قسمت بالایی و پایینی تطبیق داده می‌شود. بنابراین با انتخاب هر نقطه از نقطه‌های آزمایشگاهی، منحنی به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم می‌شود. نقطه‌های موجود در هر قسمت با یک خط تقریب زده می‌شود به گونه‌ای که کم‌ترین مجموع مربعات خطا به دست‌آید. این کار برای همه نقطه‌های میانی منحنی (به غیر از نقطه اول و آخر) انجام می‌شود. سرانجام نقطه‌ای که مجموع کم‌ترین مجموع مربعات خطا برای هر دو خط قسمت بالا و پایین کم‌تر باشد، به عنوان WAT انتخاب می‌شود.

نتیجه‌های تعیین نقطه WAT برای نمونه‌های گازوییل و نفت خام به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۲ و ۳ ارایه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، این موضوع برای گازوییل‌ها و نفت‌های خام مورد بررسی به درستی با نتیجه‌های آزمایش‌ها ارایه شده در جدول ۱ منطبق می‌باشد.

برای سه نمونه نفت خام نتیجه‌های آزمایش‌ها نیز همانند نمونه‌های گازوییل ترسیم شده است. (شکل ۳) و نقطه WAT در شکل‌های مربوط به نفت خام از Crude oil-1 تا Crude oil-3 مشخص شده است.

$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}), 0)$$

$$\text{Gaussian}(x; \sigma, c) = \exp(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2})$$

$$\begin{aligned} \text{trapezoid}(x; a, b, c, d) \\ = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}), 0) \end{aligned}$$

### مدل خطی

یکی دیگر از مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش، مدل‌های خطی چند جمله‌ای می‌باشد که شکل کلی این چند جمله‌ای به صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$\begin{aligned} Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \\ + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \end{aligned}$$

برای سنجش میزان دقت هریک از مدل‌های معرفی شده در بالا و میزان توانایی آنها در پیش بینی تأثیر متغیرهای گوناگون در مقدار نقطه آغاز تشکیل واکس، از پارامترهای آماری شامل  $R^2$ ، RMSE، MRE استفاده می‌شود. برای محاسبه مقدارهای این پارامترها رابطه‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{exp i} - y_{cal i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{exp i} - y_{ave exp})^2}$$

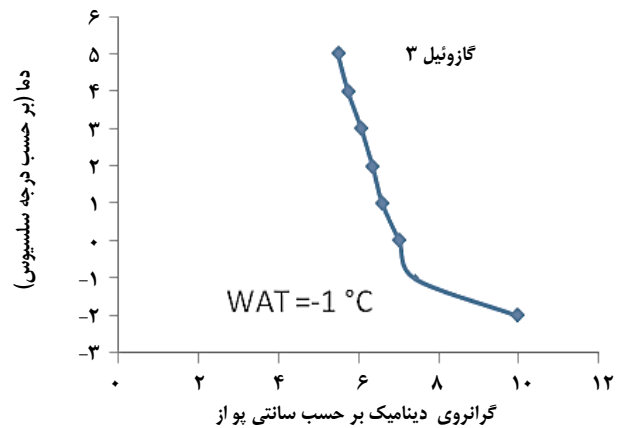
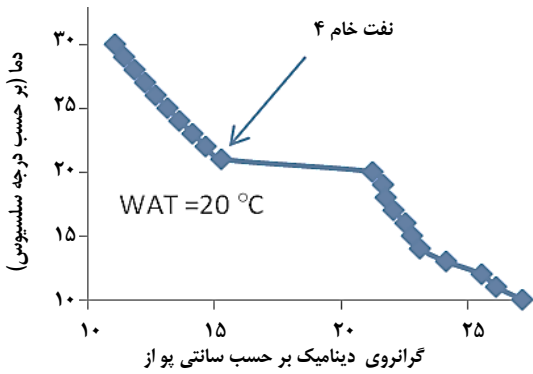
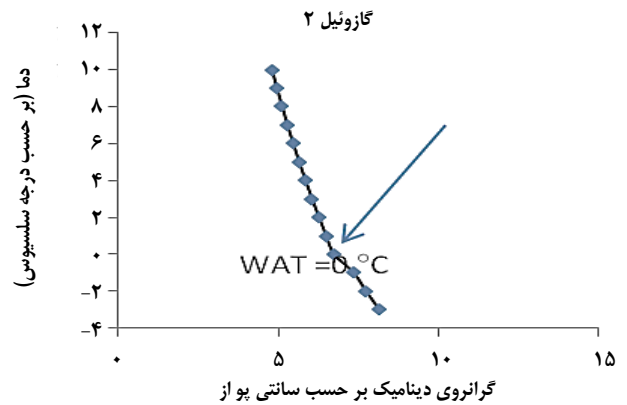
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{exp i} - y_{cal i})^2}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{exp i} - y_{cal i}}{y_{exp i}} \right| * 100$$

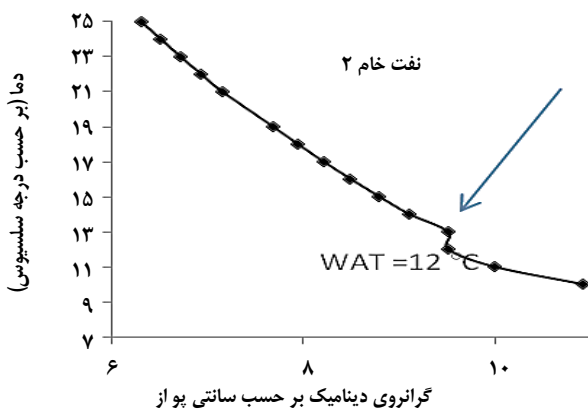
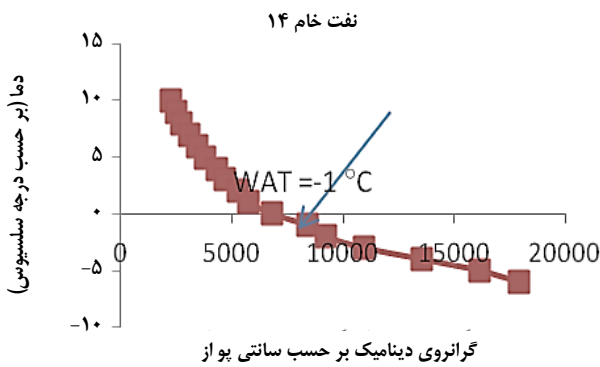
در این رابطه‌ها RMSE نشان دهنده Root Mean Square Error می‌باشد که نشان دهنده اختلاف بین مقدار تخمین زده شده به وسیله مدل و مقدار سنجش شده آزمایشگاهی می‌باشد.  $y_{exp}$  و  $y_{cal}$  مقدارهای آزمایشگاهی و مقدارهای پیش بینی شده توسط مدل می‌باشند. افزون بر این  $y_{ave exp}$  مقدار میانگین مقدارهای آزمایشگاهی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. همچنین MRE نشان دهنده Mean Relative Error می‌باشد. بیان کننده نسبت خطای مقدار آزمایشگاهی به مقدار آزمایشگاهی می‌باشد. براساس تعریف‌های انجام شده، مقدار مطلوب  $R^2$ ، RMSE و MRE به ترتیب برابر با ۱، ۰ و ۰ می‌باشد [۱۷].

جدول ۲- نتیجه‌های WAT بروش میکروسکوپی و مقایسه با روش ویسکومتری

Crude oil -2	Crude oil -14	Crude oil -4	نام ویژگی
+۲۰	-۱	+۱۲	دمای ظهور واکس با استفاده از میکروسکوپ (°C)
+۲۰	+۱	+۱۱	دمای ظهور واکس با استفاده روش ویسکومتری (°C)
۲	۲	۲	درصد مجاز برای تجدیدپذیری (°C)
۰	۲	۱	اختلاف در دو روش (°C)



شکل ۲- منحنی‌های مربوط به گازوییل‌های مورد مطالعه



شکل ۳- منحنی‌های مربوط به نفت خام‌های مورد مطالعه

### بررسی درستی نتیجه‌های WAT با روش ویسکومتری برای نمونه‌های

#### نفت خام

#### بررسی درستی نتیجه‌های WAT با روش ویسکومتری برای نمونه‌های نفت خام

مطابق شکل ۵ (الف) پیش از نقطه ظهور واکس، نمونه‌ها به‌طور کامل تیره و یکنواخت می‌باشند و هنگامی که دمای نمونه به مقدار کافی کاهش پیدا نمود در یک لحظه بلورهای سفید رنگی زیر میکروسکوپ دیده شد که این بلورهای سفید رنگ مربوط به واکس‌ها می‌باشند که برخلاف نمونه‌های شفاف مانند گازوئیل در نفت خام با چشم غیر مسلح قابل دیدن نمی‌باشند.

دماهای که در این آزمایش‌ها به‌دست آمد در جدول ۲ آمده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود با توجه به دقتی تر بودن روش میکروسکوپی، اگر مبنای قضاوت، نتیجه‌های حاصل از روش میکروسکوپی در نظر گرفته شود اختلاف نتیجه‌های ما بین دو روش در بازه استاندارد ASTM D 2500 [۱۸] می‌باشد که نتیجه‌های قابل قبولی بوده است.

جدول ۳- مقادارهای پارامترهای آماری برای مدل‌های مورد مطالعه

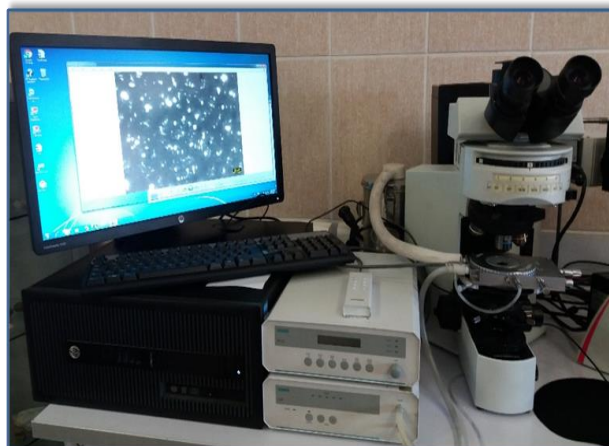
	Polynomial	ANN model	ANFIS
R-Squared	۰/۹۷۷	۰/۸۵۸	۰/۸۸۴
RMSE	۰/۹۱۶	۲/۲۹	۲/۰۷۴
MRE	۱۴/۳۴	۵۴/۷	۴۵/۴۵
R2 adj	۰/۹۷۷	۰/۸۵۸۰	۰/۸۸۴

جدول ۴- مقادارهای محاسبه شده برای هر یک از ضرایب مربوط به مدل ارایه شده در رابطه (۱)

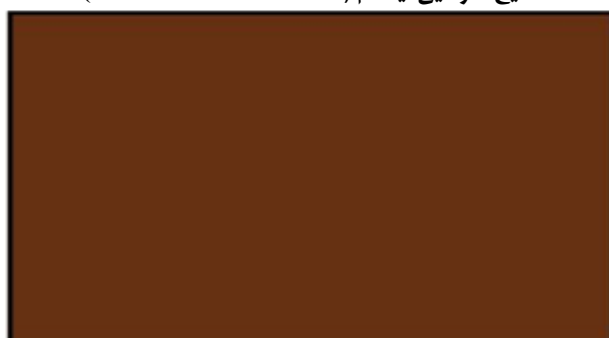
عبارت	مقدار ضریب	ردیف
مقدار ثابت	-۷۹۷/۹۷۹	۱
X1(دانسیته)	۱۰۷/۱۴۶	۲
X2(آسفالتین)	۱۰/۴۹۷	۳
X3(نقطه ریزش)	-۱۴/۶۷۹	۴
X4(واکس)	۲۰۲/۹۲۴	۵
X1*X2	-۵۸/۱۶۷	۶
X1*X3	۱۷/۶۵۰	۷
X1*X4	-۲۴۱/۴۹۳	۸
X2*X3	-۰/۳۵۲	۹
X2*X4	۵/۲۱۹	۱۰
X1 <sup>2</sup>	۱۰۰۶/۲۰۳	۱۱
X2 <sup>2</sup>	۱/۷۳۷	۱۲
X3 <sup>2</sup>	۰/۰۰۰۳۹	۱۳

همان‌گونه که دیده می‌شود، مدل خطی دارای بیشترین میزان دقت بوده و بعد از آن مدل توسعه داده شده براساس ترکیب شبکه عصبی - منطق فازی بالاترین میزان دقت را دارا می‌باشد. برای بررسی و توسعه مدل مناسب برای تعیین میزان وابستگی متغیر WAT به سایر متغیرها مشتمل بر مقدار WAT به سایر متغیرها مشتمل بر میزان Asphaltene، Pour point و مقدار دانسیته از داده‌های تجربی که در جدول ۱ آمده، استفاده شده است. بر اساس نتیجه‌های ارایه شده در جدول ۳، بهترین مدل قابل پیاده سازی مدل خطی می‌باشد. در جدول ۴ مقادارهای دقیق هر یک از ضرایب ارایه شده است.

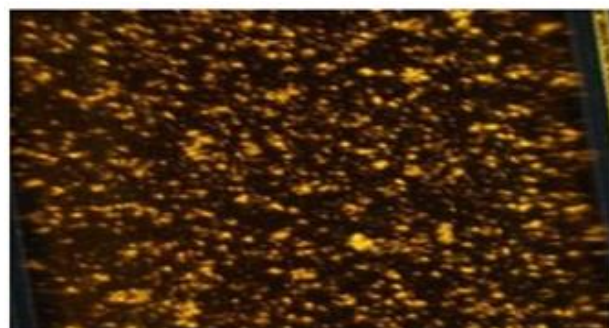
در این صورت با توجه به مقدار هر یک از متغیرها و مقدار ضریب‌های استخراجی مشخص می‌شود که بیشترین تأثیرگذاری در ارتباط با عوامل اصلی، مربوط به آسفالتین و کمترین میزان تأثیرگذاری مربوط به دانسیته می‌باشد. از طرف دیگر بیشترین تأثیر درونی مربوط به درون عامل‌های دانسیته و نقطه ریزش می‌باشد. این در حالی است که کمترین میزان تأثیرگذاری مربوط به درون



شکل ۴- دستگاه میکروسکوپ نور عبوری Olympus-BX51 به همراه استیج گرمایی لینکام (Linkam- THMSG 600)



الف) تصویر نفت خام در میکروسکوپ قبل از دمای WAT



ب) تصویر نفت خام در میکروسکوپ هنگام تشکیل کریستال WAT  
شکل ۵- عکس نمونه‌های نفت خام زیر میکروسکوپ پیش و هنگام تشکیل بلور واکس در دمای WAT

#### بررسی مقدار دقت میزان وابستگی نتیجه‌های WAT با ساختار نفت خام

برای تعیین مدل مناسب، برای تخمین میزان وابستگی نقطه شروع تولید واکس به دیگر متغیرها و ساختار مولکولی هیدروکربن‌های تشکیل دهنده نفت خام از سه مدل شبکه عصبی، مدل ترکیبی شبکه عصبی - منطق فازی و مدل خطی استفاده شد. برای تعیین مقدار دقت مدل‌های، پارامترهای آماری گوناگون مورد محاسبه قرار گرفت که مقادارهای این پارامترها در جدول ۳ ارایه شده است.

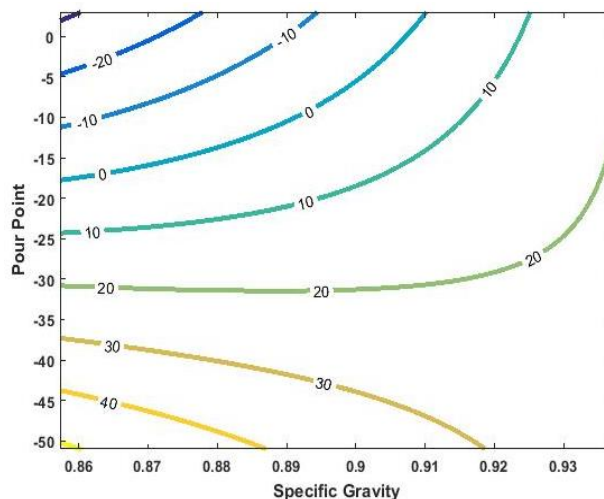


اندازه گیری و سپس با استفاده از روش استاندارد (ASTM D445) تغییر گرانی بر حسب دما اندازه‌گیری و بررسی شد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌های شفاف در نقطه ابری شدن تغییر گرانی زیاد بوده و هنگامی که منحنی گرانی بر حسب دما رسم می‌شود نتیجه‌های این دو روش همپوشانی خوبی با هم دارند از این رو در این مطالعه برای اندازه‌گیری WAT نمونه‌های تیره نفت خام از روش اندازه‌گیری تغییر گرانی بر حسب دما و رسم آن برای نمونه‌های تیره استفاده شده است. نتیجه‌ها نشان داد که در صورت ضرورت تعیین WAT در زمانی که روش‌های جایگزین که به‌طور معمول نیاز به دستگاه‌های ویژه و گران دارند، دچار مشکل‌هایی می‌باشد از این روش برای اندازه‌گیری WAT نمونه‌های تیره می‌توان استفاده کرد. با توجه به نتیجه‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش لازم است در صورت استفاده از این روش مقدمات اولیه مانند حذف مزاحمت آب موجود در نمونه با استفاده از روش ساترفیوژ انجام پذیرد.

همچنین نمونه تا دمای ۴۵ درجه سلسیوس پیش از شروع آزمایش گرانی گرم شده زیرا با رساندن دمای نمونه تا این نقطه به ذوب بلورهای واکس کمک می‌نماید و تأثیر آن را در خطای احتمالی حذف می‌نماید.

از نکات مهم دیگری که می‌بایست در این روش مد نظر قرار گیرد توجه به دمای مینا برای شروع اندازه‌گیری گرانی دینامیک می‌باشد که این نقطه می‌بایست حداقل ۳۰ درجه سلسیوس از نقطه ریزش نفت خام بالاتر باشد از این رو می‌بایست پیش از اندازه‌گیری WAT، نخست نقطه ریزش نمونه نفت خام تعیین شود تا بتوان با دقت بیشتر و در زمان کم‌تری آزمایش را انجام داد.

افزون بر این به منظور تخمین میزان وابستگی WAT به متغیرهای ورودی مدلی برای تخمین‌های مرتبط توسعه داده شد. برای این کار، سه مدل متفاوت شامل مدل شبکه عصبی، مدل ترکیبی شبکه عصبی - الگوریتم فازی و در پایان مدل‌های خطی نیز آزموده شد. نتیجه‌های آزمون‌های آماری نشان داد که بیش‌ترین میزان دقت مربوط به مدل‌های خطی می‌باشد نتیجه‌های این مدل‌سازی نشان داد که بیش‌ترین تأثیر درونی مربوط به درون عوامل دانسیته و نقطه ریزش می‌باشد. در مورد تأثیر اثرهای اصلی نیز مشخص شد که بیش‌ترین میزان اثرهای مربوط به آسفالتین می‌باشد. به منظور امکان تخمین مقدار WAT بر اساس تغییرهای ویژگی‌های با اهمیت اعلام شده نیز نمودار تغییرها این متغیر بر حسب تغییرهای متغیر با اهمیت نیز نشان داده شد. توسعه این روش که هم شامل موارد تجربی و هم شامل مدل‌سازی و رابطه مناسب برای تخمین این ویژگی می‌باشد، تسریع‌کننده آزمایش‌های تعیین این نقطه می‌باشد.



شکل ۶- تأثیر متغیرهای دانسیته و نقطه ریزش بر مقدار WAT

عامل‌های آسفالتین و واکس می‌باشد. به طور کلی بیش‌ترین تأثیر مربوط به تأثیر مستقیم عامل آسفالتین در مقدار متغیر خروجی می‌باشد. با توجه به اهمیت تأثیرهای درونی دو عامل دانسیته و نقطه ریزش، در شکل ۶ تأثیر دو عامل دانسیته و نقطه ریزش بر مقدار WAT به تفصیل نمایش داده شده است. در این شکل عامل‌های دیگر مشتمل بر واکس و آسفالتین در مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است. در این شکل دیده می‌شود که در صورت وجود نمونه‌هایی با وزن ویژه به‌تقریب ثابت و با میزان نقطه ریزش متفاوت، میزان WAT با افزایش نقطه ریزش کاهش می‌یابد. همچنین در صورت وجود نمونه‌هایی با مقدار نقطه ریزش به‌تقریب ثابت ولی با مقدار وزن ویژه متفاوت، میزان خاصیت WAT با افزایش وزن ویژه افزایش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیر نقطه تشکیل واکس در مقدار گرانی نفت خام و برش‌های شفاف نفتی و سرانجام استفاده از این پدیده برای تعیین WAT برای نمونه‌های تیره بوده است. در نمونه‌های نفتی شفاف با چشم غیر مسلح به سادگی می‌توان نقطه ابری شدن بلور واکس سفید رنگ را درون لوله آزمایش دید و دمای ظهور آن را بر روش استاندارد تعیین نمود. این پدیده در نمونه‌های تیره رنگ مانند نفت خام و انواع نفت کوره قابل شناسایی و گزارش نبوده و نیاز به ابزار ویژه و گران دارد. در این مطالعه نخست بر روی سه نمونه گازوئیل تولیدی پالایشگاه‌های کشور و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی نقطه ظهور واکس یا نقطه ابری شدن با استفاده از روش (ASTM D97) [۱۹]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸، ۰۶، ۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸، ۱۰، ۰۲

## مراجع

- [1] Bagai R., Singh N., Kumar R., Chopra A., Chopra A., Saxena J., [Understanding Wax Appearance Temperature in Light Crude Oils by DSC, NMR, and HT-GC](#), *Petroleum Science and Technology*, **35(15)**: 1595-1600 (2017)
- [2] Musser B.J., Kilpatrick P.K., [Molecular Characterization of Wax Isolated from a Variety of Crude Oils](#), *Energy & Fuels*, **12(4)**: 715-725 (1998)
- [3] Kok M.V., Letoffe J.M., Claudy P., Volle J.L., [Comparison of Wax Appearance Temperatures of Crude Oils by Differential Scanning Calorimetry, Thermomicroscopy and Viscometry](#), *Fuel*, **75(7)**: 787-790 (1996)
- [4] Behbahani T.J., Beigi A.A.M, Taheri Z., Ghanbari B., [Investigation of Wax Precipitation in Crude Oil: Experimental and Modelling](#), *Petroleum*, **1(3)**: 223-230 (2015)
- [5] محمدرضا احسانی، سجاد فرازمنند، محمد مهدی شادمانی، بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی‌های پلیمری بر نقطه ریزش دیزل و نفت کوره تولیدی شرکت پالایش نفت اصفهان، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۵(۳)**: ۱۱۵ تا ۱۲۶ (۱۳۹۵)
- [6] Taherishakib J., Rajabikochi M., Kazemzadeh E., Shekarifard A., " [A Modified Investigation of WAT of Crude Oil Based on Wax Properties: Experimental Study](#)", *Saint Petersburg 2018. Cong*, 09 April 2018, Saint Petersburg (2018).
- [7] Taherishakib J., Rajabikochi M., Kazemzadeh E., Shekarifard A., [A Comprehensive Study of the Impact of Wax Compositions on the Wax Appearance Temperature \(WAT\) of Some Iranian Crude Oils: An Experimental Investigation](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **165**: 67-80 (2018)
- [8] Chiu V.Y.G., [Modified Test Method Measures Wax Deposition Qualities of Opaque Crude](#), *Oil & Gas Journal*, **113(111)**: (2015)
- [9] Dantas Neto. A.A., Gomes E.A.S., Barros Neto., E.L., Dantas T.N.C., Moura C.P.A.M., [Determination of Wax Appearance Temperature \(WAT\) in Paraffin/Solvent Systems by Photoelectric and Viscosimetry](#), *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, **3(4)**: 149-157 (2009)
- [10] Jiang Z., Hutchinson J.M., Imrie C.T., [Measurement of the Wax Appearance Temperatures of Crude Oils by Temperature Modulated Differential Scanning Calorimetry](#), *Fuel*, **80**: 367-371 (2001)
- [11] Verson Kok M., Mikhail A., Varfolomeev D., Nurgaliev K., [Wax Appearance Temperature\(WAT\) Determination of Different Origin Crude Oils by Differential Scanning Calorimetry](#), *Petroleum Science and Technology*, **168**: (2018)
- [12] Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H., [Characterization of the Wax Precipitation in Iranian Crude Oil Based on WAT: The Influence of Electromagnetic Waves](#), *Petroleum Science and Technology*, **161**: 530 (2018)

- [۱۳] خشایار یعقوبی، ندا گیلانی، سرود زاهدی عبقری، مروری بر مدل‌سازی و بهینه‌سازی واحد شکست کاتالیستی بستر سیال، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۸: ۱۲۵ تا ۱۵۶ (۱۳۹۸)
- [14] Zahedi Abghari S., Shokri S., Baloochi B., Marvast M.A., [Analysis of Sulfur Removal in Gasoil Hydrodesulfurization Process by Application of Response Surface Methodology](#), *Korean J. Chem. Eng.*, **28(1)**: 93-98 (2011)
- [15] Mohammadikhah R., Zahedi Abghari S., Marvast M.A., [Improvement of Hydrodynamics Performance of Naphtha Catalytic Reforming Reactors using CFD](#), *Iran J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **33(3)**: 63-76 (2014)
- [16] ASTM D4007, "[Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method \(Laboratory Procedure\)](#)", Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(2)**: (2017)
- [17] ASTM D5002, "[Standard Test Method for Density and Relative Density of Crude Oils by Digital Density Analyzer](#)" Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(2)**: (2017)
- [18] ASTM D2500, "[Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products](#)" Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(2)**: (2017)
- [19] ASTM D97, "[Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products](#)" Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(2)**: (2017)
- [20] ASTM D5853, "[Standard Test Method for Pour Point of Crude Oils](#)" Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(3)**: (2017)
- [21] ASTM D4057, "[Standard Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products](#)" Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(2)**: (2017)
- [22] ASTM D445, "[Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids and Calculation of Dynamic Viscosity](#)", Annual Book of ASTM Standards, USA, **5(1)**: (2017)
- [23] Zahedi Abghari S., Imani A., [Determination of Suitable Operating Conditions of Fluid Catalytic Cracking Process by Application of Artificial Neural Network and Firefly Algorithm](#), *Iran J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **37(6)**: 157-168 (2018)
- [24] Zahedi Abghari S., Sadi M., [Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for the Prediction of the Yield Distribution of the Main Products in the Steam Cracking of Atmospheric Gasoil](#), *J. Taiwan Inst. Chem. E.*; **(44)**: 365-376 (2013)