مطالعه تأثیر مونو اتیلن گلایکول (MEG) در بازدارندگی از تشکیل هیدرات در یکی از میدان‌های گازی فراساحل ایران

کامبیز دوانی*، دانشـــجوی دکتری مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز ■ عبدالحسین باقری، دانشجوی دکتری مهندسی نفت، دانشـــکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز ■ جلال الدین دلالت‌پور، دانشجوی دکتری مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز ■ محمدرضا ملایری، استاد دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز

چکیده

بیش از ۲۰۰ ســال از شــناخت ساختار هیدرات می گذرد و فرآیند تشــکیل آن کماکان یکی از معضلات در صنعت نفت و گاز به شــمار می رود. در این فرآیند، شــناخت و پیش بینی شرایطی که طی آن هیدرات های گازی به وجود می آیند ضروری اســت. یکی از راه های جلوگیری از تشــکیل هیدرات های گازی، استفاده از بازدارنده های شــیمیایی است. در این مطالعه شــرایط تشکیل هیدرات در خطوط لوله انتقال گاز از ۴ سکوی دریایی در یکی از میادین گازی ایران به تأسیسات واقع در بخش خشکی، در دو حالتِ بدون تزریق بازدارنده و با تزریق بازدارنده با استفاده از نرم افزار شبیه ساز الگا (OLGA) مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل سازی خواص ســیال از نرم‌افزار PVTSIM20 و تشــخیص نوع هیدرات از نرم افزار پایپ سیم (PIPESIM) استفاده شــده است. نتایج حاصل نشان داد که هیدرات تشکیل‌شده در خطوط لوله مورد مطالعه از نوع ۱ (I) و ۲ (II) هستند. در این پژوهش، از مونو اتیلن گلایکول (MEG) به‌عنوان بازدارنده استفاده شده است و نتایج، حاکی از کارآیی این بازدارنده در جلوگیری از تشکیل هیدرات است. همچنین تحلیل حساسیت سنجی دو پارامتر دمای بیرونی خط لوله و ضخامت لایه های عایق صورت گرفته اســت. برای هر خط لوله، دبی و نسبت بهینه تزریق بازدارنده در بدترین شــرایط محیطی از نظر تشکیل هیدرات یعنی فصل زمستان، تعیین شده است. با افزایش دمای محیط در ماه زهای گرم ســال، احتمال تشــکیل هیدرات کاهش می یابد یا هیدرات در فواصل دورتری از سکوی دریایی تشکیل می شود؛ بنابراین در این فصل ها می توان از میزان بازدارنده کمتری استفاده کرد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش داور: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹

واژگان کلیدی:

هیدرات گازی،بازدارنده،شبیه سازی،الگا، مونواتیلن گلایکول.

مقدمه

وجود آب و میعانات گازی در خطوط جمع‌آوری و انتقال گاز طبیعی به‌صورت جریان دوفازی، مشکلاتی از قبیل تشکیل هیدرات و انسداد خطوط، خوردگی، تجمع مایعات و سایش خطوط را به همراه دارد. در این مطالعه به یکی از معضلات قدیمی صنعت نفت و گاز یعنی هیدرات و راه های جلوگیری از تشکیل آن در خطوط انتقال گاز پرداخته شده است.

هیدرات های گازی، ترکیبات جامد کریستالی هستند که در دسته اندرون گیرها طبقه بندی می شوند. اندرون-گیر ترکیبی است که در آن یک مولکول از ماده ای (مولکول مهمان) در شبکه ساخته‌شده از مولکول ماده ای دیگر (مولکول میزبان) به دام می افتد. در ساختار هیدرات، مولکول های آب به‌عنوان مولکول های میزبان عمل کرده و به علت داشتن پیوند هیدروژنی با ایجاد حفره هایی، ساختار شبه‌شبکه ای تشکیل می دهند. این شبکه که ناپایدار است به‌عنوان شبکه خالی هیدرات شناخته می شود که در دما و فشار خاص (در دمای پایین و فشار بالا) با حضور اجزای گازی مختلف با اندازه و شکل مناسب، می تواند به یک ساختار پایدار تبدیل شود. در این نوع از کریستال ها، هیچ پیوند شیمیایی بین موکول های آب و مولکول های گاز محبوس‌شده تشکیل نمی شود و تنها عامل پایداری کریستال ها، وجود پیوند هیدروژنی بین مولکول های میزبان (آب) و نیروی واندروالسی بین مولکول های میزبان و مولکول های مهمان (گاز) است.[۱]

تاکنون سه نوع ساختار برای هیدرات، شناسایی شده است؛ ساختارهای نوع ۱ (I)، ۲ (II) و H. ساختار ۱ معمولاً با مولکول‌های کوچک تر مانند متان، دی‌اکسید کربن، اتان و... تشکیل می شود. مولکول های بزرگ‌تر با قطر بین ۵ تا ۶/۷ آنگستروم که نمی توانند در ساختار ۱ قرار بگیرند،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات (kambizd1992@gmail.com)

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]

[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]

ساختار ۲ را شکل می دهند؛ بنابراین، این ساختار به‌وسیله مولکول های بزرگ تر مانند پروپان و ایزو بوتان تشکیل می شود. ساختار H تحت عنوان ساختار دوگانه شناخته می شود و برای تشکیل آن یک نوع مولکول کوچک مانند متان و یک نوع مولکول بزرگ مانند متیل سیکلو هگزان باید موجود باشند تا بتوانند ساختار آن را پایدار کنند. زمانی که اجزای گاز طبیعی مثل پروپان و ایزوبوتان وجود دارند این ساختار تشکیل نمی شود. از مهم ترین خواص ساختار H، فشار تشکیل پایین و ظرفیت ذخیره‌سازی بالا است.[۲]

عوامل تشکیل هیدرات در خطوط انتقال به‌طور خلاصه عبارت است از: ۱. وجود آب (مایع یا یخ) ۲. وجود مولکول های کوچک گازی مانند سولفید هیدروژن، متان، اتان و دی‌اکسید کربن و ۳. شرایط فشاری و دمایی مساعد (فشار بالا و دمای پایین). با حذف هرکدام از این عوامل می توان از تشکیل ساختار هیدرات جلوگیری به عمل آورد. شرایط ترمودینامیکی برای جلوگیری از شکل گیری هیدرات می تواند با افزایش دما در یک فشار مشخص یا کاهش فشار در یک دمای معلوم حاصل شود. اگر این عملیات امکان‌پذیر نباشد، می توان با کاهش درصد آب موجود در گاز و استفاده از بازدارنده ها از تشکیل هیدرات ممانعت به عمل آورد.[۳]

در صنعت نفت و گاز به‌طور گسترده از بازدارنده های شیمیایی برای جلوگیری از تشکیل هیدرات استفاده می‌شود. آن ها معمولاً از بین حلال های استخراج‌پذیری که با تغییر فوگاسیته آب، موجب کاهش دمای تشکیل هیدرات می‌شوند، انتخاب می شوند. از جمله بازدارنده ها می توان به الکل ها و گلایکول ها اشاره کرد. انتخاب بازدارنده مناسب به شرایط زیادی از جمله ساختار هیدرات، ترکیب آب محیط، دما و فشار عملیات، حجم آب محیط، فواصل نقاط تزریق و شرایط دینامیکی مثل تولید یا توقف لخته های موجود در محیط بستگی دارد.

این مواد را می توان به دو گروه بازدارنده های ترمودینامیکی و بازدارنده های هیدرات با دوز کم (LDHI) تقسیم کرد. بازدارنده های ترمودینامیکی بر دانه بندی و تشکیل هسته های هیدرات و رشد بلور های هیدرات تأثیر نمی گذارند و آن را تغییر نمی دهند بلکه تنها شرایط دمایی و فشاری برای تشکیل هیدرات-ها را تغییر داده و جابه جا می کنند. با استفاده از این بازدارنده ها، دمای شکل گیری هیدرات، کاهش یافته یا فشار شکل گیری آن ها افزایش می یابد. بنابراین با به‌کارگیری بازدارنده های ترمودینامیکی شرایط بهره برداری به خارج از محدوده ی شکل گیری هیدرات ها منتقل می شود. معمولاً از دو نوع بازدارنده ی ترمودینامیکی در صنعت استفاده می شود: الف. متانول؛ ب. مونواتیلن گلیکول (MEG).

ازآنجاکه میزان بیش از حدِ آب درون خط لوله، به مقادیر زیاد MEG و متانول، به‌مثابه بازدارنده های تشکیل هیدرات، نیاز دارد؛ هزینه های عملیاتی پروژه هم افزایش می یابد. برای رفع این مشکل، وقتی که مقدار آب در خط لوله زیاد باشد، می‌توان از بازدارنده های مؤثرتر استفاده کرد. استفاده از بازدارنده های شیمیایی جدید با مکانیزم بازدارندگی متفاوت با متانول و MEG می تواند به نحو مؤثرتری مقدار مصرفی مادهٔ بازدارنده را کاهش دهد. موادی که به‌نحو مؤثر از شکل گیری هیدرات ممانعت به عمل آورند و درعین‌حال به میزان زیادی مقدار بازدارنده تزریق‌شده را کاهش می دهند، بازدارنده هیدرات با دوز کم (LDHI) نامیده می شوند.

در صنعت، دو نوع رایج از بازدارنده LDHI کاربرد دارد: ۱. بازدارندهٔ سینتیکی و ۲. بازدارندهٔ ضدکلوخه[۱] (AA). نوع اول، فرایند تشکیل بلورهای هیدرات را کُند می‌کند، به گونه‌ای که از سرعت فرایند هم کاسته می‌شود. لذا تشکیل و رشد بلورهای هیدرات در زمانِ طولانی تری به تعویق میفتد. اما این نوع بازدارنده ها، تنها زمان وقوع فرایند را طولانی می کنند و به‌طور کامل نمی توانند فرایند تشکیل دانه‌های هیدرات را متوقف کنند. بنابراین بازدارندهٔ سینتیکی تنها برای زمان محدودی از فرایندِ تشکیل هیدرات ممانعت به عمل می آورند. با سپری شدن این زمان و با یک تغییر خیلی سریع، آبِ آزادِ موجود، مقدار زیادی هیدرات ایجاد می کند که ممکن است به‌سرعت باعث انسداد شدید خط لوله شود. بنابراین در پروسهٔ طراحی استراتژی‌های تقلیل هیدرات در خطوط لوله دریایی، اطمینان از اینکه زمان ماندن سیال در جریان پایدار، کمتر از زمان ماندگاری بازدارنده LDHI باشد حائز اهمیت است. زمان ماندگاری[۲] بعضی از بازدارنده های سینتیکی می تواند ۲۴ تا ۴۸ ساعت باشد.

بازدارنده‌های ضدکلوخه‌ای از جنس پلیمر و اساساً یک واکنش‌کننده سطحی هستند. و تمایل به جلوگیری از تشکیل بلور های بزرگ هیدرات دارند. بنابراین باعث می شوند به جای هیدرات هایی که قابلیت مسدود کردن خط را دارند دوغاب قابل‌انتقال[۳] در لوله تشکیل شود. این بازدارنده ها در تشکیل دانه های هیدرات خللی ایجاد نمی‌کنند، بلکه با کاهش سرعت رشد بلورها؛ بلورهای هیدرات را در فاز هیدروکربن نگه می دارند. در نتیجه بلورهای هیدرات نیز با جریان هیدروکربن در طول خط لوله مثل جریان دوغاب منتقل می‌شوند.

روش های متعددی برای پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات وجود دارد. در اینجا سه روش مرسوم برای تشخیص صحیح و سریع شرایط تشکیل هیدرات، به‌اجمال تشریح می شود.

۱. روش فاکتور K: این روش در ابتدا توسط کاریون و کتز توسعه داده شد. همچنین نمودارها و داده های زیادی تا به امروز برای افزایش دقت این روش

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]

[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]

ارائه شده‌اند. در این روش دمای تشکیل هیدرات می تواند توسط ثابت های تعادلی بخار ـ جامد پیش‌بینی شود. معادله پایه برای این پیش‌بینی به‌صورت زیر است[۴]:

$$\sum_{(i=1)}^{n} \left(\frac{Y_i}{K_i}\right) = 1 \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا y_i درصد مولی جزء i در گاز بدون آب است. K_i ثابت تعادل بخار ـ جامد برای جزء i و n تعداد اجزای تشکیل‌دهنده است. محاسباتی که با رابطهٔ بالا صورت می گیرد از نوع تکرارشونده است. یعنی در فشار یا دمای ثابت مقداری برای یکی از این دو متغیر که مجهول است حدس زده شده و مقدار ثابت ها به دست می آید. این فرایند تا زمانی پیش می رود که رابطه بالا حاصل شود. در نهایت اگر فشار معلوم باشد، دمایی که به دست می آید دمای تشکیل هیدرات است. اگر دمای گاز از این مقدار کمتر باشد هیدرات تشکیل می شود. مقدار K_i با استفاده از داده های تجربی به دست آمده است که در مراجع موجود هست و برابر درصد جزء موجود در فاز گاز خشک بر هیدرات بدون آب است[۴].

$$K_i = \left(\frac{Y_i}{X_i}\right) \qquad (۲)$$

روش کارسون و کتز جواب‌های قابل قبولی برای گاز شیرین در اختیار قرار می دهد و تا فشار ۱۰۰۰ psia قابل استفاده است.

۲. روش Baillie and Wichert: این روش اجازهٔ محاسبهٔ تشکیل هیدرات را در دامنهٔ فشاری گسترده تری می‌دهد؛ معمولاً بین ۱۰۰ تا ۴۰۰۰psia. این روش برای جریان گاز شیرین که دارای CO_2 است جواب دقیقی نمی دهد ولی برای مقدار کم این گاز دقت خوبی دارد.

۳. روش گراویتی گاز: روش‌های پیشین، برای پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات گاز طبیعی به آنالیز ترکیب گاز نیاز دارند. نمودار گراویتی گاز را می‌توان به‌منظور پیش‌بینی فشار و دمای تشکیل هیدرات در شرایطی که ترکیب گاز مشخص نباشد، مورد استفاده قرار داد. این روش با توجه به فشار گاز و وزن مخصوص آن دمای تشکیل هیدرات را پیش‌بینی می کند (رابطه ۳). اگر دما کمتر از دمای تشکیل هیدرات پیش‌بینی شده باشد، هیدرات تشکیل می شود [۵].

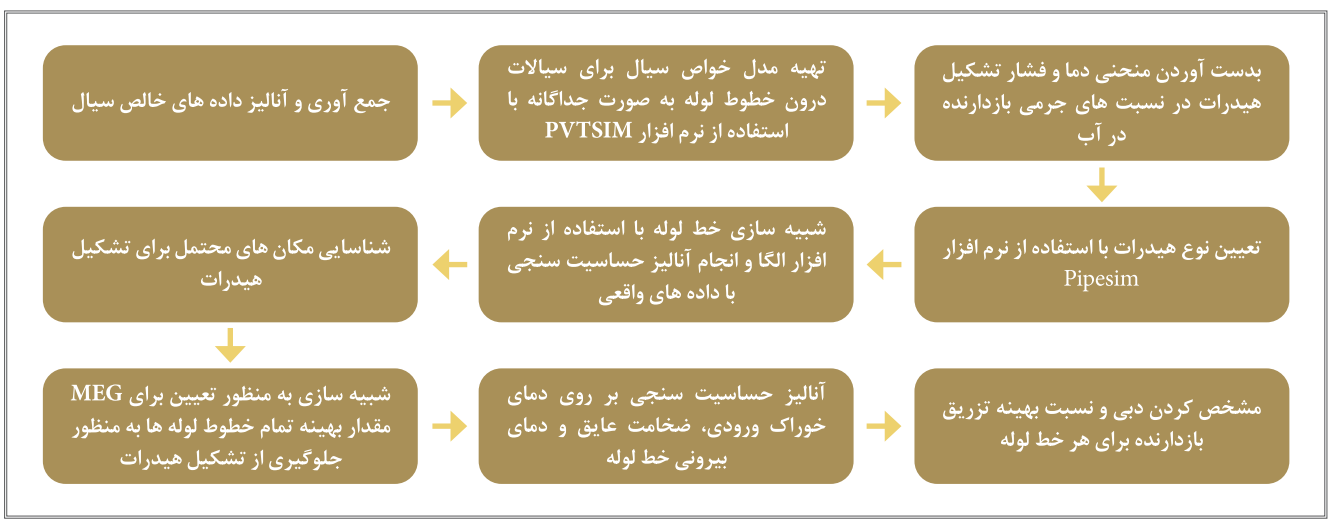
$$T_h = ۱۳/۴۷\ln(P) + ۳۴/۲۷\ln(SG) - ۱/۶۷۵[\ln(P) \times \ln(SG)] - ۲۰/۳۵ \qquad (۳)$$

در رابطه بالا، T دمای جریان گاز بر حسب F و P فشار بر حسب psia و SG وزن مخصوص گاز می باشد.

۲. روش انجام کار

به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند الگا می توان نقاط مستعد تشکیل هیدرات را شناسایی کرد و روش انتخابی برای جلوگیری از تشکیل هیدرات را مورد ارزیابی قرار داد. همچنین انتخاب بازدارنده مناسب برای جلوگیری از تشکیل هیدرات با استفاده از این نرم‌افزارها امکان پذیر است. تعیین میزان دبی و نسبت بهینه تزریق بازدارنده و همچنین امکان ارزیابی نقش پارامترهای مؤثر در تشکیل هیدرات از قبیل دمای پیرامونی و خصوصیات لایه های عایقِ به کار گرفته‌شده در خط لوله و اتخاذ رویکرد مناسب در قبال آن ها از دیگر جنبه های کاربردی پژوهش انجام شده است.

در این پژوهش، چگونگی تشکیل هیدرات در خطوط لوله انتقال گاز از ۴ سکوی دریایی در یکی از میادین گازی ایران، در دو حالتِ بدون تزریق بازدارنده و با تزریق بازدارنده تحت شرایط مختلف عملیاتی و با کمک نرم‌افزار الگا (OLGA) شبیه‌سازی شد. خواص ترمودینامیکی سیال از نرم‌افزار PVTSIM20 به دست آمده و نوع هیدرات از نرم‌افزار پایپ سیم (PIPESIM) تشخیص داده شد. بازدارنده مورد ارزیابی، مونو اتیلن گلایکول (MEG) است. در نهایت تحلیل حساسیت سنجی بر روی دمای بیرونی خط لوله و ضخامت لایه های عایق صورت گرفت. شکل ۱ مراحل مختلف شبیه‌سازی خط لوله در هنگام تشکیل هیدرات را نشان می‌دهد.



شکل ۱ | امراحل مختلف شبیه‌سازی خط لوله

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]

[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]

جدول ۱ | خط لوله دریایی و خصوصیات مواد پوشانندهٔ بیرونی

	32 inch offshore pipelineCarbon steel Grade X65 (API)							
	۰ – ۱	۱ – ۲.۷۵	۲.۷۵ – ۳.۱۰	۳.۱۰ – ۱۰	۱۰ – ۸۰.۲	۸۰ – ۸۲.۱	۸۲.۱ – ۱۱۰.۶	Riser
	Km							۸۲۹.۲
OD (mm)	۸۱۲.۸							۲۸.۸
Thickness (mm)	۲۰.۶							۱۱
Corrosion Allowance	۳ mm							
Corrosion Coating	۶ mm Bitumen enamel							۱۲ mm Neoprene
Concrete Coating Thickness (mm)	۹۰	۹۰	۱۱۰	۹۰	۶۸	۹۰	۶۸	–

۲-۱. داده‌های استفاده‌شده در شبیه‌سازی خطوط لوله در نرم‌افزار الگا

در این مطالعه برای بررسی تشکیل هیدرات در خطوط انتقال گاز، از اطلاعات خطوط لوله‌های A، B، C و D مربوط به میدان مورد مطالعه استفاده شده است. این مطالعه، همچنین برای بررسی چگونگی تشکیل هیدرات در خطوط لوله انتقال گاز از سکوهای دریایی به خشکی و مدل‌سازی آن در نرم‌افزار الگا از اطلاعات خطوط لوله انتقال سکوهای دریایی به خشکی بهره برده است. جدول ۱ اطلاعات یکی از خطوط انتقال و پروفایل جریانی آن (از خشکی تا سکو) را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. جنس خط لوله از نوع کربن استیل با شاخص API (X65) است. برای مقابله با خوردگی از مواد پوششی ضد خوردگیِ بیتومن برای خط لوله و نئوپرن برای رایزر استفاده شده است. همچنین یک لایه از جنس بتن ــ مطابق با جدول ۱ ــ سطح خارجی خط لوله را پوشانده است. همان طور که در جدول هم مشخص شده است، ضخامت پوشاننده بتنی ثابت نبوده و در فواصل طولی مختلف از خط لوله، متفاوت است. برای بررسی تشکیل هیدرات در خط لوله، بدترین شرایط دمایی یعنی فصل زمستان در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ دمای هوا و دمای آب دریا در عمق‌های مختلف ذکر شده است.

جدول ۲ | شرایط دمایی خط لوله

	Winter
Ambient temperature	۱۹°C
Temp. at depth -20m	۱۵°C
Temp. at depth -40m	۱۴°C
Temp. at depth -60m	۱۳°C

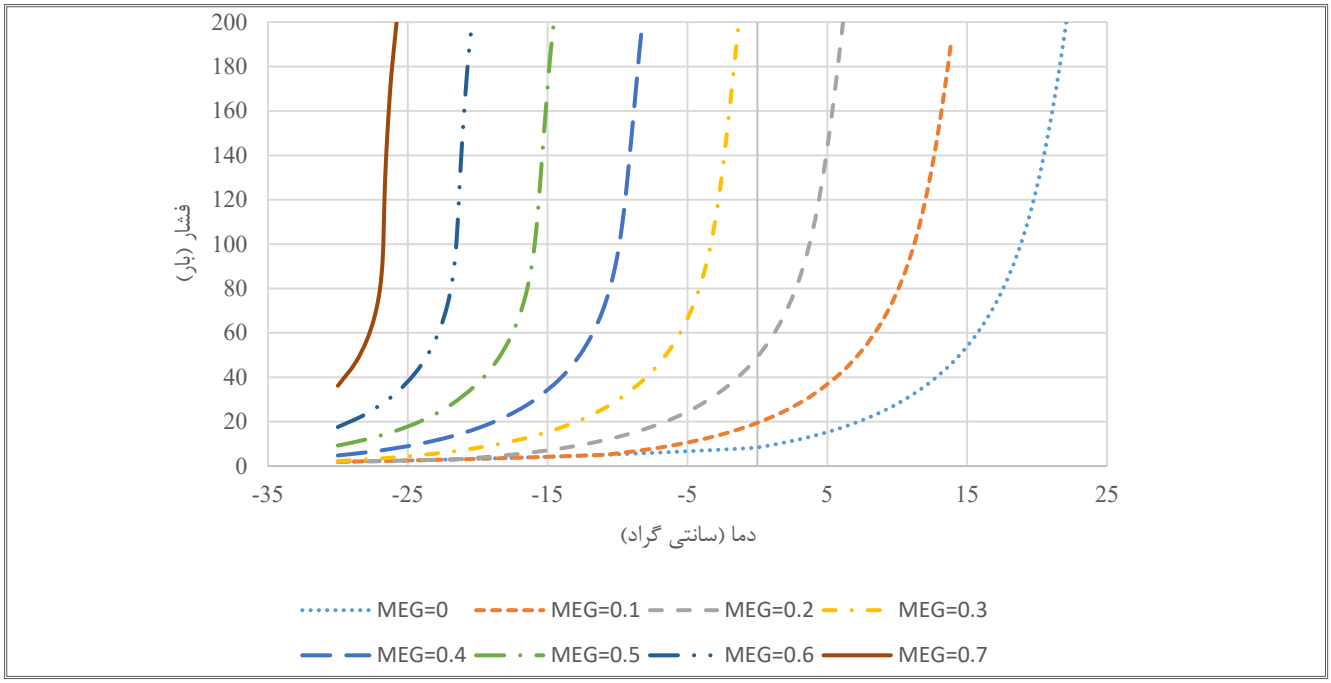
جدول ۳ ترکیبات سیال ورودی به خطوط لوله را نشان می دهد. با توجه به جدول، تفاوت هایی به‌ویژه در مقدار آب موجود در خوراک ورودی وجود دارد. از این اطلاعات به‌منظور مدل کردن خواص سیال ورودی خط لوله و به دست آوردن نمودار دما ـ فشار تشکیل هیدرات در نرم‌افزار خواص سیال PVTSIM20 استفاده شده است.

جدول ۳ | ترکیب سیال خطوط لولهٔ مورد مطالعه

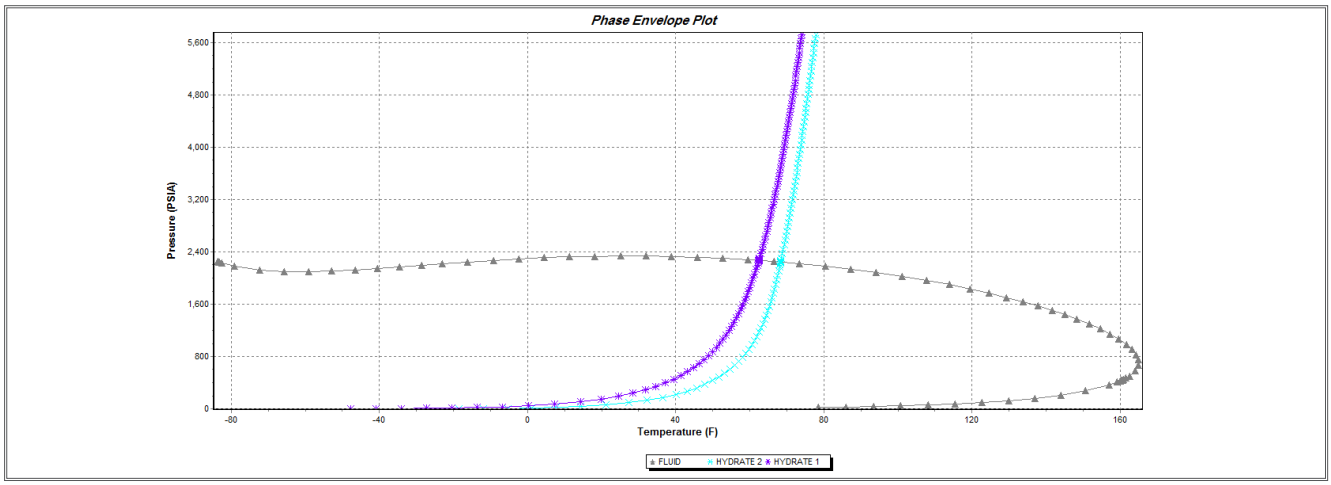
ترکیب	A درصد مولی	B درصد مولی	C درصد مولی	D درصد مولی
N_2	۳/۴۱۵	۳/۳۷۳	۳/۲۷۶	۳/۵۸۸
CO_2	۲/۰۱	۲/۰۰۷	۲/۱۵۲	۲/۱۷
H_2S	۰/۲۹۵	۰/۱۹۹	۰/۲۶۷	۰/۵۶۸
C_1	۸۴/۱۷۵	۸۵/۲۱۴	۸۴/۳۴۸	۸۴/۶۵۴
C_2	۴/۷۴۶	۴/۹۸۲	۴/۸۷۲	۴/۷۰۴
C_3	۱/۶۳	۱/۷۳۱	۱/۶۹۲	۱/۶۱۴
IC_4	۰/۳۱	۰/۳۲۸	۰/۳۲۵	۰/۳۱۳
NC_4	۰/۵۲۴	۰/۵۵	۰/۵۳۹	۰/۵۲۷
IC_5	۰/۲۱	۰/۲۱۸	۰/۲۱۷	۰/۲۱۸
NC_5	۰/۱۸۹	۰/۱۹۳	۰/۱۹	۰/۱۹۷
C_6	۰/۲۵۱	۰/۲۴۶	۰/۲۴۲	۰/۲۷۳
C_7	۰/۲۹۹	۰/۲۸۲	۰/۲۶۲	۰/۳۳۹
C_8	۰/۲۳۵	۰/۲۲۲	۰/۱۹۷	۰/۲۹۸
C_9	۰/۱۱۲	۰/۰۷۱	۰/۰۹۲	۰/۱۶
C_{10}	۰/۰۶۱	۰/۰۳۲	۰/۰۴۵	۰/۰۶۶
H_2O	۱/۵۴۱	۰/۳۵۱	۱/۲۸۳	۰/۳۱

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]

[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]



شکل ۲ | منحنی دما ـ فشار تشکیل هیدرات مربوط به خط لوله A در نسبت‌های جرمی مختلف بازدارنده به آب



شکل ۳ | نمودار فازی و نوع هیدرات تشکیل‌شده (منحنی بنفش هیدرات نوع ۱، منحنی آبی کم‌رنگ هیدرات نوع ۲ است)

نمودار دما ـ فشار هیدرات، شرایطی را نشان می دهد که در آن هیدرات تشکیل می شود. این نمودارها با استفاده از نرم‌افزار PVTSIM20 برای هر خط لوله با توجه به مدل خواص سیالات و درصد اشباع آب در نسبت های جرمی مختلف MEG در آب، جداگانه به دست آمده اند. شکل ۲ اطلاعات یکی از خطوط لوله در نسبت های جرمی مختلف بازدارنده به آب را به‌عنوان نمونه نمایش داده است. این منحنی ها، شرایط تشکیل هیدرات در فشارهای بالاتر و دماهای پایین تر را نشان می‌دهد.

۲-۲. بررسی نوع هیدرات

برای بررسی نوع هیدرات تشکیل‌شده با استفاده از نرم‌افزار پایپ سیم یک مدل خواص سیال از خط لوله تهیه شده است و با رسم نمودار فازی در شرایط خط لوله و برخورد آن با منحنی های نوع هیدرات (موجود در نرم‌افزار) می توان نوع هیدرات را مشخص کرد. بر اساس نتایج به دست آمده (شکل ۳) نوع هیدرات تشکیل‌شده در خطوط لوله از نوع ۱ (I) و ۲ (II) است. هرچه به سمت نمودار هیدرات نوع ۱ و ۲ (خطوط آبی کم‌رنگ و بنفش) نزدیک‌تر شویم،

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]
[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]

احتمال تشکیل هیدرات افزایش می یابد. ناحیهٔ سمت چپ نمودار هیدرات نوع ۱ و ۲، نمایانگر شرایط تشکیل هیدرات است (دما و فشاری که هیدرات در آن تشکیل می شود). هرچه به ناحیهٔ سمت راست هیدرات نوع ۱ و ۲، نزدیک‌تر شویم احتمال تشکیل هیدرات کاهش می‌یابد.

۳. نتایج و بحث

در این قسمت، خروجی شبیه‌سازی خطوط انتقال مختلف با نرم‌افزار الگا تشریح می شود. دما و فشار تشکیل هیدرات در طول خط لوله در حالات مختلف مورد بررسی قرار می گیرد و دبی و نسبت[۴] بهینه تزریق MEG پیشنهاد داده می شود. علاوه بر این، نمودار حاوی افت دما و فشار در طول خطوط لوله است. همچنین بررسی کاملی در زمینه شرایط مختلف قابل‌تغییر نظیر دبی ورودی بازدارنده، انجام گرفته است. متغیرهای دیگری هم از قبیل قطر لوله و ضخامت عایق، می‌توانست مدِ نظر باشد. در مورد قطر لوله باید گفت طراحی خط لوله با توجه به رژیم جریانی در خط لوله و مقدار دبی آن انجام شده و در شرایط عملیاتی نمی توان تغییری در قطر لوله ایجاد کرد چون خط لوله در حال کار است، در نتیجه بررسی این پارامتر نمی تواند مفید باشد ولی می توان ضخامت عایق خط لوله را تغییر داد و تأثیر آن بر تشکیل هیدرات را بررسی کرد. البته انجام این کار از دیدگاه اقتصادی را نیز باید مورد بررسی دقیق قرار داد.

۳-۱. بررسی تشکیل هیدرات و تعیین دبی و نسبت جرمی بهینه مواد بازدارنده

در تمامی نمودارهای پیشِ رو، محور عمودی، اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط لوله و محور افقی، طول خط لوله را نشان می دهد (نقطه صفر محور افقی، معادل ورودی خط لوله است). همان‌طور که در شکل‌های ۴ الی ۷ دیده می شود در حالت بدون تزریق مواد بازدارنده، در تمامی خطوط لوله از فاصله تقریبی ۲۵ الی ۴۰ کیلومتری از سکوی دریایی، احتمال تشکیل هیدرات وجود دارد؛ بنابراین برای جلوگیری از تشکیل هیدرات تزریق مواد بازدارنده توصیه می شود. برای به دست آوردن دبی و نسبت بهینه تزریق بازدارنده، ابتدا در دبی و نسبت های تزریق مختلف نتایج را بررسی کرده و سپس دبی بهینه تزریق بازدارنده که قادر باشد ۵ درجه سانتی‌گراد ضریب ایمنی در جلوگیری از تشکیل هیدرات ایجاد کند، انتخاب شده است.

جدول ۴، به‌طور خلاصه، نتایج به‌دست‌آمده را نمایش می دهد. همان‌طور که در جدول هم مشخص شده است، برای خط لوله های A، C و D به‌رغم نسبت جرمی بهینه تزریق مواد بازدارندهٔ یکسان، دبی بهینه تزریق مواد بازدارنده برای خط لوله D به علت تفاوت در ترکیبات خوراک ورودی به خط لوله و شرایط فیزیکی خط لوله مانند عمق و طول متفاوت است.

جدول ۴| خلاصه‌ای از نتایج دبی و نسبت جرمی بهینهٔ تزریق بازدارنده پیشنهادی برای خطوط لوله مورد مطالعه

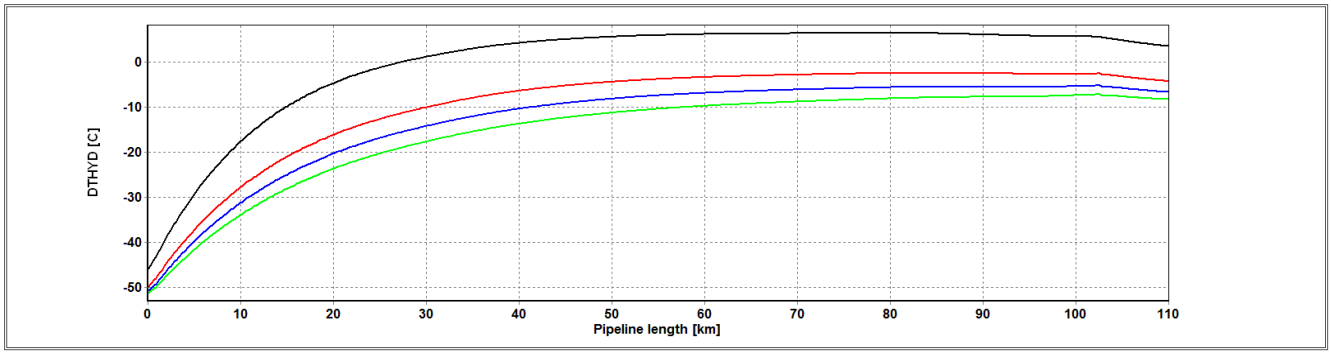
خط لوله	نسبت بهینه تزریق مواد بازدارنده (کسر جرمی بازدارنده در آب)	دبی بهینه تزریق مواد بازدارنده (مترمکعب بر ساعت)
A	۰/۷	۱۵
B	۰/۶	۱۸
C	۰/۷	۱۵
D	۰/۷	۲۰

در شکل های ۴ الی ۶ محور عمود، اختلاف بین دمای تشکیل هیدرات و دمای خط لوله را نشان می دهد و محور افقی نمایانگر فاصله خط لوله از سکو تا خشکی (پالایشگاه) است. هرگاه اختلاف بین دمای تشکیل هیدرات و دمای خط لوله (محور عمود) به میزان بزرگ‌تر و مساوی صفر برسد هیدرات تشکیل خواهد شد. همان طور که در شکل های ۴ الی ۶ مشاهده می شود، برای خط لوله‌های A، C و D در حالت بدون تزریق مواد بازدارنده (خط سیاه‌رنگ) با توجه به اینکه مقدار محور عمود در فواصل تقریبی ۲۵ تا ۴۰ کیلومتری از سکوی دریایی به صفر می رسد، احتمال تشکیل هیدرات در این فواصل وجود دارد؛ بنابراین برای جلوگیری از تشکیل هیدرات، تزریق مواد بازدارنده MEG توصیه می شود.

برای به دست آوردن دبی و نسبت بهینه تزریق بازدارنده، ابتدا در نسبت و دبی های تزریق مختلف نتایج را بررسی می کنیم. در نسبت تزریق کمتر از ۰/۶ تا دبی های نزدیک به ۲۵ مترمکعب بر ساعت برای خطوط لوله A و D و ۳۵ مترمکعب بر ساعت برای خط لوله C نیز هیدرات تشکیل می شود و از نظر اقتصادی استفاده از بازدارنده در دبی های بالاتر مقرون‌به‌صرفه نیست؛ بنابراین نسبت ۰/۷ مدنظر قرار گرفت. در نسبت ۰/۷، دبی بهینه تزریق MEG (خط آبی‌رنگ) با در نظر گرفتن ضریب ایمنی (۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای تشکیل هیدرات) به ترتیب ۱۵، ۱۵ و ۲۰ مترمکعب بر ساعت است. بنابراین توصیه می شود با توجه به گزارش‌های صنعتی، نسبت بهینه، ۰/۷ در نظر گرفته شود. باید دانست که ضریب ایمنی با دبی رابطهٔ مستقیم دارد، بدین معنی که با افزایش دبی به ضریب ایمنی بالاتری نیاز خواهیم داشت. به این معنا که تفاوت در نمودارها به دلیل تفاوت در ترکیب سیال ورودی و شرایط خط لوله است.

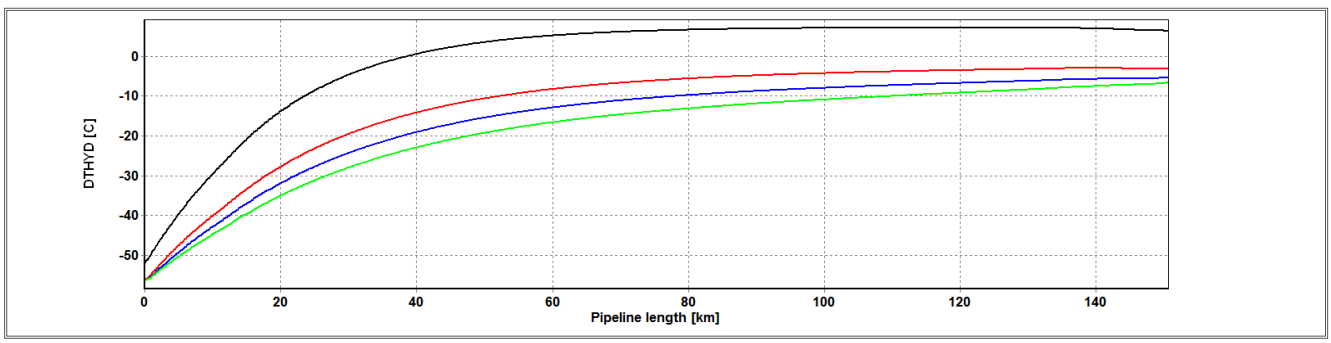
[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]

[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]



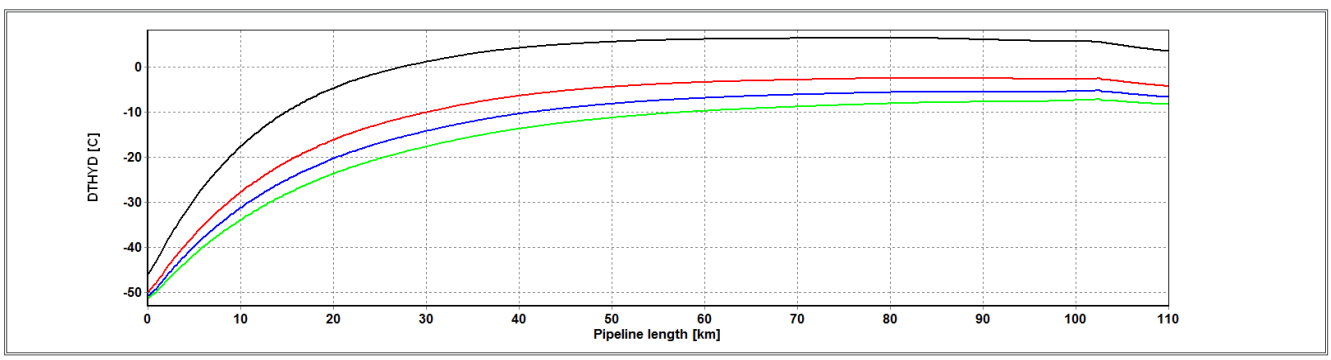
شکل ۴ | منحنی اختلاف دمای تشکیل هیدرات با دمای خط لوله در طول خط لوله A (از سکو تا پالایشگاه).

منحنی سیاه‌رنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که از بازدارنده استفاده نشده است. منحنی قرمزرنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که دبی تزریق بازدارنده ۱۰ مترمکعب بر ساعت است. منحنی آبی‌رنگ DTHYD در طول خط لوله در حالت دبی تزریق بهینه ۱۵ مترمکعب بر ساعت. منحنی سبزرنگ DTHYD در طول خط لوله با دبی تزریق ۲۰ مترمکعب بر ساعت



شکل ۵ | . منحنی اختلاف دمای تشکیل هیدرات با دمای خط لوله در طول خط لوله C.

منحنی سیاه‌رنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که از بازدارنده استفاده نشده است. منحنی قرمزرنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که دبی تزریق بازدارنده ۱۰ مترمکعب بر ساعت است. منحنی آبی‌رنگ DTHYD در طول خط لوله در حالت دبی تزریق بهینه ۱۵ مترمکعب بر ساعت. منحنی سبزرنگ DTHYD در طول خط لوله با دبی تزریق ۲۰ مترمکعب بر ساعت

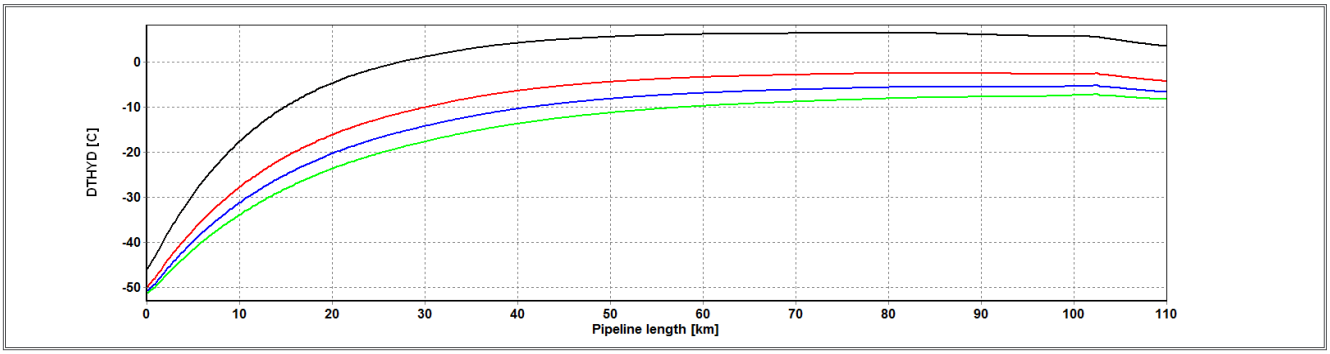


شکل ۶ | منحنی اختلاف دمای تشکیل هیدرات با دمای خط لوله در طول خط لوله D.

منحنی سیاه‌رنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که از بازدارنده استفاده نشده است. منحنی قرمزرنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که دبی تزریق بازدارنده ۱۰ مترمکعب بر ساعت است. منحنی آبی‌رنگ DTHYD در طول خط لوله در حالت دبی تزریق بهینه ۲۰ مترمکعب بر ساعت. منحنی سبزرنگ DTHYD در طول خط لوله با دبی تزریق ۲۵ مترمکعب بر ساعت.

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]

[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]



شکل ۷ | منحنی اختلاف دمای تشکیل هیدرات با دمای خط لوله در طول خط لوله B.

منحنی سیاه‌رنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که از بازدارنده استفاده نشده است. منحنی قرمزرنگ: اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط در حالتی که دبی تزریق بازدارنده ۱۰ مترمکعب بر ساعت است. منحنی آبی‌رنگ DTHYD در طول خط لوله در حالت دبی تزریق بهینه ۱۸ مترمکعب بر ساعت. منحنی سبزرنگ DTHYD در طول خط لوله با دبی تزریق ۲۵ مترمکعب بر ساعت.

در خط لوله B (شکل ۷)، برای حالت بدون تزریق مواد بازدارنده، مطابق توضیحات پیشین، محور عمود اختلاف بین دمای تشکیل هیدرات و دمای خط لوله است و زمانی که این اختلاف به مقدار صفر و بیش از آن برسد هیدرات تشکیل خواهد شد. در این خط لوله، از فاصله تقریبی ۳۶ کیلومتری از سکوی دریایی احتمال تشکیل هیدرات وجود دارد؛ بنابراین تزریق مواد بازدارنده به‌منظور جلوگیری از تشکیل هیدرات ضروری است. برای به دست آوردن دبی و نسبت بهینه تزریق بازدارنده، ابتدا در نسبت و دبی های تزریق مختلف نتایج را بررسی می‌کنیم. در نسبت تزریق کمتر از ۰/۵ تا دبی های نزدیک به ۳۰ مترمکعب بر ساعت نیز هیدرات تشکیل می‌شود و از نظر اقتصادی استفاده از بازدارنده در دبی های بالاتر مقرون‌به‌صرفه نیست. بنابراین نسبت ۰/۶ مدنظر قرار گرفت. در نسبت ۰/۶، دبی تزریق بهینه با در نظر گرفتن ضریب ایمنی (۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای تشکیل هیدرات) در حدود ۱۸ مترمکعب بر ساعت است.

۳-۲. تأثیر افزایش دمای بیرون خط لوله

در این قسمت به‌منظور بررسی تأثیر افزایش دمای محیط بر تشکیل هیدرات، مطابق جدول ۵، دمای محیط بیرون تغییر داده شد. همان‌طورکه در شکل ۸ دیده می شود، برای خطوط لوله A، B و C، در هیچ نقطه‌ای اختلاف بین دمای تشکیل هیدرات و خط لوله به صفر نمی رسد. این بدان معنی است که امکان تشکیل هیدرات در این خطوط وجود ندارد. بنابراین پیشنهاد می شود به‌منظور صرفه جویی در هزینه ها، در ماه های گرم سال میزان بازدارندهٔ کمتری مورد استفاده قرار گیرد. در خط لوله D مشاهده می شود که بدون تزریق مواد بازدارنده در نقاط انتهایی خط لوله دمای ضریب ایمنی تزریق بازدارنده حدود ۲ درجه سانتی گراد کمتر از دمای تشکیل هیدرات می شود که برای رساندن دما به ۵ درجه سانتی گراد کمتر از دمای تشکیل هیدرات می توان با تزریق بازدارنده با دبی ۳ مترمکعب در ساعت ضریب ایمنی را افزایش داد؛ بنابراین پیشنهاد می شود که در ماه‌های گرم سال میزان بازدارنده کمتری مورد استفاده قرار گیرد. نکته دیگری که در شکل ۸ به چشم می خورد این است که شیب نمودارها در انتها به‌تدریج کاهش می یابد. علت را می توان این‌چنین توضیح داد که با نزدیک شدن به خشکی، به علت بالا رفتن دمای خط لوله، احتمال تشکیل هیدرات نیز کاهش می یابد.

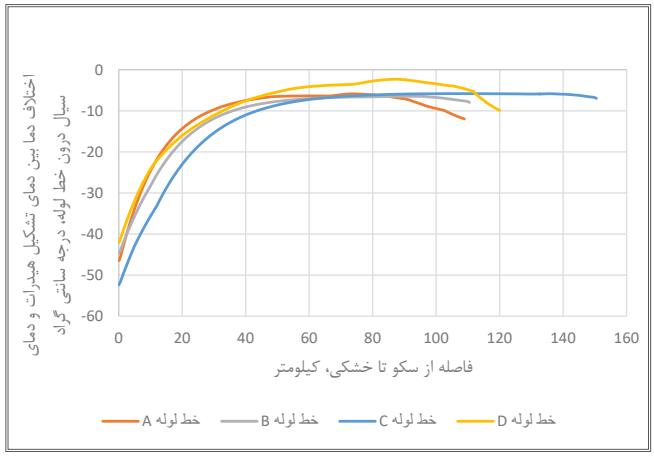
جدول ۵ | تغییرات دمایی به‌منظور بررسی تأثیر دمای محیط بر تشکیل هیدرات

Ambient temperature	۳۵°C
Temp. at depth -20m	۳۰°C
Temp. at depth -40m	۲۸°C
Temp. at depth -60m	۲۶°C
Temp. at depth -60m	۲۴°C

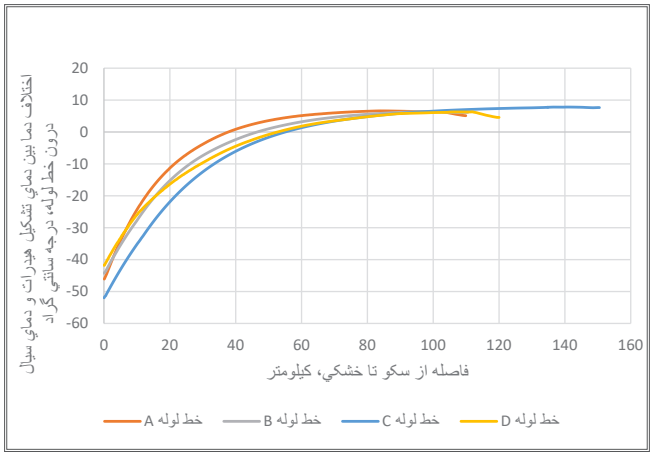
۳-۳. تأثیر افزایش ضخامت عایق خط لوله

در این بخش تأثیر افزایش ضخامت لایه های عایق در جلوگیری از تشکیل هیدرات بررسی شده است. بدین منظور، ضخامت لایه عایق bitumen و لایه بتنی، به ترتیب ۶ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر افزایش یافته و سپس بدون تزریق بازدارنده، شرایط تشکیل هیدرات مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]
[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]



شکل ۸ | منحنی اختلاف دمای تشکیل هیدرات و دمای خط لوله در طول تمامی خطوط لوله



شکل ۹ | تأثیر افزایش ضخامت عایق‌های خطوط لوله بر تشکیل هیدرات

است، افزایش ضخامت لایه های عایق به‌تنهایی مانعی در مقابل تشکیل هیدرات در تمامی طول خط لوله نبوده و در فواصل ۳۵ تا ۵۸ کیلومتری از سکو، اختلاف بین دمای تشکیل هیدرات و دمای سیال خط لوله به بیش از صفر درجه سانتی گراد می رسد و این به معنای تشکیل هیدرات است. بنابراین استفاده از این روش به‌منظور جلوگیری از تشکیل هیدرات توصیه نمی شود.

۴. نتیجه گیری

از پژوهش انجام‌شده، نتایج زیر حاصل می شود:

۱. تشکیل هیدرات گازی، همچنان یکی از چالش های بزرگ در خطوط انتقال گاز است. یکی از مؤثرترین راه ها برای جلوگیری از تشکیل هیدرات در خطوط انتقال گاز، استفاده از بازدارنده هاست. یکی از پرکاربردترین و تأثیرگذارترین بازدارنده ها، مونو اتیلن گلایکول (MEG) هست که در این مطالعه استفاده شد و نتایج حاصل، حاکی از کارآیی این بازدارنده در جلوگیری از تشکیل هیدرات است.

۲. در این مطالعه، ۴ خط لوله انتقال گاز از سکوهای دریایی به تأسیسات واقع در خشکی در یکی از میادین گازی فراساحل ایران، با استفاده از نرم افزار الگا شبیه سازی شده و احتمال تشکیل هیدرات در آن ها مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت دبی و نسبت بهینه تزریق بازدارنده مونو اتیلن گلایکول برای هر خط لوله به‌صورت جداگانه تعیین شد.

۳. با استفاده از نرم‌افزار پایپ‌سیم مشخص شد که هیدرات تشکیل‌شده در خطوط لوله مورد مطالعه از نوع ۱ (I) و ۲ (II) هستند.

۴. آنالیز حساسیت سنجی برای بررسی شرایط مختلف خط لوله انجام گرفت. این آنالیز شامل تغییر دمای محیط بیرون و تغییر ضخامت لایه های عایق بود. نتایج حاصل نشان داد که افزایش ضخامت لایه های عایق به‌تنهایی قادر نیست مانع از تشکیل هیدرات در تمام طول خط لوله شود.

۵. با توجه به اینکه در این مطالعه بدترین شرایط محیطی برای تشکیل هیدرات در نظر گرفته شد، با افزایش دمای محیط در ماه های گرم سال، احتمال تشکیل هیدرات کاهش می یابد یا این که هیدرات در فواصل دورتری از سکو تشکیل می شود؛ بنابراین در این فصل ها می توان از میزان بازدارندهٔ کمتری استفاده کرد.

پانویس ها

1. Anti-agglomerate inhibitor
2. Hold time
3. Portable slurry
4. کسر جرمی بازدارنده در آب

منابع

[1]. Y. F. Makogon, “Hydrates of Hydrocarbons”, Pennwell Publishing Co. Oklahoma, 1997.
[2]. Sloan E. D., "Clathrate Hydrates of Natural Gases", Second ed., Mrcel, New York,1998.
[3]. Sloan Jr, E. D. and C. Koh, “Clathrate hydrates of natural gases”. 2227: CRC press.
[4]. Katz, D. L.V., “Handbook of natural gas engineering”. 1959: McGraw-Hill.
[5]. Mokhatab, S. and W. A. Poe, “Handbook of natural gas transmission and processing”. 2012: Gulf Professional Publishing.

[Downloaded from ekteshaf.nioc.ir on 2023-04-20]
[DOR: 20.1001.1.25381652.1401.1401.201.3.5]