



بررسی امکان ذخیره سازی دی اکسید کربن در حوزه دریای خزر

حمید بهمنش^۱ دانشگاه Calgary کانادا

احسان قناعت پشه^۲ شرکت بهره برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی
حسین مهر آرا^۳ پژوهشگاه صنعت نفت

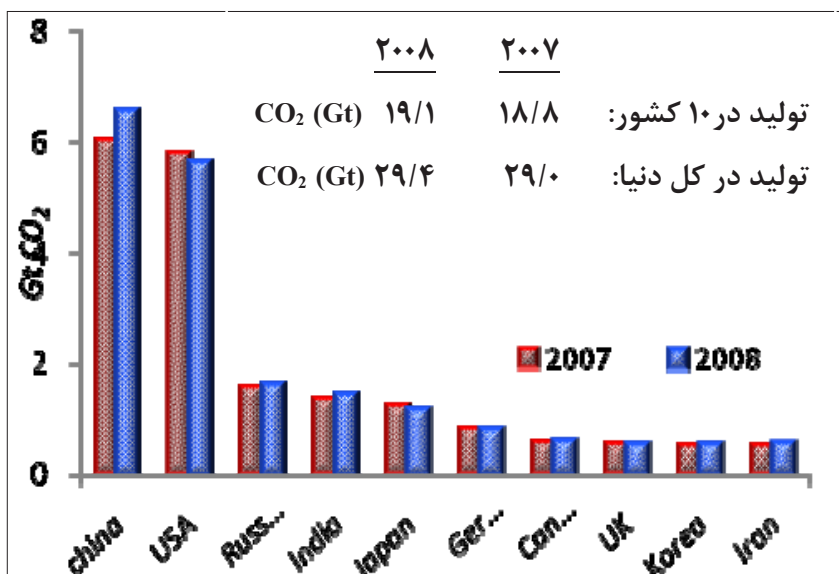
مقدمه

زمانی که رابطه بین مصرف انرژی و محیط زیست مطرح می شود مباحثی مانند انرژی های تجدیدپذیر، انرژی هسته ای، افزایش بازده سوخت های فسیلی و ذخیره سازی دی اکسید کربن اهمیت بیشتری می یابند. با توجه به اینکه سوخت های فسیلی عامل اصلی ورود گازهای گلخانه ای به اتمسفر هستند، جمع آوری گاز دی اکسید کربن یکی از روش هایی است که اخیراً بسیار مورد توجه واقع شده است. این گاز می تواند در سازندهای مختلف زیر سطح زمین رسوب کند. روش های مختلفی برای ذخیره سازی دی اکسید کربن جمع آوری شده وجود دارد؛ مثل ذخیره سازی در سازندهای زمین شناسی نفتی و گازی [۲ و ۱] یا ذخیره سازی در سازندهای زغال سنگی [۳] و یا ذخیره سازی در اعماق اقیانوس ها [۴] و یا تبدیل شیمیایی دی اکسید کربن به مواد معدنی که از لحاظ ترمودینامیکی پایدارند [۵]. در

این نوشتار روش های مذکور معرفی و امکان پیاده سازی آنها در ایران بررسی شده است. دو کشور مجموعاً، سالیانه ۱۱/۸ گیگاتن دی اکسید کربن تولید می کنند که برابر با ۴۱ درصد کل تولید این گاز در جهان است. شکل ۱- مقدار تولید دی اکسید کربن این ده کشورها را در سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ نشان

۱- آمار نشر دی اکسید کربن در ایران

دو سوم دی اکسید کربن انتشار یافته توسط ده کشور جهان تولید می شود. در این میان



شکل ۱ | ده کشور که بیشترین دی اکسید کربن دنیا را تولید کرده اند

می‌دهد. ایران در سال ۲۰۰۷ در رتبه دهم کشورهای تولیدکننده دی‌اکسید کربن بوده و در سال ۲۰۰۸ در رتبه نهم قرار گرفته [۶] که این رتبه‌ها نشان‌دهنده وضعیت نامناسب کشورمان در زمینه انتشار این گاز است. انواع مختلف سوخت‌های به کاررفته در نیروگاه‌ها، میزان و نشر دی‌اکسید کربن و چگونگی رشد آن طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۰۸ در شکل ۲- نشان داده شده است. قسمت اعظم تولید دی‌اکسید کربن و افزایش سرعت نشر آن مربوط به مصرف انرژی است.

نیروگاه‌های ایران که ۹۰ درصد انرژی الکتریکی کشور را تولید می‌کنند اغلب با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند [۸]. در سال ۲۰۰۵ بخش‌های تولید انرژی و صنایع به تنهایی ۴۰/۵ درصد از کل تولید دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص دادند. ۴۵/۴ درصد کل الکتریسیته تولیدی در سال ۲۰۰۸ از واحدهای تولید بخار حاصل شده است. این واحدها که همگی قدیمی بوده، بازده پایین و مصرف سوخت بالایی دارند و به دلیل اینکه معمولاً فاقد سیستم‌های معمولی

کاهش آلودگی هستند، منجر به آلودگی هوا خواهند شد [۷]. این آمارها دلیلی کافی برای اجرای روش‌هایی با هدف جلوگیری از نشر بی‌رویه دی‌اکسید کربن هستند. با توجه به اینکه وزارت نیرو جهت تأمین تقاضای انرژی کشور نیازمند افزایش سالیانه تولید انرژی به میزان ۷ تا ۹ درصد است، این مساله اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد [۹].

این نگرانی منجر به ذخیره گسترده دی‌اکسید کربن در مکان‌هایی که پتانسیل ذخیره‌سازی دارند، شده است. در این مطالعه نشر دی‌اکسید کربن و مجاورت تولیدکننده‌های این گاز با مکان‌های زمین‌شناسی که قابلیت ذخیره‌سازی دارند بررسی می‌شود.

۲- مخازن نفت و گاز

تعداد زیادی مخازن تپه‌شده نفت و گاز در مناطق مختلف دنیا وجود دارند که می‌توان برخی از آنها را جهت ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن استفاده کرد. تزریق دی‌اکسید کربن در مخازن نفت و گاز تپه‌شده زمانی قابل قبول و مناسب خواهد

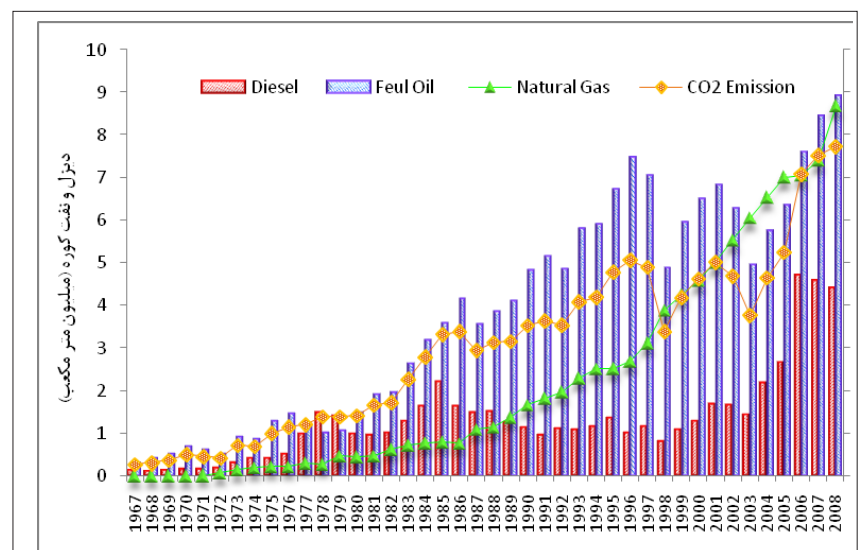
بود که در عملیات بهره‌برداری حجم زیادی از این گاز جداسازی و حاصل شود. مقدار تخمینی جهت ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن نفت و گاز تپه‌شده دنیا، حدود ۵۰ گیگاتن است [۱۰].

۳- جداسازی و دفن دی‌اکسید کربن در زیر لایه‌های نفت، گاز و آب

تزریق و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در زیر سطح تماس آب و نفت^۴ در مخازن نفتی امکان پذیر است [۱۱]. در مخازن گازی، این تزریق در زیر سطح تماس گاز و آب^۵ که تراوایی و تخلخل در این مکان‌ها زیاد است، صورت می‌گیرد. هان و مک فرسون در سال ۲۰۰۹ این فرضیه را فقط برای مخازن نفتی بیان کردند [۱۱].

۴- روش ذخیره‌سازی در بستر زغال سنگی متانی

حضور مقدار انبوه هیدروکربن‌های گازی (که بیشتر آنها گاز متان است) در زغال سنگ، منجر به انجام تحقیقات گسترده‌ای طی چند سال گذشته در این زمینه شده است. از آنجا که توسعه منابع زغال سنگی متانی در آمریکا و کانادا انجام شده، معمولاً در بیشتر کشورها به دلیل وفور منابع گازی و یا عدم شناخت عملی کافی از منابع زغال سنگی متانی، این منابع ناشناخته مانده‌اند. منابع زغال سنگی گزینه مناسبی برای ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن هستند. [۱]. در این روش مقدار قابل توجهی دی‌اکسید کربن جذب می‌شود [۱۲]. این جذب مانع از جذب متان توسط زغال سنگ می‌گردد که منجر به آزادسازی متان و بهبود برداشت آن نیز خواهد شد [۲]. این ازدیاد برداشت متان می‌تواند قسمتی و یا حتی تمام هزینه ناشی از جداسازی و دفن دی‌اکسید کربن را جبران کند.



شکل ۲ | مصرف انرژی و نشر دی‌اکسید کربن در نیروگاه‌ها طی سال‌های [۷] ۱۹۶۷-۲۰۰۸



۴-۱- روش CBM^۲ در ایران

ایران با داشتن ۹۸۵ تریلیون فوت مکعب گاز درجا، در رتبه دوم کشورهای صاحب مخازن گازی قرار دارد [۶]. به دلیل وجود این مقدار عظیم گاز درجا، هنوز تولید گاز از مخازن غیرمعمول در ایران شروع نشده است. به هر صورت تأمین افزایش نیاز انرژی کشور مستلزم کشف و به کارگیری سایر منابع انرژی است. بر اساس وجود منابع عظیم زغال‌سنگی در کشور، گاز طبیعی موجود در این مخازن جزو بزرگ‌ترین منابعی است که قادر به تأمین نیاز کشور خواهد بود. در این بخش مخازن زغال‌سنگی به عنوان منابع عظیم متان و هم‌چنین به عنوان مکانی برای تزریق و نگهداری گاز دی‌اکسید کربن بررسی می‌شود.

تولید زغال‌سنگ در ایران مربوط از سال ۱۹۶۰ آغاز شد. به دلیل حضور مخازن عظیم نفتی و گازی در ایران زغال‌سنگ به عنوان یک منبع انرژی مورد توجه قرار نگرفته است. همان‌طور که در جدول ۱- نشان داده

شده منابع زغال‌سنگی در ایران در پنج حوزه یافت می‌شود. مقدار زغال‌سنگ موجود در این منابع در حدود ۱۳-۸ گیگاتن تخمین زده شده است. بخش عظیمی از این منابع در رشته کوه‌های البرز در شمال‌شرق ایران قرار دارد. رسوب‌گذاری دوره تریاسه و ژوراسیک در شکل ۳- نشان داده شده است.

برای این منظور داده‌های مربوط به بسترهای زغال‌سنگی از معادن مختلف در مناطق متفاوت بررسی شده است. نتایج این بررسی، شناسایی پتانسیل تولید از منابع کنونی را ممکن کرده و علاوه بر این مقدار تولید گاز از این منابع، هم‌چنین مطالعه تزریق دی‌اکسید کربن در این مکان‌ها و قابلیت ذخیره‌سازی این گاز را مشخص می‌کند. زغال‌سنگ‌ها در محیط‌های دریاچه‌ای این مکان‌ها رسوب کرده‌اند.

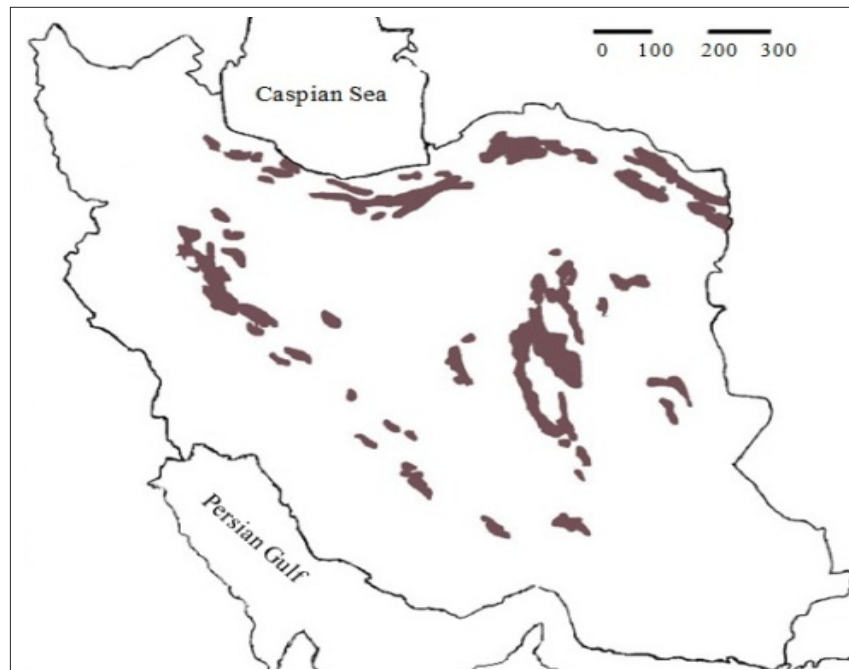
۴-۱-۱- مطالعه موردی

اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی، منابع و پتانسیل تولید در بعضی از قسمت‌های این معادن

زغال‌سنگی، بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و کتابخانه‌ای حاصل شده است. مقدار گاز موجود در نمونه آزمایشی خمروود که از معادن زغال‌سنگی کرمان تهیه شده، نشان دهنده افزایش عمق است. داده‌ها در بعضی از قطعات، محتوای گاز بیشتری را نشان می‌دهد. در این منطقه فشار سربار بیشتری به عنوان مشخصه زمین‌شناسی ضبط شده که این مطلب به دلیل توپوگرافی بیشتر در این منطقه تپه‌ای است. مقدار محتوی گاز بین $7-11 \text{ m}^3/\text{ton}$ از یک معدن تا معدن دیگر متفاوت است. برای خاک رس زغال‌سنگی و سیلت زغال‌سنگی مقدار $2/4 \text{ m}^3/\text{ton}$ و برای خاک رس غیر زغال‌سنگی مقداری کمتر از $0/5 \text{ m}^3/\text{ton}$ گاز تخمین زده شده است. زغال‌سنگ‌های بیتومینی مربوط به دوره ژوراسیک (۶۹٪ تا ۱۰۲٪ درصد Ro) در این منطقه، کانی‌شناسی متفاوتی دارند.

۵- هیدرات‌های گازی

تحرك زیاد دی‌اکسید کربن در حالت گاز یا مایع و یا در نقطه فوق بحرانی سیال (که بر اثر فشار و دما در این شرایط واقع شده) شرایط خاصی را جهت نگهداری و تزریق این گاز طلب می‌کند. به همین دلیل دین دی‌اکسید کربن در اعماق اقیانوس‌ها روشی بسیار امید بخش است. در این قسمت دین



رسوب‌گذاری دوره تریاسه و ژوراسیک در ایران

مخازن زغال‌سنگ در ایران	
مکان	زغال سنگ (میلیون تن)
البرز	۳۳۱۸
کرمان	۸۷۵
شمال‌شرقی خراسان	۸۳۱۶
اصفهان	۱۰۰
آذربایجان شرقی	۱۵۰
جمع کل	۱۲۷۵۹

دی اکسید کربن به صورت هیدرات در دریای خزر بررسی خواهد شد. شرایط دما و فشار و هم‌چنین تراوایی و تخلخل سازندهای زیر دریای خزر شرایط مساعدی برای تزریق و نگهداری این گاز مهیا کرده است. می‌دهد. تخلخل و تراوایی مناسب سازند پذیرنده دی اکسید کربن، ظرفیته بالایی برای نگهداری این گاز به وجود می‌آورد.

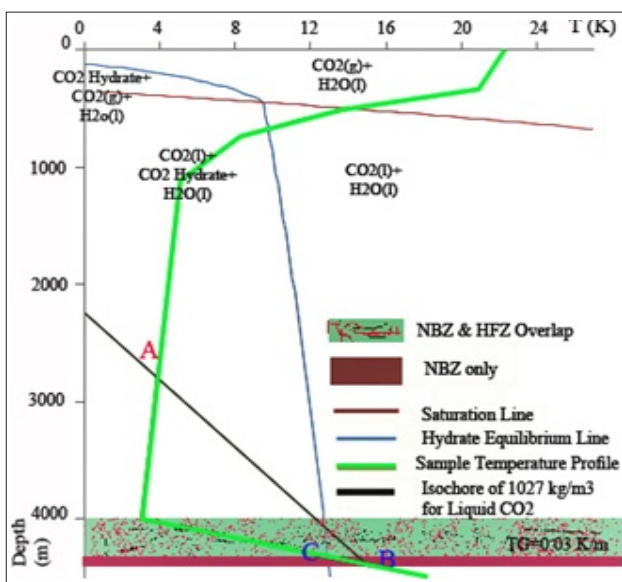
۵-۱- مکانیزم ذخیره‌سازی دی اکسید کربن در سازندهای رسوبی زیر دریا

دریاچه خزر که بزرگ‌ترین دریاچه جهان به شمار می‌رود باقیمانده اقیانوس تیس است که عمر آن به ۶۰-۵۰ میلیون سال پیش می‌رسد. مکانیزم ذخیره‌سازی در کف دریا می‌تواند بر اساس پایداری ثقلی [۱۳]، تشکیل هیدرات دی اکسید کربن [۱۴]، پایداری ثقلی آب کربناته [۱۵]، به دام انداختن دی اکسید کربن توسط مواد معدنی [۱۶] و یا به دام انداختن آن توسط چینه‌ها [۱۷] باشد. در این مطالعه فقط دو مکانیزم نخست بررسی خواهد شد. تحت فشار بالا (۳۰-۱۰ Mpa) و

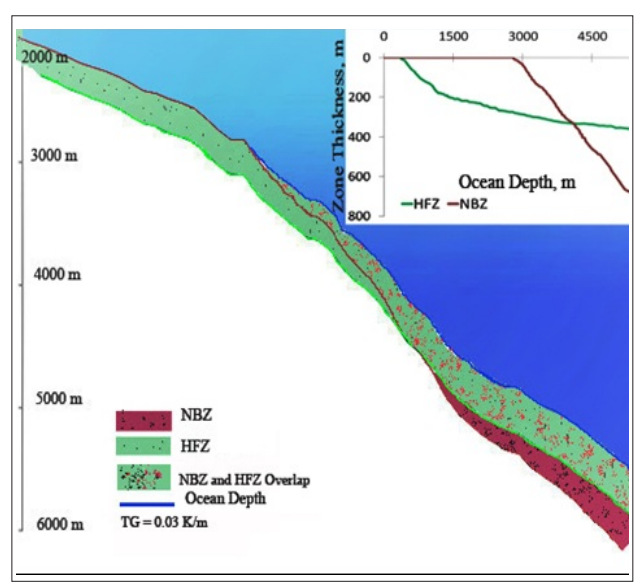
دمای بالا (۳۳۰-۴۰۰ K) گاز دی اکسید کربن در شرایط فوق بحرانی قرار گرفته و که چگالی آن ۷۰-۴۰ درصد کمتر از سیال درون تخلخل‌ها خواهد بود. اما به خاطر خاصیت تراکم‌پذیری نسبی دی اکسید کربن نسبت به آب، این گاز در فشار بالا و دمای پایین چگال‌تر از آب می‌شود [۵]. در عمق بیشتر از ۳۰۰۰ متر، دی اکسید کربن تزریقی از سیال درون تخلخل‌ها چگال‌تر می‌شود. این پایداری ثقلی سبب می‌شود که لایه رسوبی کف دریا به عنوان یک سنگ پوش^۷ عمل کرده و نتواند از شکستگی‌های سنگ‌های رسوبی به عنوان مسیری برای فرار استفاده کند. زیر سطح دریا گرادیان دما به خاطر اثر زمین‌گرایی باعث افزایش چگالی دی اکسید کربن تا مقداری برابر با چگالی سیال درون تخلخل‌ها خواهد شد. این بازه که بین کف دریا و عمق لایه رسوبی که در آن شناوری دی اکسید کربن به علت بیان شده صفر می‌شود، قرار دارد را منطقه شناوری معکوس^۸ می‌نامند [۵]. جهت افزایش چگالی دی اکسید کربن شرایطی مشابه آنچه گفته

شد (فشار بالا و دمای پایین) برای دفن و ذخیره‌سازی هیدرات دی اکسید کربن مورد نیاز است. مناطق زیرزمین با دمای نسبتاً پایین و فشار بالا که شرایط مناسب برای هیدراته‌ساز^۹ می‌گویند [۵]. این روش به طور کامل از نشت دی اکسید کربن جلوگیری می‌کند. در شکل ۴- منطقه شناوری معکوس و منطقه هیدراته‌ساز نشان داده شده است. با توجه به این شکل منطقه هیدراته‌ساز خیلی سریع‌تر از منطقه شناوری معکوس، در عمق ۴۰۰ متر شروع می‌شود.

ضخامتی که در آن، دو ناحیه نام‌برده بر هم منطبقند به عمق دریا ارتباطی ندارد بلکه به خاطر گرادیان زمین‌گرایی است. نقطه بهینه تزریق دی اکسید کربن مکانی است که دو ناحیه بر هم منطبقند. بر اساس گفته هاوس و همکارانش [۵] و کوید [۱۸] این نقطه در عمقی بیشتر از ۲۹۰۰ متر است. شکل ۵- چگونگی محاسبه ضخامت نسبی منطقه شناوری معکوس و هیدراته‌ساز را به عنوان نمونه در اقیانوس به عمق ۴۰۰۰ متر نشان می‌دهد که



شکل ۵ | منطقه شناوری معکوس و هیدراته‌ساز در عمق ۴۰۰۰ متر برای گرادیان زمین‌گرایی ۰/۰۳ K/m



شکل ۴ | ضخامت دو منطقه هیدراته‌ساز و شناوری معکوس در برابر عمق اقیانوس در اعماق لایه رسوبی با گرادیان زمین‌گرایی ۰/۰۳ K/m



کردن این گاز فراهم شود. بنابراین احتمال حذور منطقه شناوری معکوس در این دریا تقریباً صفر است. اما فشار و دمای مناسب برای ایجاد هیدرات دی اکسید کربن در این حوزه وجود دارد. میزان توانایی ذخیره سازی دی اکسید کربن در دریای خزر با در نظر گرفتن یک میانگین ضخامتی و تخلخلی از منطقه پایدار هیدرات دی اکسید کربن به دست می آید.

نتیجه گیری

با افزایش نیاز به انرژی، باید به جای سوخت های فسیلی، گرایش تدریجی به استفاده از سوخت های تجدیدپذیر مانند انرژی باد، انرژی خورشید و ... ایجاد شود. در این مقاله توانایی ذخیره سازی دی اکسید کربن در حوزه دریای خزر با در نظر گرفتن خصوصیات زمین شناسی، زمین گرمایی و فشاری کف و زیر سازند موجود در این دریاچه مطالعه شده است. بررسی ها نشان

حدود ۶-۴ درجه سانتی گراد است. برای حوضچه های دریایی در جنوب دریای خزر، گرادیان دمایی $2-1/8^{\circ}\text{C/m}$ است. امروزه مطالعات دقیق و گسترده ای برای اندازه گیری جریان گرمایی در حوضچه دریای خزر انجام نشده، اما مطالعات صورت گرفته برای بسیاری از چاه های خشکی در این مکان و بیش از ۲۴ چاه دریایی، نشان می دهد که جریان گرمایی در این حوضه $21-42\text{ mW/m}^2$ می باشد [۱۹ و ۲۰].

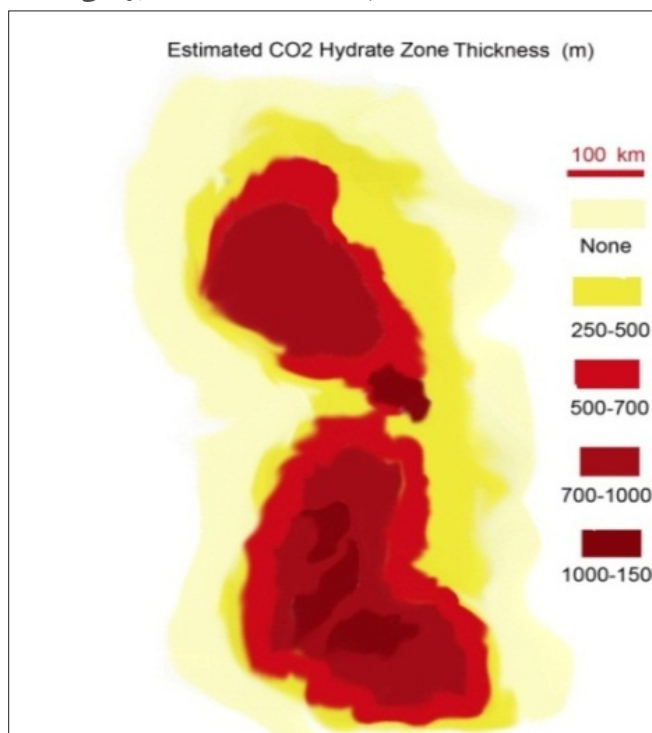
۳-۵- توانایی و ظرفیت دفع و نگهداری دی اکسید کربن

با هدف به دست آوردن توانایی دفع دی اکسید کربن، عمق سنجی، جریان زمین گرمایی، رسانایی گرمایی و گرادیان دمایی رسوبات حوزه دریای خزر بر اساس اطلاعات حاصله بررسی شد. عمق این دریاچه در هیچ نقطه ای از ۳۰۰۰ متر تجاوز نکرده تا توانایی فشرده سازی و چگال تر

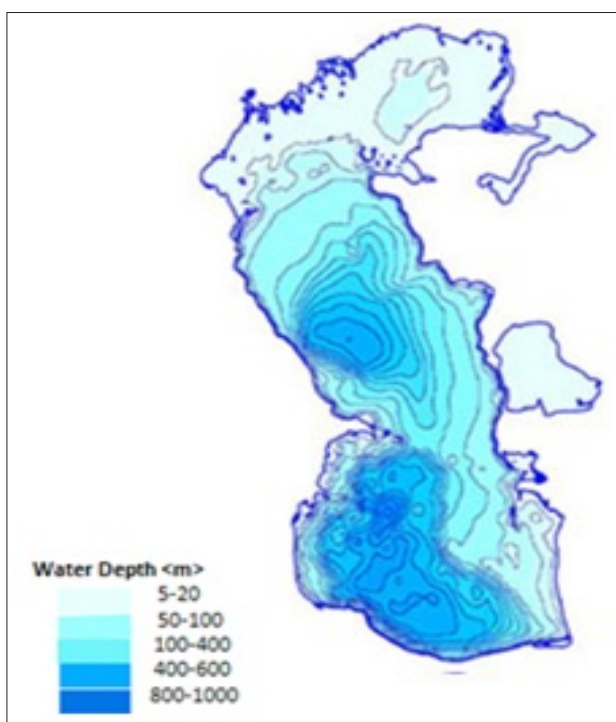
این اندازه گیری با گرادیان زمین گرمایی K/m در رسوبات کف دریا محاسبه شده است. در این شکل، A نشان دهنده نقطه ای است که چگالی دی اکسید کربن بیشتر از چگالی آب شده است. این نقطه، محل برخورد منحنی هم حجم و پروفیل دمایی اقیانوس است.

۲-۵- تخمین منطقه شناوری معکوس و منطقه هیدراته ساز در دریای خزر

شکل ۶- تغییرات عمق دریای خزر را نشان می دهد. قسمت شمالی این دریاچه، کم عمق (با عمق ۶-۱۰ متر) است. عمق میانگین در میانه های دریای خزر ۱۷۵ متر و در مکان های عمیق آن ۷۹۰ متر است. قسمت جنوبی که بیشترین حجم را دارد، بیشترین عمق (۱۰۲۵ متر) را نیز داراست. شکل ۶- مکان یک حوزه رسوبی وسیع و عمیق را در این دریاچه نشان می دهد. با وجود اینکه دمای آب به صورت دقیق در متون تحقیقاتی نیامده، اما بیان شده که در عمق بیش از ۲۰۰ متر دما در



شکل ۷ | ضخامت تخمینی برای هیدرات دی اکسید کربن



شکل ۶ | خطوط هم عمق دریای خزر

می دهد که تبدیل دی اکسید کربن به هیدرات کف دریا مناسب ترین روش است. مطالعات دی اکسید کربن در ماسه سنگ های زیرین این گاز و ذخیره سازی آن به صورت جامد در نشان دهنده توانایی بالای ذخیره سازی دریای خزر می باشد.

پانویس ها

¹ehsan.ghanaatpisheh@gmail.com

⁴OWC

⁷cap rock

²mehrra.hossein@gmail.com

⁵GWC

⁸Negative Buoyancy Zone (NBZ)

³behmaneshhamid@gmail.com

⁶Coal Bed Methane

⁹Hydrate Formation Zone (HFZ)

منابع

- [1] Orr, F., 2004. Storage of carbon dioxide in geologic formations. *Journal of Petroleum Technology*, 56(9): 90-97.
- [2] Bachu, S. et al., 2007. CO2 storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(4): 430-443.
- [3] Gale, J. and Freund, P., 2001. Coal Bed Methane Enhancement with CO2 Sequestration Worldwide Potential. *Environmental Geosciences*, 8(3): 210-217.
- [4] Alendal, G. and Drange, H., 2001. Two-phase, near-field modeling of purposefully released CO2 in the ocean. *Journal of geophysical research*, 106(C1): 1085-1096.
- [5] House, K.Z., Schrag, D.P., Harvey, C.F. and Lackner, K.S., 2006. Permanent carbon dioxide storage in deep-sea sediments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(33): 12291.
- [6] IEA, International Energy Agency, CO2 Emissions from Fuel Combustion - Highlights 2009 and 2010 Editions, <http://www.iea.org/co2highlights/>.
- [7] Mazandarani, A., Mahlia, T., Chong, W. and Moghavvemi, M., 2010. A review on the pattern of electricity generation and emission in Iran from 1967 to 2008. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7): 1814-1829.
- [8] وبسایت www.tavanir.org.ir
- [9] Nazari, S. et al., 2010. Experimental determination and analysis of CO2, SO2 and NOx emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*, 35(7): 2992-2998.
- [10] قناعت پیشه احسان، بهمنش حمید، میرباقری سید محمود، مروری بروشهای مختلف تسخیر و ذخیره سازی کربن، نخستین همایش مهندسی مخازن هیدروکربوری، خرداد ۱۳۹۱، تهران.
- [11] Han, W.S. and McPherson, B.J., 2009. Optimizing geologic CO2 sequestration by injection in deep saline formations below oil reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 50(10): 2570-2582.
- [12] Ohga, K., Sasaki, K., Deguchi, G. and Fujioka, M., 2003. Fundamental Tests on Carbon Dioxide Sequestration into Coal Seams. *Greenhouse Gas Control Technologies*, 1.
- [13] Lemmon, E., McLinden, M., Friend, D., Linstrom, P. and Mallard, W., 2005. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD.
- [14] Lee, K.M., Lee, H., Lee, J. and Kang, J.M., 2002. CO2 hydrate behavior in the deep ocean sediments; phase equilibrium, formation kinetics, and solubility. *Geophysical research letters*, 29(21): 2034.
- [15] Chen, B., Song, Y., Nishio, M., Someya, S. and Akai, M., 2005. Modeling near-field dispersion from direct injection of carbon dioxide into the ocean. *Journal of geophysical research*, 110(C9): C09S15.
- [16] Spinelli, G.A., Giambalvo, E.R. and Fisher, A.T., 2004. Sediment permeability, distribution, and influence on fluxes in oceanic basement. *Hydrogeology of the oceanic lithosphere*: 151-188.
- [17] Fisher, A.T., 1998. Permeability within basaltic oceanic crust. *Reviews of Geophysics*, 36(2): 143-182.
- [18] Koide, H., Takahashi, M., Tsukamoto, H. and Shindo, Y., 1995. Self-trapping mechanisms of carbon dioxide in the aquifer disposal. *Energy Conversion and Management*, 36(6-9): 505-508.
- [19] Tagiyev, M., Nadirov, R., Bagirov, E. and Lerche, I., 1997. Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of the north-west South Caspian Basin. *Marine and petroleum geology*, 14(4): 363-382.
- [20] Nadirov, R., Bagirov, E., Tagiyev, M. and Lerche, I., 1997. Flexural plate subsidence, sedimentation rates, and structural development of the super-deep South Caspian Basin. *Marine and petroleum geology*, 14(4): 383-400.