

پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری و تشکیل هیدرات‌های گازی حین حفاری در آب‌های عمیق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی

محمد دوستی^۱، الناز خداپناه^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: khodapanah@sut.ac.ir

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۷۱ - ۸۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

چکیده

حفاری در سازندهای هیدرات‌گازی در آب‌های عمیق دارای خطرات و چالش‌های زیادی است. به همین منظور در این پژوهش باهدف تعیین پنجره دمایی سیال حفاری برای حفاری در آب‌های عمیق، پس از بررسی روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌گازی، با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین، «رگرسیون چندجمله‌ای در زبان پایتون و پرسپترون چندلایه در MATLAB»، پیش‌بینی لازم برای تعیین پنجره دمایی سیال حفاری انجام می‌شود. از بین روابط بررسی شده برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌گازی رابطه سحرخیزان با میانگین خطای نسبی ۰/۴۹ بالاترین دقت را در میان روش‌های بررسی شده، دارد. همچنین در پیش‌بینی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ۶ ترکیب گازی با وزن مخصوص‌های مختلف، مشخص گردید ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۶۱ با مقدار $R^2 = 0.9743$ در پیش‌بینی با الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای و ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۶۵ در پیش‌بینی با الگوریتم پرسپترون چندلایه بالاترین دقت را داشتند.

کلیدواژه‌ها: هیدرات‌های گاز طبیعی، پنجره دمایی سیال حفاری، حفاری در آب‌های عمیق، الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای، الگوریتم پرسپترون چندلایه

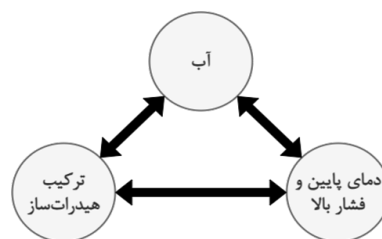
۱. مقدمه

کریستال‌های هیدرات ترکیباتی هستند دارای ساختارهای پیچیده و سه‌بعدی که در آن مولکول‌های آب یک قفس را تشکیل می‌دهند و مولکول‌های مهمان درون این قفس‌ها به دام افتاده‌اند. نکته قابل توجه در مورد این ترکیبات این است که هیچ پیوندی بین مولکول‌های مهمان و میزبان وجود ندارد؛ در واقع مولکول‌های مهمان آزاد هستند که در داخل قفس‌های ساخته شده از مولکول‌های میزبان بچرخند. تشکیل این ترکیبات که هیدرات نامیده می‌شود به سه شرط مهم (۱) ترکیب مناسب از دما و فشار؛ هیدرات‌ها در دماهای پایین و فشارهای بالا شکل می‌گیرند، (۲) وجود ترکیبات هیدرات‌ساز، شامل متان، اتان و دی‌اکسید کربن (گاز) و (۳) وجود هر شکلی از آب (بخار یا مایع) نیاز دارد. (شکل ۱) توصیف ساده‌ای از سه معیار اصلی اشاره شده در بالا را نشان می‌دهد. وجود این سه عامل و ارتباط آن‌ها با یکدیگر سبب تشکیل هیدرات‌ها می‌شود [۱]. برخی از ترکیبات تشکیل دهنده هیدرات شامل CH_4 ، C_2H_6 ، C_3H_8 ، CO_2 و H_2S می‌باشد [۲]. هیدرات‌های گاز ترکیبات کریستالی هستند که تحت شرایط خاص دمای پایین و فشار بالا شکل می‌گیرند. منابع هیدرات‌گازی، مانند





یخ قابل اشتعال بوده و غنی از متان هستند و در سطح جهانی در رسوبات کم عمق قطبی و حاشیه قاره‌ای توزیع شده‌اند. از دلایلی که باعث شناخته شدن ترکیبات هیدرات شده است، می‌توان به ذخایر انرژی فراوان، توزیع گسترده، رسوبات کم عمق، چگالی انرژی بالا و احتراق پاک اشاره نمود. از زمان تولید آزمایشی موفقیت آمیز ذخایر هیدرات در منطقه شنهو در جنوب چین و در سال ۲۰۱۷، پیشرفت در بهره‌برداری تجاری از منابع هیدرات افزایش یافته است. با این حال، به علت بازده روزانه و راندمان تولید پایین، هنوز چاه‌های حفاری شده در سازند هیدرات گازی نمی‌توانند معیارهای لازم برای تولید تجاری گاز متان را از این منابع برآورده کنند [۳-۵].



شکل ۱: سه معیار اصلی تشکیل هیدرات [۱]

بنابراین با توجه به افزایش مستمر تقاضای انرژی در جهان، گاز طبیعی به دلیل مزایای زیست‌محیطی مزیت بالاتری نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی دارد. از طرفی همان‌طور که اشاره شد گاز طبیعی مانند متان در هیدرات‌های گازی محبوس شده است. یک ویژگی منحصر به فرد هیدرات‌های گازی، افزایش چشم‌گیر حجم این ترکیبات در تغییر از حالت هیدرات به حالت گاز آزاد می‌باشد، به طوری که در شرایط دما و فشار استاندارد (یعنی دمای صفر درجه سانتی‌گراد و فشار یک بار)، یک مترمکعب از هیدرات‌های گازی به ۱۶۴ مترمکعب گاز متان و ۰/۸ مترمکعب آب تجزیه می‌شوند [۶]. با این حال یکی از چالش‌هایی که در مسیر دسترسی به هیدرات‌های گازی وجود دارد، عدم بلوغ کافی در حفاری چاه در سازند هیدرات گازی در آب‌های عمیق است. حفاری در سازند هیدرات گازی معمولاً با چالش‌ها و مخاطراتی همراه است که سبب گردیده عملیات حفاری در این سازندها نیازمند تکنولوژی‌های دقیق و به‌روزتری باشد. یکی از چالش‌های موجود در این زمینه، انتخاب سیال حفاری مناسب عملیات حفاری است. یکی از موارد مهم در حین حفاری سازند مستعد تشکیل هیدرات گازی، دما است. از این رو، نظارت دقیق و کامل بر دمای مخزن و نیز دمای سیال حفاری در عملیات حفاری حائز اهمیت است. به‌طور معمول دمای مخزن هیدرات گازی در حین عملیات

حفاری و سیمان کاری چاه افزایش می‌یابد، بنابراین، انتظار می‌رود هیدرات گاز تجزیه شود؛ تجزیه هیدرات گاز در حین عملیات حفاری می‌تواند پیامدهای ناخواسته‌ای به همراه داشته باشد که نشان‌دهنده اهمیت بالای شرایط پایداری هیدرات گازی است. هیدرات‌های گازی به دلیل وجود مقادیر زیادی ذخایر به‌ویژه در رسوبات دریایی به‌عنوان یک منبع انرژی بالقوه در آینده در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در مقایسه با فعالیت‌های حفاری و تولید از مخازن نفت و گاز معمولی، تجربه کمتری در زمینه حفاری سازندها و مخازن مستعد تشکیل هیدرات گازی وجود دارد [۷-۹]. سیال حفاری عموماً به دلیل اختلاف فشار بین انتهای چاه و سازند، در طول عملیات تزریق به چاه، درون سازند نیز نفوذ می‌کند، تداوم این اتفاق نه تنها سبب مهاجرت سیالات درون سازند به مناطق عقب‌تر و نیز انتقال مواد می‌شود، بلکه می‌تواند باعث تغییرات دما، فشار و شوری آب منفذی نیز شود. تغییر در این پارامترها می‌تواند باعث انحراف منحنی تعادل فازی هیدرات شود و در نتیجه باعث ایجاد خطرات مختلف در حین حفاری گردد؛ بنابراین، به‌منظور حفاظت مؤثر از مخزن هیدرات گاز و جلوگیری از تفکیک هیدرات در حین حفاری، تکنیک حفاری مورد نظر باید به‌شدت از نظر امکان‌سنجی و صرفه اقتصادی مورد بررسی قرار گیرد [۱۰]. همچنین، انتخاب سیال حفاری مناسب و تنظیم پنجره دمایی سیال به‌گونه‌ای که در حین حفاری سازند هیدرات، احتمال تجزیه هیدرات‌های موجود در سازند به حداقل برسد و یا این که در شرایط مناسب به دلیل شرایط دمایی از تشکیل هیدرات در سیال حفاری جلوگیری گردد، ضروری است. در ادامه این مطالعه روابط و تئوری‌های مختلفی که برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی تاکنون ارائه شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرند. روابطی که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود، عموماً با توجه به فشار تشکیل هیدرات و وزن مخصوص ترکیب گازی مستعد تشکیل هیدرات گازی، دمای تشکیل هیدرات گازی را برای هر ترکیب گازی پیش‌بینی می‌کند. با این حال هر یک از روابط ارائه شده در این زمینه شرایط خاصی را برای استفاده دارد و هر یک در شرایط خاصی پاسخگوی نیازهای متخصصان در این زمینه می‌باشد.

مطالعات آکادمیک هیدرات‌های گازهای مختلف از سال ۱۷۷۸ میلادی آغاز و تا ۱۹۳۴ ادامه یافت. نتایج در این زمینه استفاده تجاری گسترده‌ای پیدا نکرد و کاربردی برای آن‌ها یافته نشد. با این حال نتایج مطالعات دانشگاهی برای شروع مطالعات صنعتی هیدرات‌های گازی مهم بود. مطالعات صنعتی از سال ۱۹۳۴ میلادی آغاز و تا ۱۹۶۵ ادامه یافت. کارهای مهمی در

ایالات متحده در سال ۱۹۳۴ بر اساس مطالعات تجربی منتشر شد که نشان داد جامداتی که در خطوط لوله تشکیل می‌شوند هیدرات هستند. این کار انگیزه‌ای برای مطالعات هیدرات‌های گاز در صنعت به منظور جلوگیری از تشکیل هیدرات و حذف آن‌ها در خط لوله و استفاده از خواص هیدرات‌ها در فناوری‌های مختلف ایجاد کرد [۱۱]. به منظور پیش‌بینی شرایط دمایی تشکیل هیدرات‌های گازی نیاز است روش‌های مختلفی که تاکنون معرفی و توسعه داده شده‌اند، بررسی شوند. این روش‌ها شامل روابط تجربی و آزمایشگاهی و همچنین استفاده از نرم‌افزارهای توسعه داده شده در این زمینه است. این روابط تجربی برای شرایط خاص و بر مبنای ویژگی‌های خاص یک منطقه توسعه داده شده‌اند. رابطه هامر اشمیت از اولین روابطی بود که در سال ۱۹۳۴ توسط این محقق برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات در شرایط مختلف ارائه شد. این رابطه دقت بالایی در پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ندارد و به صورت زیر ارائه شده است [۱۲]:

$$T = 8.9 \times P^{0.285} \quad (1)$$

در رابطه بالا P بیانگر فشار بر حسب psi و T دمای تشکیل هیدرات گازی بر حسب °F می‌باشد.

در ادامه و در سال ۱۹۸۱ ماکوگون نیز رابطه‌ای را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه داد. این رابطه مطابق معادله (۲) تعریف می‌شود [۱۳]:

$$T = \sqrt{\frac{\log(P) + 1 - \beta}{0.0497k} + \frac{0.25}{k^2}} - k \quad (2)$$

همان‌طور که در این معادله مشخص است، دو ثابت β و k نیز در این رابطه تأثیرگذار هستند. نکته قابل ذکر در مورد این معادله این است که فشار بر حسب Mpa به عنوان ورودی رابطه داده می‌شود و دما بر حسب °C محاسبه می‌شود. همچنین ثوابت اشاره شده نیز مطابق معادلات (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

$$k = -0.006 + 0.011\gamma + 0.011\gamma^2 \quad (3)$$

$$\beta = 2.681 - 3.811\gamma + 1.679\gamma^2 \quad (4)$$

با توجه به روابط بالا، مشخص است برای محاسبه ثوابت β و k مقدار پارامتر γ به عنوان وزن مخصوص ترکیب گاز تأثیرگذار است و برای انجام محاسبات دمای تشکیل هیدرات با استفاده از روابط (۲) تا (۴)، معلوم بودن وزن مخصوص گاز و یا محاسبه آن ضروری است. برگ^۱ در سال ۱۹۸۶ معادله جدیدی را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه کرد؛ در روابط (۵) و (۶) دمای تشکیل هیدرات گازی به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز در دو محدوده مشخص وزن مخصوص تعریف شده است [۱۴]:

$$\text{برای } 0.555 \leq \gamma \leq 0.58$$

$$T = -96.03 + 23.57 \times \ln(P) - 0.64 \times \ln(P)^2 + \frac{\gamma - 0.555}{0.025} \times (80.61 \times P + \frac{1.16 \times 10^4}{P + 599.16} - 96.03 + 23.57 \times \ln(P) - 0.64 \times \ln(P)^2) \quad (5)$$

$$\text{و برای } 0.58 < \gamma \leq 1$$

$$T = \frac{-1.23 \times 10^4 + 80.61P - 2.1 \times 10^4 - \frac{1.22 \times 10^3}{\gamma - 0.535} - \frac{1.71 \times 10^3}{\gamma - 0.509}}{P - 260.42 - \frac{15.18}{\gamma - 0.535}} \quad (6)$$

در این روابط، فشار ورودی بر حسب kPa می‌باشد و دمای خروجی بر مبنای °F محاسبه می‌شود. در سال ۱۹۸۷، کابویاشی^۲ رابطه‌ای با تعداد پارامترهای قابل توجه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی ارائه کرد که مطابق معادل (۷) بیان می‌شود [۱۵]:

$$T = 1 / [a_1 + a_2 \times \ln(\gamma) + a_3 \times \ln(P) + a_4 \times \ln(\gamma)^2 + a_5 \times \ln(\gamma) \times \ln(P) + a_6 \times \ln(P)^2 + a_7 \times \ln(\gamma)^3 + a_8 \times \ln(\gamma)^2 \times \ln(P) + a_9 \times \ln(\gamma) \times \ln(P)^2 + a_{10} \times \ln(P)^3 + a_{11} \times \ln(\gamma)^4 + a_{12} \times \ln(\gamma)^3 \times \ln(P) + a_{13} \times \ln(\gamma)^2 \times \ln(P)^2 + a_{14} \times \ln(\gamma) \times \ln(P)^3 + a_{15} \times \ln(P)^4] \quad (7)$$

1. Berge
2. Kaboyashi





مقادیر ثوابت a_1 تا a_{15} در (جدول ۱) نشان داده شده است. توسط کابویاشی، دقت لازم را ندارد و در مواردی دمای محاسبه شده در حالت فشار و وزن مخصوص نرمال به صورت منفی به دست می‌آید؛ بنابراین از این رابطه در محاسبات پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی استفاده نمی‌شود [۱۵].

جدول ۱: ثوابت رابطه کابویاشی و همکاران (۱۹۸۷) [۱۵]

تعداد نورون	تابع فعال‌ساز	تعداد نورون	لایه‌های شبکه عصبی
$-۲/۳۲۷۹۱۸۱ \times ۱۰^{-۴}$	a_9	$۲/۷۷۰۷۷۱۵ \times ۱۰^{-۳}$	a_1
$-۲/۶۸۴۰۷۵۸ \times ۱۰^{-۵}$	a_{10}	$-۲/۷۸۲۲۳۸ \times ۱۰^{-۳}$	a_2
$۴/۶۶۱۰۵۵ \times ۱۰^{-۳}$	a_{11}	$-۵/۶۴۹۲۸۸ \times ۱۰^{-۴}$	a_3
$۵/۵۵۴۲۱۲ \times ۱۰^{-۴}$	a_{12}	$-۱/۲۹۸۵۹۳ \times ۱۰^{-۳}$	a_4
$-۱/۴۷۲۷۶۵ \times ۱۰^{-۵}$	a_{13}	$۱/۴۰۷۱۱۹ \times ۱۰^{-۳}$	a_5
$۱/۳۹۳۸۰۸ \times ۱۰^{-۵}$	a_{14}	$۱/۷۸۵۷۴۴ \times ۱۰^{-۴}$	a_6
$۱/۴۸۸۵۰۱۰ \times ۱۰^{-۵}$	a_{15}	$۱/۱۳۰۲۸۴ \times ۱۰^{-۳}$	a_7
		$۵/۹۷۲۸۲۳۵ \times ۱۰^{-۴}$	a_8

موتی^۱ در سال ۱۹۹۱ رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز مطابق معادله (۸) ارائه داد [۱۶]:

$$T = -283.24469 + 78.99667 \times \log(P) - 5.352544 \times (\log P)^2 \quad (8)$$

$$+ 349.473877 \times \gamma - 150.854675 \times \gamma^2 - 27.604065 \times \log P \times \gamma$$

در این رابطه فشار برحسب kPa و دما برحسب °C است.

در سال ۲۰۰۵ تولر و مخاطب^۲ رابطه موتی را تصحیح نموده و رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز ارائه کردند [۱۷]:

$$T = 13.47 \times \ln(P) + 34.27 \times \ln(\gamma) - 1.675 \times \ln(P) \times \ln(\gamma) - 20.35 \quad (9)$$

در این رابطه فشار برحسب psi و دما برحسب °F است.

در ادامه نیز از آخرین روابطی که برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه گردید، می‌توان به رابطه قییم و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۴ اشاره نمود. در این رابطه با تعریف ثوابت مشخص، دقت محاسبه دمای تشکیل هیدرات‌های گازی افزایش یافته است. این معادله مطابق رابطه (۱۰) به صورت زیر تعریف می‌شود و (جدول ۲) ثوابت این رابطه را نشان می‌دهد [۱۸]:

$$T = a + \frac{b}{\gamma} + c \times \ln(P) + d \times \exp(\gamma^g) + e \times \ln(P)^2 + f \times \ln(P) \times \exp(\gamma^h) \quad (10)$$

در رابطه بالا فشار برحسب psi و دما برحسب °F می‌باشد.

جدول ۲: ثوابت رابطه قییم و همکاران [۱۸]

مقدار	ثابت	مقدار	ثابت
$-۱/۱۳۵$	e	$-۲۶/۱۱۵$	a
$۰/۴۴۳$	f	$-۲۳/۷۲۸$	b
$-۲/۳۰۰$	g	$۲۳/۹۴۲$	c
$-۱/۷۰۰$	h	$-۰/۷۳۸$	d

1. Motiee

2. Towler and Mokhtab

3. Ghayyem et al.

در سال ۲۰۱۵ سحرخیزان^۱ رابطه‌ای ساده، اما دقیق برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه داد. این رابطه مطابق معادله (۱۱) به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز بیان می‌شود [۱۹]:

$$T = 194.681789 \times \gamma^{0.044323} \times (\ln[P])^{0.189829} \quad (11)$$

که در آن فشار برحسب kPa و دما برحسب K می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات پیرامون هیدرات‌های گازی به سمت استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی سوق پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۱، رانیان^۲ از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تخمین توزیع جهانی مجموع کربن آلی کف دریا به منظور محدود کردن ناحیه پایداری هیدرات‌های گازی و تولید متان استفاده نمود. کار وی سبب بهبود پیش‌بینی‌ها از مقدار کربن و تولید متان از مخازن هیدرات‌های گازی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شد. نتایج کار رانیان باعث پیش‌بینی کاملی از توزیع جهانی کربن آلی کف دریا، متان و هیدرات‌های گازی شد [۲۰].

در سال ۲۰۲۱، عمار^۳ در تحقیقات خود رابطه‌ای را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی برای انواع مختلف گاز طبیعی شامل گازهای ترش، اسیدی و شیرین ارائه نمود. این رابطه بر اساس یکی از تکنیک‌های یادگیری ماشین با عنوان GEP^۴ به دست آمد. وی برای انجام این تحقیق از تعداد ۲۷۹ داده تجربی و آزمایشگاهی استفاده کرد. نتایج این مطالعه انسجام مناسب برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها را نشان داد. مقدار میانگین خطای نسبی رابطه ارائه شده توسط عمار ۰/۱۳۹۷ درصد بود که دقت بالایی را در پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های نشان می‌دهد [۲۱].

در سال ۲۰۲۲، الهشودی^۵ و همکاران بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی یک مدل جامع همراه با معادله ریاضی متناظر آن برای تسهیل پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های

گازی ارائه کردند. همچنین آن‌ها، یک کد MATLAB و برنامه کامپیوتری مستقل برای ارائه درجه بالایی از سازگاری با بسته‌های نرم‌افزاری شبیه‌سازی و طراحی ایجاد نمودند. مدل شبکه عصبی مصنوعی آن‌ها بر اساس ۱۴۶۹ مجموعه داده فشار تشکیل هیدرات‌های گازی، دما و وزن مخصوص گاز ساخته شده است. نتایج کار آن‌ها میانگین خطای نسبی ۰/۰۰۰۵- درصد، میانگین خطای مطلق ۰/۱۱۴۵ و مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۰۷۳ درصد را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی نشان می‌دهد [۲۲].

در سال ۲۰۲۲ ژیمنگ^۶ و هایلونگ^۷ از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات‌های گازی طبیعی برای غلبه بر هزینه محاسباتی بالا و دقت پایین استفاده نمودند. آن‌ها در مدل خود از الگوریتم‌های جنگل تصادفی^۸ (RF)، بیز ساده^۹ (NB) و ماشین بردار پشتیبان^{۱۰} (SVR) برای تعیین شرایط تشکیل هیدرات‌های گازی استفاده نمودند. همچنین به‌عنوان یک مدل ترمودینامیکی نماینده، از مدل C-G^{۱۱} برای تجزیه و تحلیل کارایی محاسباتی و دقت مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل C-G و مدل RF بهتر از مدل‌های NB و SVR در سرعت و دقت محاسبات عمل می‌کند. با توجه به داده‌های تجربی، میانگین AADP محاسبه شده توسط مدل C-G ۷/۶۲ برابر مدل RF به دست آمد. آن‌ها نشان دادند در مقایسه با دو مدل دیگر یادگیری ماشین، انتظار می‌رود مدل RF با دقت بالاتری در پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات‌های گازی طبیعی در شرایط میدانی استفاده شود [۲۳].

در سال ۲۰۲۳، دوآن و همکاران^{۱۲} مدلی را ارائه کردند که می‌تواند توزیع فشار و دمای چاه را پیش‌بینی کند و مکان‌های تشکیل هیدرات‌ها را تخمین بزند. آن‌ها توزیع دما و فشار در داخل چاه، منحنی تشکیل هیدرات‌ها و نیز مناطق

1. Saharkhizan
2. Runyan
3. Amar
4. Gene Expression Programming
5. El-hoshoudy
6. Zimeng
7. Hailong
8. Random Forest
9. Naïve Bayes
10. Support Vector Machine
11. Chen-Guo
12. Duan et al.



تشکیل هیدرات را پیش‌بینی نمودند و عوامل مؤثر بر توزیع فشار و دما را در چاهی که در سازند حاوی هیدرات‌های حفاری و تکمیل شده است بررسی نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داد با افزایش تولید گاز از چاه، دمای سیال تولیدی افزایش می‌یابد، از طرفی فشار سیال سر چاه نیز در ابتدا افزایش می‌یابد؛ اما پس از مدتی کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه با افزایش تولید آب از چاه نیز، دمای سیال چاه افزایش

می‌یابد در حالی که فشار کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند تشکیل هیدرات‌های سیال به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر وزن مخصوص گاز طبیعی است؛ به‌طوری‌که افزایش وزن مخصوص گاز، منجر به تشکیل آسان‌تر هیدرات‌های سیال می‌شود [۲۴]. (جدول ۳) به‌طور خلاصه تحقیقات پیشین در زمینه هیدرات‌های سیال و نقاط ضعف و قوت هر یک از مطالعات را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه هیدرات‌های سیال

سال	نویسنده	نتایج تحقیق
۱۹۳۴	هامر اشمیت	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با دقت پایین
۱۹۸۱	ماکوگون	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال به‌منظور جلوگیری از تشکیل هیدرات در لایه‌های سنگ متخلخل
۱۹۸۴	برگ	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال که بر مبنای وزن مخصوص گاز به دو بخش تقسیم می‌شود تا رابطه با دقت بالاتری استخراج شود. همچنین در این رابطه در صورت محاسبه فشار بر حسب psi نتیجه‌ای ناپایدار تولید می‌کند.
۱۹۸۷	کابویاشی	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با ۱۵ تعریف ثابت که هر ثابت با یک روش رگرسیون به‌دست‌آمده است. همچنین این رابطه نتیجه‌ای در محدوده دمایی $34^{\circ}F - 60^{\circ}F$ ، فشار $65 - 1500 psi$ و وزن مخصوص $0/55$ تا $0/9$ به دست می‌دهد.
۱۹۹۱	موتی	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با توجه به فشار تشکیل و وزن مخصوص ترکیب گاز مستعد تشکیل هیدرات‌های سیال
۲۰۰۵	تولر و مخاطب	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با توجه به رابطه موتی (۱۹۹۱)
۲۰۱۴	قیم و همکاران	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با انجام تصحیحاتی روی رابطه موتی (۱۹۹۱) و رابطه تولر و مخاطب (۲۰۰۵) و با توجه به ثابت‌های تعریف شده
۲۰۱۵	سحرخیزان	ارائه رابطه‌ای ساده شده برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال بر مبنای ۲۲ نقطه داده و وزن مخصوص ترکیبات گاز بین $0/55$ تا ۱

۲. روش کار

به‌منظور پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری و جلوگیری از تشکیل هیدرات‌های سیال حفاری لازم است با استفاده از نرم‌افزارهای موردنظر و استخراج داده‌های مناسب، شبیه‌سازی و مدل‌سازی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شود. بدین منظور ابتدا ۱۴ نمونه ترکیب گاز که مستعد تشکیل هیدرات‌های سیال هستند استخراج شدند و برای هر نمونه ترکیب مقدار وزن مخصوص محاسبه گردید. وزن مخصوص هر ترکیب گاز مطابق رابطه (۱۲) در زیر محاسبه گردید.

$$\gamma_g = \frac{MW}{28.97} = \frac{\sum y_i MW_i}{28.97} \quad (12)$$

بنابراین با توجه به مطالب فوق، این مطالعه قصد دارد پنجره دمایی سیال حفاری هنگام حفاری سازند هیدرات‌های سیال را با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین پیش‌بینی کند تا بتوان با مدیریت صحیح دمای سیال حفاری حین حفاری این سازندها، از تشکیل هیدرات‌های سیال حفاری و یا تجزیه هیدرات‌های سیال موجود در لایه‌های زیرزمینی به دلیل افزایش دمای ناشی از عملیات حفاری جلوگیری نمود. پس از استخراج داده‌های مورد نیاز دما بر حسب فشار تشکیل هیدرات، با توجه به دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پیش‌بینی محدوده دمایی مناسب برای سیال حفاری حین حفاری سازند هیدرات‌های سیال انجام می‌شود.

در رابطه بالا γ_g بیانگر وزن مخصوص گاز، MW_i بیانگر وزن مولکولی هر جزء گازی و نشاندهنده وزن مخصوص هر جزء گازی می‌باشد. همچنین، عدد ۲۸/۹۷ جرم مولکولی هوا (به‌طور معمول شامل ۷۹ درصد نیتروژن و ۲۱ درصد اکسیژن) را نشان می‌دهد [۲۵].

سپس ترکیب و اجزاء تشکیل‌دهنده هر نمونه گازی برای شبیه‌سازی وارد نرم‌افزار PVTsim nova 1 شد. شرایط استاندارد برای شبیه‌سازی در این نرم‌افزار، دمای ۵۹ °F فانه‌پایت و فشار ۱۴/۶۹ psi در نظر گرفته شد. نتیجه خروجی شبیه‌سازی در نرم‌افزار نمودارهای تعادل هیدرات بود. سپس داده‌های دمای تشکیل هیدرات مورد نیاز شبیه‌سازی شده هر نمونه در فشار مشخص برای هر نمونه ترکیب گازی در برنامه GetData Digitizer استخراج شدند و در مجموع تعداد ۱۵۸۵ داده فشار-دما از شبیه‌سازی در نرم‌افزار PVTsim به دست آمد. در ادامه با کدنویسی برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB بر مبنای داده‌های به‌دست‌آمده، دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی تعیین شد. از بین روابط معرفی شده، برای ۶ نمونه ترکیب گازی با مقادیر وزن مخصوص متفاوت از الگوریتم‌های یادگیری

ماشین برای پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری استفاده شد. قابل‌ذکر است یکی از فرضیات انجام این تحقیق در نظر گرفتن سیال حفاری پایه آبی حاوی ۹۰/۶۷ درصد مولی آب به‌عنوان پایه تشکیل‌دهنده سیال حفاری و نیز ۹/۳۳ درصد مولی متانول به‌عنوان بازدارنده تشکیل هیدرات می‌باشد. با در نظر گرفتن فرضیات فوق، برای نمونه‌های ترکیب گازی (جدول ۴) اطلاعات هر نمونه ترکیب گازی را نشان می‌دهد) با مقادیر وزن مخصوص ۰/۵۸۱، ۰/۶۱۸۱، ۰/۶۵۳۲، ۰/۶۷۷۹، ۰/۷۴۵ و ۰/۷۶۲۳ برنامه‌نویسی برای پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات گازی در محیط پایتون با الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های یادگیری ماشین و نیز پرسپترون چندلایه (MLP) به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی در محیط MATLAB انجام شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار CSMHyd مقدار فشار تشکیل هیدرات گازی برای هر نمونه ترکیب گازی تعیین شد و به‌وسیله فشار تعیین‌شده، مقدار دمای موردنیاز جهت عدم تشکیل هیدرات گازی توسط پیش‌بینی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین مشخص شد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. [۲۶-۳۲].

جدول ۴: ترکیب گازی مستعد تشکیل هیدرات گازی برای شبیه‌سازی و داده‌یابی [۲۸]

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶	نام ترکیب
درصد وزنی هر جزء گازی						
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۵۶	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۸۷	N_2
۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۹۲	۰/۰۱۷۳	۰/۰۶۱۱	۰/۰۵۸۴	۰/۰۳۷۵	CO_2
۰/۹۶۸۱	۰/۹۲۰۸	۰/۸۵۱۹	۰/۷۷۲۵	۰/۷۸۰۶	۰/۸۷۷۶	C_1
۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۵۲	۰/۰۶۷۶	۰/۰۸۷۷	۰/۰۸۹۶	۰/۰۴۸۶	C_2
۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۵۱	۰/۰۲۷۳	۰/۰۳۳۴	۰/۰۳۳۳	۰/۰۱۵۱	C_3
۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۳۱	iC_4
۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۴۱	nC_4
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۱۹	iC_5
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	nC_5
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۲۱	C_{6+}
۰/۰۰۰۴	.	.	.	.	.	C_7
۰/۰۰۰۲	.	.	.	.	.	C_8
۰/۰۰۰۰۱	.	.	.	.	.	C_9
۰/۵۸۱	۰/۶۱۸۱	۰/۶۵۳۲	۰/۶۷۷۹	۰/۷۶۲۳	۰/۷۴۵	وزن مخصوص

1. Multilayer Perceptron

۳. نتایج و بحث

همان‌طور که از (شکل ۲) مشخص است، رابطه برگ که در سال ۱۹۸۶ جهت پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه شده است، بالاترین مقدار خطا را بین روابط بالا دارد، بعد از آن به ترتیب روابط موتی، هامر اشمیت، تولر و قییم مقدار میانگین خطای نسبی کمتری دارند و در نهایت رابطه سحرخیزان و همکاران که در سال ۲۰۱۵ ارائه گردید کمترین مقدار میانگین خطای نسبی را بین روابط به کار رفته دارد و رابطه‌ای قابل اطمینان برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی می‌باشد؛ بنابراین از رابطه سحرخیزان و همکاران در الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این مطالعه استفاده شد. در ادامه نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کدنویسی الگوریتم رگرسیون از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، برای شش ترکیب گازی با مقادیر وزن مخصوص متفاوت که به صورت تصادفی انتخاب شدند، در محیط برنامه‌نویسی ژوپیترا پایتون انجام شد. سپس، منحنی فشار-دما برای هر ترکیب گازی به صورت جداگانه رسم گردید. داده‌های فشار-دما رسم شده برای هر ترکیب گازی با استفاده از یک م چند جمله‌ای درجه دو برازش شد. به این ترتیب، با استفاده از الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای که زیرشاخه‌ی یادگیری تحت نظارت از یادگیری ماشین به روش کلاسیک است، شرایط تشکیل هیدرات‌های شش ترکیب گازی مطابق رابطه درجه دوم (۱۵) به دست آمد. همچنین ثوابت این رابطه در (جدول ۵) برای شش ترکیب گازی مستعد تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه شده است.

$$T = aP^2 + bP + c \quad (15)$$

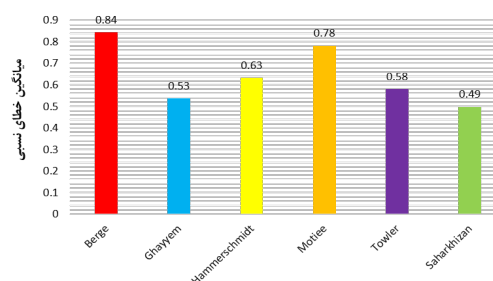
در رابطه بالا فشار ورودی برحسب kPa و دمای خروجی برحسب K است. همچنین (شکل ۳ الف تا ج) نمودار رگرسیون درجه دوم رسم شده فشار-دما را برای ترکیبات گازی اشاره شده در (جدول ۵) نشان می‌دهد.

در بخش مقدمه روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی معرفی شدند. در این بخش ابتدا دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی از بین روابط ارائه شده مشخص می‌شود. رابطه موردنظر با توجه به داده‌های استخراج شده که ترکیب گاز مخازن مستعد تشکیل هیدرات‌های گازی را نشان می‌دهد و برای شرایط سیال حفاری آب همراه با دارنده متانول، به دست می‌آید تا بتوان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین پنجره دمایی سیال حفاری را برای حفاری سازند هیدرات مشخص نمود. کد نویسی برای دقت سنجی روابط موردنظر در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. با توجه به پارامترهای ورودی فشار و وزن مخصوص گاز، مقدار دمای تشکیل هیدرات‌های گاز برای ۱۵۸۵ داده محاسبه شد. سپس، با توجه به روابط خطای نسبی (RE) و میانگین خطای نسبی (MRE) بین مقادیر دمای پیش‌بینی شده و دمای شرایط شبیه‌سازی که از داده‌ها به دست آمده‌اند، مقدار خطا برای هر رابطه به دست آمد. مقادیر میانگین خطای نسبی به دست آمده برای هر رابطه در (شکل ۲) نشان داده شده است. همچنین رابطه‌های (۱۳) و (۱۴)، معادلات خطای نسبی و میانگین خطای نسبی را نشان می‌دهد [۱۸].

$$RE = \left| \frac{x_{exp} - x_{pre}}{x_{exp}} \right| \quad (13)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{exp_i} - x_{pre_i}}{x_{exp_i}} \right|}{n} \quad (14)$$

در روابط بالا، x_{exp} داده‌های آزمایشگاهی و x_{pre} داده‌های پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. همچنین n بیانگر تعداد کل داده‌ها است.

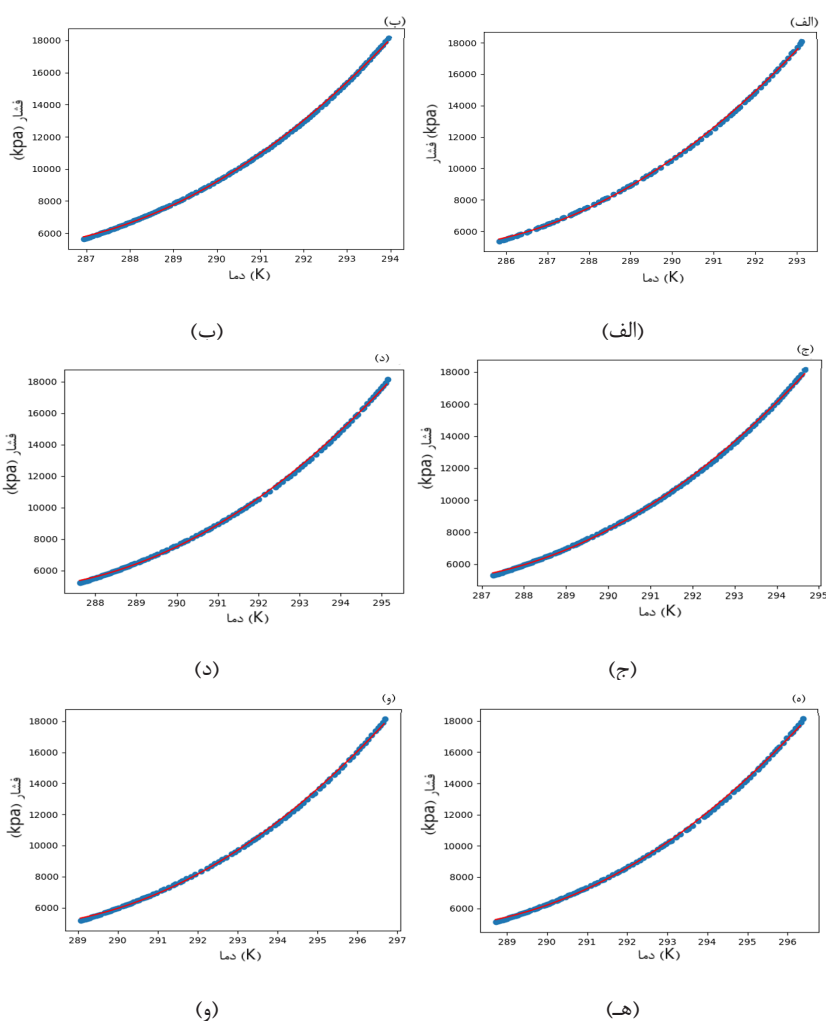


شکل ۲: میانگین خطای نسبی محاسبه شده برای روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی

1. Relative Error
2. Mean Relative Error

جدول ۵: ثابت‌های مورد نظر روابط درجه دوم استخراج شده با رگرسیون چندجمله‌ای

شماره ترکیب	وزن مخصوص ترکیب	a	b	c
۱	۰/۵۸۱	-۲/۹۰۶۹۵	۱/۲۲۵۸۸	۲۸۰/۲۹۱
۲	۰/۶۱۸۱	-۲/۸۰۴۱۷	۱/۲۰۰۲۳	۲۸۱/۲۴۱
۳	۰/۶۵۳۲	-۲/۹۶۸۷۶	۱/۲۴۲۶۳	۲۸۱/۷۰۰
۴	۰/۶۷۷۹	-۳/۰۲۶۱۲	۱/۲۵۸۹۶	۲۸۲/۰۷۹
۵	۰/۷۴۵	-۳/۰۹۰۹۱	۱/۲۷۶۵۷	۲۸۳/۱۹۵
۶	۰/۷۶۲۳	-۳/۰۳۴۰۸	۱/۲۶۴۵۹	۲۸۳/۵۴۶



شکل ۳: نمودار رگرسیون درجه دو به دست آمده در پایتون برای شرایط تشکیل هیدرات در ترکیبات گازی با مقادیر وزن مخصوص (الف) ۰/۵۸۱۰، (ب) ۰/۶۱۸۱، (ج) ۰/۶۵۳۲، (د) ۰/۶۷۷۹، (ه) ۰/۷۴۵ و (و) ۰/۷۶۲۳

با استفاده از نمودار فشار-دمای رسم شده، مقدار دمای میانگین برای هر ترکیب برحسب درجه کلونین با توجه به فشار پیش‌بینی شده تشکیل هیدرات در نرم‌افزار CSMHyd محاسبه گردید. مقادیر خطای نتایج پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم رگرسیون پشتیبانی که شامل مربعات خطا (R^2) می‌باشد، در (جدول ۶) قابل نشان داده شده است. رابطه

(۱۶) در ادامه معادله مربعات خطا را نشان می‌دهد [۳۳]. با محاسبه مقدار میانگین دما در هر منحنی و نیز تأیید دقت مناسب پیش‌بینی‌ها بر مبنای رگرسیون خطی، از نرم‌افزار CSMHyd برای پیش‌بینی شرایط ترمودینامیکی تشکیل هیدرات گازی در شرایط ترکیب سیال حفاری که ترکیب آن در (جدول ۷) قابل مشاهده است (سیال حفاری فرض



شده در شبیه‌سازی)، استفاده شد. در این نرم‌افزار با استفاده از ترکیب گازی مورد نظر و درصد مولی هر جزء و مقدار دمای ورودی (به‌صورت فرضی دمای میانگین موجود در (جدول ۶) برای هر ترکیب گازی)، فشار تشکیل هیدرات گازی در شرایط معرفی شده پیش‌بینی می‌شود. (جدول ۶) مقدار فشار پیش‌بینی شده تشکیل هیدرات گازی در شرایط ترکیب هیدرات گازی در سیال حفاری پایه آبی همراه متانول را برای ترکیبات گازی با وزن مخصوص مشخص نشان می‌دهد. با توجه به فشار پیش‌بینی شده در نرم‌افزار

جدول ۶: نتایج به‌دست آمده از پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات گازی با رگرسیون چندجمله‌ای در پایتون و نرم‌افزار CSMHyd

وزن مخصوص ترکیب مورد نظر	مربعیات خطا (R^2)	دمای میانگین هر ترکیب (K)	فشار تشکیل هیدرات محاسبه شده در نرم‌افزار (CSMHyd kPa)	دمای تشکیل هیدرات پیش‌بینی شده با الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای (K)
۰/۵۸۱۰	۰/۹۷۳۹	۲۸۹/۴۱۵	۹۶۶۵/۹۱۱	۲۸۹/۴
۰/۶۱۸۱	۰/۹۷۴۳	۲۹۰/۲۸۷	۱۲۵۵۶/۷۰۴	۲۹۱/۸
۰/۶۵۳۲	۰/۹۷۳۲	۲۹۰/۷۵۵	۹۳۳۴/۶۰۵	۲۹۰/۹
۰/۶۷۷۹	۰/۹۷۳۰	۲۹۱/۰۷۷	۷۸۹۲/۴۸۴	۲۹۰/۲
۰/۷۴۵۰	۰/۹۷۲۱	۲۹۲/۲۳۹	۹۴۱۶/۹۸۰	۲۹۲/۶
۰/۷۶۲۳	۰/۹۷۲۴	۲۹۲/۵۶۰	۱۰۳۲۲/۹۸۶	۲۹۳/۲

جدول ۷: ترکیب سیال حفاری پایه آبی همراه با متانول به‌عنوان بازدارنده تشکیل هیدرات

جزء	درصد مولی
آب (H_2O)	۹۰/۳۲۷
متانول (MeOH)	۹/۶۷۳

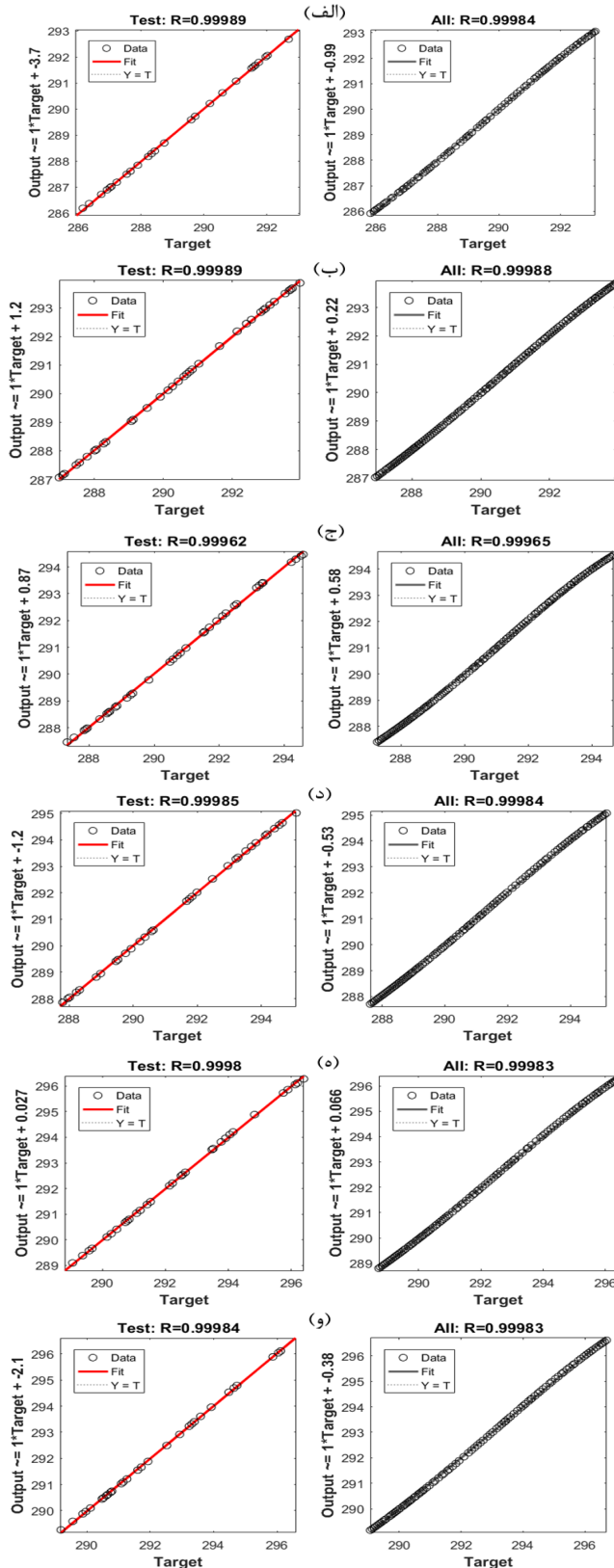
برای شش ترکیب گازی منتخب، داده‌های فشار و دما به‌صورت مجزا برای هر ترکیب تفکیک شدند؛ بنابراین داده‌های فشار هر ترکیب گازی به‌عنوان داده ورودی و داده‌های دمای هر ترکیب به‌عنوان داده هدف انتخاب شد. برای پیش‌بینی با این الگوریتم لازم بود مقدار داده‌های آموزشی، داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های تست مشخص شود. با توجه به اهمیت بالاتر داده‌های آموزشی و داده‌های تست سهم بیشتری از داده‌های موجود به این نوع دو داده اختصاص یافت. بدین منظور ۵۵ درصد از داده‌ها را داده‌های آموزشی تشکیل داد، ۳۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شد و باقی‌مانده داده‌ها (۱۵ درصد) نیز به داده‌های اعتبارسنجی مورد اختصاص یافت. پس از اجرای شبکه برای داده‌های هر ترکیب گازی، مقدار تابع هدف برای پیش‌بینی بهتر توسط شبکه عصبی مشخص شد، مقدار خطای پیش‌بینی محاسبه گردید و نمودار رگرسیون هر شبکه به‌صورت (شکل ۴) به دست آمد.

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (16)$$

در معادله (۱۶)، Y_i مقدار داده اندازه‌گیری شده و \hat{Y}_i مقدار داده واقعی را در محاسبه خطا نشان می‌دهد.

در ادامه این مطالعه، پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی و پنجره دمایی سیال حفاری برای جلوگیری از تشکیل هیدرات گازی متان در سیال حفاری حین حفاری در سازند گازی مستعد تشکیل هیدرات، به‌وسیله الگوریتم MLP به‌عنوان زیرشاخه‌ای از شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه که یکی از الگوریتم‌های مهم طبقه‌بندی در شبکه‌های عصبی مصنوعی است، برای شش ترکیب گازی با وزن مخصوص مشخص، پیش‌بینی‌ها انجام شد و نتایج به دست آمد و مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور انجام پیش‌بینی با پرسپترون چندلایه



شکل ۴: نتایج خروجی از پیش‌بینی تشکیل هیدرات با استفاده از الگوریتم MLP

راهنما: در (شکل‌های الف تا و) محور Target به‌عنوان تابع هدف و محور عمودی Output به‌عنوان خروجی نهایی (پیش‌بینی شده) از شبکه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات ترکیبات گازی با مقادیر وزن مخصوص (الف) ۰/۵۸۱۰، (ب) ۰/۶۱۸۱، (ج) ۰/۶۵۳۲، (د) ۰/۶۷۷۹، (ه) ۰/۷۴۵۰ و (و) ۰/۷۶۲۳ معرفی می‌شود.



رابطه (۱۷) مقدار تابع نهایی مناسب با دقت بالا را با توجه به نتایج به دست آمده بر اساس داده‌های تست برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی در شرایط سیال حفاری پایه آبی نشان می‌دهد.

$$T_f = T_i + d \quad (17)$$

همچنین در رابطه بالا، T_f دمای نهایی و T_i دمای ابتدایی هستند که بر حسب درجه کلون محاسبه می‌شوند. همچنین ثابت d این معادله در (جدول ۸) برای شش ترکیب گازی اشاره شده ارائه گردیده است.

جدول ۸: مقدار محاسبه شده ثابت d رابطه (۱۳) با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه

شماره ترکیب	وزن مخصوص ترکیب گازی	مقدار ثابت d
۱	۰/۵۸۱	۳/۷
۲	۰/۶۱۸۱	۱/۲
۳	۰/۶۵۳۲	۰/۸۷
۴	۰/۶۷۷۹	-۱/۲
۵	۰/۷۴۵	۰/۰۲۷
۶	۰/۷۶۲۳	-۲/۱

در نهایت نیز خطای حاصل از پیش‌بینی با MLP برای ترکیبات گازی فوق، همراه دمای پیش‌بینی شده نهایی برای جلوگیری از تشکیل هیدرات‌های گازی در سیال حفاری در (جدول ۹) گردآوری شده است. همان‌طور که در جدول نیز مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده دمای تشکیل هیدرات به وسیله الگوریتم پرسپترون چندلایه دقت بالایی

دارد و مقادیر خطای پایینی برای هر ترکیب گازی در شرایط تعریف شده به دست آمده است. به عنوان مثال با توجه به مقدار ثابت d می‌توان پیش‌بینی نمود که ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۷۴۵ کمترین مقدار تصحیح دمای نهایی تشکیل هیدرات را نسبت به دمای اولیه پیش‌بینی شده را نیاز دارد. همچنین با توجه به مقدار میانگین مربعات خطا می‌توان گفت ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۶۵۳۲ می‌تواند بهترین نتیجه را بین سایر ترکیبات داشته باشد. در ادامه مشابه پیش‌بینی‌ها با رگرسیون چندجمله‌ای، با انتخاب دمای میانگین به عنوان دمای ورودی مقدار دمای پیش‌بینی شده به وسیله MLP محاسبه شد که نتایج آن در (جدول ۹) آورده شده است. به عبارت دیگر دمای میانگین به عنوان دمای اولیه برای هر ترکیب گازی در معادله (۱۷) در نظر گرفته شد و دمای تشکیل هیدرات با استفاده از الگوریتم MLP محاسبه شد. دمای نهایی محاسبه شده در (جدول ۹)، مقدار حداقل دمایی را نشان می‌دهد که در آن دما در سیال حفاری پایه آبی همراه با دارنده متانول هیدرات‌های گازی تشکیل نمی‌شود؛ بنابراین، برای یک ترکیب گازی با وزن مخصوص مشخص که در سازند مستعد تشکیل هیدرات‌های گازی طبیعی وجود دارد، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان مقدار پنجره دمایی مناسب سیال حفاری را طوری مشخص نمود که از تشکیل هیدرات‌های حین عملیات حفاری جلوگیری گردد و مخاطرات حفاری سازند هیدرات‌ها به حداقل برسد. به این ترتیب، با گذشت از مرحله حفاری موفق سازند هیدرات، می‌توان در راستای تولید و استخراج گاز طبیعی متان از این ترکیبات ارزشمند گام نهاد.

جدول ۹: نتایج پیش‌بینی و خطای پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه

وزن مخصوص ترکیب گازی	R^2	مقدار میانگین مربعات خطا	مقدار دمای میانگین تشکیل هیدرات (K)	مقدار دمای نهایی پیش‌بینی شده (K)
۰/۵۸۱	۰/۹۹۹۸۴	۰/۰۰۱۱۸	۲۸۹/۴۱۵	۲۹۳/۱۱۵
۰/۶۱۸۱	۰/۹۹۹۸۳	۰/۰۰۱۶۸۴	۲۹۰/۲۸۷	۲۹۱/۴۸۷۶۳
۰/۶۵۳۲	۰/۹۹۹۸۸	۰/۰۰۳۷۷۶	۲۹۰/۷۵۵	۲۹۱/۶۲۵۱۴
۰/۶۷۷۹	۰/۹۹۹۶۵	۰/۰۰۱۸۰۵	۲۹۱/۰۷۷	۲۸۹/۸۷۷۷۱
۰/۷۴۵	۰/۹۹۹۸۴	۰/۰۰۲۱۳۸	۲۹۲/۲۳۹	۲۹۲/۲۶۶۱۱
۰/۷۶۲۳	۰/۹۹۹۸۳	۰/۰۰۱۵۸۸	۲۹۲/۵۶۰	۲۹۰/۴۶۰۰۱

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه انجام شده با هدف پیش‌بینی پنجره دمایی مناسب سیال حفاری برای سازندهای هیدرات

با توجه به نتایج به دست آمده برای ۱۵۸۵ داده و با کدنویسی در محیط MATLAB، رابطه سحرخیزان (۲۰۱۵) با مقدار میانگین خطای نسبی ۰/۴۹۸ بالاترین دقت و کمترین خطا را در بین روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گاز نشان داد. همچنین رابطه برگ (۱۹۸۶) با مقدار میانگین خطای نسبی ۰/۸۴۴ کمترین دقت را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها دارا بود؛ بنابراین، برای اجرای الگوریتم‌های یادگیری ماشین از رابطه سحرخیزان (۲۰۱۵) استفاده شد.

با اجرای رگرسیون چندجمله‌ای در محیط پایتون برای شش ترکیب‌های اشاره شده یک چندجمله‌ای درجه دو با پارامترهایی که بهترین تطابق را با داده‌های مورد نظر داشت، استخراج شد. نتایج به دست آمده نشان داد ترکیب‌های گاز با وزن مخصوص ۰/۶۱۸۱ با مقدار R^2 برابر ۰/۹۷۴۳ کمترین مقدار خطا را بین سایر ترکیب‌های گاز برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها دارد. سپس با استفاده از نرم‌افزار CSMHyd مقدار فشار تشکیل هیدرات برای ترکیب‌های گاز در مقادیر دمایی مشخص که به عنوان میانگین دما در محدوده دمایی تشکیل هیدرات‌ها برای هر ترکیب در نظر گرفته شد، به دست آمد و برای محاسبه دمای تشکیل هیدرات بر اساس معادله به دست آمده از رگرسیون به کار رفت. نتایج به دست آمده نشان داد دمای پیش‌بینی تشکیل هیدرات برای ترکیب‌های گاز منتخب با وزن مخصوص ۰/۶۱۸۱، حدود ۱/۶ درجه کلوین از دمای میانگین اولیه بالاتر است که به عنوان حداکثر دمایی تعریف می‌شود که در آن دما هیدرات‌های گاز در سیال حفاری پایه آبی همراه با دارنده متانول تشکیل می‌شود. به این ترتیب، حداقل دمای مورد نیاز سیال حفاری که در آن دما هیدرات‌های گاز طبیعی در حین عملیات حفاری به وسیله سیال حفاری پایه آبی تشکیل نمی‌شود، برای ترکیب‌های گاز مورد نظر به دست آمد.

همچنین با انجام پرسپترون چندلایه در شبکه‌های عصبی مصنوعی در محیط MATLAB برای شش ترکیب‌های گاز اشاره شده محاسبات مربوط انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده از MLP، بیشترین مقدار مجذور مربعات خطا در پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها برای ترکیب‌های گاز با وزن مخصوص ۰/۶۵۳۲ محاسبه شد. سپس برای ترکیب‌های گاز منتخب، مشابه قسمت رگرسیون، رابطه‌ای برای پیش‌بینی دما به دست آمد. رابطه استخراج شده به دمای اولیه که به طور فرضی دمای میانگین در منحنی فشار-دمای هر ترکیب‌های گاز انتخاب شد، وابسته می‌باشد. به این ترتیب،

برای ترکیب‌های گاز مورد نظر، مقادیر دمای تشکیل هیدرات در سیال حفاری تعیین گردید. بر همین اساس، برای ترکیب‌های گاز با وزن مخصوص ۰/۶۵۳۲ مقدار دمای نهایی پیش‌بینی تشکیل هیدرات‌ها در سیال حفاری مقدار ۲۹۱/۶۲۵ کلوین به دست آمد که از مقدار دمای میانگین حدود ۰/۸۷ بیشتر بود؛ بنابراین، برای هر ترکیب‌های گاز مقدار حداقل دمای مورد نیاز سیال حفاری که تا آن دما به دلیل شرایط دمایی هیدرات‌های تشکیل نمی‌شود، به دست آمد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت شرکت نفت خزر به انجام رسیده است. نویسندگان از مجموعه شرکت نفت خزر، آقای مهندس حکمی مسئول بخش حفاری و سرکار خانم جتیی مسئول بخش پژوهش و فناوری، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع:

- [1]. Carroll, J. (2020). Introduction. In *Natural Gas Hydrates* (pp. 1–26). Elsevier, pp: 12-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821771-9.00001-X>.
- [2]. Englezos, P. (1993). Clathrate Hydrates. In *Ind. Eng. Chem. Res* (Vol. 32).
- [3]. Yang, M., Zhao, J., Zheng, J. nan, & Song, Y. (2019). Hydrate reformation characteristics in natural gas hydrate dissociation process: A review. In *Applied Energy* (Vol. 256). Elsevier Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113878>.
- [4]. Wang, X., Pan, L., Lau, H. C., Zhang, M., Li, L., & Zhou, Q. (2018). Reservoir volume of gas hydrate stability zones in permafrost regions of China. *Applied Energy*, 225, 486–500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.125>.
- [5]. شرکت نفت خزر. (۱۳۹۸). هیدرات‌های گاز در آب‌های عمیق (چاپ اول). صفحات ۱–۳۰.
- [6]. Li, J. fa, Ye, J. liang, Qin, X. wen, Qiu, H. jun, Wu, N. you, Lu, H. long, Xie, W. wei, Lu, J. An, Peng, F., Xu, Z. qiang, Lu, C., Kuang, Z. gui, Wei, J. gong, Liang, Q. yong, Lu, H.



- Gas. Penn Well Publishing Company, Tulsa, p. 237.
- [14]. Berge, B.K. (Norsk Hydro). Hydrate prediction on a microcomputer. SPE 15306, Presented at the Society of Petroleum Engineers Symposium on Petroleum Industry Applications, Colorado, USA, Silvercreek, 1986, 18e20 June.
- [15]. Kobayashi, R., Song, K., Sloan, E., 1987. Phase behavior of water/hydrocarbon systems. In: Brad-ley, H.B., Gipson Fred, W. (Eds.), Petroleum Engineering Handbook. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA.
- [16]. Motiee, M., 1991. Estimate possibility of hydrate. *Hydrocarb. Process.* 70 (7), 98-99.
- [17]. Towler, B.F., Mokhatab, S., 2005. Quickly estimate hydrate formation conditions innatural gases. *Hydrocarb. Process.* 84 (4), 61e62.
- [18]. Ghayyem, M. ali, Izadmehr, M., & Tavakoli, R. (2014). Using an eclectic approach, developing a simple and accurate correlation for initial estimation of hydrate formation temperature of sweet nat-ural gases. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 184–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.08.003>.
- [19]. Safamirzaei, M. (n.d.). Predict gas hydrate formation temperature with a simple correlation. www.GulfPub.com.
- [20]. Runyan Lee, T. (n.d.). A machine learning approach to predicting seafloor properties and their ap-plication in estimating a global methane hydrate inventory. 2021 <https://scholarsjunction.msstate.edu/td>
- [21]. Menad Nait Amar, Prediction of hydrate formation temperature using gene expression program-ming, *Journal of* feng, & Kou, B. bei. (2018). the first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea. *China Geolo-gy*, 1(1), 5–16. DOI: <https://doi.org/10.31035/cg2018003>.
- [7]. Merey, Ş. (2016). Drilling of gas hydrate reservoirs. In *Journal of Natural Gas Science and Engi-neering* (Vol. 35, Issue Part A, pp. 1167–1179). Elsevier B.V. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.058>.
- [8]. Yakushev, V.S., Collett, T.S., 1992. Gas hydrates in Artic regions: risk to drilling and production. In: *Proceedings of the Second (1992) International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, 14e19 June 1992.
- [9]. Collett, T., Bahk, J.J., Baker, R., Boswell, R., Divins, D., Frye, M., Goldberg, D., Husebø, J., Koh, C., Malone, M., Morell, M., Myers, G., Shipp, C., Torres, M., 2015. Methane hydrates in nature-current knowledge and challenges. *J. Chem. Eng. Data* 60 (2), 319e329.
- [10]. Wei, N., Pei, J., Zhao, J., Zhang, L., Zhou, S., Luo, P., Li, H., & Wu, J. (2022). A state-of-the-art review and prospect of gas hydrate reservoir drilling techniques. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.997337>.
- [11]. Kozhevnykov, A., Khomenko, V., Liu, B., Kamyshatskyi, O., & Pashchenko, O. (2020). The histo-ry of gas hydrates studies: From laboratory curiosity to a new fuel alternative. *Key Engineering Ma-terials*, 844, 49–64. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.49>.
- [12]. Hammerschmidt, E.G., 1934. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines. *Ind. Eng. Chem.* 26, 851.
- [13]. Makogon, Y., 1981. Hydrates of Natural



MS/1742567/spe-131663-ms.pdf/1.

- [29]. Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. In SN Computer Science (Vol. 2, Issue 3). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>.
- [۳۰]. حاجی آبادی، مرتضی؛ شبکه عصبی چیست: شبکه عصبی مصنوعی چیست، ارائه شده در سایت کنکور کامپیوتر، ۱۴۰۱. <https://ai-center.ir>
- [31]. Mahesh, B. (2018). Machine Learning Algorithms-A Review. International Journal of Science and Research. DOI: <https://doi.org/10.21275/ART20203995>.
- [32]. Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. In SN Computer Science (Vol. 2, Issue 3). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>.
- [33]. Deepak K., Mayukh Ch., Gurmehak K., Suchitra V., Deep Learning for Medical Applications with Unique Data, chapter3- Deep learning applications for disease diagnosis, pages 31-51, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824145-5.00005-8>.
- Natural Gas Science and Engineering, Volume 89, May 2021, 103879, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103879>.
- [22]. El-hoshoudy A. N., Ahmed A., Gomma S., Abdelhady A., An Artificial Neural Network Model for Predicting the Hydrate Formation Temperature, Arabian Journal for Science and Engineering 47(6), 2021, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06340-w>.
- [23]. Zimeng Yu, Hailong Tian, Application of Machine Learning in Predicting Formation Condition of Multi-Gas Hydrate, Energies 2022, 15(13), 4719; DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134719>.
- [24]. Xinyue D., Jiaqiang Z., Jiadong Li, Yu T., Chuanyong Zhu, Liang G., Prediction of Gas Hydrate Formation in the Wellbore, Energies 2023, 16(14), 5579; DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145579>.
- [25]. Abdullah Hussein, Essentials of Flow Assurance Solids in Oil and Gas Operations, Chapter 12 - Flow Assurance Solids Prediction and Modeling, pages 503-577, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99118-6.00018-6>.
- [26]. PVTsim Nova. A leading PVT software. Available online: <https://www.calsep.com/pvtsim-nova/> (accessed on 2021).
- [27]. CSMHYD. Publicly Available Software. Available online: <http://hydrates.mines.edu/CHR/Software.html> (accessed on 2 July 2021).
- [28]. Rajnauth, J., Barrufet, M., & Falcone, G. (2010). SPE 131663 Hydrate Formation: Considering the effects of Pressure, Temperature, Composition and Water. <http://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-pdf/10EURO/All-10EURO/SPE-131663->



Prediction of Drilling Fluid Temperature Window and Formation of Gas Hydrates During Drilling in Deep Water Using Machine Learning Algorithms

Mohammad Dousti¹, Elnaz Khodapanah^{2*}

1. M.Sc., Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 05 June 2024

Revised: 20 July 2024

Accepted: 10 August 2024

Keywords:

Natural gas hydrates

Drilling fluid temperature window

Deepwater drillin

Polynomial regression algorithm

Multilayer perceptron algorithm

ABSTRACT

Drilling in gas hydrate formations in deep water poses significant risks and challenges. This research aims to determine the temperature window for drilling fluid in deep water drilling, after examining the relations of predicting the temperature of gas hydrate formation, using two machine learning algorithms, "polynomial regression in Python and multilayer perceptron in MATLAB". The predictions are used to establish the required temperature range for the drilling fluid. Among the examined methods for predicting gas hydrate formation temperatures, the Saharkhizan relationship, with an average relative error of 0.49, demonstrated the highest accuracy. Furthermore, for six gas compounds with varying specific gravities, the gas compound with a specific gravity of 0.61 yielded an R^2 value of 0.9743 using the polynomial regression algorithm. Similarly, the gas compound with a specific gravity of 0.65 showed the highest accuracy when using the multilayer perceptron algorithm.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

M. Dousti, E. Khodapanah, Prediction of Drilling Fluid Temperature Window and Formation of Gas Hydrates During Drilling in Deep Water Using Machine Learning Algorithms. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(1): 71-86. (https://www.ijge.irangi.org/article_722820.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: khodapanah@sut.ac.ir, (E. Khodapanah).

Available online 01 September 2024

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

