



## شناسایی منابع انتشار دی اکسید کربن جهت تزریق در مخازن نفتی به منظور ازدیاد برداشت

اکرام وحیدی<sup>۱</sup>، بریم خرووی، محمد احمدی<sup>۲</sup>، مدیریت پژوهش و فن آوری شرکت ملی نفت ایران

چکیده

افزایش روزافزون غلظت گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن در جو زمین باعث افزایش نگرانی و فشار جوامع بین‌المللی جهت کاهش و کنترل انتشار این گاز شده است. در این راستا روش‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی اکسید کربن در مخازن زیرزمینی در سراسر جهان مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. از جمله روش‌های ذخیره‌سازی این گاز، تزریق آن در مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت می‌باشد. سالیانه حجم زیادی گاز طبیعی در صنعت نفت به منظور حفظ فشار یا ازدیاد برداشت به مخازن نفتی تزریق می‌شود. جایگزین کردن گاز ارزان‌تر دی اکسید کربن، علاوه بر ایجاد ارزش افزوده از طریق صرفه‌جویی در هزینه گاز تزریقی و نیز افزایش چشم‌گیر نفت تولیدی، به کاهش انتشار این گاز و بهبود رتبه ایران در انتشار دی اکسید کربن کمک شایانی خواهد بود. هدف اصلی این مطالعه ایجاد بانک اطلاعاتی جامعی شامل آمار منابع انتشار دی اکسید کربن در ایران به همراه حجم و غلظت آن می‌باشد که بر اساس نتایج آن اطلس انتشار دی اکسید کربن در ایران ترسیم شده است. در کنار این کار، غربالگری پارامتریک و فنی مخازن نفتی جهت تزریق دی اکسید کربن انجام شده است.

واژگان کلیدی: منابع انتشار دی اکسید کربن، نیروگاه‌ها، منابع غیر نیروگاهی، غربالگری مخازن، تزریق دی اکسید کربن

### مقدمه

گسترش روزافزون آلاینده‌های زیست‌محیطی مثل دی اکسید کربن و نگرانی از روند گرمایش زمین لزوم توجه به اصول توسعه پایدار از جمله حفاظت از محیط زیست را بیشتر کرده است. ایران با تولید ۵۰۰ میلیون تن دی اکسید کربن در سال، رتبه دهم انتشار این گاز را در جهان داراست و با پیوستن به پیمان کیوتو اگرچه تا سال ۲۰۱۲ تعهدی جهت کاهش میزان دی اکسید کربن ندارد، اما در سال‌های بعد ملزم به کاهش انتشار این گاز خواهد بود [۴]. جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی اکسید کربن در مقیاس بزرگ و صنعتی توسط کشورهای مختلف در سراسر جهان مورد توجه و بررسی است. بیش از ۴۰ سال تجربه در پروژه‌های CO<sub>2</sub>/EOR این اطمینان را ایجاد کرده که تزریق در مخازن زیرزمینی و ساختارهای زمین‌شناسی، با مشخصات و پتانسیل مناسب، عملی و امکان‌پذیر است. بر این اساس، انجام مطالعاتی به منظور شناسایی منابع انتشار دی اکسید کربن و معرفی تعدادی از مخازن مناسب ایران جهت تزریق این گاز به منظور ازدیاد برداشت بسیار ضروری است.

به‌طور کلی سهم عمده انتشار دی اکسید کربن

را نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌های نفت، واحدهای پالایش گاز و صنایعی که به علت نوع فرآیند خود این گاز را به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌کنند بر عهده دارند. در این تحقیق میزان انتشار دی اکسید کربن در واحدهای نیروگاهی و غیرنیروگاهی کشور به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در واحدهای نیروگاهی تعدادی از نیروگاه‌های مطرح کشور همراه با موقعیت جغرافیایی و ترکیب درصد گاز خروجی آن گزارش شده است. در ایستگاه‌های غیرنیروگاهی، بخش‌های صنایع معدن، صنایع شیمیایی، صنایع فلزی و واحدهای شیرین‌سازی در تعدادی از استان‌های کشور مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در ادامه جهت شناسایی میدان‌های نفتی از روش‌ها و نرم‌افزارهای متفاوت غربالگری مخازن استفاده شده است.

با استفاده از این نرم‌افزارها غربالگری و رتبه‌بندی تکنیکی تعدادی از مخازن ایران به منظور ازدیاد برداشت به روش تزریق امتزاجی دی اکسید کربن انجام شده و تخمینی از میزان اضافه‌باز یافت نفت در اثر تزریق دی اکسید کربن

در نظر گرفته شده است.

### ۱- منابع انتشار دی اکسید کربن

منابع انتشار دی اکسید کربن به دو دسته احتراقی و غیراحتراقی تقسیم می‌شوند. منابع احتراقی شامل دودکش نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌های نفت و گاز و هم‌چنین صنایع فولاد، سیمان و پتروشیمی است. منابع غیراحتراقی مربوط به واحدهای فرآورش گاز طبیعی و هم‌چنین واحدهای تولید اتیلن اکساید و آمونیوم در صنایع پتروشیمی است. بزرگ‌ترین منبع انتشار دی اکسید کربن نیروگاه‌ها هستند که از سوخت‌های فسیلی جهت تولید انرژی استفاده می‌کنند. میزان دی اکسید کربن در جریان خروجی دودکش‌های نیروگاه‌ها نسبتاً کم است. در این میان واحدهای پتروشیمی نظیر واحدهای تولید آمونیاک از مواردی محسوب می‌شوند که گاز خروجی آنها غنی از دی اکسید کربن بوده و بر همین اساس هزینه‌های جمع‌آوری این گاز در واحدهای پتروشیمی کمتر از نیروگاه‌هاست. همان‌گونه که اشاره شد در ایران سالانه حدود ۵۰۰ میلیون تن

دی اکسید کربن منتشر می شود. جدول-۱ سهم هر یک از بخش ها را در انتشار این گاز در سال ۱۳۸۶ نشان می دهد [۴].

### ۲- منابع نیروگاهی انتشار دی اکسید کربن

از جمله منابع انتشار دی اکسید کربن، نیروگاه های حرارتی هستند که با سوزاندن سوخت های فسیلی جهت تولید برق، سهم عمده ای از انتشار این گاز را به خود اختصاص می دهند؛ به طوری که نیروگاه ها به تنهایی ۲۳ درصد (۱۰۰ میلیون تن در سال) از سهم کل انتشار را شامل می شوند [۱].

در ایران برق تولیدی کشور توسط سه نوع نیروگاه گازی، بخاری و سیکل ترکیبی تولید می شود. با توجه به آمار ارائه شده در جدول-۲ بیشترین میزان انتشار دی اکسید کربن به نیروگاه های بخاری اختصاص دارد و نیروگاه های سیکل ترکیبی و گازی در رتبه های بعدی قرار دارند [۱] که البته این امر با توجه به سوخت مصرفی هر نیروگاه قابل پیش بینی است. اگرچه ظرفیت نیروگاه، بازده و ساعات کارکرد نیز از دیگر عوامل تعیین کننده در میزان انتشار دی اکسید کربن هستند. در جدول-۳ از هر سه نوع نیروگاه، تعداد شش نیروگاه که دارای

بیشترین میزان انتشار دی اکسید کربن هستند معرفی شده تا در مراحل بعدی با توجه به عوامل مؤثر در انتخاب نیروگاه مستعد، مدنظر قرار داده شوند.

از مؤثرترین عوامل در انتخاب نیروگاه مناسب جهت نصب سیستم بازیافت دی اکسید کربن به منظور CO<sub>2</sub>/EOR علاوه بر میزان گاز دی اکسید کربن منتشر شده، می توان به فاصله نیروگاه تا مخزن هدف، درصد گاز دی اکسید کربن در محصولات احتراق و امکان نصب سیستم بازیافت در نیروگاه اشاره کرد [۱]. با توجه به موارد بالا نیروگاه های رامین، کازرون، شهید منتظری، بیستون و بندرعباس در اولویت بررسی قرار گرفتند که میزان انتشار و ترکیب درصد دی اکسید کربن در گاز خروجی آنها در جدول-۴ گزارش شده است [۱].

### ۳- منابع غیرنیروگاهی انتشار دی اکسید کربن

با توجه به اینکه بخش بزرگی از دی اکسید کربن منتشره مربوط به منابع غیرنیروگاهی (شامل صنایع معدنی، صنایع شیمیایی و صنایع فلزی) است، در این بخش منابع انتشار غیرنیروگاهی دی اکسید کربن در استان های خوزستان، بوشهر، فارس و کرمانشاه بررسی شده است. انتخاب این استان ها به دلیل وجود میداين نفت و گاز و این موضوع انجام شده که تزریق احتمالی دی اکسید کربن به این میداين از اهمیت بسیاری برخوردار است. برای تخمین اولیه میزان انتشار دی اکسید کربن در صنایع شیمیایی، فلزی و معدنی از گزارش IPCC1 در سال ۲۰۰۵ استفاده شده است. در شکل-۱ میزان انتشار دی اکسید کربن منابع غیرنیروگاهی با استفاده از ضرایب گزارش IPCC و ظرفیت تولید اسمی ذکر شده است [۵]. نتایجی که در شکل-۲ آورده شده نشان می دهد که ۹ درصد از کل انتشار مربوط به کارخانه فولاد خوزستان، ۱۳ درصد مربوط به پالایشگاه های گازی، ۳۱ درصد مربوط به کارخانه های سیمان و ۴۷ درصد مربوط به کارخانه های پتروشیمی است [۲].

۱ | سهم بخش های مختلف مصرف کننده انرژی کشور در انتشار گاز دی اکسید کربن

بخش	میزان انتشار (تن/سال)	درصد انتشار
نیروگاهی	۱۲۰۱۷۹۴۳۱	۲۴/۴۱
پالایشگاهی	۲۲۶۳۹۴۸۶	۴/۶۰
کشاورزی	۱۲۳۱۰۰۱۹	۲/۴۸
حمل و نقل	۱۱۵۵۰۲۴۳۸	۲۳/۴۶
صنعت	۷۹۳۹۸۴۵۸	۱۶/۱۳
خانگی، تجاری و عمومی	۱۴۲۳۳۵۱۲۵	۲۸/۹۱

۲ | میزان انتشار دی اکسید کربن توسط نیروگاه های مختلف

نیروگاه بخاری	نیروگاه سیکل ترکیبی	نیروگاه گازی	دی اکسید کربن منتشر شده (تن/سال)
۵۳۰۵۸۰۷۷	۲۴۷۲۴۵۵۸	۱۸۳۶۵۸۴۲	

۳ | رتبه بندی نیروگاه های مختلف کشور از جهت میزان انتشار دی اکسید کربن

رتبه	نیروگاه بخاری	نیروگاه گازی	نیروگاه سیکل ترکیبی
اول	دماوند	شهید محمد منتظری	گیلان
دوم	هرمزگان	شهید سلیمی (تکا)	کرمان
سوم	ری	رامین هواز	کازرون
چهارم	سنندج	شازند اراک	نیشابور
پنجم	پرند	بندرعباس	شهید رجایی
ششم	آبادان	اسلام آباد (اصفهان)	منتظر قائم

۴ | میزان انتشار دی اکسید کربن و ترکیب درصد آن

دی اکسید کربن منتشر شده (تن/سال)	ترکیب درصد دی اکسید کربن	بندرعباس
۲۸۹۹۳۰۶	۳/۷۲۵	کازرون
۵۲۶۹۱۶۲	۹/۹۵	رامین
۷۱۳۰۹۴۶	۱۱/۲۸	شهید محمد منتظری
۲۱۷۶۵۸۴	۱۴/۲	بیستون
۴۲۳۷۰۰۵	۸/۷۵	بندرعباس



در میان واحدهای بررسی شده با استفاده از ضرایب گزارش IPCC، از واحدهایی که بیشترین میزان انتشار دی اکسید کربن را داشته‌اند بازدید میدانی انجام شده که نتایج آن در جدول- ۵ ارائه شده است. آمار واقعی، نتایج حاصل با استفاده از ضرایب گزارش IPCC را تأیید می‌کند [۲].

بر اساس نتایج حاصل، بزرگ‌ترین منبع انتشار غیر نیروگاهی دی اکسید کربن، کارخانه فولادخوزستان با بیش از ۱/۵ میلیون تن است که ترکیب درصد دی اکسید کربن ورودی به

دودکش آن، ۱۴/۹۵ می‌باشد. پس از فولاد خوزستان نیز پالایشگاه گاز فجر جم و پتروشیمی مارون در رتبه‌های بعدی قرار دارند [۲].

#### ۴- غربالگری مخازن نفتی ایران

بعد از یافتن منبع دی اکسید کربن، یافتن پتانسیل‌های تزریق این گاز در مخازن به منظور ازدیاد برداشت از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. تحقیقات زیادی در خصوص غربالگری مخازن جهت تزریق امتزاجی دی اکسید کربن به منظور ازدیاد برداشت انجام شده که تنها

می‌تواند به‌عنوان راهنمای مناسبی برای شناسایی اولیه مخزن کاربرد داشته باشد. امروزه اکثر مدل‌های مورد استفاده در صنعت برای تزریق دی اکسید کربن، از نوع مدل‌های پیچیده و زمان‌بر بوده و نیازمند حجم زیادی از داده‌های ورودی هستند که استفاده از این گونه مدل‌ها برای غربالگری سریع تعداد زیادی مخزن توصیه نمی‌شود.

در راستای غربالگری سریع مخازن مناسب جهت تزریق امتزاجی دی اکسید کربن نرم‌افزار CO<sub>2</sub>SIM طراحی شد. در این نرم‌افزار با توجه به اهمیت غربالگری سریع و تخمین ضریب بازیافت نفت از مخازن در اثر تزریق امتزاجی دی اکسید کربن، طی مقایسه‌ای مخازن غربال می‌شوند و در قیاس با مشخصه‌های مخازن موفق در زمینه تزریق امتزاجی دی اکسید کربن در دنیا، درصد احتمال موفقیت آنها محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از روش‌های تحلیلی، ضریب بازیافت نهایی مخزن در حجم‌های مختلف تزریق تخمین زده می‌شود. نرم‌افزار CO<sub>2</sub>SIM، با استفاده از اطلاعات قابل دسترسی از بانک اطلاعات مخازن تحت تزریق دی اکسید کربن در جهان و توسط نرم‌افزار Matlab ارائه شده است. داده‌های ورودی به برنامه شامل مشخصات سیال و سنگ مخزن مانند شاخص چگالی نفت، میزان اشباع نفت، تراوایی، تخلخل، دما، فشار، عمق و ضریب DP مخزن می‌باشد.

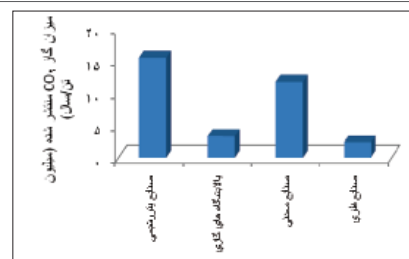
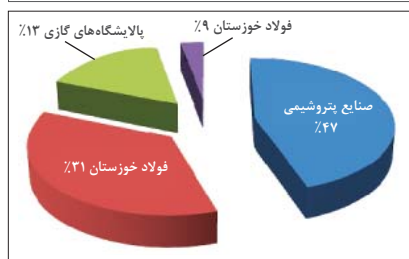
در خروجی این نرم‌افزار ابتدا مشخص می‌شود که آیا مخزن هدف برای تزریق امتزاجی دی اکسید کربن کاندیدای مناسبی است یا خیر و در ادامه رتبه تکنیکی تخصیص داده شده به مخزن که نشان‌دهنده درصد موفقیت آنست نمایش داده می‌شود. در نهایت میزان پیش‌بینی شده ضریب بازیافت نفت در حجم‌های مختلف تزریق گزارش شده است [۳و۶].

با استفاده از نرم‌افزار CO<sub>2</sub>SIM و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج نرم‌افزار CO<sub>2</sub>PROPHET، غربالگری اولیه تعداد

صنایع فلزی	صنایع معدنی	پالایشگاه های گازی	صنایع پتروشیمی
فولاد خوزستان	سیمان داراب، فارس، نو، کارون و...	پالایشگاه فجر جم، پالایشگاه پارس جنوبی فاز-۱	پتروشیمی جم، پتروشیمی مارون، پتروشیمی مروارید (طرح الفین)، پتروشیمی فرسانشیمی، پتروشیمی مارون، پتروشیمی رازی، پتروشیمی لوان، پتروشیمی رازی
۱۵۰۰۰۰۰	۱۳۷۷۵۶۸۴	۱۴۱۷۷۲۷	۴۳۰۱۹۸۸

مخزن	API	اشباع نفت	دما (°F)	ضخامت لایه نفتی	تراوایی متوسط (mD)	تخلخل (%)	فشاردهی مخزن (psi)							
SSH	S4N	S2N	S3D	P2W	P1W	PIR	KIT	D2N	D1N	CIK	B1K	M2N	MIN	A1Z
۱۹/۸	۳۶	۳۰	۴۱/۵	۱۹	۲۱/۷	۱۳	۳۶	۳۶/۱	۳۰/۲	۲۹	۳۰	۲۶	۳۲	۳۴/۷
۰/۹۴	۰/۸	۰/۷۸	۰/۶۵		۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۷	۰/۷
۱۸۰	۱۹۳	۱۷۴		۳۳۸	۱۶۹/۵	۲۰۴	۲۱۲	۲۳۸	۱۹۰	۲۱۵	۱۶۰	۲۱۵	۲۱۵	۱۸۹
۴۰/۳۴	۲۱/۱۲	۲۶/۷۵	۶۹/۱۱		۴۷/۴۲	۱۵۳/۳	۸۷/۲۳	۹۸/۷۴	۲۶/۲۴		۱۵۶	۱۲۲/۸	۱۵۵/۱۵	۱۶۸
۱-۱	۱۶-۴	۱/۷	۵	۱۴	۵۰۰	۳۶۹۱/۷	۵	۰/۵	۰/۵	۵۰۰	۱۰	۱۰	۱۲	۱۰
۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۲	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۲
۳۹۰۰	۳۳۹۰	۳۶۸۰	۴۴۷۳	۵۵۶۲	۴۵۸۹	۴۴۰۰	۴۳۳۱	۵۷۶۸	۳۷۹۳	۴۸۴۳	۳۰۰۰	۵۵۰۰	۴۰۰۰	۳۶۰۰

مخزن	رتبه بندی تکنیکی	بازیافت در نقطه میان شکن	بازیافت در یک حجم تزریق			
CIK	M2N	MIN	KIT	S3D	A1Z	S4N
۴۴/۱۲	۴۶/۳۲	۵۲	۶۱/۹۴	۶۳/۷۸	۷۶/۰۱۷	۷۷/۵۲
۸/۲	۵/۵۵	۶/۸۳	۷/۳۵	۷/۸۹	۸/۴۹	۹/۱۷
۳۵/۹۴	۳۰/۳۰	۲۷/۷	۳۰	۳۴/۴۲	۳۷/۳۱	۴۱/۲۵



شکل ۲ | سهم هر یک از صنایع در انتشار دی اکسید کربن

شکل ۱ | میزان دی اکسید کربن منتشر شده از منابع غیر نیروگاهی

زیادی از مخازن ایران به منظور تزریق امتزاجی دی اکسید کربن انجام شده که اطلاعات برخی از این مخازن در جدول ۶- ارائه شده است. رتبه بندی تکنیکی و میزان بازیافت نفت تعدادی از مخازن بررسی شده با نرم افزار CO<sub>2</sub>SIM در جدول ۷- گزارش شده است [۳ و ۶]. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷- مخازنی که رتبه تکنیکی و میزان بازیافت زیادی دارند می توانند به عنوان کاندیدای جهت تزریق امتزاجی معرفی شوند. نمودارهای دو بعدی و پروفایل بازیافت نفت، مقایسه بین خروجی های دو نرم افزار CO<sub>2</sub>SIM و CO<sub>2</sub>PROPHET مربوط به یکی از مخازن در شکل ۴- نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که رتبه بندی با توجه به مشخصات سیال و سنگ مخزن و تخمین میزان بازیافت نهایی نمی تواند تنها عوامل مهم در انتخاب کاندیدای مناسب جهت تزریق دی اکسید کربن باشد بلکه در کنار مشخصات

تکنیکی مخزن، وجود یک منبع قابل اطمینان و کافی دی اکسید کربن با هزینه های معقول از ابتدایی ترین نیازهای این پروژه است. از میان منابع شناسایی شده نیروگاه بخاری رامین و نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون (با توجه به میزان انتشار دی اکسید کربن و فاصله از مخازن نفتی) می توانند منابع مناسبی از دی اکسید کربن جهت تزریق به دو مخزن کاندیدا شده A1Z و KIT باشند.

### نتیجه گیری

■ از مؤثرترین عوامل در غربالگری نیروگاه های مناسب جهت نصب سیستم بازیافت دی اکسید کربن، می توان به میزان گاز منتشر شده، فاصله نیروگاه تا مخزن هدف، درصد دی اکسید کربن در محصولات احتراق و امکان نصب سیستم بازیافت در نیروگاه اشاره کرد.

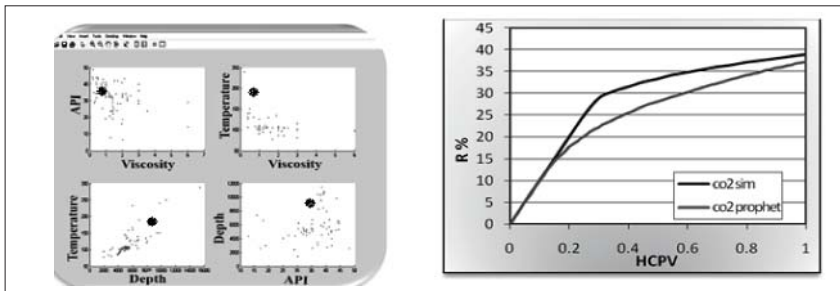
■ بزرگ ترین منابع انتشار نیروگاهی دی اکسید کربن نیروگاه های رامین، کازرون،

شهید منتظری، بیستون و بندرعباس هستند.

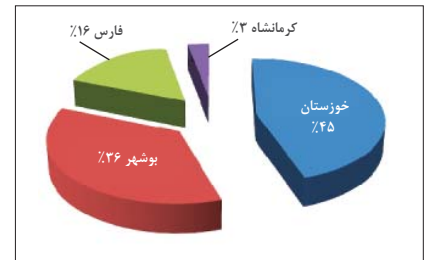
■ با توجه به مناسب بودن تعدادی از مخازن استان های خوزستان و فارس جهت تزریق دی اکسید کربن، در بخش نیروگاهی در استان خوزستان نیروگاه رامین و در استان فارس نیروگاه کازرون جهت احداث واحد جداسازی دی اکسید کربن پیشنهاد می شوند.

■ بزرگ ترین منابع انتشار غیرنیروگاهی دی اکسید کربن شناسایی شده در چهار استان خوزستان، بوشهر، فارس و کرمانشاه، به ترتیب کارخانه فولاد اهواز و پالایشگاه گاز فجر جم هستند.

■ در بخش غیرنیروگاهی در صورتی که مخزن کاندیدا در استان خوزستان قرار گیرد کارخانه فولاد خوزستان به عنوان منبع دی اکسید کربن پیشنهاد می گردد و در صورت انتخاب مخزن در استان فارس کارخانه های سیمان جهت احداث واحدهای جداسازی دی اکسید کربن توصیه می شوند. ■



شکل ۴ | نمودار قیاس دو بعدی کمیت های مخزنی و پروفایل بازیافت مخزن A1Z



شکل ۵ | تولید دی اکسید کربن از منابع غیرنیروگاهی به تفکیک استان

### پانویس ها

<sup>1</sup>Intergovernmental Panel on Climate Change

### منابع

[5] IPCC Special Report on Carbon Capture and Storage, 2005

[6] Kamali, F., Talebian, M., Khosravi, M., Vahidi, A., Roayaei, E., "Recovery Based Ranking Oil Reservoir for CO<sub>2</sub> Miscible Injection", Proceeding at the SHIRAZ/EAGE Conference scheduled 4-6 May 2009 in Shiraz Identify sources of carbon dioxide emission to inject in oil reservoirs for enhanced oil recovery purposes

[۱]. گزارش "تعیین روش و معیارهای غربالگری نیروگاه های کشور جهت بازیافت گاز دی اکسید کربن به منظور ازدیاد برداشت از مخازن نفتی و تهیه بانک اطلاعاتی"، پژوهشکده تولید نیرو، سال ۱۳۸۷

[۲]. گزارش "بررسی دسترسی به منابع غیرنیروگاهی تولید دی اکسید کربن"، راهبرد البرز انرژی، سال ۱۳۸۸

[۳]. "غربالگری مخازن نفتی ایران جهت تزریق امتزاجی دی اکسید کربن"، اکرم وحیدی - مریم خسروی - فاطمه کمالی - عماد رعایایی، مجله انجمن مهندسی شیمی ایران، شماره ویژه ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، سال ۱۳۸۷

[4] Iran 1994 report to UNFCC