بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی شیمی

رساله دکتری مهندسی شیمی

# تعیین سینتیک رسوب آسفالتین در سیستم جریانی

**فرهاد سلیمی**

استادان راهنما:

**دکتر محسن وفایی سفتی**

**دکتر سید شهاب‌الدین آیت اللهی**

استاد مشاور:

**دکتر آرزو جعفری**

خرداد ۱۳۹۲

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی شیمی

بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای فرهاد سلیمی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان **تعیین سینتیک رسوب آسفالین در سیستم جریانی** در تاریخ ۱۳۹۲/۳/۲۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه دکتری مهندسی شیمی پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران | نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | امضا |
|---|---|---|---|
| استاد راهنما | دکتر محسن وفایی سفتی | استاد | |
| استاد مشاور | دکتر آرزو جعفری | استادیار | |
| استاد ناظر | دکتر عبدالصمد زرین قلم مقدم | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر مهرداد منطقیان | استاد | |
| استاد ناظر | دکتر و حید تقی خانی | استاد | |
| استاد ناظر | دکتر ولی احمد سجادیان | دانشیار | |
| مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی) | دکتر عبدالصمد زرین قلم مقدم | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر سید شهاب الدین آیت اللهی | استاد | |

**آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس**

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی شیمی است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محسن وفایی سفتی و آقای دکتر سید شهاب الدین آیت اللهی، مشاوره سرکار خانم دکتر آرزو جعفری از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب فرهاد سلیمی دانشجوی رشته مهندسی شیمی مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: فرهاد سلیمی

*تاریخ و امضاء* ۹۲/۴/۹

## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **فرهاد سلیمی** دانشجوی رشته **مهندسی شیمی** ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۷ مقطع **دکتری** دانشکده مهندسی شیمی متعهد می شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا

تاریخ: ۹۲/۴/۱۰

# تقدیم

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم:

آن دو فرشته ای 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 .

تقدیم به همسرم مهربانم:

*که در تمام طول تحصیل، همراه و همگام من بوده و با قلبی آکنده از عشق و معرفت،*

*محیطی سرشار از سلامت، امنیت، آرامش و آسایش برایم فراهم آورده است*

## تشکر و قدردانی

و با تشکر از

دکتر وفایی سفتی، استاد راهنمای مهربانم که پیگیری‌های مداوم ایشان، انگیزه اینجانب را در انجام این پروژه دو چندان کرد.

دکتر آیت اللهی، استاد راهنمای دلسوزم که بدون کمک و حمایت-های عملی و مالی ایشان این کار به سرانجام نمی‌رسید.

و همچنین

از مهندس توحیدی که به بنده در ساخت دستگاه کمک و یاری فراوانی رسانیدند تشکر و قدردانی می‌کنم، از مهندس معاضد به خاطر کمک در تهیه مواد آزمایشگاهی و ساخت دستگاه و همچنین از بچه‌های خوب ازدیاد برداشت آقایان دکتر کرد، اسکروچی، لشکربلوکی و .... که با کمک و یاریشان، بنده را در انجام این پروژه یاری رساندند کمال تشکر را دارم.

# چکیده

آسفالتین سنگین‌ترین جزء نفت می‌باشد که در حالت عادی در نفت به صورت حل شده و پایدار وجود دارد. با تغییر شرایط ترمودینامیکی یا هیدرودینامیکی ممکن است آسفالتین از نفت جدا شده و در مخزن، نزدیکی دهانه چاه، ستون چاه، خطوط لوله انتقال نفت و یا تاسیسات رو زمینی رسوب کند. یکی از مهم‌ترین صدمات ناشی از رسوب آسفالتین در مخزن کاهش تراوایی می‌باشد. همچنین ته‌نشین شدن آسفالتین در ستون چاه باعث کاهش تدریجی تولید از چاه شده و در نهایت با بستن مسیر جریان نفت، باعث توقف کامل تولید می‌گردد.

با توجه به مشکل ناشی از آسفالتین در بسیاری از مخازن نفتی ایران و سایر نقاط، ضرورت بررسی و شناخت مکانیسم صدمات ناشی از رسوب آسفالتین درون سنگ مخزن، ستون چاه و تأثیر آن بر روند تولید اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. تاکنون مطالعات فراوانی بر روی شناخت ساختار، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آسفالتین انجام شده است. اما در بحث رسوب آسفالتین در سیستم‌های جریانی مطالعات اندکی انجام شده، به طوری که در برخی موارد پاسخ درستی برای حل این مسئله ارائه نشده است.

در این پروژه سینتیک رسوب آسفالتین مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دستگاهی ساخته شده تا بتوان شرایط خطوط جریانی را شبیه‌سازی کرد. از روش‌های گرمایی و شستشو برای اندازه‌گیری مقدار رسوب تشکیل شده داخل لوله استفاده شده است.

تأثیر پارامترهایی مانند سرعت، دما، نوع نفت، غلظت و ... بر روی نرخ رسوب مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزایش سرعت، کاهش غلظت آسفالتین نفت و کاهش دمای سطح موجب کاهش نرخ رسوب روی دیواره در هر دو رژیم آرام و متلاطم می‌شود. بعلاوه افزایش سورفکتانت به نفت سبب کاهش نرخ رسوب می‌شود. همچنین با افزایش دمای نفت کاهش کمی در نرخ رسوب مشاهده گردید. تأثیر پایداری نفت نشان داد که نرخ رسوب برای نفتی که در ناحیه ناپایدار قرار دارد بیشتر است. همچنین برای پیش‌بینی رسوب آسفالتین در خطوط جریانی دو رابطه نیمه تجربی ارائه شد. رابطه سینتیکی رسوب آسفالتین بدست آمده را می‌توان برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی در ستون چاه و خطوط جریان نیز مورد استفاده قرار داد.


**کلید واژه:** آسفالتین، رسوب، هیدرودینامیک، سینتیک رسوب

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


*فهرست علایم و نشانه‌ها ..... و*

*فهرست جدول‌ها ..... ح*

*فهرست شکل‌ها ..... ط*

**فصل ۱: مقدمه ..... ۱**

*۱-۱- مقدمه ..... ۲*

*۱-۲- اهداف رساله ..... ۳*

*۱-۳- نوآوری تحقیق ..... ۳*

*۱-۴- ساختار رساله ..... ۴*

**فصل ۲: آشنایی با آسفالتین ..... ۶**

*۲-۱- مقدمه ..... ۷*

*۲-۲- تضمین جریان سیال ..... ۷*

*۲-۳- رزین‌ها ..... ۹*

*۲-۴-آسفالتین ..... ۱۰*

*۲-۵- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آسفالتین ..... ۱۰*

*۲-۶- چگالی آسفالتین ..... ۱۱*

*۲-۷- خواص ظاهری آسفالتین ..... ۱۱*

*۲-۸- اجزاء تشکیل دهنده آسفالتین ..... ۱۱*

*۲-۹- جرم مولکولی آسفالتین ..... ۱۱*

*۲-۱۰- ساختار مولکولی آسفالتین ..... ۱۲*

*۲-۱۱- اندازه ذرات آسفالتین ..... ۱۳*

۲-۱۲- *عوامل مختلف در ناپایداری آسفالتین‌ها* ۱۵
۲-۱۲-۱- غلظت و نوع مواد ۱۵
۲-۱۲-۲- تأثیر نسبت حلال به نفت و نوع حلال بر میزان رسوب آسفالتین ۱۶
۲-۱۲-۳- اثر دما ۱۶
۲-۱۲-۴- اثر فشار ۱۷
۲-۱۲-۵- مشخصه‌های جریانی ۱۸
۲-۱۲-۵-۱- مشخصه‌های هیدرودینامیکی ۱۸
۲-۱۲-۵-۲- پتانسیل جریانی ۱۸
۲-۱۳- *آزمایش‌های ابتدایی برای مشخص‌سازی آسفالتین‌ها* ۲۰
۲-۱۳-۱- آزمایش (آنالیز) سارا ۲۰
۲-۱۳-۲- روش‌های استخراج آسفالتین ۲۱
۲-۱۴ *اندازه‌گیری آستانه رسوب‌گذاری در تانک ذخیره* ۲۲
۲-۱۴-۱- روش میکروسکوپی ۲۲
۲-۱۴-۲- روش فیلتراسیون ۲۳
۲-۱۴-۳- روش جذب نوری ۲۳
۲-۱۴-۴- روش هدایت سنجی الکتریکی ۲۴
۲-۱۴-۵- روش انتقال حرارت در پیش‌بینی نقطه شروع رسوب ۲۴
۲-۱۴-۶- روش ویسکومتری ۲۴
۲-۱۴-۷- استفاده از تنش سطحی ۲۴
۲-۱۵- *مشکلات رسوب آسفالتین در مراحل مختلف صنعت نفت* ۲۵
۲-۱۵-۱- میادین خارج از کشور دارای مشکل آسفالتین ۲۵
۲-۱۵-۲- میادین ایرانی در معرض مشکل آسفالتین ۲۶
۲-۱۶- *خلاصه فصل* ۲۶
**فصل ۳: مرور تحقیقات گذشته ۲۷**
۳-۱- *مقدمه* ۲۸
۳-۲- *مکانیزم‌های رسوب آسفالتین* ۲۸
۳-۳- *ته‌نشینی آسفالتین* ۳۰

۳-۴- *لخته شدن آسفالتین* ..... ۳۲
۳-۴-۱- روش اسکیلین ..... ۳۳
۳-۵- *تماس سطحی و چسبیدن به سطح* ..... ۳۵
۳-۶- *رسوب آسفالتین در سیستم جریانی* ..... ۳۷
۳-۷-*خلاصه فصل* ..... ۳۸

**فصل ۴: ساخت دستگاه، مواد و روش‌ها ..... ۴۰**

۴-۱- *مقدمه* ..... ۴۱
۴-۲- *اهمیت ساخت دستگاه بررسی سینتیک رسوب* ..... ۴۱
۴-۳- *مراحل ساخت دستگاه* ..... ۴۳
۴-۴- *شرح دستگاه* ..... ۵۱
۴-۵- *اجزای اصلی دستگاه* ..... ۵۳
۴-۵-۱- مخزن ذخیره نفت ..... ۵۳
۴-۵-۲- پمپ استفاده شده ..... ۵۴
۴-۵-۳- حمام دی اتیلن گلایکول ..... ۵۵
۴-۵-۴- سیستم لوله ..... ۵۶
۴-۵-۵- سیستم جمع‌آوری داده‌ها و کنترل ..... ۵۶
۴-۶- *روش‌های اندازه‌گیری کمی رسوب تشکیل شده داخل لوله* ..... ۵۸
۴-۶-۱- روش شستشو ..... ۵۸
۴-۶-۲- روش اختلاف فشار ..... ۵۸
۴-۶-۳- روش انتقال حرارت ..... ۵۹
۴-۷- *اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت در حالت دمای بستر ثابت* ..... ۶۱
۴-۷-۱- روش انجام آزمایش ..... ۶۱
۴-۸- *دقت و خطای اندازه‌گیری* ..... ۶۴
۴-۹- *نمونه آزمایش برای محاسبه نرخ رسوب* ..... ۶۵
۴-۱۰- *خلاصه فصل* ..... ۶۹

**فصل ۵: نتایج و بحث ..... ۷۰**

*۵-۱- مقدمه ..... ۷۱*

*۵-۲- آزمایش‌های بررسی دقت و تکرار پذیری دستگاه ..... ۷۱*

۵-۲-۱- مورد اول ..... ۷۲

۵-۲-۱-۱- آزمایش بررسی رسوب واکس ..... ۷۲

۵-۲-۲- مورد دوم ..... ۷۳

۵-۲-۲-۱- آزمایش بررسی رسوب آسفالتین ..... ۷۳

*۵-۳- فرآیند تشکیل رسوب آسفالتین ..... ۷۴*

*۵-۴- اندازه‌گیری غلظت آسفالتین نفت ..... ۷۵*

*۵-۵- تأثیر استفاده دوباره نفت بر میزان رسوب ..... ۷۶*

*۵-۶- تاثیر نوع نفت بر میزان رسوب ..... ۷۸*

*۵-۷- تاثیر ممانعت کننده بر میزان رسوب ..... ۸۲*

*۵-۸- تاثیر غلظت آسفالتین نفت بر میزان رسوب ..... ۸۳*

*۵-۹- تاثیر سرعت بر میزان رسوب ..... ۸۶*

*۵-۱۰- تاثیر دمای نفت بر میزان رسوب ..... ۹۰*

*۵-۱۱- تاثیر دمای دیواره بر میزان رسوب ..... ۹۳*

*۵-۱۲- خلاصه فصل ..... ۹۵*

**فصل ۶: نتایج مدل‌ها ..... ۹۷**

*۶-۱- مقدمه ..... ۹۸*

*۶-۲- مدل‌ها ..... ۹۸*

۶-۲-۱- مدل رسوب‌گذاری ..... ۹۸

۶-۲-۱-۱- نتایج مدل رسوب‌گذاری در مبدل‌ها ..... ۱۰۳

۶-۲-۲- مدل ارائه شده بر پایه انتقال جرم ..... ۱۰۶

۶-۲-۲-۱- مرحله انتقال ذرات آسفالتین ..... ۱۰۶

۶-۲-۲-۲- فرآیند اتصال ..... ۱۰۸

۶-۲-۲-۳- نتایج مدل ارائه شده بر پایه انتقال جرم ..... ۱۱۱

*۶-۳- خلاصه فصل ..... ۱۱۴*

**فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ..... ۱۱۵**

*۷-۱- نتیجه‌گیری ..... ۱۱۶*

*۷-۲- پیشنهادها ..... ۱۱۹*

**فهرست مراجع ..... ۱۱۹**

# فهرست علایم و نشانه‌ها

| عنوان | علامت اختصاری |
|---|---|
| عدد رینولدز | $N_{Re}$ |
| طول لوله(m) | L |
| قطر هیدرولیک (m) | D |
| دبی حجمی (cc/min) | Q |
| چگالی ($kg/m^3$) | $\rho$ |
| ضخامت رسوب (m) | $\delta$ |
| اختلاف فشار (bar) | $\Delta P$ |
| ویسکوزیته(Pa.s) | $\mu$ |
| ویسکوزیته سیال نزدیک دیواره(Pa.s) | $\mu_w$ |
| هدایت گرمایی رسوب ($kcal/(hr.m.^oC)$) | $k_w$ |
| هدایت گرمایی لوله ($kcal/(hr.m.^oC)$) | $k_p$ |
| ضریب انتقال حرارت جابجایی نفت ($kcal/(hr.m^2.^oC)$) | $h_o$ |
| ضریب انتقال حرارت جابجایی سردکننده ($kcal/(hr.m^2.^oC)$) | $h_g$ |
| متوسط لگاریتمی اختلاف دما ($^oC$) | $\Delta T_{ln}$ |
| عدد پرانتل | $N_{Pr}$ |
| ضریب انتقال حرارت کلی ($kcal/(hr.m^2.^oC)$) | $U_c$ |
| ظرفیت گرمایی ویژه نفت/حلال ($kcal/(kg.^oC)$) | $C_{p_o}$ |
| نرخ کل گرمای انتقال یافته (kcal) | Q |
| جرم رسوب کرده (kg) | $m_D$ |
| ضریب نفوذ واکس در نفت($m^2/s$) | $D_m$ |
| درصد وزنی واکس حل شده در نفت | $C_w$ |
| سطح تماس ($m^2$) | Ai |
| تنش فشاری (Pa) | $\tau$ |
| سرعت سیال در لوله (m/s) | v |
| ضریب انتقال جرم کلی(m/s) | $k_t$ |
| فلاکس جرمی رسوب | $\varphi$ |
| هدایت گرمایی رسوب در معادله ۶-۲ ($kcal/(hr.m.^oC)$) | $k_f$ |
| عدد اشمیت | Sc |
| فاکتور اصطکاک | f |
| درجه فرآیند واکنش اضافه شدن | n |

| | |
|---|---|
| انرژی جذب (j/mole) | E |
| دمای فیلم متوسط($^oC$) | $T_f$ |
| دمای متوسط دیواره ($^oC$) | $T_w$ |
| ضریب نفوذ ($m^2/s$) | $D_{Diff}$ |
| ضریب انتقال جرم جابجایی داخل لوله ($m^2/s$) | $\beta$ |
| ثابت استفان بولتزمن (1.38*10-23J/K) | $k_B$ |
| قطر ذرات (m) | $d_p$ |
| غلظت ذرات در نفت/حلال($kg/m^3$) | $C_{Ab}$ |
| غلظت ذرات نزدیک دیواره ($kg/m^3$) | $C_{AS}$ |
| احتمال جایگذاری | $S_p$ |
| نرخ رسوب ($kg/m^2.s$) | $\dot{m}$ |
| نیروهای چسبندگی (N) | $F_{adh}$ |
| نیروی درگ | $F_{drag}$ |
| نسبت حلال به نفت | $R_v$ |
| ضریب درگ | $C_D$ |
| درصد وزنی آسفالتین رسوب کرده | W |
| پارامترهای معادله اسکیلین | X and Y |
| وزن مولکولی حلال (kg/kmol) | M |

# فهرست جدول‌ها

**عنوان** **صفحه**


جدول ۴-۱ محدوده انجام آزمایش‌ها ..... ۶۲

جدول ۴-۲ نتایج آنالیز SARA ..... ۶۳

جدول ۵-۱ درصد آسفالتین رسوب جمع شده در لوله ..... ۷۸

جدول ۶-۱ شرایط آزمایش‌های گرمایی برای جریان متلاطم ..... ۱۰۳

جدول ۶-۲ نتایج حاصل از برازش کردن معادلات برای رژیم متلاطم برای روش گرمایی ..... ۱۰۴

جدول ۶-۳ شرایط آزمایش‌های گرمایی برای جریان آرام ..... ۱۰۴

جدول ۶-۴ نتایج حاصل از برازش معادله‌ها برای رژیم آرام برای روش گرمایی ..... ۱۰۵

جدول ۶-۵ شرایط آزمایش‌های شستشو برای جریان آرام ..... ۱۰۵

جدول ۶-۶ نتایج حاصل از برازش کردن معادله‌ها برای رژیم آرام برای روش شستشو ..... ۱۰۶

جدول ۶-۷ نتایج حاصل از برازش داده‌های معادله (۶-۲۱) روش گرمایی ..... ۱۱۲

جدول ۶-۸ نتایج حاصل از برازش داده‌های معادله (۶-۲۱) روش شستشو ..... ۱۱۳

جدول ۶-۹ نتایج حاصل از برازش داده‌های معادله (۶-۲۲) روش گرمایی در جریان متلاطم ..... ۱۱۴

# فهرست شکل‌ها

**عنوان** **صفحه**


شکل ۲-۱ رسوب ترکیبات هیدروکربنی و غیر هیدروکربنی در حین تولید نفت ..... ۹

شکل ۲-۲ a) ساختار پیشنهادی آسفالتین برای نفت مایا (مکزیک) b) ساختار مولکولی پیشنهادی آسفالتین برای نفت ونزوئلا ..... ۱۳

شکل ۲-۳ مراحل مختلف لخته شدن آسفالتین در حضور مقادیر زیادی پارافین ..... ۱۴

شکل ۲-۴ تشکیل کلوئیدهای استریکی از لخته‌های آسفالتینی در حضور مقادیر اضافی از رزین و هیدروکربن‌های پارافینی ..... ۱۴

شکل ۲-۵ تشکیل میسل‌های آسفالتینی به موجب افزایش درجه آروماتیکی محیط ..... ۱۵

شکل ۲-۶ تأثیر دما بر نقطه شروع رسوب برای نفت‌های دریاچه سرد و آتاباسکا ..... ۱۷

شکل ۲-۷ نشست الکتریکی در جریان تک فاز ایزوترمال در لوله ..... ۱۹

شکل ۲-۸ سیگنال‌های فلورسنت نمونه نفت خام بر حسب نسبت پنتان اضافه شده ..... ۲۳

شکل ۲-۹: نقطه ته‌نشینی آسفالتین برای نفت بروخاون بعد از افزودن نرمال هپتان ..... ۲۵

شکل ۳-۱ سازوکارهای پیشنهادی رسوب آسفالتین روی سطح ..... ۲۹

شکل ۴-۱ طرح دستگاه اندازه‌گیری وزن رسوب آسفالتین ..... ۴۲

شکل ۴-۲ لوله‌ها و محل اتصال که در آن حسگرهای فشاری و دمایی قرار داده شده است ..... ۴۳

شکل ۴-۳ نمونه پمپ چرخ دنده‌ای استفاده شده در کار ..... ۴۴

شکل ۴-۴ نمایی از سیلندر و پیستون استفاده شده در کار ..... ۴۵

شکل ۴-۵ نمایی از پمپ فشار بالا ..... ۴۶

شکل ۴-۶ نمایی از شیر تنظیم دبی ..... ۴۶

شکل ۴-۷ نمایی از درایور استفاده شده در کار ..... ۴۷

شکل ۴-۸ نمایی از جریان سنج Vision 1000 ..... ۴۷

شکل ۴-۹ تغییرات دبی برای غلظت ۵۰٪حلال ..... ۴۸

شکل ۴-۱۰ تغییرات اختلاف فشار با زمان برای غلظت ۲۰٪حلال ..... ۴۹

شکل ۴-۱۱ شکل مخزن نگهداری نفت ..... ۵۱
شکل ۴-۱۲ شماتیک دستگاه بررسی ترسیب ..... ۵۳
شکل ۴-۱۳ نمایی از مخزن خوراک و همزن آن ..... ۵۴
شکل ۴-۱۴ نمایی از پمپ استفاده شده در کار ..... ۵۵
شکل ۴-۱۵ نمایی از خفه کن استفاده شده در کار ..... ۵۵
شکل ۴-۱۶ نمایی از حمام DEG و همزن ..... ۵۶
شکل ۴-۱۷ نمایی از لوله و محل اتصال لوله به دستگاه ..... ۵۶
شکل ۴-۱۸ نمایی از PLC مدل S7-224 XP ..... ۵۷
شکل ۴-۱۹ نمایی از سیستم جمع آوری داده‌ها، پنل و محیط آن ..... ۵۷
شکل ۴-۲۰ برشی از سطح مقطع لوله و مشاهده پارامترهای مرتبط ..... ۶۰
شکل ۴-۲۱ تغییرات ویسکوزیته و چگالی نفت با دما برای نفت ۱ ..... ۶۳
شکل ۴-۲۲ تغییرات ویسکوزیته و چگالی نفت با دما برای نفت ۲ ..... ۶۴
شکل ۴-۲۳ تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت گرمایی با دما برای نفت ۱ ..... ۶۴
شکل ۴-۲۴ تغییرات دماهای ورودی و خروجی لوله با زمان برای رسوب آسفالتین ..... ۶۶
شکل ۴-۲۵ تغییرات دمای حمام با زمان برای رسوب آسفالتین ..... ۶۶
شکل ۴-۲۶ تغییرات گرمایی منتقل شده از حمام به نفت برای رسوب آسفالتین ..... ۶۷
شکل ۴-۲۷ تغییرات مقاومت گرمایی با زمان برای رسوب آسفالتین ..... ۶۷
شکل ۴-۲۸ تغییرات ضخامت رسوب با زمان برای رسوب آسفالتین ..... ۶۸
شکل ۴-۲۹ تغییرات اختلاف فشار با زمان برای رسوب واکس ..... ۶۸
شکل ۵-۱ تأثیر دمای حمام بر میزان رسوب واکس برای نفت ۲، روش‌های گرمایی و اختلاف فشاری، دمای نفت $۳۰^{o}C$، دبی جریان ۴۰۰cc/min ..... ۷۳
شکل ۵-۲ نتایج آزمایش تکرار برای نفت شماره ۲ ..... ۷۴
شکل ۵-۳ تغییرات درصد وزنی آسفالتین رسوب کرده با نسبت حلال به نفت ..... ۷۵
شکل ۵-۴ تغییرات ضخامت رسوب آسفالتین با زمان ..... ۷۷
شکل ۵-۵ سطح داخلی لوله قبل از انجام آزمایش ..... ۷۷

شکل ۵-۶ سطح داخلی لوله بعد از انجام آزمایش، ورودی لوله ..... ۷۷
شکل ۵-۷ سطح داخلی لوله بعد از انجام آزمایش، خروجی لوله ..... ۷۸
شکل ۵-۸ سطح داخلی لوله در آزمایش ۲ بعد از شستن لایه بالایی با گاز نیتروژن ..... ۷۸
شکل ۵-۹ تأثیر نوع نفت بر میزان رسوب تشکیل شده در داخل لوله در رژیم آرام ..... ۸۰
شکل ۵-۱۰ تاثیر سرعت و حلال بر میزان رسوب تشکیل شده در رژیم آرام برای نفت ۲ ..... ۸۲
شکل ۵-۱۱ تاثیر ممانعت کننده بر میزان رسوب تشکیل شده ۲ ..... ۸۳
شکل ۵-۱۲ تاثیر میزان آسفالتین بر ضخامت رسوب تشکیل شده ..... ۸۵
شکل ۵-۱۳ تاثیر مقدار آسفالتین بر نرخ رسوب تشکیل شده با استفاده از روش شستشو ..... ۸۵
شکل ۵-۱۴ تاثیر میزان آسفالتین بر ضخامت رسوب تشکیل شده در داخل لوله در سرعت ۰/۶m/s با استفاده از روش گرمایی ..... ۸۶
شکل ۵-۱۵ تاثیر مقدار آسفالتین نفت بر نرخ رسوب تشکیل شده ..... ۸۶
شکل ۵-۱۶ تاثیر سرعت بر ضخامت رسوب تشکیل شده در رژیم آرام در $Ca=4.8kg/m^3$ ..... ۸۸
شکل ۵-۱۷ تاثیر سرعت بر ضخامت رسوب تشکیل شده در رژیم متلاطم ..... ۸۸
شکل ۵-۱۸ تاثیر سرعت بر نرخ رسوب تشکیل شده در غلظت‌های یکسان از آسفالتین ..... ۸۹
شکل ۵-۱۹ تاثیر رژیم جریان بر نرخ رسوب تشکیل شده ..... ۸۹
شکل ۵-۲۰ تاثیر سرعت جریان بر نرخ رسوب تشکیل شده در روش شستشو ..... ۹۰
شکل ۵-۲۱ تغییر رسوب تشکیل شده با دمای نفت ..... ۹۱
شکل ۵-۲۲ تغییر نرخ رسوب با دمای نفت ..... ۹۲
شکل ۵-۲۳ تغییر رسوب تشکیل شده با دمای نفت برای غلظت ۱٪ B-DBSA در دبی ۱۲۰cc/min و دمای حمام $۷۰^oC$ ..... ۹۲
شکل ۵-۲۴ تغییرات ضخامت رسوب با دمای حمام برای روش گرمایی برای جریان آرام (غلظت آسفالتین ۴/۸kg/m3، سرعت ۰/۳۳m/s و دمای نفت $۵۷^oC$) ..... ۹۴
شکل ۵-۲۵ تغییرات ضخامت رسوب با دمای حمام برای روش گرمایی جریان متلاطم (غلظت آسفالتین ۴/۸kg/m3، سرعت ۰/۳۳m/s و دمای نفت $۵۷^oC$) ..... ۹۴

شکل ۵-۲۶ تغییرات نرخ رسوب با دمای حمام برای روش گرمایی جریان آرام (غلظت آسفالتین ۴/۸kg/m3، سرعت ۰/۳۳m/s و دمای نفت ۵۷$^{o}$C) ..... ۹۵
شکل ۵-۲۷ تغییرات نرخ رسوب با دمای حمام برای روش گرمایی جریان متلاطم (غلظت آسفالتین ۶/۲kg/m3، سرعت ۰/۷۶m/s و دمای نفت ۵۰ $^{o}$C) ..... ۹۵
شکل ۵-۲۸ تغییرات نرخ رسوب با دمای حمام برای روش شستشو برای جریان آرام (غلظت آسفالتین ۴/۸kg/m3، سرعت ۰/۳۳m/s و دمای نفت ۵۷ $^{o}$C) .....۹۶
شکل ۶-۱ داده‌های برازش شده بر معادله (۶-۲۱) برای جریان آرام با روش گرمایی .....۱۱۲
شکل ۶-۲ داده‌های برازش شده بر معادله (۶-۲۱) برای جریان آرام با روش شستشو .....۱۱۳
شکل ۶-۳ داده‌های برازش شده بر معادله (۶-۲۲) برای جریان متلاطم روش گرمایی .....۱۱۴