

## گازهای هیدراته در دریای خزر و ارزیابی تاثیرات گرمایش جهانی بر آنها

هادی گریوانی<sup>۱\*</sup>، بنت‌الهدی گریوانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه علوم غیرزیستی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، پست الکترونیکی: gerivani@mo.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری شیمی- فیزیک، دانشکده شیمی، دانشگاه تهران، تهران، پست الکترونیکی: hodagrivani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۶

\* نویسنده مسوول

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۳

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۵، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

### چکیده

گازهای هیدراته که در بستر دریاها گردآمده‌اند، به مرور زمان می‌توانند در جو آزاد شده و با عملکردی گلخانه‌ای در گرمایش جهانی کره زمین موثر باشند این امکان وجود دارد که براساس روابط فیزیکی- شیمیایی، پایداری متان هیدراته به عنوان فراوانترین ترکیب هیدراته، در یک منطقه و نقش عوامل مختلف بر آن را محاسبه نمود. در این مقاله با استفاده از روابط فیزیکی- شیمیایی، محدوده پایداری متان هیدراته در عمق‌ها و بخش‌های مختلف دریای خزر براساس اطلاعات موجود در ۶۴۱ نقطه محاسبه شد و به صورت نقشه‌هایی ارائه گردیده است. سپس محاسبات پایداری متان برای شرایط افزایش دمای آب‌های دریای خزر در اثر گرمایش جهانی به میزان ۰/۶ تا ۲ درجه سلسیوس صورت پذیرفته و از تفاضل آن با نتایج پیشین میزان تغییرات در ضخامت محدوده پایداری متان هیدراته به دست آمده است. در مرحله بعد براساس این تغییرات ضخامت و شواهد ژئوفیزیکی از گازهای هیدراته در دریای خزر، برای سناریوهای مختلف گرمایش جهانی، برآوردی از میزان گاز متانی که در جو آزاد خواهد شد، ارائه گردیده است. براساس نتایج این پژوهش انتظار می‌رود در اثر سناریوهای مختلف گرمایش جهانی حجم قابل توجهی از گاز معادل ۳۶۹ تا ۹۸۴ هزار میلیارد متر مکعب می‌تواند در جو رها شود.

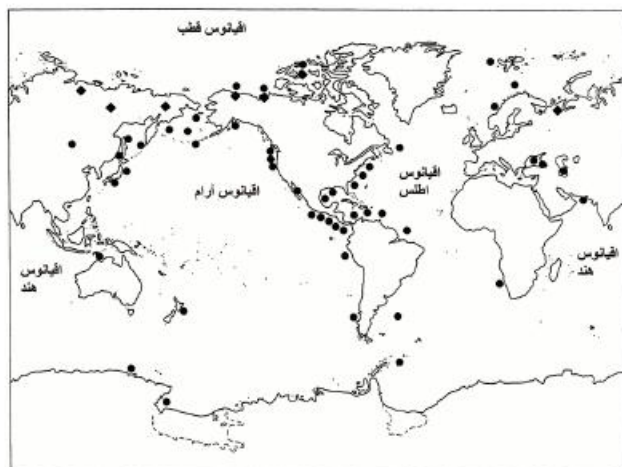
کلمات کلیدی: گاز هیدراته، متان، گرمایش جهانی، دریای خزر.

### ۱. مقدمه

دربرگرفتن مولکول‌های متان، اتان و سایر گازهایی با ابعاد مشابه مانند دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن بزرگ است، اما ساختار شش وجهی نه تنها برای در برگرفتن این مولکول‌ها بلکه برای مولکول‌هایی به بزرگی پروپان نیز به اندازه کافی بزرگ است (Sloan, 1990). گازهای هیدراته وقتی از حالت هیدراته خارج شوند حجم قابل توجهی می‌یابند به گونه‌ای که در دما و فشار استاندارد، ۱ متر مکعب گاز هیدراته معادل ۱۶۴ متر مکعب گاز

گازهای هیدراته مواد جامد نیمه پایداری هستند، متشکل از مولکول‌های آب با پیوند هیدروژنه که مولکول‌های گازی (عموماً متان) را در شبکه خود به دام انداخته‌اند (شکل ۱). در طبیعت مولکول آب دارای دو ساختار مولکولی مکعبی (کیوبیک) و شش وجهی (هگزاگونال) است. ساختار مکعبی به اندازه کافی برای

همان‌طورکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در فشار و دماهای مختلف، بین متان گازی و متان هیدراته مرزی وجود دارد. وجود یون‌ها در آب و گازهای مختلف همراه با متان باعث جابجایی این مرز به سمت راست یا چپ می‌شود. معمولاً برای سادگی محاسبات، فرض می‌شود آب و متان به صورت خالص در فضای بین رسوبات قرار دارند. در این حالت، این شکل پیشنهاد می‌کند که در مناطق قطبی که دمای سطح زیر صفر درجه سلسیوس باشد، مرز بالایی برای پایداری متان عمق ۱۵۰ متری است. در رسوبات اقیانوسی، گازهای هیدراته در جایی رخ می‌دهند که دمای آب در بستر دریا صفر بوده و عمق آب به بیش از ۳۰۰ متر برسد. مرز زیرین شکل‌گیری متان هیدراته توسط گرادیان گرمایی تعیین می‌شود. نکته دیگر در تشکیل گازهای هیدراته حجم قابل توجه متان و سایر گازها برای شکل‌گیری این پدیده است. از این رو تنها در مناطق محدودی از دریاها کره زمین امکان تشکیل گازهای هیدراته وجود دارد. شکل ۳ گسترش جهانی این پدیده را نشان می‌دهد.



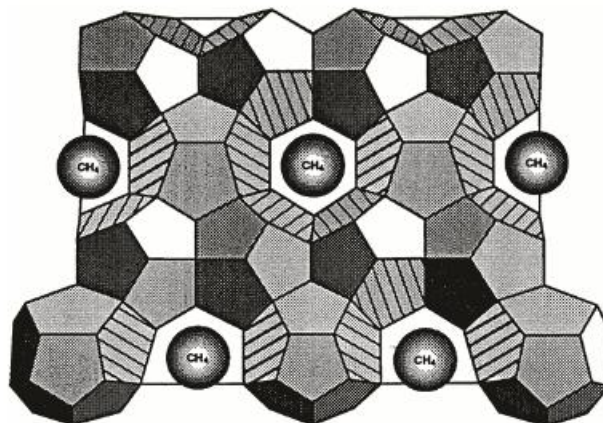
شکل ۳: گسترش جهانی پدیده گازهای هیدراته (Kvenvolden, 1993).

از نظر رسوب‌شناختی، گازهای هیدراته و متان بیشتر در محیط‌هایی تشکیل می‌شوند که سرعت رسوب‌گذاری زیاد باشد. در این گونه محیط‌ها تجمع مقادیر قابل توجه از مواد زیستی ممکن بوده و به دلیل رسوب‌گذاری سریع و مدفون شدن این مواد از اکسید شدن آنها جلوگیری می‌شود (Singh and Singh, 1999). متان به دو صورت زیستی<sup>۱</sup> و گرمایی<sup>۲</sup> تشکیل می‌شود.

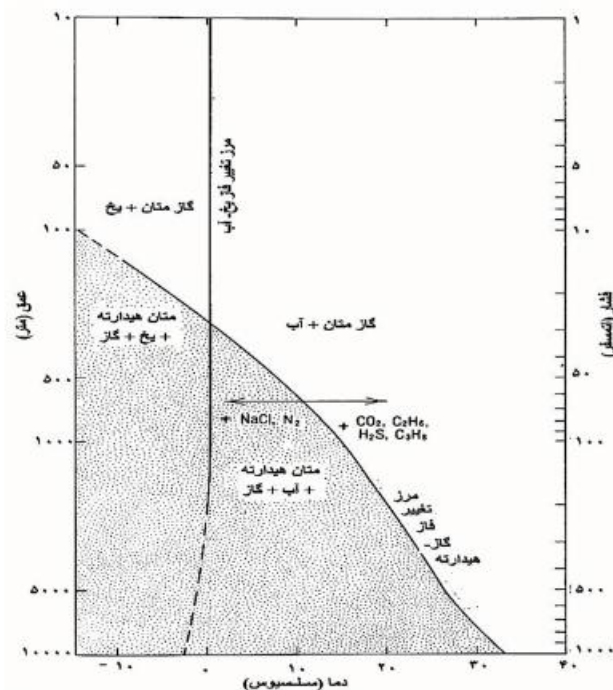
<sup>۱</sup> Biologic

<sup>۲</sup> Thermogenic

است. مخاطرات ناشی از گازهای هیدراته از خاصیت تغییر حجم زیاد و امکان اشتعال آنها ناشی می‌شود (Kvenvolden, 1993). چهار عامل اصلی برای تشکیل گازهای هیدراته ضروری است: گاز هیدروکربن، آب، فشار بالا و دمای پایین (Kvenvolden, 1993; Bagirov and Lerche, 1997). تغییرات گازهای هیدراته در طبیعت به ارتباط بین دما، فشار و ترکیب گازها به صورتی که در شکل ۲ نمایش داده شده، مربوط می‌شود.



شکل ۱: ساختار گازهای هیدراته (Kvenvolden, 1993).



شکل ۲: دیاگرام فاز گازهای هیدراته، که مرز بین متان گازی آزاد و متان هیدراته را برای شرایط مختلف فشار و دما نشان می‌دهد. افزودن NaCl به آب، منحنی را به سمت چپ و افزودن CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> به متان منحنی را به سمت راست منتقل می‌نماید (Kvenvolden, 1993).

محدودی در داخل کشور صورت پذیرفته و بیشتر مطالعات توسط پژوهشگران روسی انجام شده است. مطالعات صورت گرفته در دریای خزر، براساس برداشت‌های ژئوفیزیکی، نشان دهنده وجود گازهای هیدروکربنی در رسوبات بخش‌های مختلف دریای خزر اعم از خزر شمالی (Diaconescu and Knapp, 2000; Knapp and Knapp, 2002) و خزر جنوبی (Berzodnykhe et al., 2013) است.

در این مقاله سعی شده است اثر گرمایش جهانی بر گازهای هیدراته دریای خزر مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور امکان‌سنجی پتانسیل گازهای هیدراته، براساس روابط پایداری فیزیکو-شیمیایی گاز متان به عنوان فراوان‌ترین گاز هیدراته در عمق‌های مختلف محاسبه شده و نقشه‌های مربوطه تهیه شده است. سپس تاثیر گرمایش جهانی بر وضعیت این گازها ارزیابی شده و برای سناریوهای مختلف افزایش دمای جهانی، برآوردی از حجم بالای گاز متان آزاد شده در جو ارائه شده است.

## ۲. روش انجام پژوهش و داده‌های مورد استفاده

همانطورکه پیشتر عنوان شد، متان در محدوده معینی از دما و فشار و املاح محلول به صورت هیدراته درآمده و با تغییر شرایط به صورت گاز تغییر حالت می‌دهد. مطالعات متعددی به منظور مدل‌سازی پایداری متان هیدراته در شرایط مختلف انجام شده است (Duan et al., 2011; Maekawa, 2008; Maekawa, 2006).

Hui و Yue (۲۰۰۷) با استفاده از روابط تحلیلی، مدلی را برای محاسبه پایداری متان هیدراته خالص با در نظر گرفتن سه متغیر دما، فشار و شوری ارائه نمودند. آنها رابطه فیزیکو- شیمیایی ۱ را برای این منظور ارائه نمودند:

رابطه ۱

$$T_{\text{stability}} = A(x)\ln P + B(x)\ln^2 P + C(x)\ln^3 P$$

$$A(x) = 12.6223 - 60.66x + 1078.90x^2 - 11080.07x^3 + 61534.87x^4 - 185885.18x^5 + 231861.14x^6$$

$$B(x) = -2.0780 + 32.43x - 740.52x^2 + 8506.69x^3 - 53994.43x^4 + 175167.33x^5 - 216507.56x^6$$

برای تشکیل متان زیستی، مواد زیستی گردآمده، توسط باکتری‌ها در شرایط بی‌هوازی و در زیر بستر دریا تجزیه می‌شوند. برای تشکیل متان گرمایی، در اثر گرما، مواد آلی تجزیه شده و یا هیدراته‌ها متلاشی شده و گاز متان آزاد می‌شود (Vogt et al., 1999). پس از تولید متان، این گاز به صورت‌های مختلف مانند انتقال آب درون حفره‌ای حاوی گاز محلول، جریان گاز آزاد و انتشار مولکولی می‌توانند به درون رسوبات متخلخل انتقال یابند. پس از انتقال متان به داخل رسوبات مورد نظر و فراهم شدن شرایط دما و فشار (محدوده پایداری گازهای هیدراته در شکل ۳)، در حضور آب، متان و سایر گازها در حفرات رسوبات به حالت هیدراته در می‌آیند (Jauhari, 2001).

مطالعه گازهای هیدراته از جهات مختلف حائز اهمیت است. این ترکیبات در زیر بستر دریا می‌توانند با سایر عوامل مانند بارهای ثقلی، امواج لرزه‌ای، گسلش و غیره تحریک شده و ناپایداری بستر و مخاطرات ناشی از آن را به همراه داشته باشند (McIver, 1982). علاوه بر مخاطرات، گازهای هیدراته به عنوان منبع جدیدی از انرژی در آینده مورد توجه هستند (Kevenvolden, 1988; Collett, 2002; Johnson and Max, 2006).

یکی دیگر از مسائل مهم مرتبط با گازهای هیدراته، اثر گلخانه‌ای آنها در جو و تشدید گرمایش جهانی است (Kennett et al., 2013; Dickens, 2004). گازهای هیدروکربن موجود در تجمعات هیدراته که بخش قابل توجهی از آن را متان تشکیل داده است، با آزاد شدن در جو منجر به افزایش شرایط گلخانه‌ای و متعاقباً گرم تر شدن کره زمین می‌شوند. زمان بقای گاز متان در جو حدود ۱۲ سال است که در مقایسه با دی اکسید کربن (۵ تا ۲۰۰ سال) زمان کوتاهتری دارد، اما توانایی گاز متان در به دام انداختن تشعشعات خورشیدی بیشتر بوده و نقش ۱ واحد از گاز متان در گرمایش جو برابر ۲۱ واحد از دی اکسید کربن محاسبه شده است (IPCC, 2013). از این رو گاز متان به عنوان یکی از مهمترین گازها در گرمایش جهانی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته و تحقیقات بسیاری به منظور ارزیابی اثرات این گاز بر گرمایش زمین انجام شده است. از سوی دیگر انتظار می‌رود با گرم تر شدن کره زمین و به تبع آن گرم تر شدن آب‌های دریاها و اقیانوس‌ها، گازهای هیدراته ناپایدار شده و مقدار بیشتری از آنها وارد جو شود.

در مورد جنبه‌های مختلف دریای خزر در داخل کشور مطالعات فراوانی انجام شده است (لاهیجانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ دلرند و علیزاده، ۱۳۹۴) اما در مورد گازهای هیدراته مطالعات

## ۳. نتایج و بحث

## ۳.۱ پتانسیل تشکیل متان هیدراته در دریای خزر

به منظور بررسی پتانسیل گازهای هیدراته در دریای خزر از رابطه ۱ استفاده شده است. به این منظور در مرحله اول، براساس داده‌های مذکور، فشار در عمق‌های مختلف آب با در نظر گرفتن چگالی ۱۰۰۸ کیلوگرم بر متر مکعب برای آب محاسبه شده است. سپس فشار در عمق‌های مختلف رسوبات بستر دریا نیز، با فرض چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای رسوبات کم عمق بستر و افزایش آن با رابطه ۲ محاسبه شده است:

رابطه ۲

$$\rho(d) = (0.74 \pm 0.03) \ln(1.0 + d(0.00163 \pm 0.0009))$$

که در این رابطه  $d$  عمق در زیر بستر دریا و  $P$  چگالی رسوبات در عمق مورد نظر است. این رابطه براساس داده‌های تجربی و برای محیط‌های دریایی ارایه شده است (Tenzer and Gladrikh, 2014). در کلیه محاسبات شوری نزدیک بستر برای محاسبات در نظر گرفته شده است. براساس داده‌های مورد استفاده شوری آب نزدیک بستر، ۵ تا ۱۵ گرم در لیتر و به طور میانگین حدود ۱۰ گرم در لیتر بوده است. در گام بعدی عامل دما نیز در عمق‌های مختلف با رابطه ۳ تعیین شده است:

$$T_d = T_m + d \times GT \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه  $T_d$ ،  $T_m$ ،  $d$  و  $GT$  به ترتیب دما در عمق زیر بستر، دمای اندازه‌گیری شده نزدیک بستر دریا، عمق و گرادیان دمایی هستند. در منطقه دریای خزر گرادیان دریایی در محدوده ۱۱ تا ۱۷ درجه در کیلومتر تخمین زده شده است (Diaconescu and Knapp, 2000). در این مطالعه گرادیان میانگین این دو محدوده یعنی ۱۴ درجه سلسیوس در هر یک کیلومتر مبنای محاسبات قرار گرفته است.

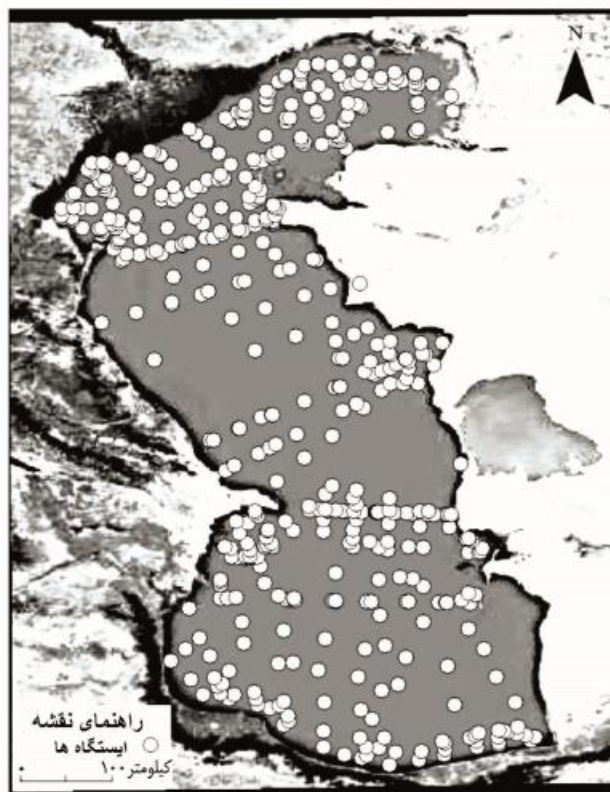
در ادامه دمای پایداری متان هیدراته و دمای طبیعی زمین در عمق‌های مختلف، با استفاده از رابطه ۱، محاسبه شده و منحنی تغییرات این دو دما نسبت به عمق ترسیم گردیده است. محل تلاقی این دو منحنی مرز بالایی و زیرین محدوده‌ای که امکان تشکیل متان هیدراته وجود دارد را نمایش می‌دهند. این

$$C(x) = 0.3418 - 5.51x + 154.32x^2 - 1985.04x^3 + 13855.28x^4 - 46685.56x^5 + 58554.43x^6$$

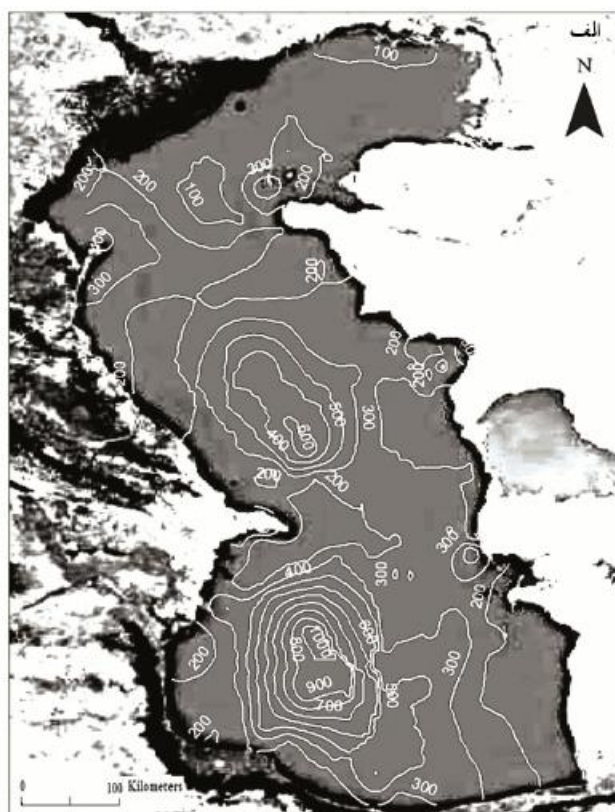
که در این روابط،  $T_{stability}$  دمایی است که در آن گاز متان هیدراته برای فشار ( $P$ ) و شوری ( $x$ ) مشخص پایدار است. در این مطالعه این روابط مبنای تحلیل پایداری متان هیدراته بوده است.

براساس رابطه ۱ فشار، دما و شوری مهمترین عوامل در پایداری حالت هیدراته متان به شمار می‌آیند. برای ارزیابی پتانسیل تشکیل متان هیدراته در عمق‌های مختلف و مناطق مختلف دریای خزر از اطلاعات دما، عمق و شوری در دسترس برای ۶۴۱ نقطه در دریای خزر بهره گرفته شده است. این داده‌ها از بانک داده‌های اقیانوسی جهانی (World Ocean Database 2005) استخراج شده است. شکل ۴ پراکندگی مکانی این نقاط را در دریای خزر نشان می‌دهد.

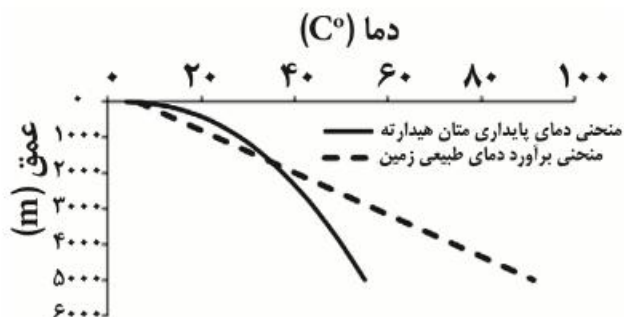
در مرحله بعد، برای شرایطی که در اثر گرمایش جهانی دمای آب دریای خزر در سناریوهای مختلف افزایش یابد، محاسبات تکرار شده و با بررسی تغییرات ضخامت محدوده‌ای حاوی ترکیبات هیدراته اثر افزایش دما بررسی شده است.



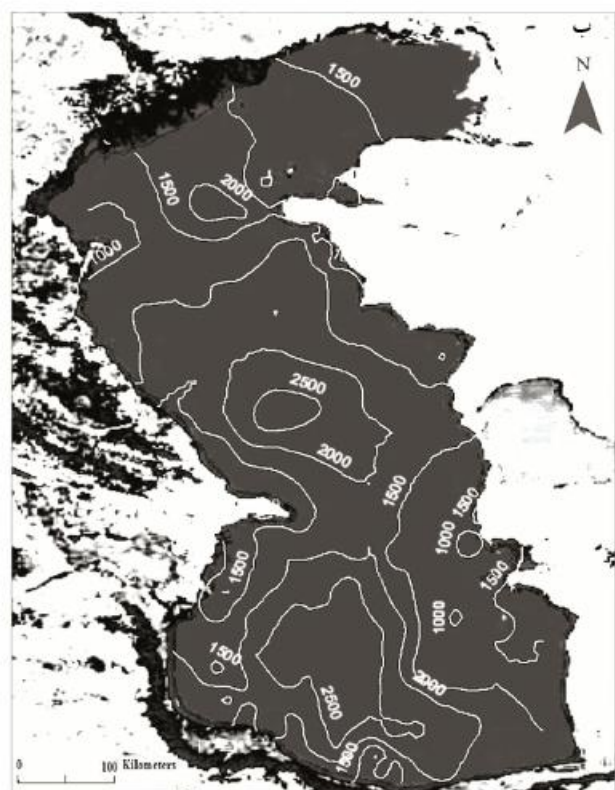
شکل ۴: پراکندگی مکانی داده‌های در دسترس.



محاسبات و نمودارهای مربوطه برای هر یک از ۶۴۱ نقطه انجام شده است. شکل ۵ نمونه ای از این نمودارها را نشان می‌دهد.



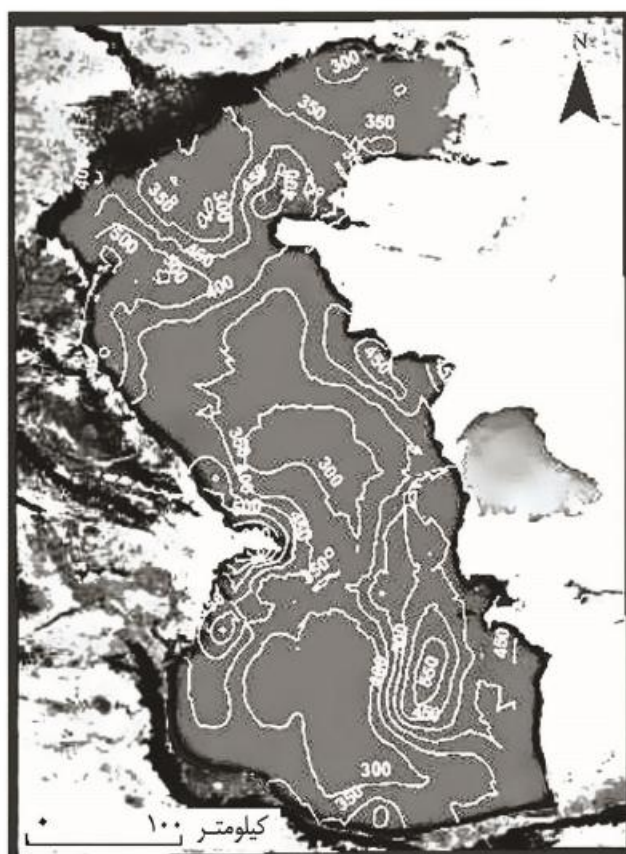
شکل ۵: نمونه ای از منحنی تغییرات دمای پایداری متان هیدراته و دمای طبیعی زمین. این شکل عمق صخره بستر دریا را نشان می‌دهد. محل تلاقی این دو منحنی در نزدیکی بستر مرز بالایی پایداری متان هیدراته و محل تلاقی آنها در عمق حدود ۱۸۰۰ متری، مرز زیرین پایداری متان هیدراته را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نقشه هم عمق پتانسیل تشکیل متان هیدراته در دریای خزر. الف) مرز بالایی محدوده تشکیل متان هیدراته. ب) مرز زیرین محدوده متان هیدراته.

با مشخص شدن مرز بالایی و زیرین محدوده پایداری متان هیدراته برای هر یک از نقاط، نقشه‌های مربوطه در محیط GIS با ترسیم خطوط هم عمق برای مرز بالایی و مرز زیرین پایداری متان هیدراته تهیه شده است (شکل ۶). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مرز بالایی محدوده تشکیل گازهای هیدراته در شمال دریای خزر با عمق حدود ۱۰۰ متر نسبت به سطح آب دریا، کم عمق‌ترین است. عمق کم تشکیل گازهای هیدراته در این مناطق به دلیل پایین بودن دما است. عمیق‌ترین مرز بالایی تشکیل گازهای هیدراته در بخش مرکزی دریای خزر در عمق حدود ۱۰۰۰ متر نسبت به سطح آب قرار دارد. مرز زیرین محدوده تشکیل گازهای هیدراته در دریای خزر نیز از ۱۰۰۰ متر تا ۲۵۰۰ متر نسبت به تراز آب قرار دارد.

نقشه‌های نظیر آنچه در شکل ۷ نمایش داده شده، این امکان را فراهم می‌سازد تا در نقاط مختلف و عمق‌های مختلف امکان تشکیل گازهای هیدراته و خطرات ناشی از آنها مشخص گردد. با دسترس بودن این نقشه‌ها می‌توان مطالعات دقیق‌تر مانند برداشت‌های ژئوفیزیکی را در عمق‌ها و مناطق خاصی متمرکز نمود و به این ترتیب صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های مطالعات امکان‌پذیر خواهد بود. علاوه بر این، براساس این نقشه‌ها می‌توان برآوردی از حجم گازهای هیدراته به عنوان یک منبع انرژی جدید، به دست آورد.

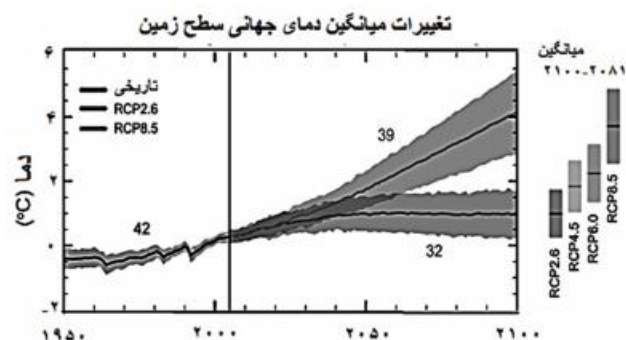


شکل ۸: تغییرات ضخامت محدوده تشکیل گازهای هیدراته در دریای خزر برای افزایش ۲ درجه‌ای دمای آب.

تغییر ضخامت محدوده متان هیدراته در اثر گرمایش جهانی به این معناست که حجم گاز موجود در این محدوده به صورت گازی در آمده و اندک اندک وارد جو می‌شود. براساس این نقشه می‌توان برآوردی از حجم گازی که وارد جو می‌شود به دست آورد. محاسبات مربوطه به عنوان نمونه برای افزایش ۲ درجه‌ای دمای آب در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱: مقادیر مفروض و نتایج حاصل به منظور برآورد حجم گاز متان آزاد شده در جو در اثر افزایش ۲ درجه‌ای دمای آب دریای خزر

پارامتر	مقدار	واحد
مساحت دریای خزر	۲۵۰۰	میلیارد متر مربع
میانگین تغییرات ضخامت محدوده تشکیل گازهای هیدراته در اثر گرمایش جهانی	۴۰۰	متر
درصد محدوده دارای متان هیدراته	۶/۲۵	درصد
درصد حجم متان هیدراته در محدوده دارای گاز هیدراته	۱۰	درصد
حجم محدوده دارای متان هیدراته	۶۰	هزار میلیارد متر مکعب
حجم گاز هیدراته	۶	هزار میلیارد متر مکعب
حجم متان در حالت گاز در سطح زمین	۹۸۴	هزار میلیارد متر مکعب



شکل ۷: پیش‌بینی تغییرات دمای جهانی در سطح زمین بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۱۰۰ (IPCC, 2013).

### ۲-۳ ارزیابی اثر گرمایش جهانی بر گازهای هیدراته در دریای خزر

براساس گزارش IPCC (2013) میانگین دمای سطحی کره زمین در دریاها و خشکی‌ها بین سال‌های ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲، ۰/۸۵ درجه افزایش نشان می‌دهد. در اقیانوس‌ها، میانگین دما، در عمق‌های تا ۷۰۰ متر، بین سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۰ افزایش نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد روند افزایش دمای کره زمین با افزایش گازهای گلخانه‌ای کماکان ادامه خواهد داشت. شکل ۷ برآورد تغییرات دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ را نشان می‌دهد. بر این اساس دمای سطح کره زمین تا پایان قرن ۲۱ میلادی، نسبت به سال ۱۹۵۰، تا بیش از ۵ درجه سلسیوس نیز ممکن است افزایش یابد. در مورد اقیانوس‌ها نیز پیش‌بینی می‌شود که گرمایش جهانی در طول قرن ۲۱ ادامه داشته و گرما از سطح دریاها به اعماق آن نفوذ کرده و جریان‌های دریایی را متاثر نماید. برای دریاها در بخش ۱۰۰ متر بالایی، افزایش تا حدود ۲ درجه سلسیوس و از ۱۰۰ متر تا ۱۰۰۰ متر، افزایش تا ۰/۶ درجه سلسیوس برآورد شده است (IPCC, 2013).

در این مطالعه برای افزایش دمای دریای خزر در اثر گرمایش جهانی در بازه ۰/۶ تا ۲ درجه و برای دماهای ۰/۶، ۱، ۱/۵ و ۲ درجه سلسیوس محاسبات پایداری متان هیدراته صورت پذیرفته است. بر پایه این محاسبات ضخامت محدوده‌ای که امکان تشکیل گازهای هیدراته در شرایط افزایش دما وجود دارد محاسبه شده و از ضخامت این محدوده در شرایط اندازه‌گیری داده‌ها (۱۹۲۴ تا ۱۹۹۵) کسر شده است. نتیجه حاصل تغییرات ضخامت محدوده گازهای هیدراته خواهد بود. نقشه هم ضخامت حاصل برای افزایش ۲ درجه‌ای در شکل ۸ نمایش داده شده است.

باعث گرمایش بیشتر کره زمین می‌شود. محاسبات مشابه برای افزایش‌های ۰/۶، ۱ و ۱/۵ درجه‌ای نیز انجام شده و نتایج در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲: حجم برآورد شده گاز آزاد شده در جو در سناریوهای مختلف گرمایش جهانی

افزایش دمای آب (درجه سانتی‌گراد)	میانگین تغییرات ضخامت محدوده تشکیل گازهای هیدراته (متر)	حجم متان آزاد شده در جو (هزار میلیارد متر مکعب)
۰/۶	۱۵۰	۳۶۹
۱	۲۵۰	۶۱۵
۱/۵	۳۵۰	۸۶۱
۲	۴۰۰	۹۸۴

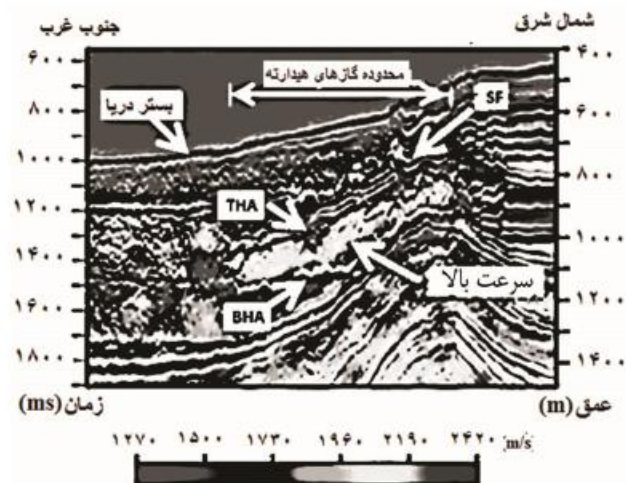
#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله براساس روابط فیزیکی - شیمیایی پایداری متان به عنوان فراون‌ترین ترکیب هیدروکربنی موجود در گازهای هیدراته مورد بررسی قرار گرفت و نقشه‌هایی که عمق بالایی و پایینی پایداری متان در بخش‌های مختلف دریای خزر را نشان می‌دهد، ارایه گردید. سپس تاثیرات افزایش دمای دریای خزر در اثر گرمایش جهانی روی پایداری گازهای هیدراته مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، براساس روابط فیزیکی - شیمیایی مرز بالایی و پایینی پایداری متان در شرایط دمایی جدید تهیه شد و با کسر آنها از مرزهای پایداری در شرایط فعلی، تغییر ضخامت محدوده پایداری متان در بخش‌های مختلف دریای خزر محاسبه گردید. با توجه به نمونه‌ای از شواهد ژئوفیزیکی از گازهای هیدراته در دریای خزر، برآوردی از میزان گاز هیدراته آزاد شده در جو در اثر گرمایش جهانی ارایه گردید. براساس این برآورد، در اثر گرمایش آب‌های دریای خزر، انتظار می‌رود بسته به سناریوهای مختلف چیزی در حدود ۳۶۹ تا ۸۹۴ هزار میلیارد متر مکعب گاز متان وارد جو شود. دریاها و مناطق اقیانوسی گسترده‌ای در جهان حاوی گازهای هیدراته‌اند که وقوع چنین پدیده‌ای در همه آنها باعث ورود حجم بسیار زیادی از گاز به جو زمین می‌شود. این مقدار گاز با عملکرد گلخانه‌ای، خود می‌تواند باعث افزایش دمای جهانی گردد.

#### ۵. سپاسگزاری

این تحقیق در پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی و با حمایت این پژوهشگاه انجام شده است. از این رو مولفین بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاسگزاری خود را اظهار دارند.

مساحت دریای خزر و میانگین تغییرات ضخامت محدوده گاز هیدراته از نقشه شکل ۸ به دست آمده است. درصد محدوده دارای متان هیدراته براساس نمونه‌ای از برداشت‌های ژئوفیزیک (شکل ۹) در منطقه آبشرون برآورد شده است. در این منطقه، محدوده دارای پتانسیل گاز هیدراته ۳۰ کیلومتر در ۸۰۰ متر است و محدوده دارای گاز هیدراته که براساس سرعت بالا در برداشت ژئوفیزیکی مشخص شده، حدود ۱۰ کیلومتر در ۱۰۰ متر است.



شکل ۹: مقطع تفسیر شده برداشت ژئوفیزیکی در منطقه آبشرون در دریای خزر. منطقه نامنجاری سرعت منطقه دارای گاز هیدراته را نشان می‌دهد (Knapp and Knapp, 2002).

این بدان معناست که تنها حدود ۶ درصد از محدوده دارای پتانسیل گاز هیدراته، تجمع گاز هیدراته دارد. این محدوده تجمع نیز به طور کامل از گازهای هیدراته تشکیل نشده و این ترکیبات هیدراته در خلل و فرج رسوبات تجمع یافته‌اند. بر این اساس میزان تخلخل و در نتیجه میزان گازهای هیدراته ۱۰ درصد فرض شده است. براساس این فرضیات حجم گاز هیدراته آزاد شده در جو ۶ هزار میلیارد متر مکعب خواهد بود. همانطور که پیشتر بیان شد گازهای هیدراته، در فشار سطح زمین افزایش حجم قابل توجهی می‌یابند به گونه‌ای که هر ۱ متر مکعب گاز هیدراته، در سطح زمین، ۱۶۴ متر مکعب گاز خواهد بود (Kvenvolden, 1993). از این رو حجم گاز متانی که وارد جو خواهد شد معادل ۹۸۴ هزار میلیارد متر مکعب خواهد بود که حجم بسیار زیادی به شمار می‌آید. گاز متان و سایر گازهای هیدراته از گازهای گلخانه‌ای به شمار آمده که خود از عوامل افزایش دمای کره زمین هستند. به عبارت دیگر گرمایش زمین باعث آزاد شدن حجم بیشتری از گازهای هیدراته شده و وارد شدن این گازها به جو

- Studies, 9 (1): 111-119.
- Johnson, A.; Max, M.D., 2006. The path to commercial hydrate gas production. *The Leading Edge*, 25: 648-651.
- Kennett, J.P.; Cannariato, K.G.; Hendy, I.L.; Behl, R.J., 2013. Methane hydrates in quaternary climate change: The Clathrate Gun Hypothesis. Special publication. AGU. Washington, D.C., 54: 216P.
- Knapp, C.C.; Knapp, J.H., 2002. South caspian sea: A unique setting to evaluate proposed mechanisms for late-Pleistocene large-scale submarine slope failure. *AAPG Bulletin Special Volume: Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards*. Department of Geological Sciences, University of South Carolina, 701 Sumter Street, Columbia, SC 29208.
- Kvenvolden, K.A., 1993. Gas hydrates- geological prospective and global change. *Reviews of geophysics*, 3: 173-187.
- Kvenvolden, K.A., 1988. Methane hydrate - A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology*, 71 (1-3): 41-51.
- Maekawa, T., 2006. Phase equilibria for hydrate formation from binary mixtures of ethane, propane and noble gases. *Fluid Phase Equilibria*, 243: 115-120.
- Maekawa, T., 2008. Equilibrium conditions for clathrate hydrates formed from methane and aqueous propanol solutions. *Fluid Phase Equilibria*, 267: 1-5.
- McIver, R.D., 1982. Role of naturally occurring gas hydrates in sediment transport. In *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66: 789-792.
- Singh, A.; Singh, B.D., 1999. Methane gas: An unconventional energy resource. *Current Science*, 76: 1533-1545.
- Sloan, E.D.J., 1990. *Clathrate hydrates of natural gases*. Marcel Dekker Inc., 705: 45-113.
- دالوند، م.؛ عزیزاده ح.، ۱۳۹۴. حلیل استنادی و ترسیم نقشه تاریخ نگاشتی تولیدات علمی محققان علوم دریایی ایران در حوضه آبی خزر در پایگاه استنادی "Web of Science" طی سالهای ۲۰۱۳-۱۹۹۲. *نشریه اقیانوس شناسی*. دوره ۶، شماره ۲۲، صفحات ۴۹-۵۷.
- لاهیجانی، ح.؛ حائری اردکان، ا.؛ شریفی، آ.؛ نادری بنی، ع.، ۱۳۸۹. شاخص های رسوب شناختی و ژئوشیمیایی در خلیج گرگان. *نشریه اقیانوس شناسی*، دوره ۱، شماره ۱، صفحات ۴۵-۵۵.
- Bagirov, E.; Lerche, I., 1997. Hydrates represent gas source, drilling hazard. *Oil and Gas Journal*, 95: 99-104.
- Bezrodnikh, Yu.P.; Deliya, S.V.; Lavrushin, V.Yu.; Yunin, E.A.; Poshibaev, V.V.; Pokrovskii, B.G., 2013. Gas seeps in the North Caspian water area. *Lithology and Mineral Resources*, 48(5): 373-383.
- Collett, T.S., 2002. Energy resource potential of natural gas hydrate. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86: 1971-1992.
- Diaconescu, C.C.; Knapp, J.H., 2000. Buried gas hydrates in the deepwater of the south Caspian Basin, Azerbaijan. Implications for Geohazards. *Energy Exploration and Exploitation*, 18 (4): 385-400.
- Dickens, G.R., 2004. Methane hydrate and abrupt climate change. *Geotimes*, 49(11): 18-23.
- Duan, Z.; Li, D.; Chen, Y.; Sun, R., 2011. The influence of temperature, pressure, salinity and capillary force on the formation of methane hydrate. *Geoscience Frontiers* 2(2): 125-135.
- Hui, Y.D.; Yue, X.W., 2007. Effects of salinity on methane gas hydrate system. *Science in China Series D. Earth Sciences*, 50(11): 1733-1745.
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. *Climate change 2013, the physical science basis*. Cambridge university press. [www.cambridge.org](http://www.cambridge.org).
- Jauhari, P., 2001. Methane hydrates in marine sediments untapped source of energy. *Journal of Indian Ocean*



Gardner, J.; Bowles, F.; Cherkasher, G., 1999. Ground - Truthing 11 to 12 kHz side-scan sonar images in the Norwegian - Greenland Sea: Part II: Probable diapirs on the Bear Island fan slide valley margins and the Vering Plateau. *Geo-Marine Letters*, 19: 11-130.

Tenzer R.; Gladkikh, V., 2014. Assessment of density variations of marine sediments with ocean and sediment depths. *The Scientific World Journal*, Article ID 823296, 9P.

Vogt, P.R.; Crane K.; Sundvor, E.; Hjelstuen, B.O.;