

# مدل‌سازی ضخامت محدوده پایداری هیدرات‌گازی و تخمین اولیه حجم گاز در رسوبات دریای عمان

پژوهش‌نفت

سال بیست و چهارم

شماره ۷۹

۱۳۹۳

صفحه، ۲۰-۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۶/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۵/۵

عرفان افاضلی<sup>۱\*</sup>، شهاب گرامی<sup>۲</sup>، ناصر کشاورز فرج‌خواه<sup>۳</sup> و سید امیر بدخشان<sup>۴</sup>

۱- دانشکده مهندسی نفت، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، شرکت ملی نفت، تهران، ایران

۳- پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۴- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

گاز میدان عظیم پارس جنوبی قابل مقایسه می‌باشد. بنابراین، وجود این منبع انرژی در دریای عمان ضرورت انجام مطالعات ویژه جهت تولید و ارزیابی اقتصادی را بیش از پیش مورد تاکید قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: هیدرات‌گازی، دریای عمان، محدوده پایداری هیدرات‌گازی، منبع انرژی، نشان‌گرهای لرزه‌ای

## مقدمه

هیدرات‌های گازی شبکه جامد کریستالی یخ ماندنی هستند که در آنها گازهایی با وزن مولکولی کم (عمدتاً متان) درون قفس‌های ساخته شده از مولکول‌های آب به دام می‌افتند [۱]. مخازن هیدرات‌گازی در بخش‌های زیادی از مناطق فلات قاره‌ای<sup>۱</sup> دریایی دنیا و قطب‌ها<sup>۲</sup> رخ می‌دهند [۲] و حدود ۹۷٪ هیدرات‌های گازی خارج از خشکی واقع شده‌اند [۳].

## چکیده

شواهد مطالعات لرزه‌ای در دریای عمان با استفاده از نشان‌گر شبیه‌ساز بستر دریا و نشان‌گرهای لرزه‌ای لکه مسطح و لکه روشن نشان می‌دهد که هیدرات‌گازی در رسوباتی که عمق آنها بیشتر از ۱۱۵۰ m باشد و در محدوده‌ای بالغ بر  $km^2$  ۲۷۰۰۰ مشاهده شده است. در این مقاله با مدل‌سازی ضخامت محدوده پایداری هیدرات‌گازی و در نظر گرفتن خصوصیات میانگین زمین‌شناسی، تخمین مناسبی از حجم هیدرات‌گازی ارائه می‌گردد. برای این منظور مدل میلکو و ساسن مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به عدم قطعیت در ترکیب گاز، با در نظر گرفتن سه نوع ترکیب متفاوت گازی، حداقل عمق آب که هیدرات‌گازی می‌تواند در دریای عمان پایدار باشد، بین ۴۳۰ تا ۸۷۲ m متغیر می‌باشد. همچنین ضخامت متوسط محدوده پایداری هیدرات‌گازی ۲۱۷ تا ۴۴۶ m زیربستر دریا محاسبه گردید. بر این اساس حجم گاز هیدراته در دریای عمان در محدوده ۱۱ تا ۲۱ تریلیون متر مکعب در شرایط استاندارد دما و فشار پیش‌بینی می‌شود که با مقدار

1. Continental Margins

2. Permafrost Regions

er.afazeli@srbiau.ac.ir

\*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی

باشد و در محدوده‌ای به مساحت  $27000 \text{ km}^2$  از بخش ایرانی دریای عمان حضور هیدرات را تأیید نموده است. همچنین نشان‌گرهای لرزه‌ای لکه مسطح و لکه روشن که به عنوان نشانه‌هایی از حضور گاز در تجمعات گازی در نظر گرفته می‌شوند، در مقاطع لرزه‌ای دریای عمان و در زیر BSR مشاهده شده است [۱۲].

این مقاله، اولین مطالعه‌ای است که به مدل‌سازی ضخامت محدوده پایداری هیدرات گازی<sup>۱</sup> (GHSZ) در دریای عمان می‌پردازد و حدود تغییر ضخامت محدوده پایداری هیدرات گازی را تخمین می‌زند. همچنین با در نظر گرفتن عوامل مؤثر، در خصوص ترکیب گاز اظهار نظر کرده و با توجه به ترکیبات در نظر گرفته شده حداقل عمق آب را برای تشکیل هیدرات گازی پیش‌بینی می‌کند. به علاوه، حجم هیدرات گازی و متان به دام افتاده در ساختار هیدرات را براساس مساحت محاسبه شده توسط روش‌های لرزه‌ای و در نظر گرفتن خصوصیات میانگین زمین‌شناسی، برای مخزن هیدرات گازی دریای عمان ارائه می‌دهد. به منظور مدل‌سازی ضخامت GHSZ و تخمین حجم گاز هیدراته در دریای عمان، مدل میلکو و ساسن [۱۶] مورد استفاده قرار گرفت.

### ویژگی‌های منطقه رخداده هیدرات گازی

دریای عمان که در شمال اقیانوس هند واقع شده، عمق متوسط  $1000 \text{ m}$  و حداکثر عمق  $3300 \text{ m}$  دارد. شوری آب آن در سطح  $36\%$  و در عمق آب بیشتر از  $3000 \text{ m}$  تا حداکثر  $34\%$  کاهش می‌یابد [۱۷ و ۱۸]. ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه دریای عمان به گونه‌ای است که دلالت بر وجود هیدرات گازی در رسوبات دریایی دارد. قسمت شرقی تنگه هرمز و همچنین قسمت شمالی دریای عمان تحت تأثیر مجموعه فزاینده مکران<sup>۲</sup> قرار گرفته است. طول مجموعه فزاینده مکران بیش از  $900 \text{ km}$  است که حدود نیمی از آن داخل ایران قرار دارد [۱۹].

حجم تخمین زده شده جهانی برای گاز هیدراته در رسوبات زیر دریا از  $2 \times 10^{14} \text{ m}^3$  تا  $7/6 \times 10^{17} \text{ m}^3$  [۴ و ۵] متغیر است. این مقدار از هیدرات گازی سبب گردیده تا هیدرات‌ها به عنوان منابع بالقوه تأمین انرژی آینده [۶] و جزء مهمی از چرخه کربن آلی جهان [۷] در نظر گرفته شوند. افزایش دانش بشری در ارتباط با توزیع و تمرکز هیدرات گازی در رسوبات دریایی در طول ۴ دهه گذشته، سبب کاهش چشمگیر تخمین‌ها گردیده است [۸].

وجود هیدرات گازی در شمال اقیانوس هند و دریای عمان در محدوده مکران به عنوان یکی از مناطق محتمل وجود هیدرات گازی توسط وایت [۹] مورد تأکید قرار گرفته است. به جرأت می‌توان گفت که وایت و کلیت گورد [۱۰] اولین کسانی هستند که به مطالعه لرزه‌ای و تکتونیکی دریای عمان از سال ۱۹۷۶ میلادی پرداخته و به حضور گاز آزاد در زیر لایه‌های هیدرات گازی در این منطقه اشاره نموده‌اند. ون ولدن لورنسن [۱۱] در سال ۲۰۰۱ میلادی و اسلوان [۲] در سال ۲۰۰۸ میلادی بر اساس کار وایت، دریای عمان را جزئی از مناطق محتمل وجود هیدرات گازی معرفی کرده‌اند.

با توجه به آنکه هیچ نمونه‌گیری مستقیمی از رسوبات هیدراته دریای عمان صورت نگرفته است [۱۲]، در خصوص اظهار نظر راجع به این مخزن، از روش‌های غیر مستقیم، به ویژه روش‌های ژئوفیزیکی به عنوان یک روش کارآمد برای به دست آوردن اطلاعات استفاده می‌شود. داده‌های موجود برای انجام ارزیابی در این مکان شامل مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی می‌باشد. داده‌های ژئوفیزیکی شامل نشانه لرزه‌ای بازتاب کننده شبیه‌ساز بستر دریا<sup>۱</sup> (BSR)، داده‌های گرانی و مغناطیسی می‌باشد [۱۳]. علاوه بر این نشانه‌های دیگری چون لکه مسطح<sup>۲</sup> و لکه روشن<sup>۳</sup> وجود دارد که در خصوص شناسایی هیدرات‌های گازی دریای عمان به کار گرفته شده‌اند [۱۲]. BSR که به عنوان مهم‌ترین نشانه موجود در مقاطع لرزه‌ای برای یافتن هیدرات گازی در اقیانوس شناخته می‌شود از اختلاف نسبتاً زیاد مقدار مقاومت صوتی بین رسوبات هیدراتی و لایه گاز آزاد زیر آن ناشی می‌شود [۱۴ و ۱۵]. این نشان‌گر لرزه‌ای در رسوباتی که عمق آب در آنها بیشتر از  $1150 \text{ m}$

1. Bottom Simulating Reflector
2. Flat Spot
3. Bright Spot
4. Gas Hydrate Stability Zone
5. Makran Accretionary Prism

که به عنوان یک مسیر برای مهاجرت این گازها از اعماق زیاد به رسوبات سطحی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، می‌توان چنین اظهار داشت که با توجه به وجود گسل‌های فراوان در حوزه عمان [۱۳] و با توجه به وجود ترکیبات ترموژنیک اندازه‌گیری شده در رسوبات دریایی سایر مناطق جهان [۳ و ۲۲] این حوضه نیز می‌تواند حاوی هیدرات‌هایی از منشأ ترموژنیک باشد.

به نظر می‌رسد دریای عمان می‌تواند دارای هر دو گروه هیدرات گازی بیوژنیک (۱۰۰٪ متان) و ترموژنیک (ساختار II و H) باشد، سه نوع ترکیب مولکولی متفاوت گازی به منظور تخمین شرایط پایداری هیدرات گازی در دریای عمان فرض گردید (جدول ۱).

لازم به ذکر است که دو ترکیب ترموژنیک موجود در جدول ۱ (B و C) دو ترکیب گازی هستند که در مخازن دریایی ایران مشاهده شده است.

توزیع گسترده و ضخیم رسوبات حوضه عمان، اعماق مناسب آب، وجود ماده آلی که در منطقه‌هایی مانند مجموعه فزاینده مکران و در رسوبات شبه قاره‌ای به وفور یافت می‌شود [۱۳] و وجود گلفشان‌ها و ساختارهای گسله که در تفسیرهای لرزه‌نگاری آمده است، شرایط مناسب تشکیل هیدرات را در منطقه دریای عمان نشان می‌دهد.

#### حداقل عمق آب جهت تشکیل هیدرات گازی در دریای عمان

با توجه به آنچه در بالا ذکر گردید، لازم است مرز بالایی محدوده پایداری هیدرات گازی در دریای عمان توسط مطالعات ترمودینامیکی تخمین زده شود.

منطقه دریای عمان به دلیل وجود گسل‌های رانده و معکوس فراوان، گسل‌های قاشقی عادی، پایین افتادگی، رورانندگی و وجود گلفشان‌های متعدد داری زمین‌شناسی پیچیده‌ای می‌باشد [۱۳]. حسینی اظهار داشت که گسل‌های رانده و معکوس، مهم‌ترین گسل‌های موجود در دریای عمان است که در مهاجرت گازهای تولید شده در قسمت‌های عمیق و همچنین تشکیل زون‌های غنی از هیدرات گازی و گاز آزاد مؤثر است. علاوه بر این، حضور گاز آزاد در دریای عمان با استفاده از نشانه‌های مختلفی چون گازهای همراه گلفشان‌ها و دودکش‌های گازی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است.

از آنجایی که ترکیب گاز در محدوده دریای عمان مشخص نشده است، می‌توان با استناد به وضعیت زمین‌شناسی منطقه و همچنین ترکیبات گازی میدین نفت و گاز در محدوده خلیج فارس در مورد ترکیبات هیدرات گازی دریای عمان اظهار نظر کرد. کلودا و سندلر [۲۰] بیان کردند که از میان دو منشأ تولید متان (بیوژنیک<sup>۱</sup> و ترموژنیک<sup>۲</sup>) بیشتر گازها، منشأ بیوژنیک دارند. همچنین، با توجه به کثرت وجود BSR در منطقه مورد بررسی که می‌تواند در ارتباط با متان در جای تولید شده باشد و آزمایش ساق مته چاه کراتی ۱- [۱۳] (این چاه در قسمت خشکی و در نزدیکی ساحل دریای عمان حفاری شده است) که خبر از وجود گاز با منشأ بیوژنیک در داخل آب شور سازندی می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که دریای عمان به طور عمده حاوی متان بیوژنیک می‌باشد.

علاوه بر این مکس و همکاران [۲۱] تأکید کردند که وجود گسل و شکاف موجود در محدوده پایداری هیدرات گازی می‌تواند در ارتباط با هیدرات‌هایی از منشأ ترموژنیک باشد

جدول ۱- ترکیب مولکولی (٪ حجمی) گازهای به کار رفته در تخمین شرایط پایداری هیدرات گازی

N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	nC <sub>5</sub>	i-C <sub>5</sub>	nC <sub>4</sub>	i-C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	هیدرات گازی
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰۰	A
۵/۵	۱/۲	-	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۱۵	۰/۷	۲	۹۰/۱	B
۳/۵	۳	۱/۵	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۵۵	۰/۳۵	۳/۲	۵/۸	۸۲	C

1. Biogenic Gas

2. Thermogenic Gas

رسم گردید. حداقل عمق آب برای پایداری هیدرات گازی با ترکیب ۱۰۰٪ متان، ۸۷۲ m تخمین زده شد. همچنین حداقل عمق آب برای گازهایی با ترکیب ۹۰/۱٪ متان و ۸۲٪ (گازهای ترموژنیک) به ترتیب ۶۵۰ m و ۴۳۰ m تخمین زده شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش درصد متان و سنگین‌تر شدن ترکیب گاز، حداقل عمق تشکیل هیدرات گازی در آب کاهش می‌یابد.

### تخمین ضخامت محدوده پایداری هیدرات گازی

GHSZ بازه خاصی از شرایط دما و فشار در زیر بستر دریاست که در آن هیدرات گازی در حالت تعادل با هیدروکربن‌های گازی، پایدار است [۲۷]. ضخامت GHSZ (شکل ۲) عمدتاً تابع عمق آب، دمای بستر آب، گرادیان فشار و گرادیان زمین‌گرایی در رسوبات، شوری آب درون حفره‌ای و ترکیب گاز است. با افزایش عمق و گرادیان فشار حفره‌ای، ضخامت محدوده پایداری افزایش می‌یابد. در حالی که سایر عوامل سبب کاهش ضخامت محدوده پایداری می‌گردد [۲۸].

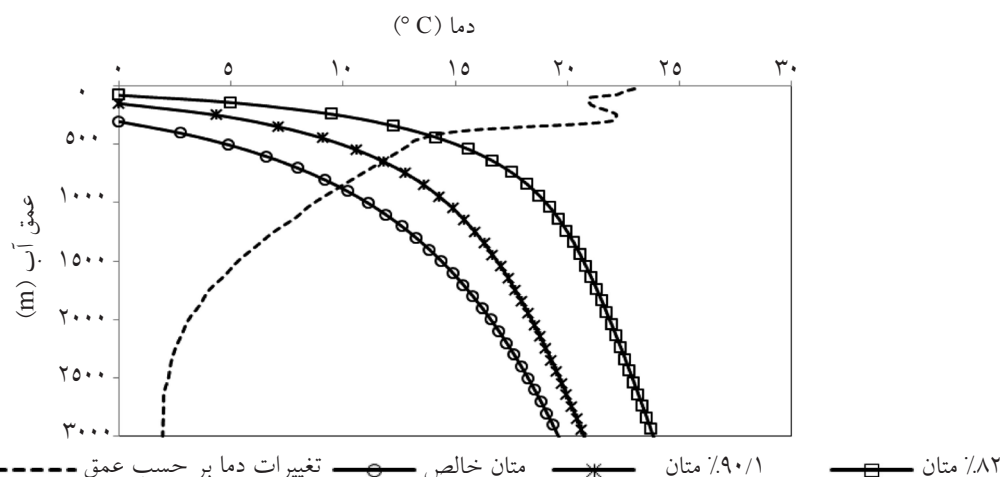
در شکل ۳ عمق آب در منطقه مورد مطالعه رسم شده است. دمای بستر آب در دریای عمان از  $23^{\circ}\text{C}$  در سطح تا  $2^{\circ}\text{C}$  در عمق ۳۰۰۰ m تغییر می‌کند [۲۵] که می‌توان آن را به وسیله یک رابطه توانی تخمین زد (شکل ۴).

$$T_w = 24.9 \times e^{(-0.001B)} \quad (1)$$

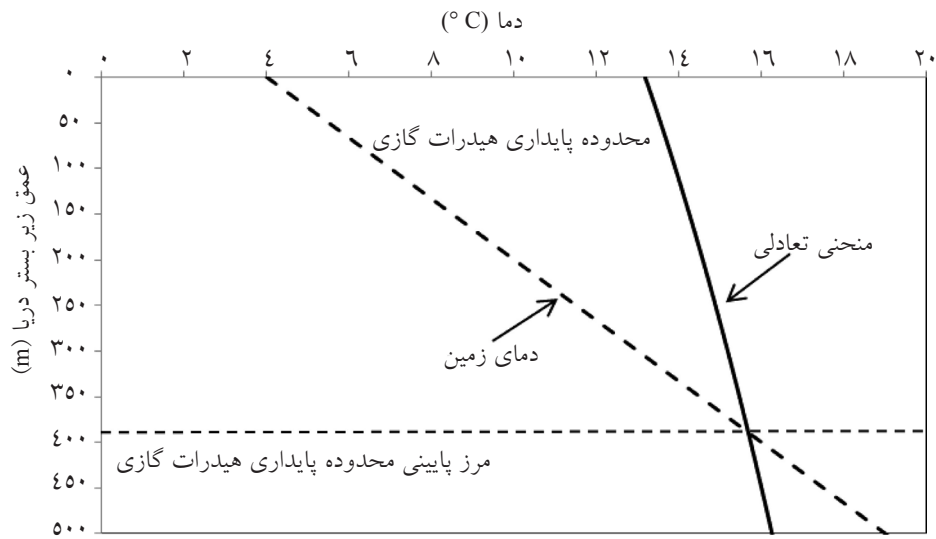
به این دلیل که وجود گسل‌ها و شکاف‌های فراوان در منطقه رویت BSR و همچنین وجود گلفشان‌ها و دودکش‌های گازی در این منطقه، این مفهوم را می‌رساند که هیدرات گازی می‌تواند در تجمعات متمرکز بزرگ در نزدیکی بستر دریا و خارج از محدوده رویت BSR تشکیل شده باشد. این مسأله اهمیت مطالعه ترمودینامیکی را روشن می‌سازد. همچنین مطالعات ترمودینامیکی صورت گرفته در خلیج مکزیک جهت تعیین حداقل عمق آب وجود هیدرات گازی در رسوبات [۱۶]، نشان داد که محل وقوع هیدرات گازی در رسوبات (که از طریق نمونه‌گیری مستقیم از محل تجمعات هیدراته انجام می‌گیرد) تقریباً منطبق بر عمق پیش‌بینی شده در مطالعه ترمودینامیکی است.

حداقل عمقی که هیدرات گازی در دریا تشکیل می‌شود تابع دمای بستر دریا، شوری آب، در دسترس بودن گاز و ترکیب گاز می‌باشد [۲۳]. روش گرافیکی [۲۴] به منظور تخمین حداقل عمق تشکیل هیدرات در آب‌های دریای عمان در نقطه تقاطع منحنی میانگین تغییرات دمای آب بر حسب عمق [۲۵] (منحنی خط چین) و منحنی‌های تعادلی هیدرات (منحنی‌های خط- علامت) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).

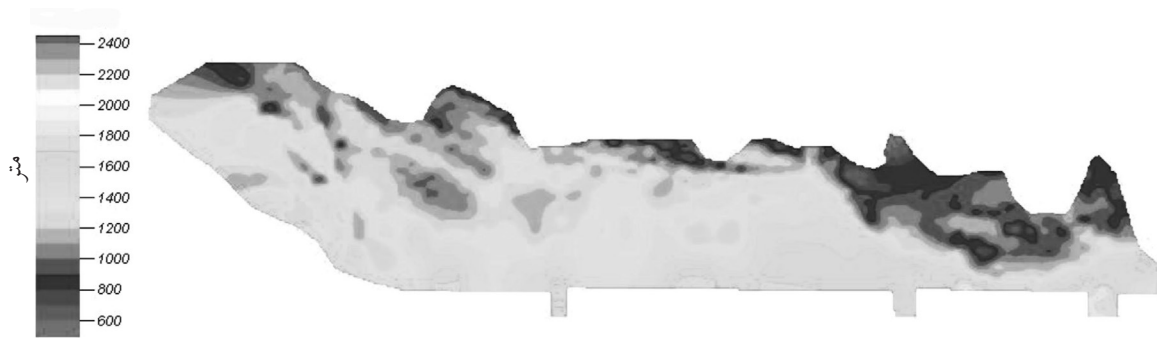
برای رسم منحنی‌های تعادلی هیدرات گازی از رابطه قدرتمند تخمین فشار تشکیل هیدرات عامری پور و بارت [۲۶] استفاده گردید. منحنی‌های تعادلی هیدرات گازی برای گازهای مختلف جدول ۱ با فرض شوری ۳۵٪



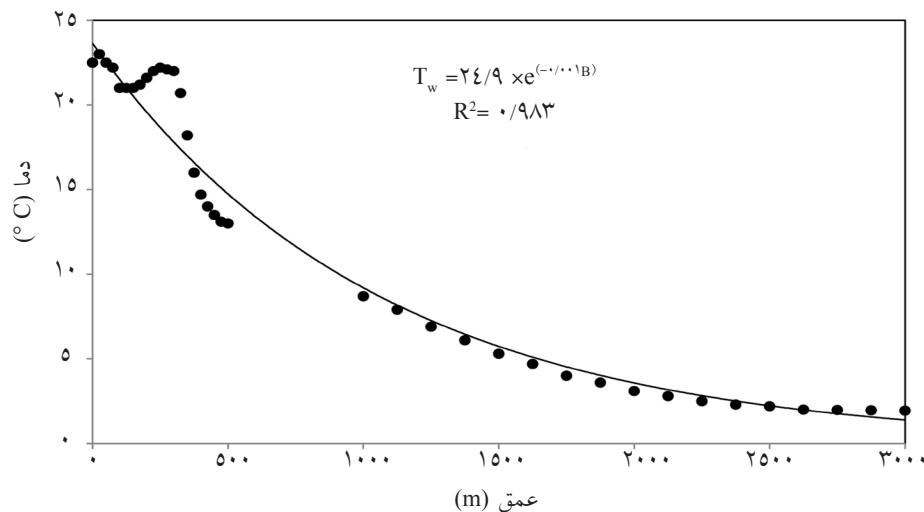
شکل ۱- محل تقاطع منحنی‌های تعادلی و دمای متوسط آب، حداقل عمق پایداری هیدرات گازی (مرز بالایی محدوده پایداری هیدرات گازی) را برای ترکیبات گازی جدول ۱، در آب‌های دریای عمان نمایش می‌دهد.



شکل ۲- محدوده پایداری هیدرات در رسوبات دریایی (دمای بستر ۴ °C، گرادیان ۲۰°C/km، فشار هیدروستاتیک خطی ۱۰ MPa/km و عمق آب ۱۰۰۰ m) [۲۸]. (محل تقاطع منحنی تعادلی و دمای زمین مرز پایینی محدوده پایداری بوده و ضخامت آن را نمایش می‌دهد)



شکل ۳- عمق آب در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴- دمای بستر دریا بر حسب عمق آب در منطقه مورد مطالعه

مشابه [۱۶ و ۲۹] و با در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین شناسی این منطقه، فرض ۳۰ °C/km گردید. همچنین در این مطالعه، شوری آب درون حفره‌ای ۳۵% در نظر گرفته شد که میانگین شوری کل این منطقه می‌باشد.

در این رابطه  $T_w$  دمای بستر (°C) و B عمق آب زیر سطح دریا (m) می‌باشد. گرادیان زمین گرمایی (G) در دریای عمان تا به حال اندازه‌گیری نشده است، بنابراین گرادیان زمین گرمایی براساس کارهای صورت گرفته در مناطق

محاسبه می گردد:

$$T_s = 30 \times A / 1000 + 24.9 \times e^{(-0.001B)} \quad (5)$$

$T_s$  دما در رسوبات در عمق  $A$  زیر بستر دریاست. مرز پایینی GHSZ در نقطه تقاطع رابطه ۵ با هر یک از روابط ۲، ۳ و ۴ واقع می گردد که وابسته به ترکیب گاز است. این مسأله با یافتن ریشه هر یک از معادلات زیر حل می شود.

$$f(B) = -30 \times C / 1000 - 24.9 \times e^{(-0.001B)} + 8.9 \times \ln(C+B) - 45.9 \quad (6)$$

$$f(B) = -30 \times C / 1000 - 24.9 \times e^{(-0.001B)} + 6.4 \times \ln(C+B) - 30.2 \quad (7)$$

$$f(B) = -30 \times C / 1000 - 24.9 \times e^{(-0.001B)} + 5.8 \times \ln(C+B) - 22.3 \quad (8)$$

$C$  ضخامت GHSZ(m) است. روش نیوتن به منظور یافتن ریشه هر یک از روابط فوق مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه نهایی محاسبات ضخامت GHSZ به صورت گرافیکی برای هر سه ترکیب گازی در شکل ۶ نشان داده شده است.

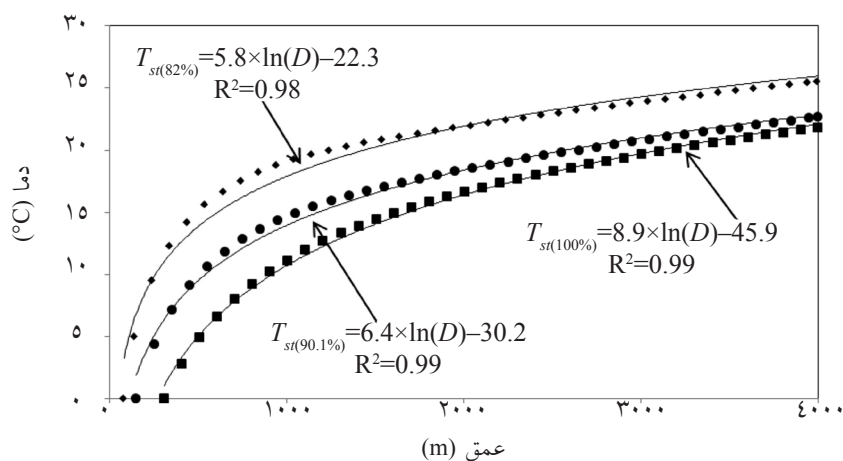
شرایط تعادلی تشکیل هیدرات گازی متان خالص و دو ترکیب گازی ترموزنیک موجود در جدول ۱ با در نظر گرفتن شوری ۳۵% محاسبه گردید (شکل ۵). روابط لگاریتمی زیر بهترین تقریب منحنی های تعادلی هیدرات گازی برای متان خالص و گازهایی با مقدار متان ۱/۹۰٪ و ۸۲٪ ارائه می دهد.

$$T_{st(100\%)} = 8.9 \times \ln(D) - 45.9 \quad (2)$$

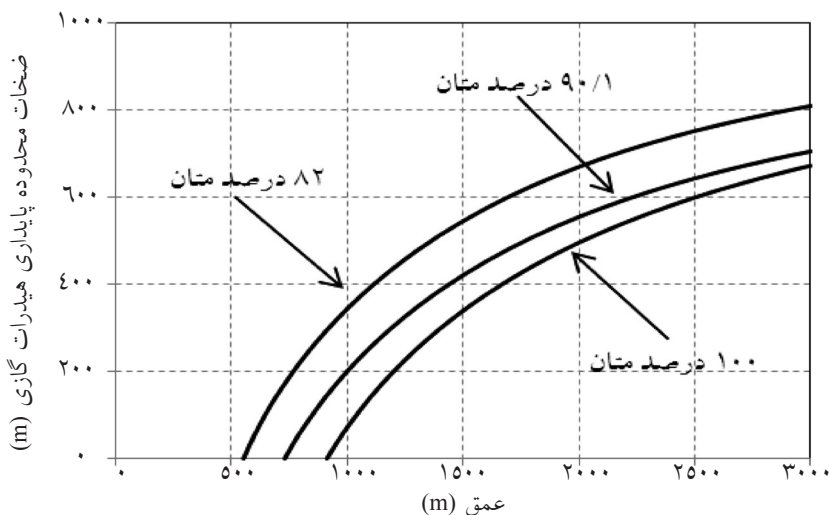
$$T_{st(90.1\%)} = 6.4 \times \ln(D) - 30.2 \quad (3)$$

$$T_{st(82\%)} = 5.8 \times \ln(D) - 22.3 \quad (4)$$

$T_{st}$  دمای پایداری هیدرات گازی ( $^{\circ}\text{C}$ ) در عمق  $D$  (m) می باشد. عمق با در نظر گرفتن گرادیان فشار هیدروستاتیکی خطی ۱۰ MPa/km در ستون آب و رسوبات، به فشار تبدیل شده است. دمای رسوبات در هر عمق زیر بستر دریا از ترکیب رابطه ۱ و گرادیان زمین گرمایی فرض شده



شکل ۵- منحنی های تعادلی تشکیل هیدرات و رگرسیون لگاریتمی برای گازهای متان خالص و گازهایی با ۱/۹۰٪ و ۸۲٪ متان

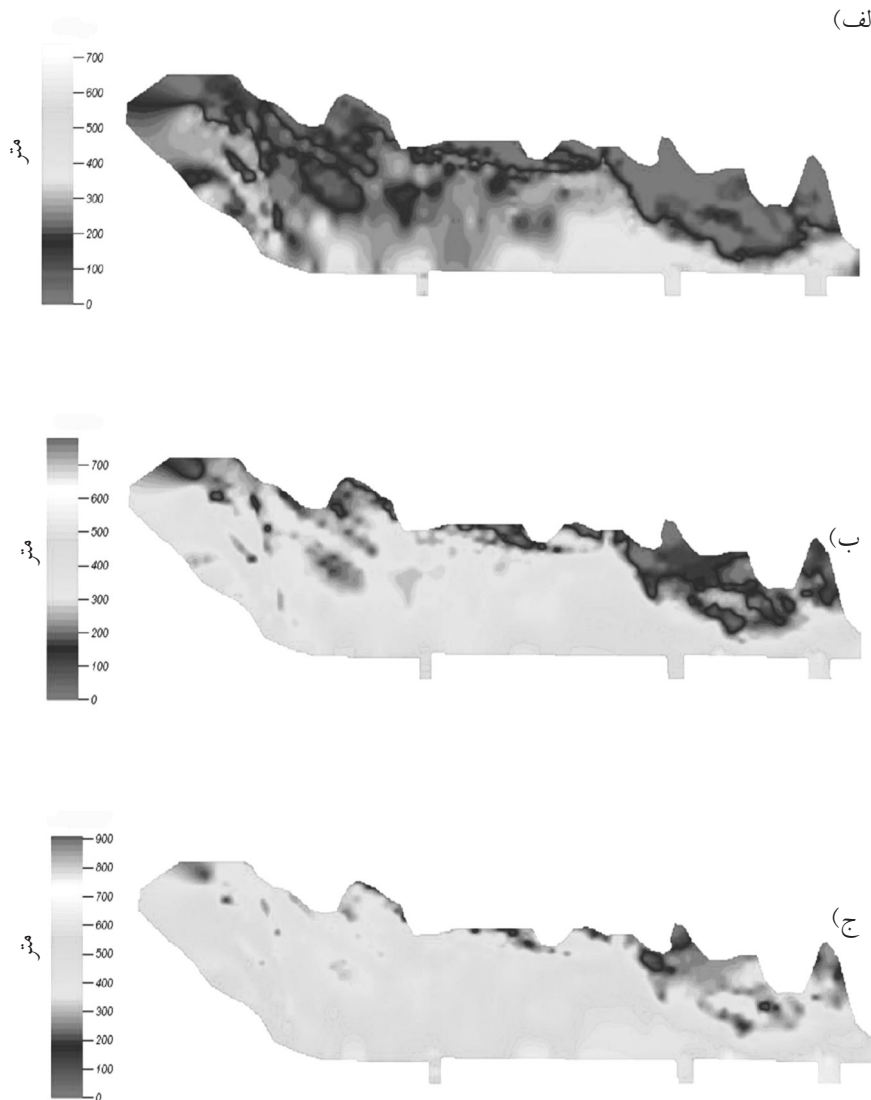


شکل ۶- ضخامت محدوده پایداری هیدرات گازی بر حسب عمق آب برای سه ترکیب گازی

۲۱۷ و برای دو گاز دیگر به ترتیب ۳۱۳ m و ۴۴۶ m می‌باشد. این مقدار ضخامت محاسبه شده برای GHSZ در محدوده ضخامت محاسبه شده از تفسیر افق لرزه‌ای BSR [۱۲] در دریای عمان می‌باشد.

نقشه‌های ضخامت GHSZ برای هر سه نوع گاز متان خالص و گازهایی با ۹۰/۱٪ و ۸۲٪ متان در محدوده منطقه مورد مطالعه در شکل ۷ نمایش داده شده است. ترسیم نقشه‌های ضخامت با استفاده از نرم افزار پترل صورت گرفت. شکل ۷ نشان می‌دهد با کاهش مقدار متان و افزایش مقدار اتان و هیدرو کربورهای سنگین‌تر ضخامت GHSZ افزایش می‌یابد.

شکل ۶ به منظور محاسبه ضخامت GHSZ در عمق‌های مختلف از آب در منطقه مورد مطالعه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان گونه که میلکو و همکاران [۱۶] بیان کردند، در این مدل تغییرات فصلی و محلی در رسوبات (دمای سیال، شوری آب درون حفره‌ای، ترکیب گاز و نرخ ورودی گاز) که ممکن است ضخامت GHSZ را تغییر دهد، لحاظ نشده است. مقدار ضخامت GHSZ در محدوده رویت BSR، برای هیدرات‌گازی متان خالص، هیدرات‌گازی حاوی ۹۰/۱٪ متان و هیدرات‌گازی حاوی ۸۲٪ متان به ترتیب برابر، ۰-۴۹۶ m، ۰-۵۵۵ m و ۰-۶۷۰ m محاسبه گردید. همچنین متوسط ضخامت GHSZ در این محدوده برای متان خالص m



شکل ۷- نقشه‌های ضخامت محاسبه شده برای GHSZ (الف) متان خالص، (ب) ترکیب گاز ۹۰/۱٪ متان و (ج) ترکیب گاز ۸۲٪ متان

ضخامت منطقه وقوع هیدرات گازی<sup>۲</sup> می‌باشد، صادق بوده که خود می‌تواند منجر به تخمین بالا گردد. بنابراین، بسیار مهم است که تحقیقات بیشتری بر روی مشخص سازی هیدرات گازی در دریای عمان صورت گیرد که لازمه این کار برنامه ریزی و انجام عملیات حفاری، استخراج مغزه جهت شناسایی رسوبات حاوی هیدرات به منظور گسترش اطلاعات زمین شناسی، داده‌های چاه پیمایی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در این منطقه می‌باشد.

### نتیجه گیری

حداقل عمق آب برای پایداری هیدرات گازی در دریای عمان با ترکیب ۱۰۰٪ متان، ۸۷۲ m و برای گازهایی با ۹۰/۱٪ و ۸۲٪ متان (گازهای ترموژنیک) به ترتیب ۶۵۰ m و ۴۳۰ m محاسبه گردید.

مدل سازی ضخامت GHSZ در محدوده رویت BSR نشان می‌دهد که مقدار ضخامت GHSZ تا ۴۹۶ m برای هیدرات گازی متان خالص، تا ۵۵۵ m برای هیدرات حاوی ۹۰/۱٪ متان و تا ۶۷۰ m برای هیدرات حاوی ۸۲٪ متان تغییر می‌کند. همچنین ضخامت متوسط GHSZ در این محدوده برای متان خالص ۲۱۷ m و برای دو گاز دیگر به ترتیب ۳۱۳ m و ۴۶۶ m می‌باشد.

مقدار گاز به دام افتاده در رسوبات حاوی هیدرات در دریای عمان ۱۱ تا ۲۱ تریلیون متر مکعب پیش‌بینی می‌گردد. این مقدار گاز به دام افتاده در ساختار هیدرات از وجود ۵ تا ۱۱ گیگاتن کربن که در رسوبات دریای عمان ذخیره شده است، خبر می‌دهد. لازم به ذکر است که تجمعات گازی هیدراته، زمانی پتانسیل اقتصادی دارد که حجم گاز قابل توجهی در مقایسه با میادین گازی متوسط و بزرگ داشته باشد. بنابراین مقدار گاز به دام افتاده در رسوبات هیدراته دریای عمان و گاز آزادی که در زیر لایه هیدراته قرار دارد، می‌تواند به عنوان منبع انرژی آینده در نظر گرفته شده و نقش بسزایی در تأمین انرژی در آینده منطقه داشته باشد.

### مقدار ذخیره تجمعات هیدرات گازی در دریای عمان

بر اساس ضخامت محاسبه شده برای GHSZ در رسوبات و مقدار گسترش سطحی تجمعات هیدرات گازی در منطقه که به وسیله BSR اندازه‌گیری شده است، حجم GHSZ در منطقه به ترتیب برای سه ترکیب هیدرات گازی برابر  $5900 \text{ km}^3$ ،  $8500 \text{ km}^3$  و  $12000 \text{ km}^3$  تخمین زده می‌شود. مقدار اشباع هیدرات گازی در دریای عمان اندازه‌گیری نشده است. میلکو [۸] مقدار اشباع متوسط هیدرات گازی در جهان را بر اساس اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیر مستقیم تقریباً ۰/۹ تا ۱/۵٪ حجمی در رسوبات در نظر گرفت که مقدار میانگین ۱/۲٪ برای محاسبات در این مطالعه فرض گردید. اگر چه اشباع هیدرات گازی در رسوبات حاوی گسل و گلفشان‌های متعدد بالاست [۱۶]، ولی در مورد دریای عمان این مقدار اشباع، تنها یک احتمال است و مطالعات بیشتری لازم است تا مقدار دقیق اشباع متوسط در منطقه از طریق نمونه‌گیری مستقیم تعیین گردد. بر این اساس حجم هیدرات گازی در منطقه در بازه  $7-14/4 \times 10^{11} \text{ m}^3$  قرار می‌گیرد.

اگر ساختار هیدرات تماماً با متان پر شود، یک متر مکعب هیدرات گازی حاوی  $172 \text{ m}^3$  متان در شرایط استاندارد دما و فشار<sup>۱</sup> (STP) است و اگر ۷۰٪ ساختار توسط گاز اشغال شود، حاوی  $139 \text{ m}^3$  خواهد بود [۱۶]. در این مطالعه فرض گردید که یک متر مکعب هیدرات در دریای عمان حاوی  $150 \text{ m}^3$  گاز در شرایط STP می‌باشد. بر این اساس مقدار گاز به دام افتاده در رسوبات حاوی هیدرات در دریای عمان، تقریباً  $11-21 \times 10^{12} \text{ m}^3$  پیش‌بینی می‌شود. این مقدار گاز به دام افتاده در ساختار هیدرات از وجود ۵ تا ۱۱ گیگاتن کربن که در  $27000 \text{ km}^2$  رسوبات هیدرات گازی دریای عمان ذخیره شده است، خبر می‌دهد.

تا کنون نمونه‌گیری مستقیمی از رسوبات حاوی هیدرات گازی در دریای عمان صورت نگرفته است. بنابراین، برای محاسبه ضخامت GHSZ و حجم گاز، تعدادی از فاکتورهای مؤثر (گرادیان زمین گرمایی، مقدار اشباع هیدرات در رسوبات و مقدار گاز موجود در یک متر مکعب رسوبات) حدس زده شده‌اند. در این مطالعه فرض روش میلکو و ساسن [۱۶] که ضخامت GHSZ برابر

1. Standard Temperature and Pressure

2. Gas Hydrate Occurrence Zone



<p><math>G</math>: گرادیان زمین گرمایی (<math>^{\circ}\text{C}/\text{km}</math>)</p> <p><math>T_{st}</math>: دمای پایداری هیدرات گازی (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</p> <p><math>D</math>: عمق (m)</p> <p><math>T_s</math>: دما در رسوبات (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</p> <p><math>A</math>: عمق زیر بستر دریا (m)</p> <p><math>C</math>: ضخامت محدوده پایداری هیدرات گازی (m)</p> <p>%: قسمت در هزار</p>	<p><b>تشکر و قدردانی</b></p> <p>بدین‌وسیله از پژوهشکده علوم زمین پژوهشگاه صنعت نفت که داده‌ها و امکانات لازم با حمایت آنان فراهم گردید، تشکر و قدردانی می‌گردد.</p> <p><b>علائم و نشانه‌ها</b></p> <p><math>T_w</math>: دمای بستر (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</p> <p><math>B</math>: عمق آب (m)</p>
---	---

### مراجع

- [۱]. افاضلی، ع.، بررسی تشکیل هیدرات گازی در صنعت نفت، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران، ۱۳۸۸.
- [2]. Sloan, E. D., *Clathrate hydrates of natural gases*, 3<sup>rd</sup> ed., CRC Press, 2008.
- [3]. Makogon Y. F., "Natural gas hydrates \_ a promising source of energy, *Natural gas science and engineering*", Vol. 2, No. 1, pp. 45-59, 2010.
- [4]. Soloviev V., *Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations*, VI International Conference on Gas in Marine sediments, St. Petersburg, Russia, 2000.
- [5]. Dobrynin V. M., Korotajev Y. P., Plyushev, D. V., "Gas hydrates \_ a possible energy source", Long-Term Energy Resources. Pitman, pp. 727– 729, 1981.
- [6]. Kvenvolden K. A., *Potential effects of gas hydrate on human welfare*, National Academy of Sciences colloquium, Irvine, USA, 1999.
- [7]. Kvenvolden, K.A., "Methane hydrate in the global organic carbon cycle", *Terra Nova*, Vol.14, No.5, pp.302–306, 2002.
- [8]. Milkov A. V., "Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there?", *Earth Science Reviews*", Vol. 66, No. 3-4, pp. 183-197, 2004.
- [9]. White R. S., "Gas hydrate layers trapping free gas in the Gulf of Oman", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 42, No. 1, pp. 114–120, 1978.
- [10]. White R. S. and Klitgord K. D., "Sediment deformation and plate tectonics in the Gulf of Oman", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 32, No. 2, pp. 199–209, 1976.
- [11]. Kvenvolden K. A., Lorenson T. D., *Global occurrence of gas hydrate, 11<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway, 2001.
- [۱۲]. جوانبختی، ا. ح.، حسینی شعار، ب.، عربانی، م.، جواهریان، ع.، بررسی هیدرات‌های گازی دریای عمان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، اولین همایش ملی هیدرات گازی، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، ۱۳۹۰.
- [۱۳]. حسینی شعار، ب.، شناسایی محدوده‌های رسوبات هیدرات گازی در دریای عمان و بررسی لرزه‌ای آنها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیرکبیر، ایران، ۱۳۸۷.
- [14]. Jackson B. A., "Seismic evidence for gas hydrates in the north Makassar basin, Indonesia", *Petroleum Geo Science*, Vol. 4, No. 3, 2004.

- [15]. Sain K., *Seismic detection and quantification of gas hydrates application to Indian continental margin*, 7<sup>th</sup> International Conference on gas Hydrates, Edinburg, Scotland, UK, 2011.
- [16]. Milkov A. V. and Sassen R., "*Estimate of gas hydrate resource-northwestern Gulf of Mexico*", Marine Geology, Vol. 179, NO. 1, pp. 71-83, 2001.
- [17]. Matthias T. and Godfrey J. S., *Regional oceanography: an introduction*, 2<sup>nd</sup> ed., Daya Publishing House, 2003.
- [18]. Han W. P., and McCreary J., "*Modeling salinity distributions in the Indian Ocean*", Geophysical Research, Vol.106, No.C1, pp. 859-877, 2001.
- [19]. Mokhtari M. and Farahbod A. M., *Tsunami occurrence in the Makran region*, Tsunami Seminar, Tehran, Iran, 2005.
- [20]. Klauda J. B. and Sandler S. I., "*Global distribution of methane hydrate in ocean sediment*", Energy Fuels, Vol. 19, No. 2, pp. 459– 470, 2005.
- [21]. Max M. D., Johnson A. H. and Dillon W. P., *Economic geology of natural gas hydrate*, 1<sup>st</sup> ed., Springer publishing, 2006.
- [22]. Sassen R. and Mac Donald I. R., "*Thermogenic gas hydrates, Gulf of Mexico continental slope*", Geochemistry, Vol. 23, No. 2, pp. 1029-1032, 1994.
- [23]. Milkov A. V., Sassen R., Novikova I. and Mikhilov E., "*Gas hydrates at minimum stability water depths in the Gulf of Mexico: significance to geo hazard assessment*", Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, Vol. 50, pp. 217-224, 2000.
- [24]. Holder G. D., Malone R. D. and Lawson W. F., "*Effects of gas composition and geothermal properties on the thickness and depth of natural-gas-hydrate zones*", Petroleum Technology, vol.39, No. 9, pp. 1147-1152, 1987.
- [25]. Vohat P., Sain K. and Thakur N. K., "*Heat flow and geothermal gradient from a bottom simulating reflector: A case study*", Current Science, Vol. 85, pp. 1263-1265, 2003.
- [26]. Ameripour S. and Barrufet M., "*Improved correlations predict hydrate formation pressures or temperatures for systems with or without inhibitors*", Canadian Petroleum Technology, Vol. 48, No. 5, pp. 45-50, 2009.
- [27]. Milkov A. V. and Sassen R., "*Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope*", Marine Geology, Vol. 20, No. 2, pp. 111-128, 2003.
- [28]. Holder G. D., Malone R. D. and Lawson W. F., "*Effects of gas composition and geothermal properties on the thickness and depth of natural-gas-hydrate zones*", Petroleum Technology, Vol. 39, No. 9, pp. 1147-1152, 1987.
- [29]. Wang S., Yan W. and Song H., "*Mapping the thickness of gas hydrate stability zone in south China sea*", Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol.17, No. 4, pp. 815-828, 2006.