

## بررسی روش‌های گرمایی تضمین جریان جهت جلوگیری از رسوب واکس در میادین دریایی در آب‌های عمیق

اشکان وطن‌دوست\*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ■ احمد شیرزادی، احمد حسین‌زادگان، شرکت نفت خزر

### چکیده

با توجه به روند روبه‌رشد تقاضا برای سوخت‌های فسیلی و روبه اتمام بودن منابع متداول، نیاز به توسعه میادین دریایی بیش از پیش احساس می‌شود. از طرفی دیگر، دریای خزر به‌عنوان یک منبع مهم ذخایر هیدروکربوری از اهمیت فراوانی برخوردار است و در مقایسه با سایر کشورهای حاشیه دریای خزر، ایران به‌تازگی در زمینه برداشت از این ذخایر اقدام کرده است. از چالش‌های مهم پیش‌رو در برداشت از میادین نفت و گاز در آب‌های عمیق، تضمین جریان جهت جلوگیری از رسوب واکس و هیدرات است. با توجه به ترکیب نفت موجود در میادین دریای خزر، احتمال رسوب واکس وجود دارد و در نظر گرفتن روش‌های جلوگیری از رسوب واکس ضروری است. با توجه به چالش‌های عملیاتی برطرف کردن این رسوبات در میادین آب‌های عمیق، اقدامات پیش‌گیرانه مانند روش‌های گرمایی توصیه می‌گردد. به طور کلی، روش‌های گرمایی به دو دسته روش‌های گرمایی فعال و منفعل تقسیم‌بندی می‌گردند. روش‌های گرمایی فعال به صورت گرم کردن خطوط لوله و روش‌های گرمایی منفعل از طریق عایق کاری خطوط لوله و حفظ گرمای موجود در سیستم مانع رسیدن دما به زیر دمای رسوب واکس (WAT) می‌گردند. در این مطالعه، پس از معرفی فرآیند رسوب واکس و بررسی مسیر حرکت سیال در تأسیسات مربوط به میادین دریایی، روش‌های گرمایی به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت و حالت بهینه استفاده از هر کدام معرفی می‌گردد. در نهایت استفاده همزمان از هر دو روش به منظور تضمین بهینه جریان در مقابل رسوب واکس پیشنهاد می‌شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۱۸

### واژگان کلیدی:

میادین دریایی، آب‌های عمیق، تضمین جریان، رسوب واکس، عایق کاری حرارتی، گرمایش الکتریکی

### مقدمه

مخاطرات زمین‌شناسی مانند جریان‌های موجود در بستر دریا، وجود آب‌های پرفشار کم‌عمق، سیستم گسلی پیچیده و فعال، گازهای کم‌عمق و ... وجود دارد. هزینه‌های حفاری و چالش‌های موجود در آن نیز به عنوان بخش عظیمی از هزینه‌های توسعه میادین در آب‌های عمیق، از اهمیت فراوانی برخوردار است [۳]. مهم‌ترین چالش عملیاتی در میادین دریایی مربوط به خطرات و ریسک انتقال جریان چندفازی سیالات است. هنگامی که آب، نفت و گاز به طور همزمان درون خطوط لوله جریان پیدا می‌کنند، امکان وقوع مشکلات گوناگونی وجود دارد که در ذیل به برخی از آنها اشاره می‌شود:

■ حضور همزمان آب و سیالات هیدروکربنی می‌تواند سبب تشکیل هیدرات‌های گازی و انسداد خطوط لوله گردد.

■ رسوب واکس و آسفالتین بر جداره خطوط لوله می‌تواند به مرور زمان سبب انسداد و گرفتگی شود.

■ در صورت وجود حجم بیش از حد آب در جریان سیالات، خوردگی رخ می‌دهد.

■ به سبب تغییرات فشار و دما در مسیر جریان و هم‌چنین ترکیب آب‌های شور ناسازگار، امکان رسوب مواد معدنی و محدود شدن مسیر جریان سیالات وجود دارد.

بدین ترتیب، چالش اصلی پیش روی مهندسين نفت، طراحی خطوط لوله و تأسیسات زیردریایی به گونه‌ای است که سیالات چندفازی به صورت ایمن و اقتصادی تمام مسیر مورد نظر از ته چاه به سمت تأسیسات بهره‌برداری را طی کنند. به فرآیند تشخیص، کمی‌سازی و کاهش خطرات احتمالی مربوط به جریان

دریای خزر واقع در شمال ایران، پهنه‌ای آبی است که بیش از ۳۶۰ هزار کیلومتر مربع مساحت دارد. منطقه‌ی دریای خزر از زمان‌های گذشته به لحاظ اقتصادی دارای ارزش و اهمیت خاصی بوده است. با پیدایش منابع نفت و گاز و هم‌چنین فروپاشی دیوار آهنین و سقوط نظام کمونیستی در شوروی سابق، اهمیت و موقعیت ژئواستراتژیک و ژئواکونومیک آن افزایش یافت [۱]. منطقه دریای خزر دارای ذخایر نفت و گاز اثبات شده‌ای معادل ۱۷٫۲ تا ۴۹٫۷ میلیارد بشکه نفت خام می‌باشد. طبق پیش‌بینی‌های انجام شده، در سال ۲۰۲۰، ۳/۵ درصد عرضه جهانی نفت و ۶ درصد عرضه جهانی گاز را به خود اختصاص خواهد داد [۲].

از طرفی دیگر، با توجه به روند نزولی و روبه اتمام منابع نفتی متداول و هم‌چنین تقاضای روزافزون برای سوخت‌های فسیلی، صنعت نفت در کل دنیا به سمت توسعه منابع جدیدتر از جمله میادین دریایی در آب‌های عمیق و میادین نفتی در قطب شمال در حال حرکت است. در حالی که تمام کشورهای حاشیه خزر به بهره‌برداری از منابع انرژی خزر می‌پردازند، ایران به تازگی در این حوزه وارد شده است. از این رو پرداختن به این موضوع در میهن عزیز ما نیز با توجه به وجود ذخایر ارزشمند نفت در دریای خزر، حائز اهمیت است. در این رابطه، شناخت صحیح و کامل از چالش‌های موجود از ضروری‌ترین گام‌هاست.

### چالش‌های موجود در میادین دریایی

فرآیند تولید از میادین نفت و گاز در آب‌های عمیق با چالش‌های گوناگونی روبروست. این چالش‌ها شامل مسائل فنی، اقتصادی و محیطی زیستی می‌باشد. در بحث چالش‌های فنی مسائل مختلفی از جمله

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (ashkan.vatandoost@gmail.com)

سیال در خطوط لوله، تضمین جریان<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۳].

### شرایط رسوب واکس

عامل اصلی رسوب واکس در جریان سیال هیدروکربنی از دست دادن گرما و کاهش دماست. به محض رسیدن دما به زیر دمای نقطه ابری شدن<sup>۲</sup> (دمای پیدایش واکس<sup>۳</sup>، WAT)، ذرات واکس تشکیل می‌گردند.

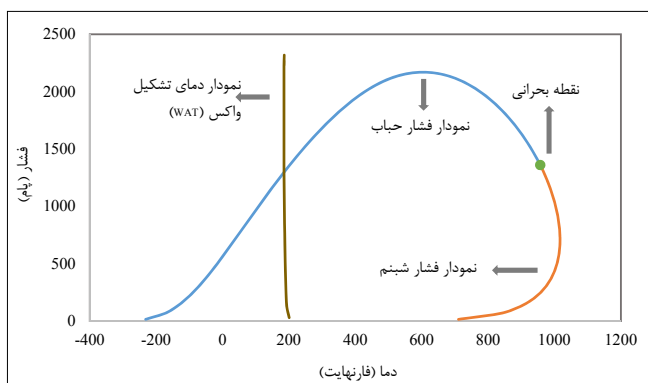
شرایط زیر جهت رسوب واکس و ترسیب آن بر جدار خطوط لوله لازم است:

- ۱- دمای نفت در نزدیک سطح جداره لوله کمتر از WAT باشد.
- ۲- گرادیان دمایی در راستای شعاعی وجود داشته باشد. بدین معنی که دما در دیواره می‌بایست کمتر از دمای مرکز لوله باشد. در صورت عدم وجود گرادیان دمایی، رسوب رخ نمی‌دهد.
- ۳- میزان زبری دیواره لوله به اندازه کافی جهت به دام انداختن ذرات رسوب واکس باشد.

اگر دمای نفت کمتر از نقطه ریزش<sup>۴</sup> باشد، جریان متوقف می‌شود. البته در شرایط وجود جریان نفت، رسیدن دما به زیر نقطه ریزش غیر معمول است. با این حال، در شرایط اضطراری که توقف جریان نفت ضروری باشد، امکان کاهش دما به زیر نقطه ریزش وجود دارد [۵].



۱ | نمونه‌ای از رسوب واکس بر جداره خطوط لوله



۲ | نمودار فازی و نمودار دمای تشکیل واکس برای یک نمونه نفتی

### تضمین جریان در میادین دریایی

تضمین جریان در میادین دریایی و آب‌های عمیق بسیار حیاتی است. در آب‌های عمیق دمای آب دریا معمولاً بسیار کمتر از دمای هوا در سطح می‌باشد. هنگامی که خطوط لوله در آب دریا غوطه‌ور می‌شوند، در صورت نبود عایق حرارتی اطراف خط لوله، گرمای سیال به سرعت به آب منتقل می‌شود. این مسئله در حضور جریان آب در اطراف خط لوله شدیدتر نیز می‌شود. در صورت عدم حضور عایق‌بندی مناسب در دیواره خروجی لوله، ضریب انتقال حرارت بسیار بالا خواهد بود که دلیل اصلی آن نیز انتقال حرارت به صورت همرفت بر اثر جریان آب است. با کاهش دمای آب احتمال تشکیل هیدرات و واکس افزایش یافته و جریان خط لوله با مشکلات گوناگونی مواجه می‌شود. بدین ترتیب، حفظ گرمای سیال به صورت مؤثر از اساسی‌ترین پارامترهای طراحی در خطوط لوله در آب‌های عمیق است [۳].

در میادین نفتی موجود در دریای خزر با توجه به ترکیب سیال موجود و بررسی‌های صورت گرفته، احتمال رسوب واکس و انسداد مسیر حرکت سیال وجود دارد. بدین ترتیب طراحی و مدیریت گرمایی مناسب خطوط لوله و مسیر حرکت سیال از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این مقاله، هدف اصلی بررسی فرآیند تضمین جریان سیال در میدان‌های نفتی در آب‌های عمیق به منظور جلوگیری از رسوب واکس با تمرکز بیشتر بر روی میدان‌های نفتی در دریای خزر است. در واقع پس از بررسی مفاهیم مربوط به رسوب واکس‌های پارافینی و مسائل مرتبط با آن، روش‌های مختلف حفاظت جریان در مقابل رسوب واکس معرفی می‌گردند. در ادامه، روش‌های مدیریت گرمایی به عنوان روش در نظر گرفته شده در این مقاله، راهکارهای جلوگیری از این رسوبات به تفصیل مورد بحث قرار خواهند گرفت و نهایتاً روش مناسب به منظور تضمین جریان در مقابل رسوب واکس در میادین دریایی منطقه خزر ارائه می‌گردد.

### ۱- رسوب واکس

واکس‌های پارافینی که عموماً از نفت خام به وجود می‌آید و در جداره خطوط لوله جریانی رسوب می‌کنند، عمدتاً شامل زنجیره‌های بلندی از هیدروکربن‌های اشباع می‌باشند که تعداد کربن آنها از ۱۸ بیشتر است و دمای ذوب آنها نیز بین ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به این دسته از واکس‌ها ماکرو کریستال گفته می‌شود. هیدروکربن‌های نفتنی (از C۱۸ تا C۳۶) نیز می‌توانند سبب ایجاد واکس گردند که به واکس به وجود آمده از این طریق، واژه میکرو کریستال اطلاق می‌شود. واکس‌های ماکرو کریستال سبب انسداد خطوط لوله و ایجاد مشکل در جریان سیال می‌شوند و واکس‌های میکرو کریستال‌ها نیز به صورت لجن در کف تانک‌های ذخیره انباشته می‌گردند. در شکل ۱- نمونه‌ای از نحوه رسوب واکس بر جداره خطوط لوله نشان داده شده است [۴].

به صورت معلق درمی آید. کریستال‌های واکس معلق شده در جریان خط لوله با سرعت متوسط حرکت می‌کنند. تنش موجود در سیال سبب می‌شود که ذرات واکس به سمت دیواره‌ها کشیده شوند و رسوب روی دیواره لوله افزایش می‌یابد که به این مکانیزم تنش پراکنندگی<sup>۵</sup> نیز گفته می‌شود. به طور کلی، تشکیل رسوب واکس شامل سه مرحله کلی تشکیل هسته، رشد و تشکیل خوشه می‌باشد [۴].

### عوامل مؤثر بر رسوب واکس

#### ■ اثر دما

همانطور که پیش تر اشاره شد، اصلی ترین عامل در فرآیند ترسیب واکس، دما می‌باشد. تأثیر دما به گونه‌ای است که ترسیب اتفاق نمی‌افتد مگر اینکه دما کمتر از WAT باشد و تأثیر سایر عوامل نیز تنها در دمای کمتر از WAT معنی پیدا می‌کند. ترسیب نفت رابطه مستقیم با اختلاف دمای نفت و دیواره لوله دارد [۴].

#### ■ اثر فشار

پارامتر مؤثر دیگر در ایجاد رسوب واکس، فشار می‌باشد. در شرایطی که فشار نفت بالاتر از فشار اشباع باشد و نفت به حالت تک‌فاز در حال جریان باشد، افزایش فشار سبب کاهش درصد حجمی اجزاء سبک تر نفت خام می‌شود و در نتیجه میزان رسوب کاهش پیدا می‌کند. در مقابل، در فشارهای پایین تر از فشار اشباع، با افزایش فشار ترکیبات سبک بیشتری در نفت حل شده و میزان رسوب کاهش پیدا می‌کند. در سیستمی که واکس در دیواره‌ها ترسیب کرده است، افزایش فشار باعث حل شدن واکس می‌گردد [۴].

#### ■ اثر ترکیب درصد نفت خام

عامل مهم دیگر در فرآیند ترسیب واکس، نوع ترکیبات موجود در نفت خام است. به طور معمول، برای تعیین ترکیبات مؤثر در ترسیب واکس، از تست SARA استفاده می‌شود. در این تست، اجزاء موجود در نفت در چهار گروه ترکیبات اشباع (پارافین‌ها)<sup>۶</sup>، ترکیبات حلقوی (آروماتیک‌ها)<sup>۷</sup>، رزین‌ها<sup>۸</sup> و آسفالتین‌ها<sup>۹</sup> دسته‌بندی شده و درصد وزنی هر کدام اندازه‌گیری می‌شود. در این دسته‌بندی، ترکیبات حلقوی یا آروماتیک‌ها سبب حفظ ذرات پارافینی واکس (ترکیبات اشباع) به صورت محلول در نفت می‌باشد. بدین ترتیب، در صورتی که میزان ترکیبات آروماتیک از ترکیبات اشباع بیشتر باشد، امکان ترسیب واکس وجود نخواهد داشت [۴].

#### ■ اثر دبی جریان

افزایش دبی جریان از ناحیه آرام به متلاطم سبب کاهش رسوب می‌شود. دلیل آن هم ایجاد نیروی تنشی-برشی بر دیواره لوله و کنده شدن رسوبات است [۴].

#### ■ اثر زبری سطح داخلی لوله

زبری سطح داخلی خط لوله نیز به سبب ایجاد شرایط جهت چسبیدن رسوبات واکس به دیواره، رابطه مستقیم با میزان رسوبات واکس دارد [۴].

### روش‌های مقابله با رسوب واکس

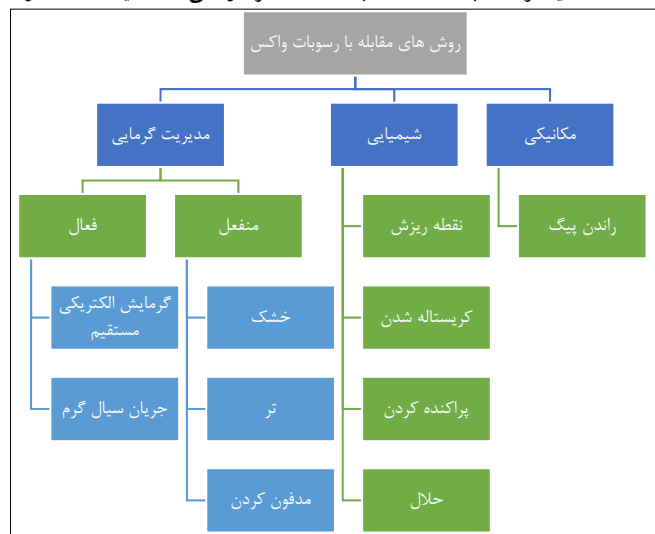
به طور کلی روش‌های مقابله با رسوبات واکس به سه دسته روش‌های مکانیکی،

لازم به ذکر است که با استخراج نفت، فشار مخزن افت پیدا کرده و ترکیبات سبک تر بخار می‌شوند. به دنبال آن، مقدار WAT نیز افزایش پیدا می‌کند. بدین ترتیب، می‌بایست دمای نفت بالاتر از WAT نگه داشته شود. در میداین نفتی در آب‌های عمیق، از آنجایی که دمای آب دریا معمولاً کمتر از WAT می‌باشد، نگه داشتن دمای سیال بالاتر از مقدار WAT دشوار است.

برای یک نمونه سیال هیدروکربنی، نمودار فازی و نمودار WAT بر حسب فشارهای مختلف در شکل ۲- نمایش داده شده است. بدیهی است که با کاهش دما در سمت چپ خط مربوط به WAT در این نمودار، واکس رسوب می‌کند.

### مکانیزم تشکیل رسوب واکس

نفت‌های خام واکسی را می‌توان مخلوطی دو جزئی از هیدروکربن‌های سبک به‌عنوان حلال و واکس‌های سنگین به‌عنوان حل‌شونده در نظر گرفت. زمانی که دمای نفت خام به زیر دمای تشکیل واکس (WAT) برسد، حلالیت واکس در هیدروکربن‌های سبک کاهش یافته و ظهور واکس آغاز می‌گردد. دو مکانیزم اصلی در پدیده رسوب ذرات واکس نقش اساسی دارند. انتقال واکس به دلیل گرادیان غلظت، با مکانیزم نفوذ مولکولی شروع می‌شود. واکس از قسمت‌هایی که غلظت آن زیادتر است به قسمت‌های با غلظت کمتر نفوذ می‌کند تا اینکه در محلول



شکل ۳ | دسته‌بندی روش‌های مقابله با رسوبات پارافینی



شکل ۴ | اجزاء اصلی یک میدان دریایی

شیمیایی و گرمایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل-۳، دسته‌بندی این روش‌ها قابل مشاهده است.

در این مقاله، هدف بررسی روش‌های مدیریت گرمایی مقابله با رسوبات واکس بوده و از روش‌های مکانیکی به سبب هزینه‌های گزاف و مشکلات اجرایی آنها در آب‌های عمیق صرف نظر می‌شود. روش‌هایی شیمیایی نیز دسته‌بندی گسترده‌ای دارند و شرح کامل تمامی آنها خارج از موضوع این مطالعه است. به طور کلی روش‌های مدیریت گرمایی علاوه بر ریسک کم هزینه نسبتاً کمی دارند و نسبت به سایر روش‌های تضمین جریان برتری دارند. روش‌های مدیریت گرمایی به دو دسته کلی روش‌های فعال و منفعل تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های منفعل شامل انواع تکنیک‌های عایق‌کاری گرمایی خطوط لوله است. در مقابل، در روش‌های فعال، خط لوله جریان و در نتیجه آن، سیال در حال جریان گرم می‌شوند. در ادامه، این روش‌ها شرح داده می‌شود [۶].

## ۲- تجهیزات میدین دریایی

به منظور درک بهتر فرآیند تولید از میدین نفت و گاز در آب‌های عمیق و مسیر حرکت سیالات از ابتدا در لایه مخزن زیرزمینی تا انتها در نقطه تحویل به واحد بهره‌برداری، اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده تأسیسات بهره‌برداری از میدین دریایی در این قسمت توضیح داده می‌شوند. در صورتی که این تجهیزات بهره‌برداری را در سه دسته به صورت تجهیزات زیرزمینی، خطوط لوله/بالابرده‌ها و تجهیزات بر روی سطح آب تقسیم‌بندی کنیم، دو دسته اول می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند که در آنها احتمال رسوبات پارافینی بیشتر بوده و در صورت وجود مشکل و انسداد خطوط لوله و مسیر حرکت سیال، برطرف کردن آن بسیار دشوار است. مسیر حرکت سیال از نقطه ورود آن به داخل چاه در عمق مخزن آغاز شده و پس از رسیدن به بستر دریا، از طریق خطوط لوله و بالابرده به سکوها دریایی منتقل می‌گردد [۷].

## ۳- مدیریت گرمایی منفعل

### ۳-۱- معرفی

در سال‌های گذشته شاهد روند روبه‌رشد عملیات مدیریت گرمایی منفعل (عایق‌کاری حرارتی) به عنوان روشی مؤثر در جلوگیری از مسدود شدن خطوط تولید توسط رسوب واکس‌های پارافینی بوده‌ایم. در روش مدیریت گرمایی منفعل، برای حفظ دمای سیال بالاتر از مقدار WAT به منظور جلوگیری از تشکیل واکس، لایه‌های عایق می‌بایست به خط لوله اضافه شوند. استفاده از روش عایق‌کاری حرارتی در تأسیسات دریایی آب‌های عمیق که در آن، وجود دماهای پایین و فشارهای بالا سبب دشواری شرایط عملیاتی می‌گردد، نیازمند طراحی بهینه عایق‌کاری می‌باشد.

عایق‌کاری حرارتی با وجود تبعیت از رفتار هیدرولیکی سیال در خطوط جریان، بر طراحی هیدرولیکی مسیر حرکت سیال به سبب اثرگذاری بر دمای سیال و خواص ترمودینامیکی نظر نسبت گاز به نفت (GOR)، چگالی و گرانیوزی، تأثیرگذار می‌باشد. طراحی حرارتی از ضروری‌ترین بخش‌ها در طراحی خطوط

جریان است که با استفاده از آن می‌توان پروفایل تغییرات دما در طول خطوط لوله را پیش‌بینی کرد. اطلاعات به دست آمده از طراحی حرارتی در بسیاری از آنالیزهای مربوط به خطوط لوله از قبیل حفاظت خوردگی، رسوب جامدات پارافینی و هیدرات‌های گازی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

طراحی حرارتی شامل آنالیز انتقال حرارتی پایدار<sup>۱</sup> و گذرا<sup>۱۱</sup> می‌باشد. در حالت انتقال حرارتی پایدار، دمای سیال تولیدی در طول خط لوله جریانی بر اثر انتقال حرارت از دیواره خط لوله به محیط بیرونی کاهش می‌یابد. پروفایل دمایی در تمام طول سیستم خطوط جریانی می‌بایست بالاتر از مقدار دمای مشخص شده برای جلوگیری از رسوب واکس در شرایط عملیاتی نرمال باشد. پروفایل تغییرات دما از محاسبات انتقال حرارت در حالت جریان پایدار به دست می‌آید [۳].

در زمان بسته‌شدن سیستم و یا راه‌اندازی مجدد، رژیم جریان از حالت پایدار به حالت گذرا تغییر می‌کند و در این حالت قوانین انتقال حرارت در جریان گذرا بر سیستم حاکم بوده و در زمان برقرار بودن جریان گذرا، از این قوانین برای اطمینان از بالاتر بودن دما از حداقل تعیین شده به منظور جلوگیری از رسوب واکس استفاده می‌شود. در حالت کلی، برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم عایق‌کاری حرارتی، هر دو حالت جریان پایدار و گذرا می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند. در ادامه، به بررسی روش‌های گوناگون مدیریت گرمایی منفعل در تضمین جریان پرداخته می‌شود.

## ۳-۲- انواع روش‌های گرمایی منفعل

عایق‌کاری خطوط لوله می‌تواند هم به کمک مواد عایق و هم از طریق مدفون کردن خطوط لوله زیر بستر خاک دریا انجام گیرد. عایق‌کاری حرارتی خطوط لوله توسط مواد عایق می‌تواند به صورت تر یا خشک انجام شود. در روش عایق‌کاری تر، لایه عایق که اطراف لوله را پوشانده است به طور مستقیم با آب دریا در تماس است. در روش عایق‌کاری خشک، لایه عایق توسط یک لایه محافظ از آب دریا جدا می‌شود. در شکل-۵ شماتیک ساده‌ای از این دو مدل عایق‌کاری خطوط لوله نشان داده شده است.

روش عایق‌کاری خشک رسانایی کمتر و ظرفیت گرمایی بیشتری نسبت به روش عایق‌کاری تر دارد که در نتیجه، سبب بازدهی بیشتر می‌شود. با این حال قراردادن لایه محافظ بیرونی موجب افزایش هزینه‌ها می‌گردد. در آب‌های عمیق به سبب وجود فشار هیدرواستاتیکی بالا، صرفاً استفاده از یک لایه محافظ و عایق به منظور حفاظت گرمایی خطوط لوله کارآمد نیست. در واقع یک محفظه بیرونی به منظور حفظ سیستم لوله و عایق در مقابل عوامل مکانیکی نیز مورد نیاز است. بدین منظور، تکنولوژی لوله-در-لوله<sup>۱۲</sup> که در آن خط لوله حامل سیال به همراه لایه عایق درون یک لوله بزرگ‌تر که نقش محافظ را بر عهده دارد توسط نگاه‌دارنده‌های خاصی قرار می‌گیرند، در عایق‌کاری حرارتی خطوط لوله در آب‌های عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل-۶ شماتیک این تکنولوژی به همراه اجزاء اصلی آن نشان داده شده است.

از آنجایی که خاک ظرفیت گرمایی مناسبی دارد، مدفون کردن خطوط لوله زیر خاک روش مناسب و کم‌هزینه‌ای جهت عایق‌کاری است. عوامل بسیاری از

با طول بالا برنده رابطه مستقیم دارد. بنابراین مدیریت خواص حرارتی در این سیستم‌ها ضروری است.

### ۳-۴- جنس مواد عایق

پلی پروپیلن (Polypropylene)، پلی اتیلن (Polyethylene) و پلی اورتان (Polyurethane) به عنوان سه ماده عایق اساسی در صنعت نفت شناخته شده هستند. با توجه به شرایط میدان و کاربرد مورد نظر، از این مواد در فرم‌های مختلف استفاده می‌شود که سبب دستیابی به ضرایب هدایت حرارتی متفاوتی می‌گردد. ضرایب هدایت حرارتی برای ترکیب مختلف مواد فوق در جدول ۱- ارائه شده است.

باید توجه داشت که ضریب هدایت گرمایی این مواد در شرایط خشک کمتر خواهد بود. فوم پلی اورتان به سبب ضریب هدایت بسیار پایین (۰,۰۳) به صورت گسترده جهت عایق کاری خطوط لوله در آب‌های عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. جنس مواد عایق مورد نیاز برای هر میدان منحصر به فرد است و به شرایط گوناگونی بستگی دارد. آنالیز تضمین جریان می‌بایست جهت تعیین حداقل ویژگی‌های مورد نیاز برای عایق کاری یک میدان مشخص انجام گیرد. این آنالیز شامل مراحل زیر می‌باشد:

- تعیین بازه دمایی تشکیل هیدرات و وکس با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی
- آنالیز حرارتی- هیدرولیکی جهت تعیین ضریب انتقال حرارت مورد نیاز در هر

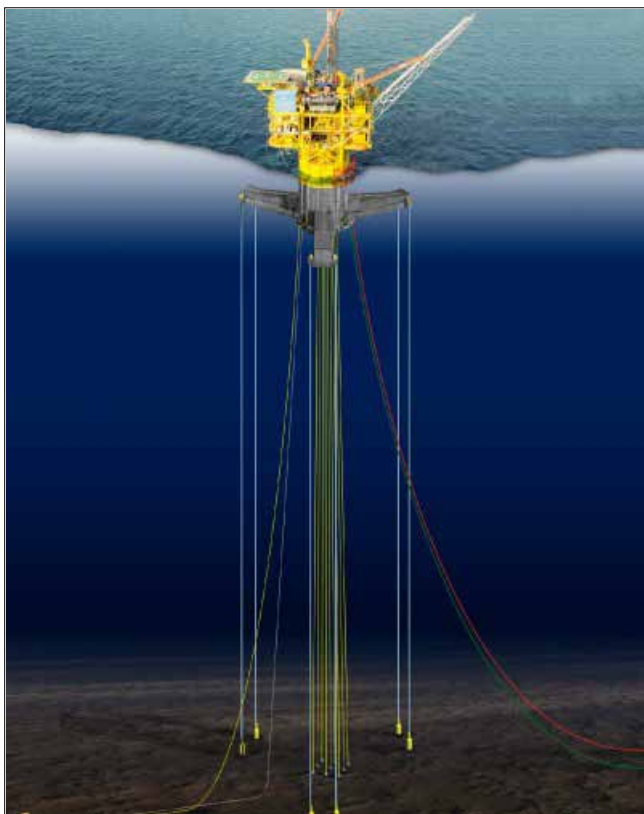
جمله عمق آب، فشار، ویسکوزیته، خواص سیال، خواص خاک، ناهمواری‌های زمین و مشکلات ناشی لوله و خطرات زمین شناسی در این روش تأثیرگذار می‌باشند که استفاده از آن به صورت عملیاتی را با دشواری‌هایی روبه‌رو می‌سازد.

### ۳-۳- چالش‌ها

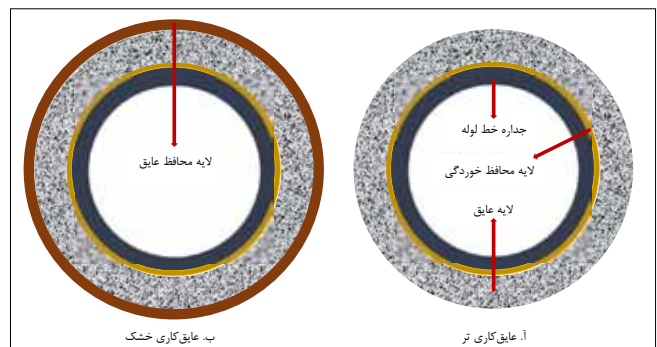
امروزه، سیستم‌های عایق حرارتی علاوه بر گرادیان دمایی بین سیال در حال جریان و محیط بیرونی که از آب تشکیل شده است، می‌بایست بر فشار بالای آب نیز فائق آیند. به علاوه، ماندگاری تأثیر این سیستم‌ها در آب‌های عمیق که نرخ خزش<sup>۱۳</sup> در آن به سبب وجود سطوح بالای تنش بالاست، از اهمیت فراوانی برخوردار است.

در آب‌های عمیق، خط لوله جریانی عمدتاً توسط یک بالا برنده<sup>۱۴</sup> تولیدی به تأسیسات در سطح آب متصل می‌گردد. نمونه یک بالا برنده در شکل ۷- قابل مشاهده است. با توجه به تفاوت عمده در ساختار خطوط جریان و بالا برنده‌ها، معمولاً استفاده از روش‌های تضمین جریان برای این دو خط جریان به صورت جداگانه و مستقل از هم صورت می‌گیرد.

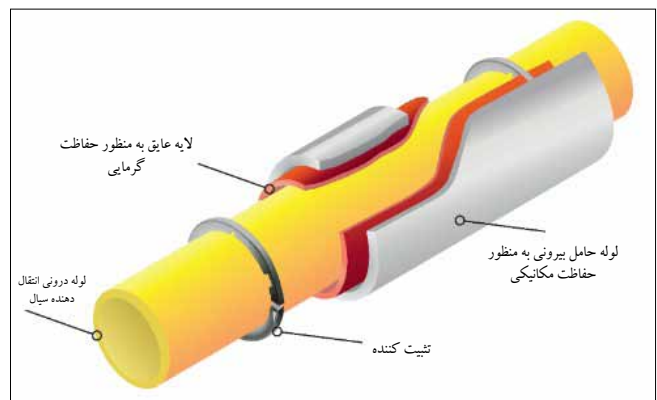
هنگامی که ارتفاع بالا برنده زیاد باشد، فشار جریانی خطوط لوله می‌بایست به سبب هد فشاری زیاد در بالا برنده بیشتر باشد. در شرایط دمایی برابر، اگر فشار جریانی خط لوله افزایش یابد، احتمال تشکیل هیدرات‌ها نیز افزایش می‌یابد. در یک سیستم خط لوله و بالا برنده که احتمال انسداد در آن بالاست، میزان انسداد



شکل ۷ | نمونه‌ای از بالا برنده‌ها در تأسیسات میدانی دریایی آب‌های عمیق



شکل ۵ | شماتیک سطح مقطع خطوط لوله عایق‌کاری شده به روش تر و خشک



شکل ۶ | شماتیک تکنولوژی Pipe-in-Pipe و اجزاء مختلف آن [۹].

نقطه از خط لوله

■ آنالیز حرارتی پایدار به منظور تعیین نوع و قطر عایق مورد نیاز برای هر قسمت

از خط لوله

■ آنالیز حرارتی گذرا در نقاط خاصی از خط لوله جهت تعیین نرخ کاهش دما به

هنگام تغییر رژیم جریان از حالت پایدار به حالت گذرا

معیارهای انتخاب یک ماده عایق مناسب جهت انجام عملیات عایق کاری خطوط

لوله در آب‌های عمیق به صورت زیر تبیین می‌شوند:

■ میزان هدایت پذیری گرمایی کم

■ ظرفیت گرمایی بالا

■ چگالی بالا

■ قابلیت مقاومت در برابر فشار هیدرواستاتیک

■ اقتصادی بودن

■ قابلیت نصب و نگهداری آسان

■ جنس مواد به کاررفته در ساخت خط لوله

■ طول خط لوله

■ شعاع خط لوله

■ گرانیوی سیال در حال جریان

■ ضریب هدایت گرمایی لوله، عایق و سیال

■ ضخامت مواد عایق

■ چگالی ماده عایق

■ وزن ماده عایق

■ مقاومت ماده عایق در برابر گرما، فشار هیدرواستاتیک و خزش ناشی از جریان

آب

■ تعداد لایه‌های عایق کاری

■ ضریب انتقال حرارت (U-Value) سیستم عایق کاری

#### ۴- مدیریت گرمایی فعال

##### ۴-۱- معرفی

مدیریت گرمایی فعال شامل روش‌های مختلفی است که طی آن خط لوله حرارت می‌بندد و گرم می‌شود. حرارت می‌تواند توسط جریان الکتریکی و یا جریان سیال داغ به خطوط لوله منتقل گردد. در روش گرمایش الکتریکی توسط جریان الکتریکی نیز دو دسته کلی گرمایش الکتریکی مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. گرمایش الکتریکی مستقیم نیز به دو روش حلقه باز<sup>۱۵</sup> و حلقه بسته<sup>۱۶</sup> انجام می‌شود.

در روش گرمایش الکتریکی، با گرم کردن خط لوله می‌توان از کاهش دما و رسیدن آن به محدوده WAT جلوگیری کرد. روش گرمایش الکتریکی می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی هم برای روش‌های پیش‌گیری از تشکیل هیدرات و هم برای روش‌های درمان آن باشد که دارای قابلیت اطمینان بالا و کمترین اثرات عم‌لیاتی منفی است. کاهش هزینه‌های عملیاتی در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان سیستم از اهمیت فراوانی برخوردار است. روش گرمایش الکتریکی سبب افزایش اطمینان‌پذیری سیستم و در نتیجه کاهش هزینه‌های عملیاتی خواهد شد.

##### ۳-۵- طراحی کاربردی

به طور کلی، مراحل اصلی در طراحی یک سیستم عایق کاری حرارتی بر روی خطوط لوله و تأسیسات دریایی در آب‌های عمیق به صورت زیر است:

■ جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در خصوص سیال، خطوط لوله، شرایط محیطی و ...

■ ساخت مدل جریان سیال درون شبکه خطوط لوله و بالابرنده‌ها

■ اعتبارسنجی مدل ساخته شده بر اساس داده‌های تجربی و آزمایشگاهی موجود

■ پیش‌بینی پروفایل تغییرات دما در حالت پایدار و گذرا

■ به‌کارگیری سیستم‌های مختلف عایق کاری با استفاده از مواد عایق گوناگون

■ آنالیز اقتصادی

همانگونه که پیداست، عوامل مختلفی بر طراحی سیستم عایق کاری حرارتی

تأثیر گذار می‌باشند که در ذیل به برخی از آنها اشاره می‌شود:

■ مکان جغرافیایی خط لوله

■ نوع جریان سیال (اعم از پایدار، گذرا و ...)

۱ | کیفیت و ویژگی‌های مواد عایق حرارتی شناخته شده در صنعت [۸]

ردیف	جنس عایق حرارتی	ضریب هدایت گرمایی (W/m.K) (k-value)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	بازدهی (%)
۱	پلی‌پروپیلن (PP)	۰/۲۲	۲۰۰۰	۹۰۰	۶۰
۲	پلی‌اورتان (PU)	۰/۱۱۹۵	۱۸۰۰	۸۰۰	۵۰
۳	فوم مصنوعی (SPP)	۰/۱۳۵	۱۹۵۰	۷۶۵	۸۰
۴	فوم پلی‌پروپیلن (PPF)	۰/۱۷	۱۹۲۰	۷۰۰	۸۰
۵	فوم پلی‌پروپیلن تقویت شده (RPPF)	۰/۰۸	۱۷۵۰	۶۵۰	۸۰
۶	فوم پلی‌اورتان	۰/۰۳	۱۸۰۰	۷۰۰	۹۵
۷	پلی‌تان مصنوعی	۰/۱۴	۱۵۰۰	۷۱۹.۵	۹۵
۸	پلی‌اورتان-شیشه مصنوعی	۰/۱۴۵	۱۷۰۰	۷۲۰	۹۵

## ۲- سیستم حلقه بسته یا کاملاً عایق<sup>۱۹</sup>

در این سیستم خط لوله از لحاظ الکتریکی کاملاً عایق بوده و هیچگونه جریان الکتریکی به آب دریا منتقل نمی‌کند. دو نوع مختلف از این سیستم وجود دارد که در هر دوی آنها لوله داخلی و لوله بیرونی به عنوان رسانای جریان الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع این دو لوله توسط تیغه‌هایی به یکدیگر متصل گشته و توسط منبع الکتریکی جریان در آنها به وجود می‌آید. تفاوت دو نوع آن نیز در محل قرارگیری تیغه‌ها و منبع تغذیه است.

در شکل-۱۰، شماتیک روش حلقه بسته (عایق) با قرارگیری منبع تغذیه در انتهای خط لوله نشان داده شده است. این روش نسبت به روش حلقه باز بازدهی بیشتری دارد، اما در گرمادهی پیوسته نمی‌توان از آن استفاده کرد و احتمال ایجاد خوردگی نیز وجود دارد.

در نوع دوم سیستم حلقه بسته (عایق) که منبع تغذیه در میانه لوله قرار گرفته است (شکل-۱۱)، بازدهی بالاتر است و امکان گرمادهی پیوسته نیز وجود دارد. با این حال، هزینه نصب تجهیزات مربوط به آن بالاست.

کاربرد روش گرمایش الکتریکی مستقیم در شرایط عملیاتی زیر به اثبات رسیده است:

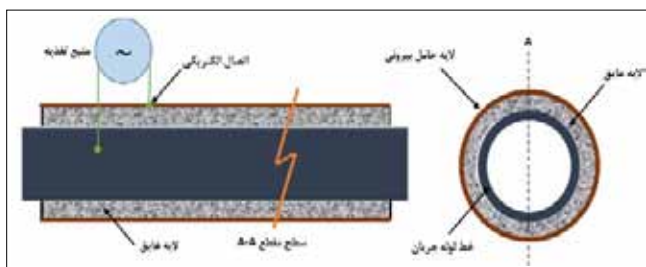
- سیستم‌های تولید همراه با عایق بندی تر با مقدار U-value بالاتر از  $2W/m^2.K$
- سیستم‌های خط لوله با قطر بیش از ۳۰ اینچ

## ۳-۴- سیستم ترکیبی EHTF

سیستم ترکیبی EHTF Electrically Heat Traced Flowline در واقع ترکیبی از روش گرمایش الکتریکی مستقیم (DEH) و روش عایق بندی حرارتی (Pipe-in-Pipe) می‌باشد. شماتیک روش EHTF در شکل-۱۲ قابل مشاهده است.

ویژگی‌های روش EHTF به شرح زیر می‌باشد:

- امکان باز آغاز عملیات تولید پس از بسته شدن‌های طولانی مدت بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های پیش‌گیرانه
- نگه‌داشتن دمای سیستم بالاتر از دمای تشکیل و کس (WAT) و دمای تشکیل هیدرات (HAT)



۱۰ | سیستم حلقه بسته (عایق) با قرارگیری منبع تغذیه در انتهای خط لوله

در روش گرمایش الکتریکی، هزینه‌های CAPEX به سبب عدم نیاز به حلقه‌های جریانی به منظور ایجاد جریان نفت مرده و هزینه‌های OPEX به دلیل عدم نیاز به نگه‌داری و تزریق حجم بالای مواد شیمیایی و هم چنین حذف زمان مورد نیاز برای آغاز مجدد عملیات بعد از بسته شدن<sup>۱۷</sup> کاهش می‌یابد. در شکل-۸، مقایسه‌ای بین هزینه‌های عملیاتی روش گرمایش الکتریکی مستقیم و روش عایق کاری لوله-در-لوله (Pipe-in-Pipe) ارائه شده است. در ادامه، روش‌های مختلف گرمایش الکتریکی شرح داده می‌شوند.

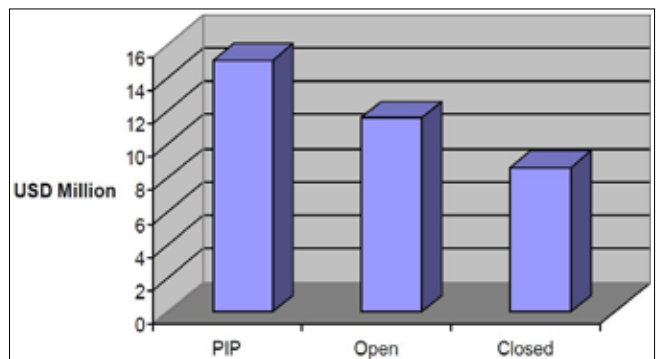
## ۲-۴- انواع روش‌های گرمایی فعال

اساس کار روش گرمایش الکتریکی مستقیم مقاومت اهمی بر اثر جریان الکتریکی القاشده در دو طرف خط لوله است که با استفاده از یک حلقه الکتریکی که از یک ژنراتور جریان منشأ می‌گیرد، به وجود می‌آید. جریان متناوب القاشده بر بدنه خط لوله سبب گرم شدن فلز بدنه در اثر مقاومت الکتریکی می‌گردد. بر اثر پدیده هدایت گرمایی، این گرمای به وجود آمده به سیال در حال جریان انتقال می‌یابد.

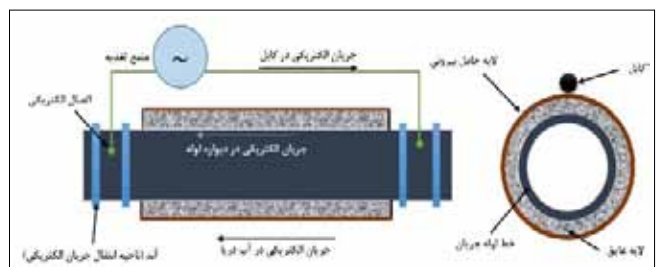
به‌طور کلی دو نوع سیستم برای گرمایش الکتریکی مستقیم وجود دارد:

### ۱- سیستم حلقه باز<sup>۱۸</sup>

که در آن از ارتباط الکتریکی بین جداره خط لوله و آب دریا بهره می‌گیرد. در این حالت کابل الکتریکی بر روی لوله سوار شده تا جریان را به انتها منتقل کند. در این روش راندمان نسبتاً پایین است و در صورت عدم محافظت در مقابل خوردگی می‌تواند مشکل ساز باشد (شکل-۹).



۸ | مقایسه نسبت هزینه‌های عملیاتی سیستم گرمایش الکتریکی مستقیم (DEH) به سیستم عایق کاری حرارتی [۱۰].



۹ | گرمایش الکتریکی خط لوله به وسیله سیستم حلقه باز

■ نیاز به منبع الکتریکی با توان پایین برای تولید گرما (توان نزدیک به  $20\text{ W/m}$ )

### نتیجه گیری

۱- مدیریت گرمایی یک عنصر مهم و حیاتی در طراحی و بهره‌برداری خطوط جریان در آب‌های عمیق می‌باشد که در آن، دماهای پایین و فشار بالا به طور همزمان وجود دارند.

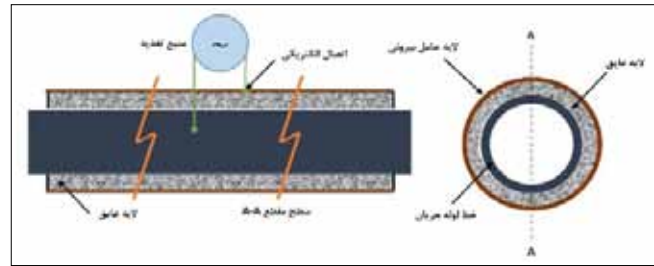
۲- در مدیریت گرمایی، هدف اصلی نگاه داشتن و حفظ دمای کل سیستم بالاتر از دمای تشکیل واکس (WAT) می‌باشد. بدین منظور از روش‌های حرارتی فعال که در آن خط لوله گرم می‌شود و روش‌های حرارتی منفعل که شامل عایق کاری و حفظ دمای خط لوله است، استفاده می‌گردد.

۳- آنالیز حرارتی سیستم می‌بایست حداقل دمای احتمالی در هر دو حالت پایا و گذرا را در نقاط مختلف تعیین کند.

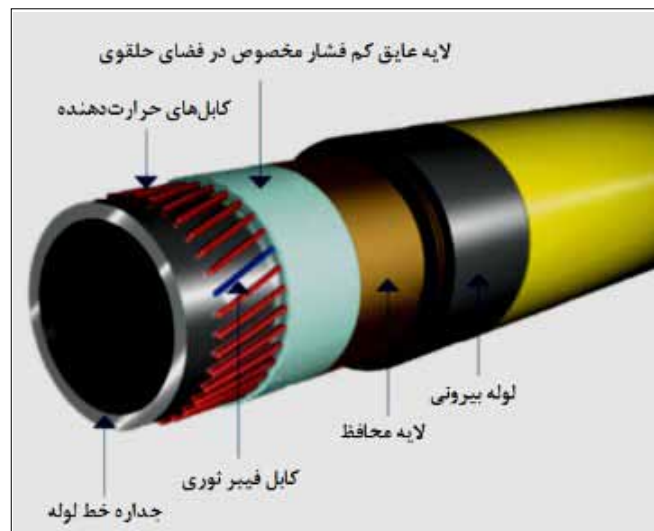
۴- در روش‌های مدیریت گرمایی منفعل، انتخاب جنس ماده عایق و طراحی عایق کاری با توجه به شرایط میدان، سیال و سایر ویژگی‌های زمین‌شناسی انجام می‌گیرد.

۵- در روش گرمایش الکتریکی مستقیم، سیستم بسته (عایق) نسبت به سیستم باز دارای بازدهی بالاتر و امکان خوردگی کمتر می‌باشد.

۶- استفاده همزمان از روش عایق کاری حرارتی و گرمایش الکتریکی مستقیم (روش EHTF)، دارای بازدهی مناسب می‌باشد. ■



شکل ۱۱ | سیستم حلقه بسته (عایق) با قرارگیری منبع تغذیه در وسط خط لوله



شکل ۱۲ | شماتیک روش EHTF

### پانویس‌ها

1. Flow Assurance
2. Cloud Point
3. Wax Appearance Temperature
4. Pour Point
5. Shear Dispersion
6. Saturates
7. Aromatics
8. Resins
9. Asphaltenes
10. Steady-State
11. Transient
12. Pipe-in-Pipe
13. Creep Rate
14. Riser
15. Open Loop
16. Closed Loop
17. Shut Down
18. Earth current system
19. Fully insulated system

### منابع

- systems. AIChE J. 39 (8): 13771388-. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690390815>
- [۶] بهروزی فرامیر. مروری بر کاربرد فناوری‌های تضمین جریان در تولید و انتقال نفت و گاز. ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز. ۱۳۹۳؛ ۱۳۹۳ (۱۱۳): ۳۳-۴۰
- [7] Lee, Jaeyoung. "Introduction to offshore pipelines and risers." N/P (2009)
- [8] Zulkefli, Nurfarah Hazirah Binti, and William Pao. "Optimum Thermal Insulation Design for Subsea Pipeline Flow Assurance.
- [9] Website: <http://www.technip.com/sites/default/files/technip/fields>
- [10] Hansen, Allan Boye, and A. Delesalle. "Cost-Effective Thermal Insulation Systems for Deep-Water West Africa in Combination with Direct Heating." Offshore West Africa 2000 Conference and Exhibition, 21-23 March 2000, Abidjan, Cote d-Ivoire. 2000.
- [۱] اومانسکی یا کوو، ملکی قاسم، نفت دریای خزر: الزام‌های ژئوپلیتیک و ژئواکونومیک، مؤسسه مطالعات و تحقیقات بین‌المللی ابرار معاصر تهران، سال ۱۳۸۲.
- [۲] اطاعت جواد، نصرتی حمیدرضا، ایران و خطوط انتقال انرژی حوزه خزر، مطالعات اوراسیای مرکزی، مرکز مطالعات عالی بین‌المللی، دانشکده حقوق و علوم سیاسی، سال دوم، شماره ۳، زمستان و بهار ۸۸-۱۳۸۷، صفحات ۲۲-۱.
- [3] Bahadori, Alireza. Thermal insulation handbook for the oil, gas, and petrochemical industries. Gulf Professional Publishing, 2014.
- [4] Freund, Mihály; Mózes, Gyula (1982). Paraffin products: properties, technologies, applications. Translated by Jakab, E. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. p. 121. ISBN 01-99712-444-.
- [5] Svendsen, J.A. 1993. Mathematical modeling of wax deposition in oil pipeline