IJMILE

International Journal of Mechanical, Industrial and Logistics Engineering (IJMILE)

مجله بین‌المللی مهندسی مکانیک، صنایع و لجستیک

https://ijmile.ir

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۹

توسعه فناوری‌های نوین در فرآیندهای استخراج و تولید نفت و بهبود بهره‌برداری از چاه‌های عمیق

محمد علی جبرائیلی

کارشناسی مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت واحد اهواز، اهواز، ایران

mohammad.ali.jebraeili@gmail.com

چکیده

با کاهش ذخایر هیدروکربوری در مخازن کمعمق، توجه صنعت نفت جهانی به سمت توسعه میادین عمیق و فراعمیق معطوف شده است. این مخازن که اغلب در اعماق بیش از ۶۰۰۰ متر قرار دارند، با چالش‌های فنی متعددی از جمله دما و فشار فرابالا، ناپایداری جداره چاه، وجود سیستم‌های چندفشاری و پنجره ایمنی باریک سیالات حفاری مواجه هستند. مقاله حاضر به بررسی سیستماتیک پیشرفت‌های فناورانه در فرآیندهای حفاری، تکمیل چاه و ازدیاد برداشت از مخازن عمیق با تأکید بر دستاوردهای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ می‌پردازد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که توسعه سیستم‌های حفاری دقیق کنترل‌شده با محرک الکتریکی تمام‌گذر، الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، سامانه‌های دوار هدایت‌شونده نسل جدید و روش‌های ترکیبی ازدیاد برداشت، تحول چشمگیری در قابلیت بهره‌برداری از چاه‌های عمیق ایجاد کرده است. سیستم تمام‌الکتریکی کنترل فشار حفاری دقیق با گذرنام اسمی ۶۸۰ میلی‌متر و دقت کنترل فشار ۰/۰۷± مگاپاسکال، نمونهٔ برجسته از این فناوری‌هاست که زمینه را برای حفاری ایمن در چاه‌های با قطر بزرگ تا عمق ۱۰۰۰۰ متر فراهم ساخته است. همچنین، پلتفرم‌های هوشمند مبتنی بر داده‌های بلادرنگ مانند سامانه AiPSO، زمان تشخیص و بهینه‌سازی عملکرد چاه را از چند روز به چند دقیقه کاهش داده‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توسعهٔ فناوری‌های هوشمند، خودکار و سازگار با شرایط حاد مخازن عمیق، مسیر غالب توسعهٔ پایدار تولید نفت در دههٔ آینده خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: حفاری چاه‌های عمیق، کنترل دقیق فشار، ازدیاد برداشت به روش هوشمند، سامانه‌های دوار هدایت‌شونده

۱. مقدمه

تأمین انرژی پایدار در جهان معاصر، به‌طور فزاینده‌ای به توانایی بشر در دسترسی به منابع هیدروکربوری واقع در لایه‌های عمیق زمین وابسته شده است. آمارهای جهانی حاکی از آن است که بیش از ۷۰ درصد منابع نفت و گاز کشف‌نشده در اعماق بیش از ۴۵۰۰ متر قرار دارند و سهم مخازن عمیق (۴۵۰۰ تا ۶۰۰۰ متر) و فراعمیق (بیش از ۶۰۰۰ متر) در مجموع ذخایر در حال توسعه، روندی صعودی دارد (Liu, Chen, & Huang, ۲۰۲۵) . با این حال، استحصال اقتصادی و ایمن از این منابع با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی پیچیده همراه است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: دماهای فرابالا (تا ۲۶۰ درجه سلسیوس)، فشارهای فوق‌العاده (بیش از ۱۷۰ مگاپاسکال)، وجود سیستم‌های چندفشاری در یک رشته چاه، ناپایداری جداره چاه در اثر تنش‌های زمین‌شناسی، پنجره ایمنی باریک سیالات حفاری و افزایش ریسک فوران چاه (Li, Chen, & Huang, ۲۰۲۵) .

در پاسخ به این چالش‌ها، طی نیم‌دههٔ اخیر، تحول شگرفی در فناوری‌های مرتبط با حفاری، تکمیل و بهره‌برداری از چاه‌های عمیق رخ داده است. این تحولات را می‌توان در سه محور اصلی دسته‌بندی کرد: (۱) فناوری‌های حفاری دقیق با قابلیت کنترل فشار در زمان واقعی، (۲) سامانه‌های هوشمند تکمیل چاه با قابلیت حسگری و کنترل از راه دور، و (۳) روش‌های ازدیاد برداشت ترکیبی با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های پیشرفته و عوامل هوشمند. مقاله حاضر با رویکردی توصیفی-تحلیلی و با تمرکز بر دستاوردهای ثبت‌شده در فاصله سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، به بررسی سیستماتیک این فناوری‌ها می‌پردازد. نوآوری این مقاله در تلفیق یافته‌های پراکنده در حوزه‌های تخصصی مختلف و ارائه تصویری یکپارچه از زنجیرهٔ ارزش توسعهٔ چاه‌های عمیق با تأکید بر قابلیت‌های عملیاتی و اقتصادی فناوری‌های نوین است.

ساختار مقاله به این صورت است که پس از این مقدمه، در بخش دوم به مبانی نظری و چالش‌های کلیدی حفاری در چاه‌های عمیق پرداخته می‌شود. بخش سوم به فناوری‌های نوین حفاری شامل سیستم‌های کنترل فشار و سامانه‌های دوار هدایت‌شونده اختصاص دارد. در بخش چهارم، فناوری‌های تکمیل چاه و راستی‌آزمایی هوشمند تشریح می‌شود. بخش پنجم به روش‌های ازدیاد برداشت از مخازن شکاف‌دار و نوآوری‌های شبیه‌سازی می‌پردازد. در بخش ششم، کاربردهای هوش مصنوعی و کنترل پیش‌بینی‌کننده بررسی می‌شود و در نهایت، نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آتی ارائه می‌گردد.

۲. چالش‌های کلیدی حفاری و بهره‌برداری در چاه‌های عمیق

توسعهٔ میادین عمیق و فراعمیق با مجموعه‌ای از موانع فنی روبه‌روست که ریشه در شرایط فیزیکی حاکم بر این لایه‌ها دارد. در این بخش، چهار چالش اصلی شناسایی و تحلیل می‌شوند.

۲/۱. دما و فشار فرابالا

در اعماق بیش از ۶۰۰۰ متر، گرادیان زمین گرمایی و فشار هیدرواستاتیک ستون سیال به شدت افزایش می‌یابد. تجهیزات حفاری مرسوم حداکثر تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۰۰ مگاپاسکال طراحی شده‌اند، در حالی که در چاه‌های ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متری، دما تا ۲۶۰ درجه سلسیوس و فشار تا ۱۷۰ مگاپاسکال نیز می‌رسد (Liu, Chen, & Huang, ۲۰۲۵) . این شرایط منجر به تخریب سریع قطعات الکترونیکی، کاهش عمر مفید موتورهای درون‌چاهی و تغییر خواص رئولوژیکی سیالات حفاری می‌شود. طبق گزارش

شرکت ملی نفت چین (CNPC) در دورهٔ برنامه پنج‌سالهٔ چهاردهم، بیش از ۷۰ درصد خرابی‌های تجهیزات درون‌چاهی در اعماق بیش از ۷۰۰۰ متر، مستقیماً به دمای فرابالا مرتبط بوده است (Liu, Chen, & Huang, ۲۰۲۵) .

۲/۲. ناپایداری جداره چاه و همافزایی سیستم‌های فشار

در یک چاه عمیق معمولاً چندین افق فشارگذر با فشارهای منفذی متفاوت و گاه با فواصل کم از یکدیگر قرار دارند. این ویژگی که به «سیستم چندفشاری» موسوم است، پنجره ایمنی سیال حفاری را به شدت محدود می‌کند. به بیان دیگر، چگالی گل حفاری برای مقابله با فشار منفذی لایه‌های عمیق باید بالا باشد، اما همین چگالی بالا ممکن است باعث شکست هیدرولیکی لایه‌های بالایی با فشار منفذی پایین‌تر شود. در برخی موارد، پنجره ایمنی به صفر یا حتی منفی می‌رسد که حفاری مرسوم را عملاً غیرممکن می‌کند (Li, Chen, & Huang, ۲۰۲۵) .

۲/۳. مشکل انتقال توان و داده در طول ستون حفاری

در چاه‌های با عمق بیش از ۱۰۰۰۰ متر، انتقال نیروی مکانیکی به مته حفاری و همچنین انتقال داده از حسگرهای درون‌چاهی به سطح با تضعیف شدید سیگنال مواجه است. سیستم‌های مخابراتی سیم‌دار با فاصله طولانی دچار نویز و افت سیگنال می‌شوند و سیستم‌های مبتنی بر امواج صوتی نیز در محیط پرنویز ستون حفاری کارایی خود را از دست می‌دهند (Alawadhi et al., ۲۰۲۵) .

۲/۴. ازدیاد آب و گاز در مخازن شکافدار

پس از مرحله حفاری و بهره‌برداری اولیه، مخازن عمیق کربناته که اغلب ماهیت شکافدار و غاری دارند، با پدیده ازدیاد سریع آب و گاز مواجه می‌شوند. مطالعهٔ موردی در منطقه گسل شیبئی شمارهٔ یک در حوضهٔ تاریم نشان می‌دهد که تزریق آب و سپس گاز برای حفظ فشار مخزن، منجر به تشکیل کانال‌های ترجیحی جریان شده و ضریب بازیافت نهایی را به شدت کاهش می‌دهد (Yan et al., ۲۰۲۶) . این مخازن به دلیل ناهمگونی شدید و ساختار شکافدار-غاری خود، مدلسازی دقیق جریان سیال را با چالش جدی مواجه می‌سازند.

این چهار چالش نشان می‌دهد که توسعهٔ چاه‌های عمیق به یک رویکرد یکپارچه نیاز دارد که در آن فناوری‌های حفاری، تکمیل و بهره‌برداری به طور هماهنگ و با بهره‌گیری از ابزارهای هوشمند طراحی شوند.

۳. فناوری‌های نوین حفاری برای چاه‌های عمیق

۳/۱. سیستم‌های حفاری دقیق با کنترل فشار (MPD)

پاسخ به چالش پنجره ایمنی باریک، توسعهٔ نسل جدیدی از سیستم‌های حفاری با کنترل دقیق فشار بوده است. مهمترین دستاورد در این زمینه، سیستم «تمام‌الکتریکی کنترل فشار حفاری دقیق با گذرنام کامل» (Pressure Managed Fine Full-Electric

Bore Large with System Drilling) است که توسط شرکت حفاری چین و با همکاری دانشگاه پترولیوم جنوب غربی و مؤسسهٔ مهندسی فناوری نفت CNPC توسعه یافته است (Li, Chen, Huang & ۲۰۲۵) (Li et al., ۲۰۲۵) .

مشخصات فنی کلیدی این سیستم در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه مشخصات فنی سیستم جدید MPD با نسل‌های پیشین

ویژگی فنی	نسل قبلی MPD	سیستم جدید تمام‌الکتریکی
حداکثر گذرنام اسمی (میلی‌متر)	۲۴۱/۳	۶۸۰
دقت کنترل فشار (مگاپاسکال)	± ۰/۲	± ۰/۰۷
حداکثر دبی سیال (لیتر بر ثانیه)	۷۰	۱۲۰
قطر تمام‌گذر شیرهای کنترل (میلی‌متر)	۸۰	۱۳۰
حداکثر فشار کاری (مگاپاسکال)	۲۱	۳۵
سرعت چرخش مجموعه دوار (دور بر دقیقه)	۶۰	۱۲۰

برگرفته از: (Li, Chen, Huang & ۲۰۲۵) و (Li et al., ۲۰۲۵)

این سیستم دارای سه نوآوری اساسی است: (۱) طراحی ساختار آب‌بندی با قابلیت خود-جبرانی برای مجموعه دوار با قطر بزرگ که امکان تحمل سرعت خطی بالا را فراهم می‌کند، (۲) توسعهٔ شیرهای کنترل جریان از نوع استوانه‌ای با قطر بزرگ و محرک الکتریکی بدون پله که قابلیت کنترل جریان تا ۱۲۰ لیتر بر ثانیه را دارد، و (۳) الگوریتم کنترل ترکیبی شامل منحنی مشخصهٔ شیر، کنترل تطبیقی PID و پاسخ پله‌ای که دقت کنترل فشار را به ±۰/۰۷ مگاپاسکال افزایش داده است (Li et al., ۲۰۲۵) .

این سیستم که کاملاً بومی و با نرخ داخلی‌سازی ۱۰۰ درصد تولید شده است، تا پایان سال ۲۰۲۵ در بیش از ۱۰۰ حلقه چاه عمیق در حوضه‌های سیچوآن، تاریم و خلیج پوهای به کار گرفته شده و موفقیت آمیز بودن آن در حفاری چاه‌هایی با نسبت قطر به عمق ۱ به ۱۰۰۰ تأیید شده است (Li et al., ۲۰۲۵) .

۳/۲. سامانه‌های دوار هدایت‌شونده (RSS) نسل جدید

در کنار کنترل فشار، هدایت دقیق مته در لایه‌های هدف با ضخامت اندک و شیب متغیر، یکی دیگر از نیازهای کلیدی حفاری عمیق است. سامانه‌های دوار هدایت‌شوندهٔ پیشرفته با قابلیت کار در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و نرخ انحراف ۸ تا ۱۰ درجه بر ۳۰ متر توسعه یافته‌اند (Liu, Chen, Huang & ۲۰۲۵) . این سامانه‌ها با بهره‌گیری از ژیروسکوپ‌های حلقه‌بسته و الگوریتم‌های کنترل تطبیقی، امکان حفاری افقی با طول بخش افقی بیش از ۲۰۰۰ متر را در مخازن عمیق فراهم کرده‌اند. آمار عملیاتی نشان می‌دهد که استفاده از این سامانه‌ها، نرخ نفوذ مته را به طور میانگین ۳۵ درصد افزایش و زمان غیرمولد ناشی از انحراف مسیر را ۶۰ درصد کاهش داده است (Liu, Chen, Huang & ۲۰۲۵) .

۴. فناوری‌های نوین تکمیل چاه و راستی‌آزمایی هوشمند

پس از اتمام عملیات حفاری، مرحله تکمیل چاه (کامل‌سازی) اهمیت حیاتی دارد. در چاه‌های عمیق با دمای بالا، سیستم‌های تکمیل هوشمند از جمله شیرهای کنترل جریان درون‌چاهی (ICV) و گیج‌های دائمی فشار و دما (PDG) نصب می‌شوند. چالش اصلی در اینجا، تأیید صحت اتصالات هیدرولیکی و الکتریکی در طول استقرار تجهیزات است.

شرکت هالیبرتون، سیستمی به نام Checker Integrity Auris توسعه داده است که به صورت بی‌سیم و با استفاده از امواج صوتی (آکوستیک) دوطرفه، یکپارچگی تکمیل هوشمند را پیش از نصب بخش بالایی چاه تأیید می‌کند (Halliburton, ۲۰۲۶) . این سیستم قادر است کنترل خطوط هیدرولیک و الکتریکی را از سطح انجام داده و فشار درون خطوط را بالاتر از هیدرواستاتیک مخزن حفظ کند. مزیت این فناوری کاهش چشمگیر زمان مداخله و هزینه‌های نگهداری است؛ زیرا در صورت وجود نقص در تکمیل پایینی، پیش از نصب بخش بالایی قابل تشخیص است (Halliburton, ۲۰۲۶) .

از سوی دیگر، تکنیک‌های تکمیل چندشعبه (Multilateral) با استفاده از حفاری شعاعی مکانیکی (MRD) به عنوان یک راهکار نوین برای افزایش تماس با مخازن ناهمگن معرفی شده است. یک مطالعه میدانی در یکی از میادین کربناته امارات نشان داد که حفاری انحرافی با شعاع فوق-کوتاه (زیر ۳ متر) با استفاده از موتور لغزان باریک دوخم و مته PDC کوچک، امکان ایجاد کانال‌های جانبی به طول ۱۵ متر و قطر ۷ سانتی‌متر را فراهم می‌کند (Alawadhi et al., ۲۰۲۵) . این تکنیک در چاهی که دچار پوستهٔ نزدیک-چاه بالا (حدود ۳۰+) بود، پس از یک عملیات تمیزکاری اسیدی، بهره‌وری را تقریباً سه برابر افزایش داد و بیش از شش ماه نرخ آب پایدار باقی ماند. جدول ۲ خلاصه‌ای از کارایی روش‌های مختلف تکمیل چاه در مخازن عمیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقایسه روش‌های نوین تکمیل چاه در چاه‌های عمیق

روش تکمیل	قابلیت کلیدی	محدودیت اصلی	نمونه کاربرد موفق
تکمیل هوشمند با شیرهای ICV	کنترل ناحیهٔ جریان	حساسیت به دمای بالا	میادین دریایی برزیل
راستی‌آزمایی آکوستیک (Auris)	تأیید بی‌سیم یکپارچگی	نیاز به مبدل‌های خاص	خاورمیانه (ADNOC)
حفاری شعاعی مکانیکی (MRD)	افزایش تماس با مخزن در لایه‌های نازک	عمق مؤثر محدود (~۱۵ متر)	میادین کربناته امارات

برگرفته از: (Halliburton, ۲۰۲۶) و (Alawadhi et al., ۲۰۲۵)

۵. روش‌های نوین ازدیاد برداشت از مخازن عمیق و شکافدار

بازیابی نفت باقیمانده از مخازن عمیق پس از مرحله تولید اولیه و ثانویه، نیازمند روش‌های پیشرفتهٔ ازدیاد برداشت (EOR) است. دو روند مهم در این حوزه قابل مشاهده است: روش‌های ترکیبی شیمیایی-گازی و رویکردهای شبیه‌سازی-بهینه‌سازی یکپارچه.

۵/۱. روش‌های ترکیبی (هیبرید) EOR

مطالعات تجربی بر روی نفت سنگین میدان Ugnu در آلاسکا نشان می‌دهد که تزریق متناوب آب شور کم و دی‌اکسید کربن مایع (WAG CO۲-LSW) می‌تواند ضریب بازیافت را تا ۸۳/۵ درصد افزایش دهد که دو برابر تزریق پیوستهٔ آب شور کم است (Alaska Study Slope North, ۲۰۲۴) . این افزایش عمدتاً به دلیل کاهش ۹۵ درصدی ویسکوزیته نفت در اثر تماس با CO۲ مایع و همچنین تشکیل امولسیون درجا است که مقاومت جریان را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، حدود ۲۵ درصد از حجم CO۲ تزریق شده در مخزن ذخیره می‌شود که مزیت زیست‌محیطی نیز به همراه دارد (Study Slope North Alaska, ۲۰۲۴) .

در مخازن عمیق کربناته شکافدار-غاری، تزریق ترکیبی آب و گاز نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. تحقیق روی زون گسل شیبئی شمارهٔ یک نشان داد که تزریق چرخه‌ای نیتروژن به همراه تزریق آب از پایین‌دست، می‌تواند نفت باقیمانده محبوس در حفرات ریز را آزاد کند (Yan et al., ۲۰۲۶) . الگوهای توزیع نفت باقیمانده در این مخازن به سه دستهٔ اصلی تقسیم شده است: (۱) نواحی با نفوذپذیری موضعی پایین، (۲) مسیرهای جریان محافظت‌شده، و (۳) الگوهای وابسته به چیدمان چاه‌های تزریقی-تولیدی (Yan et al., ۲۰۲۶) .

۵/۲. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تولید با رویکرد مدل-محور

در مخازن نفت سنگین دریایی (مانند میدان EPIC۰۰۱ برزیل با ۱۳ درجه API)، بهینه‌سازی استراتژی تولید با استفاده از شبیه‌سازی مخزن نشان داده است که تزریق پلیمر (Flooding Polymer) با غلظت متغیر در مراحل اولیه بهره‌برداری، ارزش خالص فعلی (NPV) را ۲۱ درصد بیشتر از روش تزریق آب با چاه‌های هوشمند افزایش می‌دهد (EPIC, ۲۰۲۶) . این روش با افزایش ویسکوزیته آب تزریقی، نسبت تحرک آب به نفت را بهبود می‌بخشد و سبب ازدیاد برداشت نفت خالص به میزان ۱۳ درصد می‌شود. شبیه‌سازی‌های PVT برای سیالات مصنوعی حاوی متان و CO۲ نیز نشان داده است که معادلهٔ حالت Peng-Robinson با تصحیح حجم (VT-PR) دقت پیش‌بینی چگالی فاز مایع را از ۲ درصد خطا به ۱/۴ درصد کاهش می‌دهد (EPIC, ۲۰۲۶) .

۶. کاربرد هوش مصنوعی و کنترل پیش‌بینی‌کننده در بهره‌برداری از چاه‌های عمیق

گذار از سیستم‌های کنترل سنتی به سامانه‌های هوشمند مبتنی بر داده، یکی از محوری‌ترین تحولات صنعت نفت در سال‌های اخیر است. دو روند اصلی در این حوزه قابل تشخیص است: (۱) پلتفرم‌های بهینه‌سازی تولید با هوش مصنوعی در سطح میدان و (۲) کنترل کننده‌های پیش‌بینی‌کننده مدل-محور (MPC) برای چاه‌های دارای بالابر مصنوعی.

۶/۱. پلتفرم AiPSO: تحلیلی از کاربرد هوش مصنوعی در مقیاس میدان

در نوامبر ۲۰۲۵، شرکت ملی نفت ابوظبی (ADNOC) در همکاری با شرکت اس‌ال‌بی (SLB) از پلتفرم بهینه‌سازی سیستم تولید مبتنی بر هوش مصنوعی با نام AiPSO رونمایی کرد (Peuch Le & Kaabi Al, ۲۰۲۵) (Magazine Offshore, ۲۰۲۵) . این پلتفرم که بر بستر داده‌های بلادرنگ چندین میلیون نقطهٔ داده و مدل‌های یادگیری ماشین اختصاصی ADNOC اجرا می‌شود،

قادر است عملکرد هزاران حلقه چاه و صدها تأسیسات فرآوری را به طور همزمان پایش، تحلیل و بهینه‌سازی کند. مهمترین دستاورد این سیستم کاهش زمان تشخیص و بهینه‌سازی هر چاه از چند روز به چند دقیقه است (Peuch Le & Kaabi Al, ۲۰۲۵) .

طبق اعلام ADNOC، این پلتفرم ابتدا در هشت میدان مستقر شده و برنامه دارد تا پایان سال ۲۰۲۷ در تمامی ۲۵ میدان خشکی و دریایی این شرکت پیاده‌سازی شود (Magazine Offshore, ۲۰۲۵) . سازوکار اصلی کار AiPSO مبتنی بر ایجاد جریان‌های کاری هوشمند است که اطلاعات میدان و دفتر مرکزی را به صورت بلادرنگ متصل می‌کند و به مهندسان امکان می‌دهد تا تصمیمات مبتنی بر داده را با سرعت و دقت بی‌سابقه‌ای اتخاذ کنند.

۶/۲. کنترل‌کننده‌های پیش‌بینی‌کننده مدل-محور (MPC) برای چاه‌های دارای بالابر مصنوعی

در چاه‌های عمیق دریایی که فشار مخزن برای خروج طبیعی سیال کافی نیست، از روش‌های بالابر مصنوعی مانند تزریق گاز (Gas Lift) یا پمپ‌های شناور الکتریکی (ESP) استفاده می‌شود. مطالعهٔ مروری جامعی بر روی کاربرد کنترل‌کننده‌های پیش‌بینی‌کننده در این چاه‌ها نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های ردیاب (MPC Tracking) به سطح بلوغ عملیاتی رسیده و نمونه‌های آزمایش میدانی موفق داشته‌اند، اما کنترل‌کننده‌های اقتصادی (MPC Economic) هنوز به دلیل هزینه محاسباتی بالا به مرحلهٔ کاربرد گسترده نرسیده‌اند (Survey Control Predictive Model, ۲۰۲۵) .

این مطالعه که در مجله Control in Reviews Annual منتشر شده، نشان می‌دهد که MPCهای ردیاب با استفاده از مدل‌های خطی ساده و افق پیش‌بینی محدود (معمولاً ۲۰ تا ۵۰ گام زمانی)، می‌توانند پدیده ناپایداری جریان (موسوم به پدیده حلزونی یا Slugging) را در خطوط بالابر گازی کنترل کرده و تولید را تا ۱۵ درصد افزایش دهند (Control Predictive Model Survey, ۲۰۲۵) . با این حال، چالش اصلی برای توسعهٔ بیشتر این فناوری، نیاز به مدل‌های غیرخطی دقیق و حسگرهای قابل اعتماد در شرایط دمای فرابالا است.

۷. نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

توسعهٔ چاه‌های عمیق و فراعمیق، یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال حیاتی‌ترین عرصه‌های مهندسی نفت در دههٔ جاری است. بررسی سیستماتیک انجام‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین در سه حوزه حفاری دقیق، تکمیل هوشمند و ازدیاد برداشت ترکیبی، پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند. سیستم تمام‌الکتریکی کنترل فشار حفاری با گذرنام ۶۸۰ میلی‌متر و دقت ±۰/۰۷ مگاپاسکال، نمونهٔ بارز فناوری‌های توانمندسازی است که مرز عمق عملیاتی را تا ۱۰۰۰۰ متر افزایش داده است (Li et al., ۲۰۲۵) (Li, Chen, & Huang, ۲۰۲۵) .

در حوزه تکمیل چاه، سیستم‌های تأیید یکپارچگی مبتنی بر امواج صوتی (Auris) و روش‌های حفاری شعاعی مکانیکی (MRD)، به ترتیب قابلیت اطمینان و تماس با مخزن را بهبود بخشیده‌اند (Halliburton, ۲۰۲۶) (Alawadhi et al., ۲۰۲۵) . در ازدیاد برداشت، روش‌های ترکیبی مانند تزریق متناوب آب شور کم - CO_2 (WAG LSW) و تزریق پلیمر بهینه‌سازی‌شده، نویدبخش افزایش ضریب بازیافت تا بیش از ۸۰ درصد در شرایط خاص بوده‌اند (Study Slope North Alaska, ۲۰۲۴) (EPIC, ۲۰۲۶) .

با این حال، چهار چالش اساسی همچنان پیش روی توسعهٔ این فناوری‌ها قرار دارد: (۱) محدودیت تحمل حرارتی قطعات الکترونیکی در دمای بالای ۲۴۰ درجه سلسیوس، (۲) نبود برنامه ریسک فوران جامع برای چاه‌های با پنجره ایمنی منفی، (۳) هزینه بالای پیاده‌سازی پلتفرم‌های هوش مصنوعی در مقیاس میدان، و (۴) نیاز به مدل‌های غیرخطی دقیق‌تر برای شبیه‌سازی جریان سیال در مخازن شکافدار-غاری.

چشم‌انداز آینده به سمت توسعهٔ نسل جدیدی از سامانه‌های حفاری خودکار (Automated Drilling Rigs) با قابلیت یادگیری تطبیقی، سنسورهای فیبر نوری مقاوم به حرارت برای پایش توزیع شدهٔ دما و فشار در طول چاه، و روش‌های ازدیاد برداشت زیستی-شیمیایی ترکیبی حرکت می‌کند. موفقیت در این مسیر مستلزم همکاری نزدیک میان شرکت‌های نفتی، مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های فناوری است تا بتوان مرزهای دانش و فناوری را به موازات افزایش تقاضای جهانی انرژی، پیش برد.

منابع

۱. Alawadhi, A. A., Celma, R. I., Kumar, R., Douik, H., Niculescu, E., Singh, N., Dolman, L., & Miftakhov, S. (۲۰۲۵). Enhancing reservoir connectivity and production via novel multilateral drilling techniques. *Paper presented at the ADIPEC, Abu Dhabi, United Arab Emirates, November ۲۰۲۵*. SPE-۲۲۸۹۲۸-MS.

۲. Alaska North Slope Study). (۲۰۲۴). Experimental investigation of hybrid enhanced oil recovery techniques for Ugnu Heavy Oil on Alaska North Slope. *Petroleum Science*.

۳. Al Kaabi, M., & Le Peuch, O. (۲۰۲۵). ADNOC and SLB unveil AiPSO: AI revolution in upstream productivity. *Offshore Network*, ۱۲ November ۲۰۲۵.

۴. EPIC). (۲۰۲۶). Model-based production strategy optimization for an offshore heavy oil reservoir considering polymer flooding and intelligent wells. *EPIC Energy*, January ۲۰۲۶.

۵. Halliburton). (۲۰۲۶). Auris® integrity checker: Reliable acoustic verification and monitoring for dual-trip intelligent completion installations. *Halliburton Product Brochure*.

۶. Li, Z., Chen, C., & Huang, H. (۲۰۲۵). Progress and development suggestions of key drilling and completion technologies of CNPC during "۱۴th Five-Year Plan" period. *Petroleum Drilling Techniques*, ۵۳(۶), ۱۸-۲۷.

۷. Li, Z., Zuo, X., Zhong, B., & Yuan, X. (۲۰۲۵). [The first large-bore full-electric fine managed pressure drilling system empowers ۱۰,۰۰۰-meter oil and gas resource development]. *China National Petroleum Corporation (CNPC) Chongqing Drilling Engineering Company*, ۲۴ October ۲۰۲۵.

۸. Model Predictive Control Survey) .۲۰۲۵ .(Systematic survey on model predictive control schemes applied to offshore deep water wells in oil and gas industry .*Annual Reviews in Control* ,۵۹ ,۱۰۰–۱۲۵ .

۹. Offshore Magazine) .۲۰۲۵ .(ADIPEC ۲۰۲۵ :ADNOC and SLB launch AI-powered solution to boost upstream productivity .*Offshore Magazine* ,۷ November ۲۰۲۵ .

۱۰. Yan ,H ,.Radwan ,A .A ,.Rong ,Y ,.Zheng ,S ,.Tang ,Y ,.Goudarzi ,A ,.Gazizyanov ,A ,. Alimohammadi ,N ,.& Researchers at Shunbei No .۱ Strike-Slip Fault Zone .)۲۰۲۶ .(Distribution characteristics of remaining oil in fractured–vuggy carbonate reservoirs and EOR strategies :A case study from the Shunbei No .۱ strike–slip fault zone ,Tarim Basin .*Energies* ,۱۹)۳ ,(۵۹۳ .