

مروری بر چالش ها و ارزیابی روش های پیش بینی تشکیل هیدرات های گازی زیر دریایی

سهیل مشتاق زاده^{۱*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- فراوری و انتقال گاز، دانشکده اهواز، دانشگاه صنعت نفت

Soheil.moshtaghzadeh2020@gmail.com

۱. خلاصه

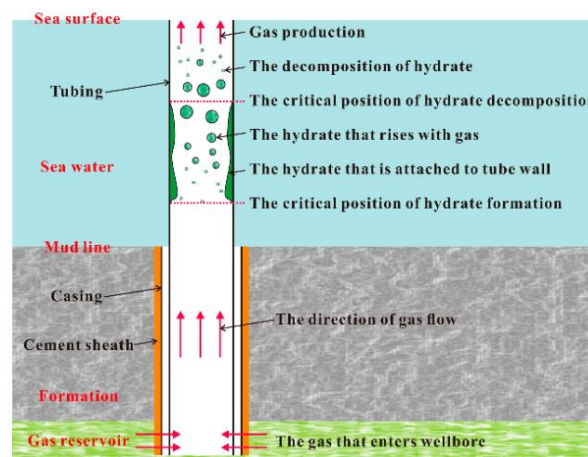
تشکیل هیدرات های گازی در سامانه های زیر دریایی، با ایجاد انسداد، افت تولید و مخاطرات ایمنی، یکی از مهم ترین چالش های اطمینان جریان است. پیش بینی دقیق مرزهای تشکیل در شرایط چند جزئی، شور و گذرای میدان برای طراحی راهبردهای پیشگیرانه و عملیاتی حیاتی است. این پژوهش به دنبال تبیین چالش ها و ارزیابی تطبیقی روش های پیش بینی تشکیل هیدرات های گازی زیر دریایی است؛ به ویژه سه خانواده اصلی شامل مدل های تعادلی ترمودینامیکی، چارچوب های سینتیکی و نیمه تجربی و همچنین روش های جریان کارهای صنعتی مبتنی بر شبیه ساز گذرای چندفازی و بسته های خواص سیال بررسی می شود. مرور نشان می دهد رویکردهای تعادلی، همراه با شبیه سازی گذرا، ابزار کارآمدی برای نقشه برداری سریع نواحی خطر در امتداد چاه و خط لوله اند؛ مدل های سینتیکی برای برآورد زمان القا در سناریوهای shut-in/restart و تولید مبتنی بر افت فشار ضروری اند؛ و روش های داده محور در دامنه های داده غنی می توانند دقت پیش بینی شرایط تعادل و شاخص های ریسک را هر چند با محدودیت های تبیین پذیری و برون یابی بهبود دهند. ترجمه نتایج به شاخص های عملیاتی مانند زیرسردسازی دما و فاصله فشار تا تعادل، امکان رتبه بندی مقطع به مقطع ریسک و تصمیم گیری هدفمند درباره دوز بازدارنده را فراهم می کند. چارچوب پیشنهادی، کالیبراسیون میدانی، تحلیل حساسیت سناریویی و یکپارچه سازی مدل های فیزیک محور و داده محور را توصیه می کند و مسیر آینده را به سوی hybrid modeling و physics-informed ML برای تصمیم یارهای بلادرنگ هموار می سازد.

کلمات کلیدی: هیدرات، هیدرات های زیر دریایی، خواص سیال، ترمودینامیک، کالیبراسیون

۱. مقدمه

تشکیل هیدرات‌های گازی در سامانه‌های زیردریایی و فراساحلی، نتیجه طبیعی برهم‌کنش فشارهای بالا و دماهای پایین در خطوط لوله، چاه‌ها و تجهیزات انتقال است و با ایجاد انسداد، کاهش دبی تولید و افزایش ریسک‌های ایمنی، به یکی از چالش‌های اصلی حوزه اطمینان جریان^۱ تبدیل شده است. در آب‌های عمیق، شرایط ترمودینامیکی مناسب برای پایداری هیدرات، حساسیت سامانه را نسبت به کوچک‌ترین تغییرات عملیاتی افزایش می‌دهد و ضرورت پیش‌بینی دقیق شرایط و نواحی مستعد تشکیل هیدرات را دوچندان می‌کند. شواهد صنعتی و نتایج پژوهشی نشان می‌دهد که عدم پیش‌بینی یا پیش‌بینی نادقیق این پدیده، می‌تواند به گرفتگی ناگهانی، توقف طولانی‌مدت تولید و تحمیل هزینه‌های سنگین مداخله منجر شود [1].

به طور کلی، رویکردهای پیش‌بینی تشکیل هیدرات را می‌توان در سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد. نخست، مدل‌های تعادلی ترمودینامیکی^۲ که بر مبنای نظریه‌های کلاسیک مانند مدل قفسه‌ای وندروالس-پلاتتو^۳ و معادلات حالت^۴ بنا شده‌اند و مرز تعادل فاز هیدرات را در فضای فشار-دما تعیین می‌کنند. دوم، مدل‌های سینتیکی و رسوب‌گذاری^۵ که به فرآیند هسته‌زایی، رشد و انتقال ذرات هیدرات پرداخته و برای تحلیل رفتار سامانه در شرایط گذرا به کار گرفته می‌شوند. سوم، شبیه‌سازهای گذرای چندفازی^۶ که با بازسازی همزمان میدان‌های دما، فشار و الگوی جریان در مقیاس چاه و خط لوله، امکان شناسایی بخش‌های پرریسک را فراهم می‌کنند. در عمل، ترکیب شبیه‌ساز صنعتی OLGA با بسته خواص سیال PVTsim به‌عنوان یکی از جریان‌کارهای استاندارد برای نقشه‌برداری نواحی تشکیل هیدرات در سیستم‌های زیردریایی شناخته می‌شود [2].



شکل ۱. مدل تشکیل و تجزیه هیدرات در خط لوله تولید یک مخزن گاز فراساحلی [3]

¹ Flow Assurance

² Thermodynamic Equilibrium models

³ Van der Waals-Platteeuw

⁴ Equations of State

⁵ Kinetic and Deposition Models

⁶ Transient Multiphase Simulators

مطالعات میدانی در چاه‌های گاز آب‌های عمیق نشان داده‌اند که می‌توان ناحیه تشکیل هیدرات را تحت سناریوهای مختلف عملیاتی، از جمله تولید پایدار، خفه‌سازی درون‌چاهی^۱ و توقف موقت چاه^۲، پیش‌بینی کرد؛ هر یک از این سناریوها اثر متفاوتی بر پروفیل دما-فشار و احتمال ورود سامانه به ناحیه پایداری هیدرات دارد. افت ناگهانی فشار و دما در اثر خفه‌سازی می‌تواند سامانه را به سرعت به محدوده تشکیل هیدرات وارد کند، در حالی که پس از توقف چاه، نزدیک شدن تدریجی دمای سیال به دمای محیط، ناحیه تشکیل را به سمت بالادست گسترش داده و طراحی دقیق زمان توقف امن^۳ را ضروری می‌سازد [4].

در کنار مدل‌های فیزیک‌محور، روندهای نوین پژوهشی به سمت بهره‌گیری از روش‌های داده‌محور و یادگیری ماشین^۴ حرکت کرده است. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵ (ANN)، برنامه‌نویسی بیان ژنی^۶ (GEP) و الگوریتم‌هایی نظیر CatBoost، امکان پیش‌بینی دمای تعادل و شرایط تشکیل در حضور نمک‌ها و بازدارنده‌ها را با دقت بالا در برخی سامانه‌ها فراهم کرده است. با این حال، چالش‌هایی مانند محدودیت تبیین‌پذیری^۷، وابستگی شدید به کیفیت و گستره داده‌های آموزشی و عدم اطمینان در برون‌یابی^۸ به شرایط پیچیده و گذرای میدانی، مانع استفاده مطمئن و مستقل از این مدل‌ها در طراحی صنعتی می‌شود [4].

مدیریت ریسک تشکیل و بازتشکیل هیدرات در خطوط لوله مبتنی بر ترکیبی از پایش میدانی، شبیه‌سازی عددی و راهبردهای شیمیایی-عملیاتی است. تزریق مونو اتیلن گلیکول (MEG) و نمک‌ها به‌عنوان بازدارنده‌های ترمودینامیکی^۹، مرز تعادل هیدرات را جابه‌جا کرده و محدوده ایمن بهره‌برداری را گسترش می‌دهد. کوپل کردن مدل‌های تعادلی و شبیه‌سازی چندفازی در قالب جریان‌کار OLGA-PVTsim، امکان تعیین نواحی پرخطر در امتداد خط، تعریف ماتریس‌های ریسک بر مبنای زیرسردسازی دما^{۱۰} (ΔT) و اختلاف فشار تا تعادل^{۱۱} (ΔP)، و رتبه‌بندی بخش‌های خط از وضعیت ایمن تا پرخطر را فراهم می‌کند [۶]. از منظر رفتار جریان، نقش سرعت گاز، دینامیک فیلم آبی و نواحی کم‌ارتفاع در تجمع مایع و افزایش احتمال رسوب و پلاگ هیدرات حائز اهمیت است؛ تغییر در این متغیرها فاصله بین نقطه شروع تشکیل و شروع رسوب را متاثر می‌کند و نشان داده شده است که تأخیر در هسته‌زایی می‌تواند این فاصله را افزایش داده و در طراحی راهبردهای restart و کنترل بازتشکیل به‌طور مستقیم اثرگذار باشد [5].

¹ downhole throttling

² shut-in

³ safe shut-in time

⁴ data-driven, machine learning

⁵ Artificial Neural Network

⁶ Gene Expression Programming

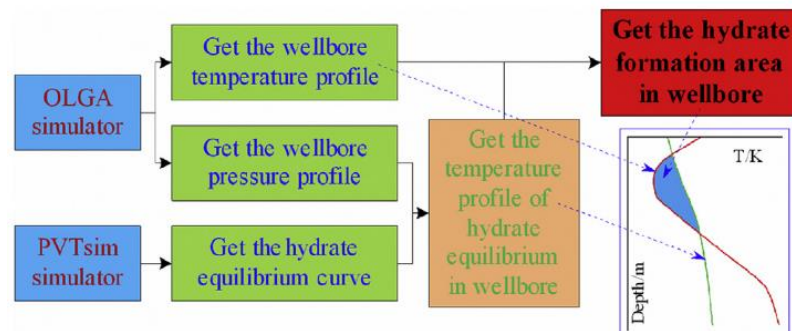
⁷ interpretability

⁸ extrapolation

⁹ thermodynamic inhibitors

¹⁰ subcooling

¹¹ pressure margin



شکل ۲. طرح محاسباتی برای تعیین ناحیه تشکیل هیدرات در ستون چاه [1]

این مجموعه شواهد، ضرورت تدوین نگاهی یکپارچه به پیش‌بینی تشکیل هیدرات‌های گازی زیردریایی را برجسته می‌کند؛ نگاهی که در آن مدل‌های ترمودینامیکی و سینتیکی، شبیه‌سازهای گذرای چندفازی، داده‌های میدانی و روش‌های یادگیری ماشین، در قالب چارچوبی منسجم برای پایش، ارزیابی و مدیریت ریسک به کار گرفته شوند.

۲. پیشینه پژوهش

گو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی بر روی پیش‌بینی ناحیه تشکیل هیدرات در چاه گاز آب‌های عمیق، با مقایسه چهار روش پیش‌بینی دمای درون‌لوله با داده‌های میدانی و پنج روش پیش‌بینی تعادل هیدرات با داده‌های آزمایشگاهی، روشی تلفیقی مبتنی بر شبیه‌ساز گذرای چندفازی OLGA و بسته خواص سیال PVTsim ارائه کردند و آن را بر داده‌های یک چاه در دریای جنوبی چین به کار بردند؛ نتایج کیفی نشان داد که افزایش نرخ تولید گاز، افزایش غلظت بازدارنده‌ها و افزایش ضخامت عایق حرارتی باعث کاهش ناحیه تشکیل هیدرات می‌شود، در حالی که افزایش رسانندگی حرارتی عایق و افزایش مدت زمان توقف چاه این ناحیه را گسترش می‌دهد و اثر خفه‌سازی درون‌چاهی با افت ناگهانی دما و فشار، احتمال تشکیل هیدرات را افزایش می‌دهد. به‌صورت کمی نیز عملکرد مدل گزارش شد: در مقایسه چهار روش پیش‌بینی افت دمای درون‌لوله با داده‌های میدانی، مقدار اندازه‌گیری شده ۲۱.۷ درجه سانتی‌گراد و پیش‌بینی مدل تلفیقی ۲۱.۴۵ درجه سانتی‌گراد بود که خطای نسبی ۱.۱۵ درصد به‌دست آمد و از سه روش مرجع کمتر بود (به‌ترتیب ۳.۰۴، ۱.۵۷ و ۵.۹ درصد)؛ همچنین خطای نسبی پیش‌بینی افت فشار ۸.۴۱ درصد گزارش شد. در اعتبارسنجی تعادل هیدرات نیز خطای نسبی مدل ۰.۰۵۷ درصد به‌دست آمد، در حالی که روش‌های نمودار تجربی، پولو-مالیف، استرگارد و هم‌شمید به‌ترتیب ۰.۳۱۴، ۵.۰۲۷، ۴.۵۱۶ و ۲.۹۸۷ درصد خطا داشتند [1].

عباسی^۲ و مهد هاشم^۳ در سال ۲۰۲۲ در پژوهشی مروری که بر اصول بنیادین پیش‌بینی تشکیل هیدرات‌های گازی انجام دادند، با مرور گسترده ادبیات، چارچوب‌های ترمودینامیکی (مدل ون‌دروالس-پلاتیو با معادله حالت پنگ-رابینسون)،

¹ Guo

² Abbasi

³ Mohd Hashim

هم‌بستگی‌های تجربی کلاسیک (مانند کارسون-کتز و همراه‌شمایدت)، و رویکردهای نوین داده‌محور شامل ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که برای خطوط لوله آب‌عمیق نیاز به مدل‌های ترکیبی هوشمند برای بهبود اطمینان جریان وجود دارد؛ همچنین در گزارش آن‌ها به مطالعاتی اشاره شده که در آن مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی با آموزش/اعتبارسنجی مناسب به دقتی در حد $MSE \approx 0.99$ ¹ دست یافته‌اند [2].

عباسی و مهد هاشم در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی بر توسعه مدل پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات برای خطوط لوله زیردریایی، با صورت‌بندی همبستگی‌های نمایی و گاوسی و به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند شامل بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی گرگ خاکستری بر داده‌های واقعی خط لوله برای گاز متان، نشان دادند که مدل پیشنهادی با داده‌های میدانی همخوانی مطلوبی دارد و قابلیت برآورد دمای تشکیل هیدرات و فشار تشکیل هیدرات را در دامنه گسترده‌ای فراهم می‌کند؛ تحلیل آماری نتایج بیانگر برازش بسیار خوب مدل است، به‌طوری‌که ضریب تعیین برای فشار ۰.۹۸۵۷ و برای دما ۰.۹۹۹۹ گزارش شد، آماره دیوربین-وانسون برای فشار ۰.۰۴۷ و برای دما ۰.۰۳۲ به‌دست آمد، و در آزمون تحلیل واریانس، آماره F برای فشار ۷۲.۹۲ و برای دما ۷۲.۹۸۲ با معناداری کمتر از عددی با سه اعشار ثبت گردید؛ همچنین معیار میانگین خطای مربعی برای ارزیابی خطای مدل در ۱۰۰۰ تکرار به‌کار رفت و روند نزولی آن در مقایسه سه الگوریتم بهینه‌سازی کارایی مدل را تایید کرد [4].

وی^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی که بر تولید از مخزن گاز دریایی و تغییرات دما و فشار در طول چاه متمرکز بود، با تدوین مدل‌های ریاضی تعادل فازی هیدرات، دمای درون‌چاهی، فشار درون‌چاهی و تشکیل/تجزیه هیدرات و توسعه روش حل عددی، نواحی و قاعده‌مندی‌های تشکیل و تجزیه هیدرات را شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت انجام دادند؛ نتایج نشان داد افزایش نرخ تولید روزانه گاز، افزایش درصد آب، یا افزایش گرادیان زمین‌گرایی موجب کاهش تمایل به تشکیل هیدرات در چاه می‌شود و در نتیجه ریسک انسداد و مخاطرات ایمنی کاهش می‌یابد، در حالی که کاهش عمق آب دریا یا کاهش فشار سر لوله نیز اثر مشابهی بر کاهش ریسک دارد. در بخش صحت‌سنجی با داده‌های میدانی، خطای نسبی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و محاسباتی در همه موارد کمتر از ۵ درصد گزارش شد (برای نمونه، در چاه LN-X با تولید روزانه ۱۰۴ متر مکعب در روز، ناحیه تشکیل اندازه‌گیری‌شده ۰ تا ۱۸۰ متر و محاسبه‌شده ۰ تا ۱۷۵ متر بود و خطای نسبی ۲.۸۷ درصد به‌دست آمد). (تحلیل سناریوها نیز نشان داد با افزایش فشار سر لوله از ۰.۱ تا ۱۰ مگاپاسکال، ضمن افزایش فشار ته‌چاه، عمق ناحیه تشکیل هیدرات گسترده می‌شود؛ به طوری که در ۵ مگاپاسکال ناحیه تشکیل از ۱۴۹۲ تا ۳۴۸ متر و ناحیه تجزیه از ۳۴۸ متر تا سطح، و در ۱۰ مگاپاسکال ناحیه تشکیل از ۱۷۶۰ تا ۲۱ متر و ناحیه تجزیه از ۲۱ متر تا سطح به‌دست آمد. همچنین با افزایش درصد آب از ۰.۱ تا ۰.۳، به علت تغییرات چگالی و ظرفیت گرمایی مخلوط، ناحیه تشکیل کوچک‌تر شد و به ترتیب به ۱۴۹۲-۳۴۸ متر، ۱۳۱۴-۲۹۸ متر و ۹۹۷-۳۸۰ متر تغییر کرد که نشان‌دهنده کاهش احتمال انسداد و بهبود ایمنی بهره‌برداری است [3].

¹ Mean Squared Error

² Wei

مکواشی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی مروری که بر شکل‌گیری، پیشگیری، رفع انسداد و کنترل هیدرات‌های گازی در سامانه‌های خط لوله متمرکز بود، با جمع‌بندی ادبیات نشان دادند که علاوه بر اجتناب از ناحیه پایداری هیدرات، رویکردهای مدیریت زمان‌وابسته نیز اهمیت یافته‌اند؛ از جمله به‌کارگیری بازدارنده‌های کم‌دوز برای مدیریت دوغاب هیدرات و کاهش ریسک پلاگینگ. آنان بر عوامل کلیدی مؤثر بر تشکیل مانند حضور آب آزاد، دمای پایین، فشار عملیاتی بالا، الگوی جریان و وجود گازهای اسیدی تأکید کردند و سطوح و رابط‌های محتمل تشکیل و تجمع (گاز-مایع، مایع-مایع، گاز-جامد، مایع-جامد، جامد-جامد) را مرور نمودند. در جمع‌بندی گزینه‌های پیشگیرانه و درمانی، گزارش کردند که متانول و مونو اتیلن گلیکول به‌عنوان بازدارنده‌های ترمودینامیکی مرسوم به‌کار می‌روند و در مقایسه‌های عملیاتی، برای جلوگیری کامل از تشکیل هیدرات در برخی سامانه‌ها غلظت بیش از ۲۰٪ متانول لازم است؛ در عین حال به دلایل ایمنی، بهداشتی و محیط‌زیستی، صنعت غالباً استفاده از مونو اتیلن گلیکول را ترجیح می‌دهد. همچنین بازدارنده‌های کم‌دوز با غلظت‌های کمتر از ۱٪ وزنی به‌عنوان راهکاری اقتصادی برای ممانعت از هسته‌زایی یا تجمع بلورها مطرح شدند. در بخش ابزارهای مهندسی، استفاده از شبیه‌ساز گذرای چندفازی OLGA برای پیش‌بینی دما و فشار و اعلام شرایط مستعد هیدرات، و نرم‌افزارهای تعادلی مانند CSMGem و CSMHyFAST و مدل‌های سینتیکی مانند CSMHyK و نیز ابزار CSMPlug برای برآورد زمان/شرایط فروگسیختگی پلاگ مورد اشاره قرار گرفت. در حوزه راهکارهای رفع انسداد نیز کاهش فشار کنترل‌شده، تزریق بازدارنده‌های ترمودینامیکی به محل انسداد با کوئل تیوب، گرمادهی فعال، و پرهیز از روش‌های مکانیکی مخرب همچون پیگی به‌عنوان رویه‌های توصیه‌شده جمع‌بندی شدند [6].

لیو^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی که بر پیش‌بینی و مدیریت بازتشکیل هیدرات در خطوط لوله طی تولید فراساحلی با روش افت فشار متمرکز بود، با توسعه یک مدل گذرای کوئل دما-فشار که اثر پمپ درون‌چاهی الکتریکی و پیش‌گرمایش القایی را همزمان لحاظ می‌کند، تکامل دوفازی گاز-مایع را شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین ریسک بازتشکیل در لوله تخلیه رخ می‌دهد و الگوی غالب جریان در این بخش حبابی است؛ آن‌ها نشان دادند که برای حذف کامل ریسک بازتشکیل، غلظت حداقلی ۲۲ درصد مونو اتیلن گلیکول لازم است و در ادامه راهبرد دوپمپ-دوهیتر را به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر برای مهار ریسک بدون استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی پیشنهاد کردند؛ همچنین تطابق نزدیک نتایج شبیه‌سازی با داده‌های میدانی (در پروژه‌های نفت و گاز متداول) دقت مدل را به‌طور غیرمستقیم تأیید کرد.

وو^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۵ در پژوهشی که بر پیش‌بینی ریسک تشکیل هیدرات در خطوط لوله زیردریایی گاز تر با تزریق مونو اتیلن گلیکول متمرکز بود، با ترکیب شبیه‌سازی تعادل فازی در بسته سیالی PVTsim و محاسبات گذرای چندفازی تمام‌مقیاس در OLGA، ماتریس‌های ارزیابی ریسک مبتنی بر اختلاف زیرسردسازی دما و اختلاف فشار را برای ۲۸۰ مقطع خط لوله تدوین و نواحی پرخطر را شناسایی کردند؛ نتایج نشان داد که افزایش غلظت مونو اتیلن گلیکول و افزایش شوری به‌صورت هم‌افزا منحنی تعادل هیدرات را به سمت دماهای پایین‌تر و فشارهای بالاتر جابه‌جا می‌کند و با افزودن ۱.۵۲ درصد مولی کلرید سدیم، ریسک در سراسر خط به سطح «هیچ» تنزل می‌یابد؛ در سناریو ۲۰ درصد وزنی

¹ Makwashi

² Liu

³ Wu

گلايکول، ريسک به چهار سطح هيچ (۱۳۶ مقطع)، کم (۳۱)، متوسط (۶۲) و زياد (۵۱) طبقه‌بندي شد. در حالي که با ۳۰ درصد وزني، همه مقاطع به سطوح «هيچ» و «کم» منتقل شدند و با ۴۰ درصد وزني، تنها ۴۹۶ متر در سطح «کم» باقي ماند؛ همچنين در ۱۲ سناريوي بررسي شده، ۱۱۷ مقطع پريسيک همگي در نيمه دوم خط و عمدتاً در بخش‌هاي کم‌ارتفاع با تجمع مايع ظاهر شدند که به دماي جريان پايين‌تر از دماي تعادل و فشار بالاتر از فشار تعادل نسبت داده شد [5].

۳. بحث و نتايج

۳.۱ چالش‌هاي عدم پيش‌بيني هيدرات‌هاي زيردريائي

نبود پيش‌بيني معتبر در محيط‌هاي زيردريائي پيامد مستقيم ترکيب پيچيدگي ترموديناميک-هيدروديناميک، گذراني عمليات و کمبود داده‌هاي ميداني است. در شرايط آب‌هاي عميق، کوچک‌ترين خطا در مکان‌يابی ناحیه پایداری هیدرات‌ها می‌تواند به انسداد ناگهانی خط لوله، تعطیلی طولانی‌مدت تولید و مخاطرات ایمنی منجر شود؛ به‌ویژه هنگام سناریوهای عملیاتی حساس مانند توقف و راه‌اندازی مجدد، خفه‌سازی درون‌چاهی و تغییرات نرخ تولید که به جهش‌های دما و فشار می‌انجامد و ريسک ورود سامانه به محدوده تشکيل هيدرات را افزايش می‌دهند [7].

عدم قطعیت‌های ترمودینامیکی نخستین دسته از چالش‌ها را شکل می‌دهند. مدل‌های تعادلی متکی بر نظریه‌های کلاسیک و معادلات حالت، هنگامی که با گازهای واقعی چندجزئی، حضور آب شور و تزریق بازدارنده روبه‌رو می‌شوند، به دقت داده‌های پایه و صحت هم‌بستگی‌ها بسیار حساس‌اند؛ تغییرات شوری، ترکیب گاز و مقدار بازدارنده نه‌تنها دماي تعادل را جابه‌جا می‌کند بلکه پهنای حاشیه عملیاتی ایمن را نیز تغییر می‌دهد. به‌طور خاص، تعامل هم‌افزای شوری و مونو اتیلن گلايکول می‌تواند منحنی تعادل را به سمت دماهای پايين‌تر و فشارهای بالاتر منتقل کند؛ نادیده‌گرفتن این برهم‌کنش‌ها در طراحی، ريسک بيش‌برآورد یا کم‌برآورد منطقه خطر را در پی دارد [7].

چالش دوم به پويایی‌هاي چندفازي و هندسه خط مرتبط است. الگوهای جريان، سرعت و ضخامت فيلم آبي، تجمع مايعات در بخش‌هاي کم‌ارتفاع و تغییرات موضعی انتقال حرارت، پنجره زمانی و مکانی تشکيل و رسوب‌گذاری را تعيين می‌کنند؛ خطا در بازسازی این متغیرها موجب جابه‌جایی مرزهای «شروع تشکيل» و «شروع رسوب» می‌شود و احتمال بروز پلاگ را در بازه‌هاي غيرمنتظره بالا می‌برد. یافته‌های میدانی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد مقاطع کم‌ارتفاع با تجمع مايع، به‌ویژه در نيمه دوم خطوط بلند، بیشترین فراواني مقاطع پريسيک را دارند؛ نبود پيش‌بيني ساده‌انگارانه این ناهمگنی‌ها، تصميم‌گیری‌هاي عملیاتی را مخدوش می‌کند [5].

گذراني عمليات و بازتشکيل هيدرات‌ها دسته سوم چالش‌ها را شکل می‌دهد. در فرآیندهای افت فشار برای تولید از ذخایر هیدراتی یا در عملیات معمول میدان، نوسان‌های سریع دما و فشار و تغییر رژیم‌های جريان، پنجره‌ای برای بازتشکيل ایجاد می‌کند. مدل‌های گذرای همبسته دما-فشار نشان داده‌اند که ناحیه بحرانی غالباً در لوله‌های تخلیه رخ می‌دهد و در نبود مداخله مؤثر، بازدارنده‌های شیمیایی با دوز کم کافی نیستند؛ در برخی پیکربندی‌ها دوزهای بالای مونو اتیلن گلايکول لازم می‌شود یا باید به راهبردهای ترکیبی مکانیکی-حرارتی متوسل شد [8].

چالش چهارم، نبود داده‌های میدانی پیوسته و معیارهای یکنواخت ارزیابی است. بسندگی داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون در مقیاس خط لوله محل تردید است، و در غیاب پایش مستمر، اندازه‌گیری‌های پراکنده فشار و دما تصویر کاملی از حاشیه زیرسردسازی و فاصله فشار تا تعادل ارائه نمی‌کند. کارهای اخیر پیشنهاد می‌کنند ماتریس‌های ارزیابی ریسک مبتنی بر زیرسردسازی دما و حاشیه فشار در امتداد کل خط و برای صدها مقطع محاسبه شود؛ اما فقدان استانداردسازی شاخص‌ها و آستانه‌ها، مقایسه میان میدان‌ها و پروژه‌ها را دشوار می‌سازد [9].

چالش پنجم به محدودیت‌های روش‌های داده‌محور مربوط است. اگرچه رویکردهای یادگیری ماشین در پیش‌بینی شرایط تعادل و شروع تشکیل پیشرفت کرده‌اند، ولی تبیین‌پذیری، نیاز به داده‌های باکیفیت و ریسک برون‌یابی در سناریوهای گذرا و شرایط غیرمألوف همچنان مانع کاربرد صنعتی بی‌دردسر است؛ مدل‌های مرجع ترمودینامیکی نظیر CSMGem نیز برای برخی سامانه‌ها معیار مقایسه‌اند، اما انتقال‌پذیری نتایج میان میدانی متفاوت نیازمند اعتبارسنجی دقیق با معیارهایی چون R^2 ¹، RMSE² و MAPE³ است [6].

در نهایت، نبود یکپارچگی بین مدل‌های تعادلی، شبیه‌سازی گذرا و تصمیم‌یارهای عملیاتی خود یک چالش است. تجربه‌های میدانی موفق بر ادغام بسته‌های خواص سیال و شبیه‌سازهای چندفازی برای نقشه‌برداری پیوسته ریسک تأکید می‌کنند؛ با این حال، خطای کوچک در برآورد افت دما یا فشار می‌تواند مرزهای ریسک را جابه‌جا کند و برنامه‌های توقف امن و راه‌اندازی را ناکارا سازد. این مسئله به‌ویژه در خطوط عایق‌کاری‌شده یا دارای تغییرات رسانندگی عایق، برجسته است و بدون کالیبراسیون میدانی و تحلیل حساسیت نظام‌مند، پیش‌بینی بهینه حاصل نمی‌شود [8].

۳.۲ انواع روش‌های پیش‌بینی هیدرات‌های زیردریایی

• رویکردهای تعادلی ترمودینامیکی

این دسته بر تعیین مرز تعادل هیدرات در فضای فشار-دما تکیه دارد و عموماً بر پایه نظریه‌های کلاسیک و معادلات حالت و پیاده‌سازی‌های نرم‌افزاری انجام می‌شود. در چارچوب‌های صنعتی، شرایط تعادل برای سامانه‌های چندجزئی و حضور بازدارنده‌ها و شوری به‌صورت صریح محاسبه می‌شود و می‌توان دمای تعادل در فشار معین یا بالعکس را استخراج کرد. در مدل‌های گذرای میدان نیز همین روابط برای سنجش فاصله تا تعادل به‌کار می‌روند. این نوع مدل‌ها برای تحلیل اثر مهارکننده‌های ترمودینامیکی و نمک‌ها ضروری‌اند و بنیان بسیاری از زنجیره‌های پیش‌بینی میدان مقیاس را می‌سازند [4].

• مدل‌های سینتیکی و نیمه‌تجربی

تمرکز این گروه بر پویایی هسته‌زایی، زمان القا و نرخ رشد است تا بتوان زمان و مکان آغاز تشکیل را در شرایط گذرا برآورد کرد. تجربه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های مفهومی برای برآورد زمان القا و نقش فوق‌اشباعی⁴ توسعه یافته و سپس با مدل‌های

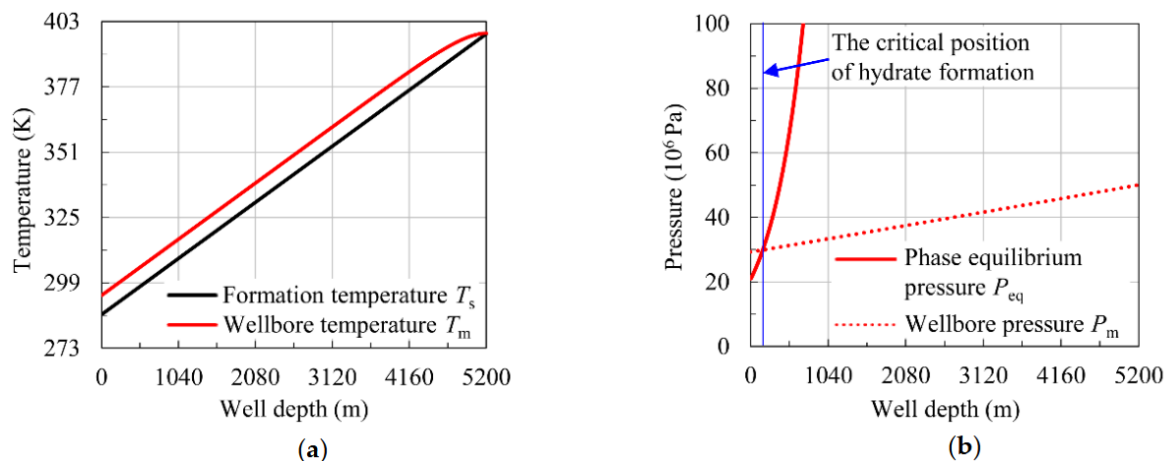
¹ Coefficient of Determination

² Root Mean Squared Error

³ Mean Absolute Percentage Error

⁴ supersaturation

گذرای حرارتی و هیدرولیکی تلفیق شده‌اند. در عمل، زنجیره‌های محاسباتی شامل مدلسازی ترمودینامیکی، سینتیکی و گذرای حرارتی کنار هم قرار می‌گیرند تا دوره رسیدن سامانه به شرایط تعادل و سپس زمان القای هیدرات تخمین زده شود [3].



شکل ۳. داده‌های محاسبه‌شده چاه (a) LN-X: دمای ستون چاه و دمای سازند؛ (b) فشار ستون چاه، فشار تعادل فاز هیدرات، و ناحیه تشکیل هیدرات [3]

• شبیه‌سازی گذرای چندفازی کوپل با بسته‌های خواص سیال

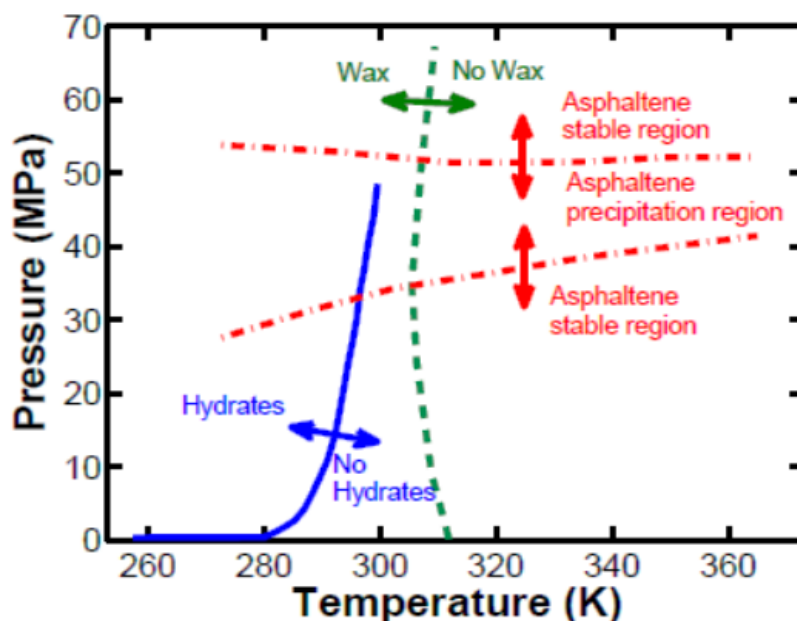
در کاربردهای میدانی، یک رویکرد رایج، کوپل کردن شبیه‌ساز گذرای چندفازی با بسته‌های ترمودینامیکی است تا هم‌زمان پروفیل‌های دما و فشار و منحنی‌های تعادل محاسبه و ناحیه خطر تشکیل روی چاه یا خط لوله نقشه‌برداری شود. این جریان کار با ترسیم پروفیل‌های دما و فشار، محاسبه تعادل و مقایسه دو منحنی، نواحی مستعد تشکیل را به‌صورت مستقیم نمایش می‌دهد و حساسیت به سناریوهای عملیاتی مانند تولید پایدار، خفه‌سازی و توقف را آشکار می‌سازد [4].

• روش‌های داده‌محور و یادگیری ماشین

در سال‌های اخیر، مدل‌های داده‌محور برای پیش‌بینی دمای تعادل، فشار تفکیک و حتی ریسک تشکیل در خطوط لوله یا مخازن به‌کار رفته‌اند. این مدل‌ها از شبکه عصبی پیش‌خور و روش برنامه‌نویسی بیان ژنی تا خانواده‌های مدرن مانند CatBoost و مدل‌های بهینه‌سازی شده عمیق را در بر می‌گیرند. گزارش‌ها نشان می‌دهد در پیش‌بینی تعادل در سامانه‌های شور یا دارای بازدارنده‌های آلی، برخی الگوریتم‌ها دقت بالایی نسبت به محاسبات نرم‌افزارهای تعادلی دارند؛ با این حال، نیاز بالا به داده، تبیین‌پذیری محدود و چالش برون‌یابی در شرایط عملیاتی پیچیده از قیود اصلی این رویکردها است [2].

• چارچوب‌های ارزیابی ریسک و نقشه‌برداری میدانی

برای تصمیم‌گیری عملیاتی، بسیاری از کارهای میدان‌مقیاس، خروجی مدل‌های تعادلی/گذرا را به شاخص‌های ریسک ترجمه می‌کنند. نمونه‌ها شامل ساخت ماتریس ریسک بر مبنای زیرسردسازی دما و فاصله فشار تا تعادل و رتبه‌بندی صدها مقطع خط لوله است؛ تغییرات هم‌افزای غلظت مهارکننده و شوری می‌تواند کاهنده ریسک باشد و در سناریوهای خاص، افزودن نمک تا یک آستانه می‌تواند رسوب را در طول خط حذف کند. همچنین تحلیل سرعت‌های فیلم آبی و گاز به شناسایی مقاطع کم‌ارتفاع با تجمع مایع و ریسک بالاتر کمک می‌کند [6].



شکل ۴. نمودار فشار-دما حاصل از مشخصه‌یابی سیالات مخزن در طی تولید نفت و گاز در خلیج مکزیک [6]

• روش‌های آمیخته با مهار شیمیایی و انتخاب دوز

گرچه این دسته بیشتر جنبه کنترلی دارد تا صرفاً پیش‌بینی، اما پیش‌بینی وابسته به دوز بازدارنده به‌صورت ضمنی در بسیاری از چارچوب‌ها وارد می‌شود. بازدارنده‌های ترمودینامیکی مانند متانول و مونو اتیلن گلیکول، و بازدارنده‌های کم‌دوز شامل مهارکننده‌های سینتیکی و ضد تجمع، هر یک پنجره عملیاتی متفاوتی ایجاد می‌کنند و در ارزیابی ریسک باید لحاظ شوند. تفاوت‌های هزینه، بازیافت، قیود زیست‌محیطی و حساسیت به الگوی جریان و شوری، انتخاب روش را متأثر می‌کند [2].

• چارچوب‌های یکپارچه برای شرایط گذرا و بازتشکیل

در تولید بر پایه افت فشار یا هنگام راه‌اندازی مجدد، خطر بازتشکیل افزایش می‌یابد. مدل‌های یکپارچه دما-فشار و تعادل، همراه با روابط انتقال حرارت وابسته به الگوی جریان، برای تعیین نواحی بحرانی و تدوین راهبردهای عملیاتی (از افزایش دوز

مهارکننده تا راهکارهای مکانیکی-حرارتی) استفاده می‌شوند. این چارچوب‌ها برای پیش‌بینی رخدادهای کوتاه‌مقیاس و طراحی پنجره‌های ایمن توقف-راه‌اندازی حیاتی‌اند [1].

۳.۳ سختی‌های پیش‌بینی هیدرات‌های زیردریایی

چالش‌های پیش‌بینی هیدرات‌های زیردریایی ریشه در هم‌نشینی عدم قطعیت‌های ترمودینامیکی، پویایی‌های چندفازی و گذرای عملیات دارد. از منظر فازی، مرز تعادل هیدرات‌ها به تغییرات کوچک در ترکیب گاز چندجزئی، شوری آب و دوز بازدارنده‌های ترمودینامیکی حساس است؛ برهم‌کنش هم‌افزای شوری و مونو اتیلن گلیکول می‌تواند منحنی تعادل را به‌طور معناداری جابه‌جا کند، و اگر در مدل لحاظ نشود، برآورد ناحیه خطر دچار بیش‌برآورد یا کم‌برآورد می‌شود.

چالش دوم به بازسازی پویایی‌های چندفازی و ناهمگنی هندسی خط مربوط است. الگوهای جریان، سرعت و ضخامت فیلم آبی، تجمع مایع در مقاطع کم‌ارتفاع و انتقال حرارت موضعی، زمان و مکان آغاز تشکیل و رسوب‌گذاری را تعیین می‌کنند؛ خطا در بازسازی این متغیرها مرزهای شروع تشکیل و شروع رسوب را جابه‌جا می‌کند و احتمال پلاگ در بازه‌های غیرمنتظره را می‌افزاید. نقشه‌برداری میدان مقیاس نشان می‌دهد مقاطع پرریسک اغلب در نیمه دوم خطوط بلند و در حوالی بخش‌های کم‌ارتفاع متمرکز می‌شوند، بنابراین ساده‌سازی‌های یکنواخت برای کل خط قابل اتکا نیست و ارزیابی مقطع‌به‌مقطع ضرورت دارد [8].

گذرایی عملیات و بازتشکیل هیدرات‌ها نیز سطح دیگری از دشواری را می‌افزاید. در سناریوهای throttling, shut-in/restart و به‌ویژه تولید مبتنی بر افت فشار، نوسان‌های تند دما و فشار و تغییر رژیم جریان پنجره بازتشکیل را می‌گشایند؛ مدل‌های گذرا نشان داده‌اند بیشترین ریسک در لوله‌های تخلیه و عمدتاً با رژیم حبایی رخ می‌دهد و در برخی پیکربندی‌ها برای حذف ریسک به دوز بالای MEG یا راهبردهای ترکیبی مکانیکی-حرارتی نیاز است [2].

شکاف داده‌ای و دشواری کالیبراسیون میدانی، مقایسه میان پروژه‌ها را پیچیده می‌کند. در نبود پایش پیوسته، محاسبه شاخص‌های ریسک مانند زیرسردسازی دما و فاصله فشار تا تعادل در همه مقاطع خط با عدم قطعیت بالا همراه است و فقدان معیارهای یکنواخت، اعتبارسنجی را ناهمگون می‌سازد. افزون بر این، حتی خطای کوچک در پیش‌بینی افت دما یا فشار در زنجیره‌های کوپل‌شده OLGA-PVTsim می‌تواند مرز ریسک را به‌صورت غیرخطی جابه‌جا کند و طراحی پنجره‌های توقف امن و راه‌اندازی را حساس سازد؛ بدون کالیبراسیون میدانی و تحلیل حساسیت نظام‌مند، تصمیم‌های عملیاتی پرریسک می‌ماند [1].

در نهایت، روش‌های data-driven با وجود دقت‌های گزارش‌شده در برخی مجموعه‌داده‌ها، با قیود تبیین‌پذیری، نیاز به داده‌های باکیفیت و ریسک برون‌یابی در شرایط عملیاتی غیرمألوف روبه‌رو هستند؛ از این‌رو ارزیابی یکنواخت با معیارهایی همچون R^2 , RMSE و MAPE و آزمون‌گیری میدانی الزامی است. حساسیت نتایج به سناریوهای عملیاتی نیز بالاست؛ تغییرات نرخ تولید، درصد آب، رسانندگی حرارتی عایق و فشار سرچاه می‌تواند جهت تغییر ناحیه تشکیل را معکوس کند و برنامه‌ریزی را آسیب‌پذیر سازد [7].

جمع‌بندی اینکه هسته‌ای پیش‌بینی از هم‌افزایی حساسیت ترمودینامیکی، بازسازی دشوار پویایی‌های چندفازی گذرا و کاستی داده/اعتبارسنجی ناشی می‌شود و پاسخ مهندسی قابل اتکا مستلزم پایش و کالیبراسیون میدانی، تحلیل حساسیت سناریو و نقشه‌برداری میدان مقیاس ریسک در کنار ترکیب هوشمند رویکردهای فیزیک‌محور و داده‌محور است.

۴. نتیجه‌گیری

این مرور نشان داد پیش‌بینی تشکیل هیدرات‌های گازی در سامانه‌های زیردریایی مسئله‌ای چندبعدی است که در تلاقی ترمودینامیک، هیدرودینامیک و عملیات میدانی قرار می‌گیرد. در بُعد ترمودینامیک، تعیین دقیق مرز تعادل و حاشیه‌های ایمن بهره‌برداری با توجه به ترکیب چندجزئی، شوری و دوز بازدارنده‌های ترمودینامیکی ضرورت دارد و اثرات هم‌افزا میان شوری و مونو اتیلن گلیکول می‌تواند برآورد ریسک را دگرگون کند. از منظر جریان، ناهمگنی هندسی خط، الگوی جریان و انتقال حرارت موضعی تعیین‌کننده زمان و مکان آغاز تشکیل و رسوب‌گذاری‌اند و نشان می‌دهند ارزیابی یکنواخت برای کل خط قابل اتکا نیست و باید نقشه‌برداری مقطع به مقطع انجام شود. در بُعد عملیاتی، سناریوهای گذرا مانند shut-in/restart و تولید مبتنی بر افت فشار پنجره بازتشکیل را می‌گشایند و طراحی پنجره‌های ایمن نیازمند زنجیره‌های شبیه‌سازی یکپارچه است.

از نظر روش‌شناسی، رویکردهای تعادلی و زنجیره‌های گذرای چندفازی کوپل با بسته‌های خواص سیال اساس نقشه‌برداری سریع ناحیه خطر و تحلیل سناریو را فراهم می‌کنند. مدل‌های سینتیکی و نیمه‌تجربی برای زمان‌بندی آغاز تشکیل در گذراها لازم‌اند و روش‌های data-driven می‌توانند در دامنه‌های داده‌غنی دقت پیش‌بینی شرایط تعادل و شاخص‌های ریسک را بهبود دهند؛ با این حال، تبیین‌پذیری، نیاز به داده‌های باکیفیت و ریسک برون‌یابی همچنان قیود کلیدی‌اند و سنجش یکنواخت با R^2 ، RMSE و MAPE باید به‌صورت نظام‌مند انجام شود. برای تصمیم‌گیری عملیاتی، ترجمه خروجی مدل‌ها به شاخص‌های ملموس مانند زیرسردسازی دما و فاصله فشار تا تعادل و رتبه‌بندی مقطع به مقطع، امکان انتخاب هدفمند دوز بازدارنده و تنظیم حدود عملیاتی را فراهم می‌کند.

چارچوب پیشنهادی شامل پنج گام عملی است: کالیبراسیون اولیه مدل‌های ترمودینامیکی و گذرا با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی منتخب؛ نقشه‌برداری میدان مقیاس ریسک بر پایه پروفیل‌های دما-فشار و مرز تعادل؛ تحلیل حساسیت سناریویی نسبت به نرخ تولید، water cut، رسانندگی حرارتی عایق، salinity و دوز مهارکننده؛ به‌کارگیری مدل‌های سینتیکی برای تعیین زمان القا در گذراها؛ و استفاده محتاطانه از یادگیری ماشین برای ریزتنظیم پیش‌بینی‌ها در حوزه‌های داده‌غنی همراه با اعتبارسنجی متقاطع. در کنار این گام‌ها، ترکیب راهبردهای شیمیایی و در صورت نیاز گزینه‌های مکانیکی-حرارتی می‌تواند ریسک عملیاتی و هزینه‌های توقف تولید را کاهش دهد.

در جمع‌بندی، دستیابی به پیش‌بینی قابل اتکا نه با یک مدل منفرد، بلکه با اکوسیستمی یکپارچه از مدل‌های فیزیک‌محور و داده‌محور، پایش و کالیبراسیون میدانی، و معیارهای ارزیابی یکنواخت ممکن است. چنین اکوسیستمی، تصمیم‌گیری مبتنی

بر ریسک را از مقیاس مقطع خط لوله تا برنامه‌ریزی تولید پشتیبانی کرده و مسیر توسعه آینده را به سوی hybrid modeling، physics-informed ML و پلتفرم‌های تصمیم‌یار بلادرنگ هموار می‌کند.

۵. منابع

1. Guo, Y., et al., A prediction method of natural gas hydrate formation in deepwater gas well and its application. *Petroleum*, 2016. 2(3): p. 296-300.
2. Abbasi, A. and F.M. Hashim, A review on fundamental principles of a natural gas hydrate formation prediction. *Petroleum Science and Technology*, 2022. 40(19): p. 2382-2404.
3. Wei, N., et al., Hydrate formation and decomposition regularities in offshore gas reservoir production pipelines. *Energies*, 2020. 13(1): p. 248.
4. Abbasi, A. and F.M. Hashim, Development of a hydrate formation prediction model for sub-sea pipeline. *Petroleum Science and Technology*, 2017. 35(5): p. 443-450.
5. Liu, Z., et al., Prediction and management of hydrate reformation risk in pipelines during offshore gas hydrate development by depressurization. *Fuel*, 2021. 291: p. 120116.
6. Makwashi, N., et al. Pipeline gas hydrate formation and treatment: a review.
7. Salam, K.K., et al., Prediction of Hydrate formation conditions in Gas pipelines. *International Journal of Engineering Sciences*, 2013. 2(8): p. 327-331.
8. Mogbolu, P.O. and J. Madu. Prediction of Onset of Gas Hydrate Formation in Offshore Operations. *SPE*.
9. Wu, X., et al., Risk Prediction of Natural Gas Hydrate Formation in Subsea Wet Gas Pipelines with Monoethylene Glycol Injection. *Journal of Cleaner Production*, 2025: p. 145907.