

بولتن تخصصی پژوهش

موضوع این شماره:

کاهش انتشار دی اکسید کربن در صنعت پالایش



صاحب امتیاز: شرکت ملی پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران

مدیر مسئول: مهدی دژحسینی

اسامی نویسندگان: سینا صلصالی، عباس ملکی

همکاران صنعتی: محسن مرادمند، آریتا برخوردار، نیما ارست

شماره ۶، پانزدهم آذر ۱۴۰۴

خلاصه مطالب

فناوری‌های CCS/CCUS در جهان به سرعت در حال تبدیل شدن به ابزار اصلی کاهش انتشار در پالایشگاه‌ها هستند و برای حفظ رقابت‌پذیری صادراتی ضروری شده‌اند. در بخش پالایش و بخش ایران، بیشترین پتانسیل کاهش انتشار در چهار نقطه کلیدی است: احتراق ساکن، واحد FCC، واحدهای تولید هیدروژن و فلرینگ این واحدها از نظر فنی و اقتصادی مناسب‌ترین محل‌های استقرار جذب کربن هستند و می‌توانند بیشترین اثر را در کاهش انتشار داشته باشند. به کارگیری CCUS علاوه بر کاهش انتشار، امکان افزایش تولید (از طریق EOR) و تولید محصولات ارزش افزوده از دی‌اکسید کربن را فراهم می‌کند و به حفظ بازارهای صادراتی سوخت‌های ایران در آینده کمک می‌کند.

اهمیت کاهش انتشار CO₂ در صنعت پالایش:

بخش پالایش نفت به عنوان یکی از حیاتی‌ترین حلقه‌های زنجیره ارزش سوخت‌های فسیلی، نقشی تعیین کننده در چشم‌انداز انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. گسترش زیرساخت‌های پالایشی، که عموماً متکی بر فناوری‌های انرژی بر و کربن محور هستند باعث شده این بخش سومین منبع بزرگ انتشار ثابت دی‌اکسید کربن در جهان باشد. در سال ۲۰۱۸، پالایشگاه‌ها حدود ۱۰۳ گیگاتن دی‌اکسید کربن منتشر کردند که معادل ۴ درصد از کل انتشار جهانی است؛ رقمی که با تداوم روند فعلی می‌تواند در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ به مجموع ۱۶/۵ گیگاتن برسد. تمرکز جغرافیایی این انتشارها نیز نشان دهنده تغییر توازن انرژی جهانی است. چین، هند، و خاورمیانه اکنون هاب‌های اصلی انتشار پالایشی اند و تنها سهم چین از انتشار جهانی این صنعت از ۶ درصد در ۲۰۰۰ به ۱۶ درصد در ۲۰۱۸ افزایش یافته است. برای ایران که در پالایش، گاز و نیروگاه‌ها انتشار بالای دی‌اکسید کربن دارد، کاهش انتشار تنها یک اقدام محیط‌زیستی نیست، بلکه برای پایداری انرژی، افزایش تولید و ایجاد ارزش افزوده ضروری است. با سخت‌گیرانه‌تر شدن استانداردهای جهانی سوخت، میزان کربن به شاخص اصلی رقابت در صادرات تبدیل می‌شود؛ بنابراین به کارگیری فناوری‌های کاهش انتشار برای حفظ بازارهای صادراتی و ارتقای استاندارد پالایشگاه‌ها اهمیت راهبردی دارد. این روندها نشان می‌دهد که کنترل و کاهش انتشار در صنعت پالایش نه تنها یک ضرورت اقلیمی بلکه پیش شرط موفقیت در گذار جهانی به سمت سامانه‌های کم انرژی و کربن است.

فناوری‌های جذب و ذخیره کربن:

جذب و ذخیره کربن به عنوان یکی از راه‌حل‌های کلیدی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به دو رویکرد اصلی تقسیم می‌شود: CCS و CCUS در ادامه، هر رویکرد را به طور مجزا بررسی می‌کنیم تا تفاوت‌ها و کاربردهای آن‌ها روشن شود.

۱. جذب و ذخیره سازی کربن^۱

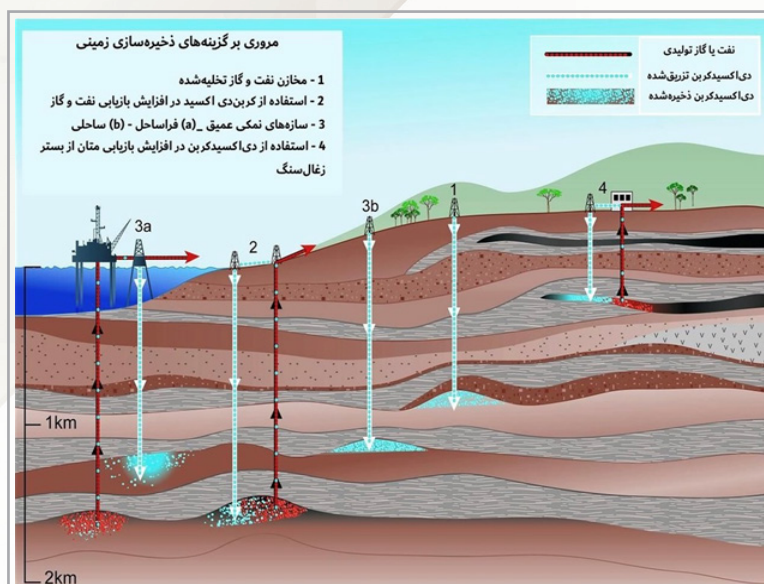
CCS یک فناوری و سامانه‌ی مهندسی کاهش انتشار است که طی آن دی‌اکسید کربن حاصل از منابع صنعتی یا انرژی قبل از ورود به اتمسفر جدا شده و در یک مخزن زمین‌شناختی عمیق ایزوله و حبس می‌شود. شکل (۱) مکان‌های ممکن برای ذخیره در اعماق زمین را نشان می‌دهد.

۲. جذب و ذخیره سازی و استفاده از کربن^۲

CCUS یک چارچوب فناوری است که در آن دی‌اکسید کربن از جریان‌های صنعتی جدا شده و ذخیره، سپس در یک کاربرد صنعتی یا شیمیایی مصرف می‌شود، یا پس از آن در صورت نیاز ذخیره‌سازی زمین‌شناختی انجام می‌گیرد.

1. Carbon Capture and Storage (CCS)

2. Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)



روش‌ها و فناوری‌های جذب دی اکسید کربن:

در جدول (۱) انواع روش‌ها و فناوری‌های جذب دی اکسید کربن شرح داده شده است:

جدول (۱): انواع روش‌ها و فناوری‌های جذب دی اکسید کربن

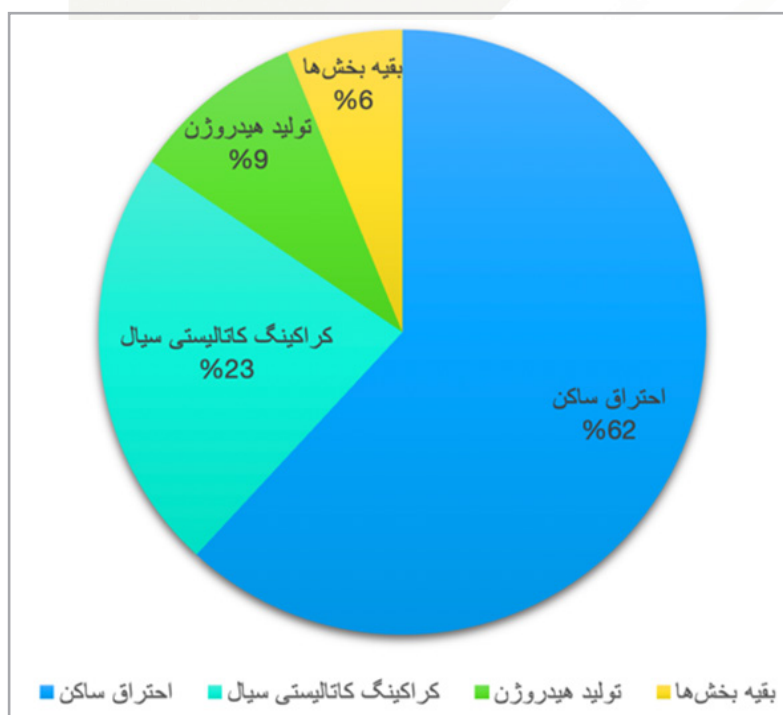
فناوری جذب	شرح کلی	وضعیت فناوری
جذب شیمیایی (Chemical absorption)	یک فرآیند رایج که بر پایه واکنش بین دی اکسید کربن و یک حلال شیمیایی است (مثلاً ترکیبات اتانول آمین). جذب شیمیایی با حلال‌های آمینی پیشرفته‌ترین روش جذب دی اکسید کربن به شمار می‌رود.	دهه‌هاست استفاده می‌شود و هم‌اکنون در تعداد زیادی از پروژه‌های کوچک و بزرگ در تولید برق، تبدیل سوخت و فرایندهای صنعتی به کار می‌رود.
جذب فیزیکی (Physical adsorption/absorption)	بر پایه جذب، جذب سطحی، جداسازی کربونی یا آب‌گیری/فشرده‌سازی است. جذب سطحی فیزیکی از مواد جامد (مثل کربن فعال، آلومینا، زئولیت‌ها و مواد فلزی) استفاده می‌کند و جذب فیزیکی مایع از حلال‌های مخصوص (مثل Selexol یا Rectisol) پس از جذب دی اکسید کربن، آزادسازی با افزایش دما (TSA) یا تغییر فشار (PSA/VSA) انجام می‌شود.	عمدتاً در فرآورش گاز طبیعی و تولید اتانول، متانول، و هیدروژن استفاده می‌شود.
جداسازی اکسی-سوخت (Oxy-fuel separation)	شامل احتراق سوخت با اکسیژن تقریباً خالص و گرفتن مستقیم دی اکسید کربن خروجی است. چون گازهای خروجی عمدتاً دی اکسید کربن و بخار آب‌اند، با آب‌زدایی می‌توان جریان دی اکسید کربن د با خلوص بالا تولید کرد.	در مرحله‌ی نمونه‌سازی است. چند پروژه در نیروگاه‌های زغال‌سوز و تولید سیمان اجرا شده است.
جداسازی غشایی (Membrane separation)	مبتنی بر غشاهای معدنی یا پلیمری با گزینش‌پذیری بالا نسبت به دی اکسید کربن است که اجازه می‌دهند دی اکسید کربن عبور کند اما سایر گازها را نگه دارند.	سطح بلوغ فناوری بسته به سوخت/کاربرد متفاوت است. در فرآورش گاز طبیعی تجاری شده است. مثلاً پروژه بزرگ Petrobras در برزیل. برای گاز دودکش، غشاهای هنوز در حال توسعه‌اند.
کلسیم لوپینگ (Calcium looping)	شامل جذب دی اکسید کربن در دمای بالا در دو راکتور است. در راکتور اول، آهک (CaO) دی اکسید کربن را از گاز می‌گیرد و کربنات کلسیم (CaCO ₃) تشکیل می‌دهد. سپس کربنات کلسیم به راکتور دوم منتقل و تجزیه شده و آهک و دی اکسید کربن خالص تولید می‌شود. آهک مجدداً به راکتور اول بازمی‌گردد.	در مرحله‌ی پایلوت است. در بسترهای سیال زغال‌سوز و تولید سیمان تست شده است.
جداسازی مستقیم (Direct separation)	دی اکسید کربن مستقیماً از فرآیند احتراق یا تولید سیمان، با استفاده از کلسیناسیون ویژه گرفته می‌شود این روش دی اکسید کربن را مستقیماً از سنگ‌آهک آزاد می‌کند بدون اختلاط با گازهای احتراق، و انرژی جداسازی را بسیار کاهش می‌دهد.	در حال تست پایلوت است، مانند پروژه LEILAC در صنایع آهک و سیمان شرکت Heidelberg Cement در بلژیک.

در میان مجموعه فناوری‌های جذب و جداسازی دی‌اکسیدکربن، جذب شیمیایی که معمولاً بر پایه حلال‌های آمینی است تجاری‌تر، پخته‌تر، و گسترده‌ترین فناوری فعلی است و تقریباً در بیشتر پروژه‌های بزرگ کربن که امروز در مقیاس صنعتی فعال‌اند، به‌عنوان گزینه اصلی یا پیش‌فرض استفاده می‌شود. مزیت اصلی این فناوری، راندمان بالا و تطبیق‌پذیری با واحدهای موجود است. یعنی می‌توان بدون بازطراحی کامل فرآیند، از این فرآیند در صنایع نیروگاهی و پالایشگاهی استفاده نمود. هرچند هزینه انرژی نوسازی حلال بالا است، اما بلوغ تکنولوژی، تجربه عملیاتی طولانی، استانداردهای مشخص طراحی، و زنجیره تأمین جهانی آن را به یک روش بالغ و کم‌ریسک برای کاهش سریع انتشار دی‌اکسیدکربن در مقیاس صنعتی تبدیل کرده است. همچنین روش جذب فیزیکی نیز برای شرایط با فشار بالا، بدون واکنش شیمیایی و پرغلظت، کارایی مناسب و تجاری ارائه می‌دهد.

نقاط تولید دی‌اکسیدکربن در پالایشگاه و گزینه‌های نصب:

اصلی‌ترین منابع انتشار دی‌اکسیدکربن در پالایشگاه‌ها شامل احتراق ساکن، واحد FCC، واحدهای تولید هیدروژن (SMR) و دیگر فرآیندهای انرژی‌بر است. بزرگ‌ترین سهم انتشار مربوط به احتراق ساکن است که چهار بخش کوره‌ها، بویلرها، واحدهای تولید برق و سیستم‌های بخار را در بر می‌گیرد؛ این بخش‌ها به‌دلیل بار حرارتی بالا، پتانسیل کامل برای استقرار فناوری‌های جذب کربن دارند. واحد FCC نیز یکی از منابع مهم انتشار است و گاز دودکش آن غلظت بالایی از دی‌اکسیدکربن دارد. در کنار آن، واحد تولید هیدروژن مبتنی بر SMR از متمرکزترین نقاط انتشار پالایشگاه است؛ این واحد به‌دلیل غلظت بالای دی‌اکسیدکربن در جریان فرآیند، گزینه‌ای بسیار مناسب برای اجرای فناوری‌های جذب پیشرفته محسوب می‌شود. همچنین سوزاندن گازهای فلر به‌جای بازیافت، حجم قابل توجهی دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند.

بنابراین، پایش و اولویت‌بندی این چهار حوزه احتراق ساکن، SMR، FCC و فلرینگ برای طراحی راهبردی پروژه‌های کاهش انتشار در پالایشگاه‌ها ضروری است. شکل (۲) سهم بخش‌های مختلف در انتشارات بخش پالایشی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): سهم درصدی بخش‌های مختلف در انتشارات بخش پالایشی جهان - منبع (world resources institute)

ملاحظات یکپارچه‌سازی فناوری CCS با واحدهای پالایشی:

یکپارچه‌سازی فناوری جذب و ذخیره کربن با واحدهای پالایشی مستلزم ارزیابی دقیق ملاحظات فنی، عملیاتی و اقتصادی است تا کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن بدون اختلال در تولید، تأمین انرژی و کیفیت محصولات صورت گیرد. نخستین ملاحظه کلیدی، شناخت

پروفایل انتشار دی اکسید کربن در واحدهای مختلف است؛ چراکه بویلرها، کوره‌های فرآیندی، واحد FCC، ریفرمینگ بخار هیدروژن و دی اکسید کربن ناشی از فلر، هر کدام ویژگی‌های متفاوتی از منظر دبی، دما، و غلظت دی اکسید کربن دارند و به فناوری‌های جذب متفاوتی نیازمندند. قرارگیری CCS در واحدهای احتراقی معمولاً در قالب جذب پسادودکش انجام می‌شود و نیازمند فضای کافی برای برج جذب، برج احیا، و تجهیزات جانبی مانند کولرها و سیستم‌های تصفیه گاز است.

ملاحظه مهم بعدی، ادغام مصرف انرژی جذب کربن با سیستم‌های Utility پالایشگاه است. فرآیند جذب شیمیایی نیازمند بخار کم فشار برای احیای حلال است و این موضوع می‌تواند بر توازن بخار، راندمان واحدهای تولید انرژی و هزینه‌های عملیاتی اثر بگذارد. به همین دلیل، طراحی مجدد شبکه بخار و امکان استفاده از گرمای اتلافی موجود در واحدها از الزامات اصلی یکپارچه‌سازی محسوب می‌شود. در واحدهای تولید هیدروژن (SMR)، یکپارچه‌سازی CCS معمولاً در قالب جذب پیش‌فرآیندی یا بازیابی دی اکسید کربن با غلظت بالا انجام می‌شود و به دلیل ماهیت متمرکز جریان، از نظر هزینه و راندمان نسبت به سایر بخش‌ها مقرون به صرفه‌تر است. ملاحظات مربوط به گازهای فلر هم شامل ترکیب متغیر آن، فشار و دبی نوسانی و انتخاب فناوری جذب مناسب می‌باشد و طراحی واحدهای بازیابی طوری باشد که پس از بازیابی هیدروکربن‌ها، دی اکسید کربن جدا شده و به خطوط فشرده‌سازی و تزریق هدایت شود. از منظر عملیاتی، یکپارچه‌سازی CCS نیازمند بررسی پایداری عملیات، بارهای نوسانی واحدها، محدودیت‌های فضا، دسترسی به آب خنک‌کننده، و ارتباط با واحدهای موجود کنترل آلودگی است. این ادغام همچنین باید با هماهنگی واحد برنامه‌ریزی در پالایشگاه‌ها انجام شود تا از توقف‌های طولانی مدت جلوگیری گردد.

در نهایت، انتخاب محل ذخیره‌سازی یا زیرساخت انتقال دی اکسید کربن و امکان اتصال پالایشگاه نقش مهمی در بعد اقتصادی پروژه دارد. وجود فاصله کم تا مخازن زمین‌شناسی مناسب مانند سفره‌های آب شور عمیق می‌تواند هزینه‌های کل پروژه را کاهش دهد.

سناریوهای پیاده‌سازی در پالایشگاه‌های ایران:

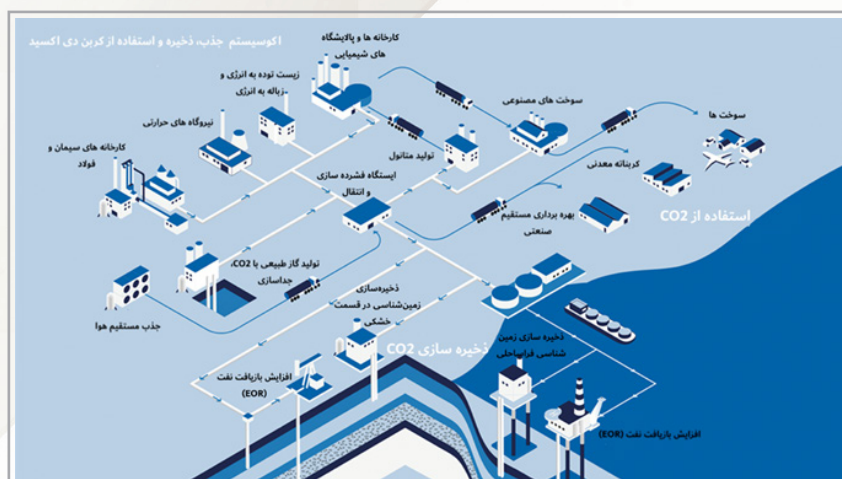
در این بخش به بررسی پیاده‌سازی فناوری جذب کربن در پالایشگاه‌های مختلف پرداخته می‌شود

۱- پالایشگاه‌های مبتنی بر نفت سبک از نظر شدت انتشار دی اکسید کربن در واحدهای احتراق دارای پتانسیل مناسبی بوده و فرآیندهای پیچیده‌ای مانند کراکینگ کاتالیستی یا ریفرمینگ بخار در آن‌ها نسبت به پالایشگاه‌های نفت سنگین محدودتر است و معمولاً دسترسی به گاز طبیعی برای تأمین انرژی دارند. ویژگی کلیدی آن‌ها، امکان پیاده‌سازی مرحله‌ای و کم‌ریسک است. جذب پس از احتراق در بویلرها و هیتر امکان‌پذیرترین مسیر کوتاه‌مدت برای فناوری جذب می‌باشد و می‌توان به دلیل انتشار کمتر نسبت به پالایشگاه‌های نفت سنگین با پایلوت سبک‌تر و کم هزینه‌تر شروع کرد و به دلیل اینکه بیشتر این پالایشگاه‌ها در ایران دور از مخازن نفت و گاز جنوب هستند، پیشنهاد می‌شود دی اکسید کربن جذب شده به پالایشگاه‌های مجاور و اطراف برای تولید محصولات داده شود و فرایند CCUS استفاده شود.

۲- پالایشگاه‌های نفت سنگین دارای فرآیندهای پیچیده‌ی بیشتری مانند کراکینگ کاتالیستی (FCC)، هیدروکراکینگ، و ریفرمینگ بخار نسبت به پالایشگاه‌های نفت سبک هستند به همین دلیل شدت انتشار دی اکسید کربن در این پالایشگاه‌ها بیشتر از پالایشگاه‌های سبک است. این پالایشگاه‌ها به دلیل اینکه بیشتر در جنوب کشور حضور دارند پتانسیل ذخیره مستقیم CCS را دارند و همچنین میتوانند در افزایش EOR مخازن جنوب نقش مهمی داشته باشند.

۳- مجتمع‌های یکپارچه پالایشگاه و پتروشیمی بهترین بستر برای CCUS محسوب می‌شود زیرا امکان بازیافت دی اکسید کربن و تبدیل آن به محصولات شیمیایی، افزایش جذابیت اقتصادی را فراهم می‌کند.

پس پالایشگاه‌های سبک برای شروع کم‌ریسک و در زمان کوتاه‌تر مناسب هستند و پالایشگاه‌های بزرگ بیشترین پتانسیل CCS و افزایش EOR مخازن را دارند و پتروپالایشگاه‌ها بیشتر برای مدل ارزش‌محور؛ تبدیل دی اکسید کربن به متانول و اوره مناسب هستند. شکل (۳) یک اکو سیستم جذب و ذخیره کربن و استفاده کربن را نشان می‌دهد.



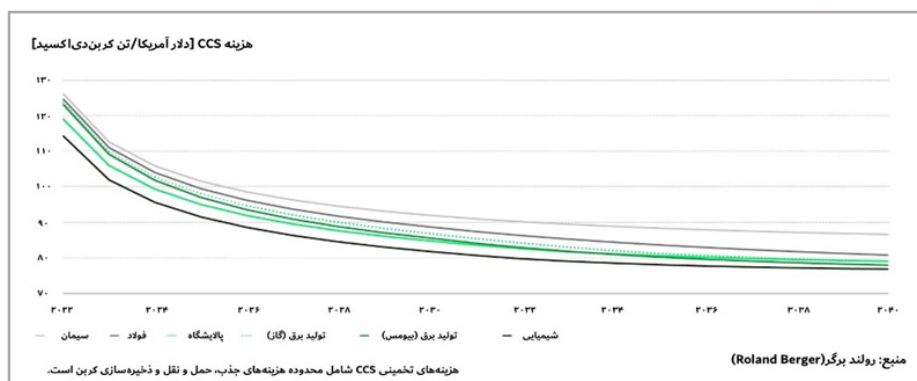
شکل (۳): اکوسیستم جذب و ذخیره و استفاده کربن - مرجع (KSB)

اقتصاد و هزینه، مشوق های اقتصادی:

بررسی روندهای جهانی نشان می دهد CCUS و CCS به سرعت به بخش اصلی راهبردهای مدیریت کربن در صنایع انرژی تبدیل شده اند. کشورهای پیشرو با ترکیب الزامات زیست محیطی و سیاست های حمایتی، از این فناوری ها برای حفظ رقابت پذیری نفت و گاز بهره می برند. برای ایران نیز با توجه به حجم بالای انتشار در پالایش، گاز و نیروگاه ها، CCUS علاوه بر نقش زیست محیطی، ابزاری استراتژیک برای پایداری انرژی، افزایش تولید و ایجاد زنجیره های ارزش جدید است.

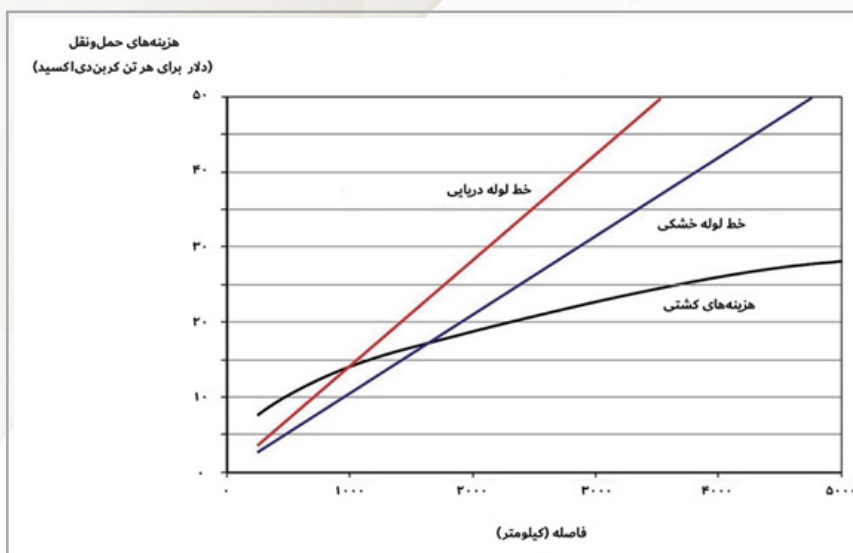
در بخش پالایش و پخش، سهم زیادی از انتشار از واحدهای فرآیندی و احتراق ناشی می شود. به کارگیری CCS می تواند ضمن کاهش انتشار، امکان استفاده از دی اکسید کربن در EOR و تولید محصولات ارزش افزوده را فراهم کند. همچنین با سخت تر شدن استانداردهای جهانی سوخت، میزان کربن تولیدی پالایشگاه ها به عامل تعیین کننده در صادرات تبدیل خواهد شد؛ بنابراین استفاده از CCUS برای حفظ بازارهای صادراتی و ارتقای استاندارد پالایشگاه های کشور ضروری است.

مطالعات Roland Berger نیز نشان می دهد هزینه فناوری CCS با روندی کاهشی حرکت می کند و تا سال ۲۰۳۵ به سطح تعادل و اقتصادی شدن خواهد رسید. شکل (۴) این روند هزینه فناوری را نشان می دهد.



شکل (۴): نمودار زمانی هزینه فناوری - مرجع (Roland Berger)

بیش از ۷۰٪ هزینه های عملیاتی CCS مربوط به مصرف انرژی است علاوه بر این، هزینه جذب دی اکسید کربن بین بخش ها متفاوت است و صناعی مانند آمونیاک و شیمیایی به دلیل غلظت بالای دی اکسید کربن نسبت به نیروگاه ها یا سیمان ارزان تر هستند همچنین اقتصاد مقیاس در حمل و نقل اهمیت دارد که در شکل (۵) هزینه حمل دی اکسید کربن از روش ها مختلف را نشان می دهد.



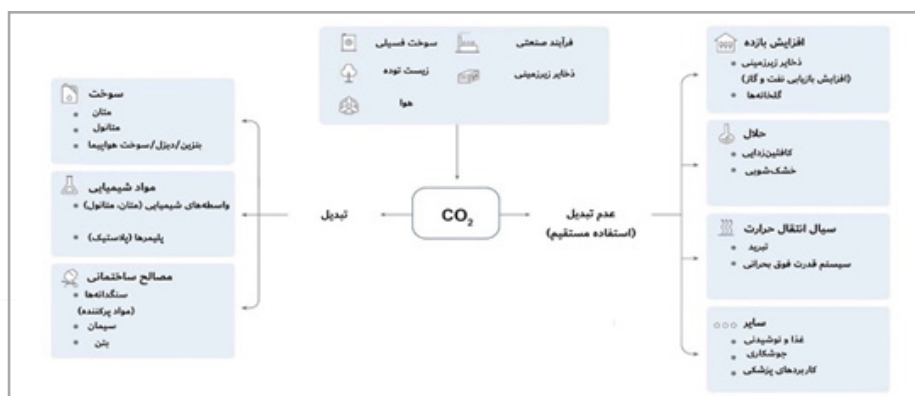
شکل (۵) هزینه حمل دی اکسیدکربن از روش های مختلف را نشان می‌دهد- مرجع (IPCC)

ایجاد سازوکارهای مالی و مشوق‌های سیاستی از جمله امکان تهاتر سرمایه‌گذاری بخش خصوصی با انتشار کمتر، مشارکت شرکت‌های دانش‌بنیان در توسعه فناوری، و ایجاد چارچوب قوانین کربن ذخیره‌شده برای اعتباردهی زیست‌محیطی می‌توانند در سرعت بخشی و مقایسه فناوری اثر بخش باشند.

کاربردها و مسیرهای استفاده دی اکسیدکربن:

۱. بازیابی نفت^۳

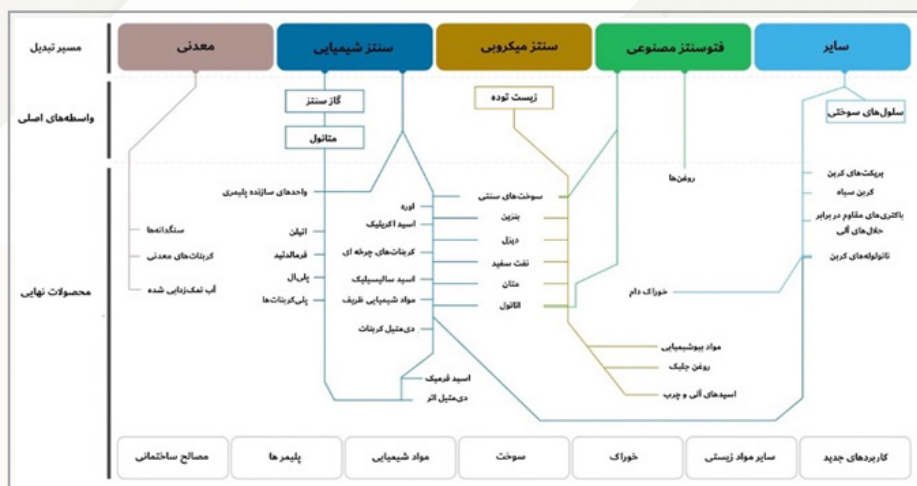
مجموعه‌ای از تکنیک‌های مهندسی مخزن است که پس از بازیابی اولیه (تولید طبیعی) و ثانویه (تزریق آب یا گاز)، با هدف استخراج نفت باقی‌مانده در مخازن، از فرآیندهای شیمیایی، حرارتی، یا گازی استفاده می‌کند و کارایی جابه‌جایی را افزایش می‌دهد. در میان این روش‌ها، سیلاب‌زایی قابل مخلوط با تزریق گاز مانند دی اکسیدکربن، گاز طبیعی یا نیتروژن رایج‌ترین رویکرد است، که با حذف تنش سطحی بین نفت و گاز، حفظ فشار مخزن و کاهش ویسکوزیته نفت به ویژه با دی اکسیدکربن که ارزان‌تر از LPG است جابه‌جایی کامل را ممکن می‌سازد و بر رفتار فازی مخلوط وابسته به دما، فشار و ترکیب نفت تکیه دارد. این روش از سال ۱۹۵۲ مورد تحقیق و ثبت اختراع قرار گرفت و در ۱۹۷۷ به طور تجاری در تگزاس آغاز شد، و اکنون با بیش از ۲۰۰ پروژه در چین و سراسر جهان گسترش یافته است. منابع دی اکسیدکربن عمدتاً از ذخایر زیرزمینی طبیعی یا جذب‌شده از صنایع (مانند پالایشگاه‌های گاز با فناوری CCUS) تأمین می‌شود. شکل (۶) مسیرهای استفاده از دی اکسیدکربن را نشان می‌دهد.



شکل (۶) مسیرهای استفاده از دی اکسیدکربن - مرجع (IEA)

۲. سوخت‌های مصنوعی

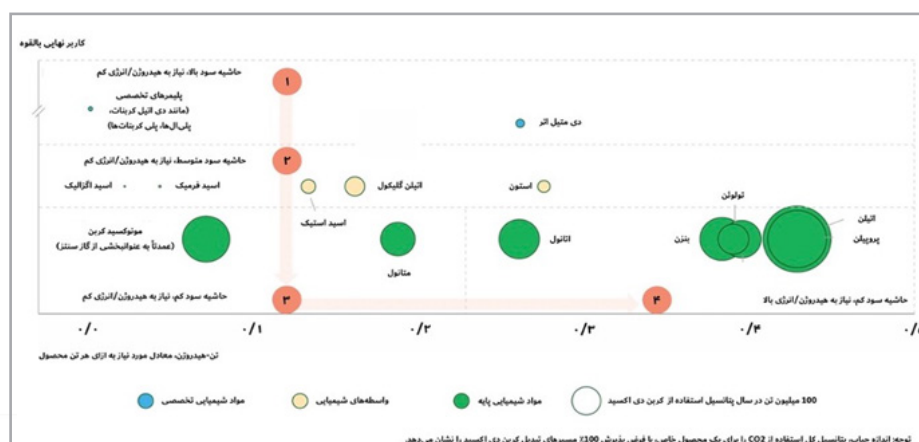
در حوزه سوخت‌ها، دی‌اکسیدکربن می‌تواند به‌عنوان منبع کربن با هیدروژن کم کربن واکنش داده و سوخت‌هایی مانند متانول، متان مصنوعی، بنزین، دیزل و سوخت هواپیما تولید کند. این فرآیندها مشابه مسیرهای کلاسیک سنتز هیدروکربن‌ها (مانند فیشر-تروپش) هستند، با این تفاوت که به‌جای کربن فسیلی از کربن بازافتی استفاده می‌شود. مزیت اصلی این سوخت‌ها تطابق کامل با موتورهای فعلی است. چالش کلیدی، انرژی زیاد موردنیاز برای تبدیل دی‌اکسید کربن به دلیل سطح انرژی پایین آن و در نتیجه هزینه بالای تولید است؛ مگر اینکه برق تجدیدپذیر بسیار ارزان و هیدروژن سبز در مقیاس بزرگ فراهم باشد. شکل (۷) زنجیره دی‌اکسیدکربن در سوخت‌های مصنوعی را نشان می‌دهد



شکل (۷): زنجیره دی‌اکسیدکربن در سوخت‌های مصنوعی - مرجع (BCG)

۳. مواد شیمیایی

در بخش مواد شیمیایی و پلیمرها، دی‌اکسیدکربن به یک خوراک پایه شیمیایی تبدیل می‌شود. فناوری‌های موجود نشان می‌دهند که دی‌اکسیدکربن می‌تواند با هیدروژن، آمونیاک و مواد واکنش‌پذیر دیگر ترکیب شده و موادی مانند متانول، اوره، کربنات‌ها، متان سنتتیک، و واسطه‌های شیمیایی مختلف تولید کند. تولید متانول از دی‌اکسیدکربن یکی از مسیرهای بالغ و صنعتی است و از نظر عملکرد شیمیایی پایداری بالایی دارد، زیرا متانول یک ماده پلتفرمی برای تولید صدها محصول پتروشیمی است. در کنار مواد پایه، فناوری‌های پلیمریزاسیون بر پایه دی‌اکسیدکربن نیز توسعه یافته‌اند. چالش اصلی در این حوزه هزینه انرژی و نیاز به بهبود کاتالیزورهاست، ولی مطالعات Fraunhofer، NREL و مجموعه مرورهای علمی نشان می‌دهد که این بخش یکی از سریع‌ترین حوزه‌های رشد در CCU است و می‌تواند سهم قابل توجهی از بازار مواد شیمیایی را در آینده تأمین کند. شکل (۸) روند بازار تولید محصولات پتروشیمی از دی‌اکسید کربن را نشان می‌دهد.



شکل ۸: روند بازار تولید محصولات پتروشیمی از دی‌اکسیدکربن - مرجع (BCG)

۴. نمونه‌های موفق جهانی در پالایشگاه‌ها:

پروژه Quest در کانادا، متعلق به شرکت Shell، در پالایشگاه Scotford Upgrader واقع شده و با استفاده از جذب شیمیایی، سالانه ۱ میلیون تن دی‌اکسید کربن را جذب و به مخازن زیرزمینی تزریق می‌کند. این پروژه یکی از موفق‌ترین نمونه‌های CCS در جهان است و نشان می‌دهد که جذب شیمیایی با استفاده از آمین‌ها می‌تواند در مقیاس بزرگ پیاده‌سازی شود. پروژه Rotterdam CCS در هلند، با هدف جذب و ذخیره‌سازی ۲.۵ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال تا سال ۲۰۲۶، از جذب شیمیایی و انتقال دی‌اکسید کربن از طریق لوله به مخازن زیرزمینی در دریای شمال استفاده می‌کند. این پروژه نشان‌دهنده یکپارچگی بین صنایع مختلف در یک منطقه صنعتی بزرگ است. پروژه Northern Lights در نروژ، با هدف جذب و ذخیره‌سازی ۱.۵ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال تا سال ۲۰۲۴ و افزایش به ۵ میلیون تن تا سال ۲۰۳۰، از جذب شیمیایی و انتقال دی‌اکسید کربن به مخازن زیرزمینی در دریای شمال استفاده می‌کند. این پروژه نشان‌دهنده همکاری بین صنایع مختلف برای کاهش انتشار کربن است.

۵. چالش‌ها و مسیر اجرا در پالایشگاه‌ها:

چالش‌های فنی:

پیچیدگی فرآیندهای پالایشگاهی باعث می‌شود نصب سیستم‌های CCS بدون ایجاد تداخل عملیاتی دشوار باشد. این سیستم‌ها انرژی زیادی برای جذب و بازسازی دی‌اکسید کربن مصرف می‌کنند و تأمین این انرژی با بازیافت حرارتی یا منابع تجدیدپذیر یکی از چالش‌های اصلی است. همچنین پس از جذب، نیاز به زیرساخت مناسب برای انتقال، ذخیره‌سازی یا استفاده مجدد از دی‌اکسید کربن وجود دارد که هزینه‌بر است.

چالش‌های اقتصادی:

سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید، نصب و راه‌اندازی تجهیزات CCS بسیار بالا است. بدون حمایت‌های مالی، معافیت‌های دولتی و سیاست‌های تشویقی، اجرای این پروژه‌ها از نظر اقتصادی برای بسیاری از پالایشگاه‌ها دشوار است. با این حال، کاهش انتشار و انطباق با مقررات می‌تواند این هزینه را توجیه‌پذیر کند.

چالش‌های عملیاتی:

یکپارچه‌سازی سیستم‌های CCS با تجهیزات موجود از لوله‌کشی تا سیستم‌های کنترل نیازمند مهندسی دقیق و همکاری شرکت‌های تخصصی است. رعایت استانداردهای ایمنی، مدیریت ریسک مواد شیمیایی و آموزش کارکنان برای بهره‌برداری و نگهداری این واحدها ضروری است. کمبود تجربه عملیاتی نیز یکی از موانع مهم در بسیاری از پالایشگاه‌ها محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری:

پیاده‌سازی فناوری‌های جذب و ذخیره کربن و همچنین تکنولوژی جذب، استفاده و ذخیره کربن در پالایشگاه‌ها اگرچه پتانسیل بالایی برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن دارند، اما با چالش‌های فنی، اقتصادی، و عملیاتی متعددی همراه هستند. پیچیدگی فرآیندهای پالایشی، نیاز به انرژی بالا، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، و گستردگی فرآیند مدیریت ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن از جمله موانع اصلی در پیاده‌سازی این تکنولوژی‌ها می‌باشند. با این حال، با انتخاب فناوری مناسب مانند جذب شیمیایی، برنامه‌ریزی دقیق، تأمین مالی مناسب، و یکپارچه‌سازی با زیرساخت‌های موجود می‌توان این چالش‌ها را مدیریت کرد. مسیر اجرایی موفق شامل ارزیابی نقاط تولید دی‌اکسید کربن، طراحی سیستم‌های سازگار با فرآیندهای پالایشی، تأمین مالی از طریق حمایت‌های دولتی و سرمایه‌گذاری خصوصی، و آموزش نیروی انسانی است. همچنین، استفاده مجدد از دی‌اکسید کربن در تولید محصولات با ارزش افزوده مانند اوره یا متانول می‌تواند بازگشت سرمایه را بهبود بخشد.

منابع:

- [1] Tianyang Lei, «Adaptive CO₂ emissions mitigation strategies of global oil refineries in all age groups,» One Earth, 2021.
- [2] Adhish Chandra, «Estimation of CO₂ emissions from petroleum refineries based on the total operable capacity for carbon capture applications,» Chemical Engineering Journal Advances, 2021.
- [3] Zachary Byrum, «A Low-Carbon Future in the US Depends on Decarbonizing Petroleum Refineries,» world resources institute, 2021.
- [4] shell, [Online]. Available: https://www.shell.ca/en_ca/about-us/projects-and-sites/quest-carbon-capture-and-storage-project.html.
- [5] porthos, [Online]. Available: <https://www.porthosco2.nl/en/project/>.
- [6] IEA, «About CCUS,» [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>.
- [7] LunaPhilDe, «The world needs to capture, use, and store gigatons of CO₂: Where and how?,» McKinsey & Company, 2023.
- [8] FransDavid, «CCUS rising?,» Roland Berger, 2025.
- [9] BayoOwolabi, «Fulfilling the Promise of Carbon Capture and Utilization,» BCG, 2024.
- [10] SumitVerma, «Can Carbon Help Decarbonize Chemicals?,» BCG, 2023.
- [11] IEA, «Putting CO₂ to Use Creating value from emissions,» IEA, 2019.
- [12] RubinEdward, Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC, 2018.
- [۱۳] KBS, [Online]. Available: <https://www.ksb.com/es-br/aplicaciones/decarbonization/meet-your-co2-targets-with-solutions-from-ksb>.