

راهنمای عملی محاسبه ردپای کربن

جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS)

سخن رئیس انجمن مدیریت سبز ایران

در دنیای امروز، که تغییرات اقلیمی، بحران انرژی و ناپایداری زیست محیطی چهره تازه‌ای از مسئولیت را بر دوش انسان معاصر نهاده است، دیگر مدیریت منابع تنها به معنای کنترل هزینه یا افزایش بهره‌وری نیست؛ بلکه به معنای بازتعریف رابطه انسان، صنعت و طبیعت است. مدیریت کربن، نماد گذار از نگاه سنتی به محیط زیست به سوی نگاه داده‌محور، سیستمی و انسان‌محور است؛ نگاهی که در بستر نسل چهارم دانش مدیریت و مهندسی سبز یا همان هوش سبز شکل گرفته است.

در این رویکرد، کاهش ردپای کربن تنها یک مأموریت زیست محیطی نیست، بلکه ابزاری است برای افزایش بهره‌وری اقتصادی، بهبود کیفیت زندگی اجتماعی، و ارتقای تاب‌آوری سازمان‌ها در برابر چالش‌های آینده. مدیریت کربن، زمانی معنا می‌یابد که بتواند همزمان سه حوزه کلیدی را دگرگون سازد:

- **اقتصاد:** کاهش هزینه‌ها از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع.
- **جامعه:** خلق فرهنگ مشارکت و مسئولیت‌پذیری سبز در بین کارکنان و شهروندان.
- **محیط زیست:** کاهش واقعی انتشار و بازگرداندن تعادل به چرخه‌های طبیعی.

انجمن مدیریت سبز ایران، از سال ۱۳۸۵ تا امروز، با تکیه بر اندیشه «هوش سبز»، کوشیده است تا میان توسعه و زیست‌پایداری صلح برقرار کند؛ تا نشان دهد که اقتصاد سبز و محیط زیست سالم، دو روی یک سکه‌اند. این کتاب، دروازه‌ای است برای عبور از دانستن به توانستن؛ برای اینکه صنعت ایران نه تنها در مدار رقابت جهانی بماند، بلکه با زبان کربن، زبان تازه توسعه پایدار، سخن بگوید. امروز ما در آغاز عصری ایستاده‌ایم که آینده از آن سازمان‌هایی است که بتوانند «عدد کربن» خود را بشناسند، مدیریت کنند و کاهش دهند. مدیریت کربن، دیگر انتخاب نیست؛ شرط بقاست — شرط تمدن سبز فردا. این راهنما با هدف کمک به صنایع است تا با رویکردی استاندارد و هماهنگ با اهداف جهانی (توافق پاریس و SDGs 2030)، ردپای کربن خود را محاسبه و مدیریت کنند.

با آرزوی ایرانی هوشمند، پایدار و سبز.

رئیس انجمن مدیریت سبز ایران

محمدحسن امامی

پاییز ۴۰۴



چکلیست صنعتی برای محاسبه ردپای کربن

1. پایه گذاری و استانداردسازی

- استفاده از تعاریف و اصطلاحات یکسان در کل سازمان (مثلاً تمایز CCUS و CCS).
- پذیرش و پیاده سازی استانداردهای بین المللی مانند:
 - LCA (ارزیابی چرخه عمر) برای شناسایی انتشار در کل چرخه تولید.
 - TEA (ارزیابی فنی-اقتصادی) برای تحلیل هزینه و منافع.
- تدوین چارچوب های یکپارچه گزارش دهی برای پایش منظم.

2. محاسبه و اندازه گیری انتشار

- اندازه گیری دقیق جریان های گازهای گلخانه ای در مراحل مختلف (تولید، حمل و نقل، استفاده، ذخیره).
- تعیین شاخص های عملکرد فناوری جذب (بازده، مصرف انرژی، قابلیت اطمینان).
- اجرای سیستم های پایش، گزارش دهی و راستی آزمایی مستقل (MRV) برای اطمینان از دقت داده ها.

3. سیاست ها و ابزارهای اقتصادی

- استفاده از مشوق های مالیاتی و بازارهای کربن برای جبران هزینه ها.
- اعمال قوانین سخت گیرانه زیست محیطی برای جلوگیری از نشت یا آسیب های ذخیره سازی.
- توجه ویژه به تأمین مالی پروژه ها (کتاب اشاره می کند سالانه بیش از ۲.۴ تریلیون دلار تا ۲۰۳۰ در سطح جهانی نیاز است).

4. کاربرد در صنایع مختلف

- فولاد و سیمان: جذب و ذخیره انتشارهای ناشی از فرآیندهای پرکربن.
- پتروشیمی: استفاده از CO₂ برای تولید محصولات جدید (CCU).
- نیروگاه ها: کاهش مستقیم انتشار ناشی از سوخت های فسیلی.

5. گزارش دهی و شفافیت

- ایجاد سیستم های گزارش دهی عمومی برای افزایش اعتماد جامعه و سرمایه گذاران.
- هماهنگی گزارش ها با اهداف اقلیمی کشورها در چارچوب توافق پاریس.
- استفاده از شاخص های استاندارد ردپای کربن برای مقایسه عملکرد بین صنایع.

این راهنما ابزار عملی برای صنایع است تا بتوانند:

۱. انتشار کربن خود را به صورت دقیق محاسبه کنند،
۲. راهکارهای کاهش و ذخیره سازی را انتخاب کنند،
۳. و گزارش دهی شفاف و استاندارد برای ذی نفعان ارائه دهند.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

دسته‌بندی موضوعی

فهرست کتاب

بخش اول: مبانی و زمینه‌سازی

۱. مقدمه
۲. تغییرات اقلیمی، گذار عادلانه انرژی و توسعه پایدار
۳. تحولات و تکامل فناوری‌های CCUS: یک مرور

بخش دوم: اقتصاد و مالی

۴. ملاحظات مالی برای توسعه CCUS
۵. ارتباط و نقش CCUS در دستیابی به خالص صفر (Net Zero)

بخش سوم: فناوری و محصولات

۶. محصولات مبتنی بر CCU و مسیرهای فناوری‌ها

بخش چهارم: جامعه و پذیرش اجتماعی

۷. ادراک اجتماعی و پذیرش فناوری‌های CCS و CCU: یک مقایسه با رویکرد جامعه-فناوری

بخش پنجم: حقوق، سیاست و استانداردها

۸. CCUS: تحولات حقوقی، سیاست‌ها و چالش‌ها
۹. مسائل استانداردسازی مرتبط با CCUS

بخش ششم: مطالعات کشوری و منطقه‌ای

۱۰. CCUS در استرالیا
۱۱. CCUS در برزیل
۱۲. CCUS در کانادا
۱۳. CCUS در اندونزی
۱۴. CCUS در چین: دیدگاه‌های حقوقی و مقرراتی



۱۵. CCUS در نیجریه
۱۶. CCUS در هلند
۱۷. CCUS در نروژ
۱۸. CCUS در قطر
۱۹. CCUS در ترینیداد و توباگو
۲۰. CCUS در امارات متحده عربی
۲۱. CCUS در بریتانیا
۲۲. CCUS در ایالات متحده آمریکا

بخش پایانی

۲۳. نتیجه گیری

- سه فصل اول بیشتر مبانی نظری و علمی هستند،
- فصل های ۴ تا ۶ به مالی و فناوری می پردازند،
- فصل ۷ روی ابعاد اجتماعی تمرکز دارد،
- فصل های ۸ و ۹ به حقوق و استانداردها مربوطاند،
- و فصل های ۱۰ تا ۲۲ همگی مطالعات کشوری هستند که تجربه کشورهای مختلف را بررسی می کنند.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

فصل اول: مقدمه

توماس ال. موینزر، ادواردو جی. پیرا و آلبرتو جی. فوسا

۱. تمرکز این کتاب: جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS)

جهان در برهه‌ای تاریخی قرار دارد که اجماع بین‌المللی کشورها بر این است که باید به سمت زندگی و اقتصاد پایدار حرکت کنیم. این اجماع از مجموعه‌ای از عوامل ناشی می‌شود که شامل حقوق و توافقات بین‌المللی است؛ به‌ویژه توافق پاریس سال ۲۰۱۵.

یک دستور کار جهانی برای توسعه پایدار شکل گرفته است که ریشه‌های نخستین آن را می‌توان در گزارش برانتلند سال ۱۹۸۷ یافت. این گزارش مفهوم «توسعه پایدار» را معرفی کرد؛ توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را برآورده می‌سازد بدون آنکه توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهایشان را به خطر بیندازد.

از آن زمان، بسیاری از اسناد و توافقات نام‌های بین‌المللی، به‌ویژه توافق پاریس، این مفهوم را تقویت کرده‌اند و کشورها را به سمت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و حرکت به سوی انتقال انرژی پاک سوق داده‌اند.

در این مسیر، فناوری‌های مربوط به جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS) به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی برای تحقق اهداف اقلیمی و پایداری شناخته می‌شوند. CCUS می‌تواند به کاهش انتشار کربن ناشی از صنایع انرژی‌بر و همچنین تولید محصولات نوآورانه بر پایه دی‌اکسید کربن کمک کند.

در سال‌های اخیر، تمرکز بر دستیابی به اهداف توسعه پایدار و محدود کردن گرمایش زمین به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد (و ترجیحاً ۱.۵ درجه) بر اساس توافق پاریس شدت گرفته است. برای تحقق این هدف، کشورها باید به سرعت انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را کاهش دهند.

با وجود رشد انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش کارایی انرژی، شواهد نشان می‌دهد که سوخت‌های فسیلی همچنان برای دهه‌های آینده بخش مهمی از سبد انرژی جهانی باقی خواهند ماند. این واقعیت چالش بزرگی ایجاد می‌کند: چگونه می‌توان همزمان به استفاده از منابع انرژی موجود ادامه داد و در عین حال، انتشار کربن را به سطحی رساند که با اهداف اقلیمی سازگار باشد؟

در اینجا است که فناوری CCUS نقشی حیاتی پیدا می‌کند. این فناوری اجازه می‌دهد:

- دی‌اکسید کربن حاصل از فرآیندهای صنعتی و نیروگاهی جذب شود.
- سپس یا در تولید محصولات جدید استفاده (Utilization) گردد، یا در سازه‌های زمین‌شناسی مناسب ذخیره (Storage) شود.

از دیدگاه سیاست‌گذاری، CCUS می‌تواند:

- ابزاری برای انتقال عادلانه انرژی باشد، به این معنا که به کشورهای متکی به صنایع سنگین اجازه می‌دهد بدون توقف ناگهانی تولید، مسیر کربن‌زدایی را دنبال کنند.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

- همچنین به صنایع سخت کاهش پذیر (مثل فولاد، سیمان و پتروشیمی) کمک کند که بخشی از انتشار خود را مدیریت کنند.

این کتاب تلاش می کند:

- تصویری جامع از ابعاد فنی، حقوقی، سیاستی و استانداردسازی CCUS ارائه دهد.
- همچنین از منظر بین المللی و منطقه ای نشان دهد که کشورها چگونه در این حوزه عمل کرده اند.

توسعه فناوری های CCUS نه تنها یک موضوع فنی است، بلکه بعد حقوقی، سیاستی و اقتصادی آن نیز اهمیت اساسی دارد. کشورها برای تحقق پروژه های CCUS نیازمند چارچوب های قانونی مشخص هستند؛ زیرا این فناوری شامل فعالیت هایی می شود که ابعاد ملی و بین المللی دارند:

- انتقال و ذخیره سازی دی اکسید کربن اغلب نیازمند هماهنگی میان صنایع مختلف و حتی میان کشورهاست.
- لازم است مقرراتی شفاف در زمینه مالکیت، مسئولیت ها و ریسک های زیست محیطی تدوین گردد.
- همچنین باید سازوکارهایی برای پایش، گزارش دهی و راستی آزمایی (MRV) ایجاد شود تا اعتماد عمومی و بین المللی نسبت به این فناوری تقویت گردد.

از منظر استانداردسازی نیز، بدون وجود معیارهای یکسان، مقایسه نتایج پروژه ها دشوار خواهد بود. به همین دلیل، سازمان های بین المللی مانند ISO و نهادهای ملی، کار روی تدوین استانداردهای مرتبط با CCUS را آغاز کرده اند.

این کتاب در حقیقت بر آن است تا:

۱. این خلأهای قانونی و سیاستی را شناسایی کند،
۲. چارچوب هایی برای رفع آنها پیشنهاد دهد،
۳. و نمونه های موفق از کشورهای مختلف را مورد بررسی قرار دهد.

به بیان دیگر، این کتاب هم یک مرجع علمی و فنی برای محققان و صنایع است و هم یک راهنمای سیاستی و حقوقی برای دولت ها و قانون گذاران.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

نویسندگان تأکید می‌کنند که بحث CCUS تنها محدود به کاهش انتشار نیست، بلکه بخشی از یک تحول گسترده‌تر در نظام انرژی جهانی است. این تحول ابعاد زیر را در بر می‌گیرد:

- **بعد اقتصادی:**
 - سرمایه‌گذاری‌های کلان برای توسعه پروژه‌های CCUS مورد نیاز است.
 - هزینه‌ها باید با استفاده از ابزارهایی مانند اعتبارهای مالیاتی، بازارهای کربن و مشوق‌های دولتی جبران شود.
- **بعد اجتماعی:**
 - موفقیت CCUS وابسته به پذیرش عمومی است. اگر مردم به ایمنی یا سودمندی آن اعتماد نکنند، پروژه‌ها با مقاومت اجتماعی مواجه خواهند شد.
 - شفافیت در اطلاع‌رسانی و مشارکت جوامع محلی نقشی کلیدی در پذیرش اجتماعی دارد.
- **بعد زیست‌محیطی:**
 - CCUS باید به گونه‌ای طراحی شود که خطرات بالقوه‌ای مثل نشت کربن یا آسیب‌های زمین‌شناسی را به حداقل برساند.
 - در عین حال، باید در راستای اهداف اقلیمی (Net-Zero) قرار گیرد و نه صرفاً ابزاری برای ادامه مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی.

این کتاب در واقع به دنبال ایجاد یک زبان مشترک بین رشته‌ای است؛ زبانی که مهندسان، اقتصاددانان، حقوق‌دانان، سیاست‌گذاران و فعالان اجتماعی بتوانند از آن برای گفتگو و همکاری در زمینه CCUS استفاده کنند.

بر این اساس، این کتاب ساختار خود را به گونه‌ای سامان داده است که بتواند تصویری جامع از چالش‌ها و فرصت‌های CCUS ارائه دهد:

۱. بخش‌های آغازین به مبانی و ضرورت CCUS می‌پردازند، از جمله:

- پیوند تغییرات اقلیمی با توسعه پایدار،
- مرور تکامل فناوری‌های CCUS،
- و بررسی مسائل مالی و اقتصادی مرتبط با آن.

۲. بخش‌های میانی موضوعات کلیدی همچون:

- محصولات مبتنی بر CCU،
- پذیرش اجتماعی و نگرش عمومی،
- مسائل حقوقی و سیاستی،
- و چالش‌های استانداردسازی را بررسی می‌کنند.

۳. بخش‌های پایانی بر مطالعات موردی کشورها تمرکز دارند. در این بخش، تجربه کشورهایی مانند استرالیا، برزیل، کانادا، چین، هلند،

نروژ، قطر، امارات، بریتانیا و ایالات متحده بررسی می‌شود. این مطالعات موردی نشان می‌دهند که چگونه شرایط حقوقی، اقتصادی و اجتماعی متفاوت بر پیاده‌سازی CCUS تأثیر می‌گذارند.



گزینه‌های استفاده از CO₂ جذب شدهCO₂ جذب شده می‌تواند در مسیرهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد:

۱. غذا (Food)

- نوشابه‌های گازدار (Carbonated Beverages)
- بسته‌بندی مواد غذایی (Food Packaging)
- بیهوشی (Anaesthesia)
- رشد گیاهان در گلخانه‌ها (Greenhouse Systems)

۲. سوخت‌ها (Fuels)

- متانول (Methanol)
- مونوکسید کربن (CO)
- متان (Methane)
- سوخت‌های مایع (Liquid Fuels)

۳. مواد شیمیایی (Chemicals)

- کربنات‌ها (Carbonates)
- کود (Fertilizer)
- مواد شیمیایی ثانویه (Secondary Chemicals)

۴. کاربردهای صنعتی و ساختمانی

- استفاده در مصالح ساختمانی (Mineral Carbonation, Aggregates, Cement, Building Materials)
- افزایش بازیافت نفت (EOR)
- افزایش بازیافت گاز (EGR)
- ذخیره انرژی زمین گرمایی پیشرفته (EGS)
- کربناتاسیون مواد معدنی (Mineral Carbonation)

۵. کاربردهای زیست محیطی و ایمنی

- اطفای حریق (Fire Extinguishers)
- تولید آب گازدار (Carbonated Water)
- کاهش آلودگی اورانیوم (Uranium Tailings Neutralization)



- کاربرد در باتری‌ها (Battery Products)

۶. دیگر کاربردها

- سردکننده‌ها و گازهای تبریدی (Refrigeration, Dry Ice)
- آب گازدار
- ذخیره‌سازی زمین‌شناسی بلندمدت

CO₂ جذب‌شده یک پسماند صرف نیست؛ بلکه یک منبع ارزشمند برای تولید سوخت‌ها، مواد شیمیایی، مصالح ساختمانی، کاربردهای پزشکی، صنایع غذایی و حتی افزایش بهره‌برداری نفت و گاز است.

به این ترتیب، کتاب هم یک نگاه جهانی و نظری دارد و هم نمونه‌های ملی و عملی را پوشش می‌دهد تا برای طیف وسیعی از مخاطبان — از دانشگاهیان گرفته تا سیاست‌گذاران و فعالان صنعتی — قابل استفاده باشد.

این کتاب علاوه بر ارائه دانش و تحلیل، به دنبال ایجاد پل ارتباطی میان حوزه‌های مختلف است. هدف آن این است که:

- برای پژوهشگران دانشگاهی بستری فراهم کند تا بتوانند به شیوه‌ای جامع‌تر به مطالعه CCUS بپردازند.
- برای سیاست‌گذاران و قانون‌گذاران ابزارهایی فراهم آورد تا تصمیمات خود را بر پایه شواهد علمی و تجربیات جهانی اتخاذ کنند.
- برای صنعت و کسب‌وکارها راهکارهایی ارائه دهد تا همسو با اهداف توسعه پایدار و کاهش انتشار، مزیت‌های رقابتی خود را نیز حفظ کنند.

نویسندگان خاطرنشان می‌کنند که CCUS نه یک «راه‌حل جادویی» برای تمامی مشکلات اقلیمی است و نه جایگزین کامل انرژی‌های تجدیدپذیر؛ بلکه بخشی مهم از جعبه‌ابزار جهانی برای مقابله با تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود.

در نهایت، این فصل مقدمه‌ای است بر اینکه چرا CCUS در دستور کار جهانی قرار گرفته و چگونه می‌توان آن را از منظر فنی، حقوقی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بررسی و به کار گرفت.

فصل دوم: تغییرات اقلیمی، گذار عادلانه انرژی و توسعه پایدار

توماس ال. موینزر و کنستانتینوس یالوریدیس

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشری در قرن بیست و یکم مطرح است. آثار آن نه تنها در محیط زیست، بلکه در اقتصاد، سلامت، امنیت غذایی و ثبات اجتماعی نیز احساس می‌شود.

جامعه جهانی برای مقابله با این بحران به راهبردهایی نیاز دارد که همزمان سه بعد را پوشش دهند:

۱. **پایداری زیست محیطی** (کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفاظت از منابع طبیعی)،
۲. **عدالت اجتماعی** (اطمینان از اینکه گروه‌های آسیب‌پذیر هزینه‌های گذار را متحمل نمی‌شوند)،
۳. **رشد اقتصادی پایدار** (توسعه‌ای که فرصت‌های شغلی و رفاه را حفظ کند).

مفهوم **گذار عادلانه انرژی (Just Energy Transition)** دقیقاً در همین راستا شکل گرفته است. این مفهوم بر این نکته تأکید دارد که تغییر مسیر از سوخت‌های فسیلی به سمت انرژی‌های پاک باید به گونه‌ای باشد که کارگران، جوامع محلی و کشورهای در حال توسعه نیز از مزایای آن بهره‌مند شوند و نه اینکه صرفاً متحمل زیان شوند.

در این فصل، نویسندگان به بررسی پیوند میان تغییرات اقلیمی، گذار عادلانه انرژی و توسعه پایدار می‌پردازند و نقش فناوری‌هایی مانند **CCUS** را در این فرآیند تحلیل می‌کنند.

توافق پاریس (۲۰۱۵) نقطه عطفی در تاریخ همکاری‌های بین‌المللی برای مقابله با تغییرات اقلیمی بود. این توافق بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد (و ترجیحاً ۱.۵ درجه) تأکید دارد.

اما برای رسیدن به این هدف، تنها **تحول در فناوری** کافی نیست؛ بلکه نیاز به **تغییرات ساختاری در نظام‌های اجتماعی و اقتصادی** وجود دارد. به‌ویژه باید اطمینان حاصل شود که هزینه‌های این گذار به‌طور ناعادلانه بر دوش کشورهای فقیر یا جوامع آسیب‌پذیر قرار نمی‌گیرد.

مفهوم **گذار عادلانه انرژی** از همین دغدغه نشأت می‌گیرد. این مفهوم به سازمان‌ها و دولت‌ها یادآور می‌شود که:

- تغییرات در حوزه انرژی باید **فراگیر** باشد،
- باید فرصت‌های شغلی جدید ایجاد گردد،
- و سیاست‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که از بروز نابرابری‌های جدید جلوگیری شود.

در این میان، **فناوری CCUS** می‌تواند یک ابزار مکمل ارزشمند باشد. این فناوری به صنایع انرژی‌بر و کشورهای متکی به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند تا ضمن حرکت به سمت آینده‌ای کم‌کربن، از شوک‌های ناگهانی اقتصادی و اجتماعی جلوگیری کنند.



گذار عادلانه و اهداف توسعه پایدار

گذار عادلانه انرژی به طور مستقیم با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد (SDGs) پیوند دارد. به ویژه:

- هدف ۷: انرژی پاک و قابل دسترس → دسترسی همگانی به انرژی‌های مطمئن، پایدار و نوین.
- هدف ۸: رشد اقتصادی و اشتغال شایسته → تضمین اینکه تغییر در ساختار انرژی به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید منجر شود.
- هدف ۱۳: اقدام فوری برای مقابله با تغییرات اقلیمی → کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش تاب‌آوری در برابر آثار اقلیم.

در این چارچوب، گذار عادلانه نه تنها به کاهش انتشار کمک می‌کند، بلکه تضمین می‌کند که این فرایند با حفظ عدالت اجتماعی و اقتصادی همراه باشد.

همچنین باید توجه داشت که شرایط کشورها متفاوت است:

- کشورهای توسعه یافته ابزارهای مالی و نهادی بیشتری برای اجرای این گذار دارند.
- کشورهای در حال توسعه، به ویژه آنهایی که اقتصادشان متکی بر سوخت‌های فسیلی است، نیازمند حمایت‌های مالی و فناوریانه بین‌المللی هستند.

از این منظر، فناوری‌هایی مانند CCUS می‌توانند به عنوان پلی میان اهداف زیست‌محیطی و واقعیت‌های اقتصادی عمل کنند؛ یعنی ضمن کمک به کاهش انتشار، به کشورها اجازه دهند مسیر توسعه‌ی خود را نیز ادامه دهند.

پیوند میان عدالت، سیاست و فناوری

گذار انرژی صرفاً یک تغییر فنی یا اقتصادی نیست، بلکه یک فرایند عمیق اجتماعی و سیاسی است. به همین دلیل، در طراحی سیاست‌ها باید توجه ویژه‌ای به عناصر زیر داشت:

۱. عدالت بین‌نسلی:

- تصمیم‌های امروز نباید آینده نسل‌های بعدی را قربانی کند.
- به همین دلیل است که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کاهش کربن، از جمله CCUS، در حکم نوعی مسئولیت اخلاقی در برابر آیندگان تلقی می‌شود.

۲. عدالت درون‌نسلی:

- هزینه‌های گذار نباید تنها بر دوش گروه‌های خاص (مانند کارگران صنایع فسیلی یا کشورهای فقیرتر) بیفتد.
- بنابراین نیاز به سیاست‌های حمایتی و جبرانی برای این گروه‌ها وجود دارد.

۳. نقش فناوری CCUS:

- این فناوری می‌تواند به صنایع پرکربن اجازه دهد تا مسیر کربن‌زدایی تدریجی را طی کنند.
- همچنین فرصتی برای توسعه بازارهای جدید بر پایه استفاده از دی‌اکسید کربن (مانند تولید سوخت‌ها و مصالح نوین) فراهم می‌آورد.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

به این ترتیب، CCUS می‌تواند ابزاری برای توازن میان عدالت اجتماعی و ضرورت زیست‌محیطی باشد و از بروز شکاف‌های جدید اقتصادی و اجتماعی در فرایند گذار جلوگیری کند.

چارچوب‌های بین‌المللی و منطقه‌ای

پیشبرد گذار عادلانه انرژی و توسعه فناوری‌هایی مانند CCUS نیازمند چارچوب‌های حقوقی و نهادی قوی است. در سطح بین‌المللی:

- توافق پاریس (۲۰۱۵) نقش محوری ایفا می‌کند. این توافق کشورها را متعهد می‌سازد که «مشارکت‌های ملی تعیین‌شده» (NDCs) خود را به‌طور دوره‌ای ارائه و به‌روز کنند و از این طریق، مسیر کاهش انتشار خود را مشخص نمایند.
- اهداف توسعه پایدار سازمان ملل (SDGs) به‌عنوان نقشه راهی جامع، جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی گذار انرژی را به هم پیوند می‌دهد.
- نهادهای منطقه‌ای (مانند اتحادیه اروپا) نیز سیاست‌ها و مقررات خاص خود را برای ترویج انرژی‌های پاک و کربن‌زدایی تدوین کرده‌اند.

این چارچوب‌ها به کشورها کمک می‌کنند تا:

۱. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک، از جمله CCUS، را افزایش دهند.
۲. معیارها و استانداردهای مشترکی برای پایش و گزارش‌دهی انتشار داشته باشند.
۳. و سازوکارهایی برای انتقال فناوری و حمایت مالی از کشورهای در حال توسعه فراهم آورند.

بنابراین، CCUS باید نه به‌عنوان یک راهکار مجزا، بلکه به‌عنوان بخشی از یک رژیم حقوقی و سیاستی جهانی در نظر گرفته شود.

چالش‌های پیش‌رو

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، تحقق گذار عادلانه انرژی و بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند CCUS با چالش‌های مهمی روبه‌رو است:

۱. چالش‌های مالی

- اجرای پروژه‌های CCUS بسیار پرهزینه است.
- کشورهای در حال توسعه اغلب منابع مالی کافی ندارند و بدون کمک بین‌المللی، اجرای چنین پروژه‌هایی دشوار خواهد بود.

۲. چالش‌های فناورانه

- برخی فناوری‌های CCUS هنوز در مراحل اولیه توسعه یا آزمایشی قرار دارند.
- نیاز به سرمایه‌گذاری‌های بیشتر برای افزایش مقیاس و کاهش هزینه‌ها وجود دارد.

۳. چالش‌های حقوقی و سیاستی

- نبود قوانین مشخص درباره مالکیت، مسئولیت و ایمنی ذخیره‌سازی کربن در بسیاری از کشورها.
- ناهماهنگی در مقررات بین‌المللی که مانع همکاری‌های فرامرزی می‌شود.

۴. چالش‌های اجتماعی

- بی‌اعتمادی عمومی نسبت به ایمنی و پایداری CCUS.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

○ نگرانی از اینکه CCUS بهانه‌ای برای ادامه مصرف سوخت‌های فسیلی باشد، نه یک راهکار واقعی برای مقابله با تغییرات اقلیمی.

این بخش نشان می‌دهد که گذار عادلانه انرژی و CCUS تنها در صورتی موفق خواهند بود که چالش‌های مالی، فناورانه، حقوقی و اجتماعی به‌طور همزمان مورد توجه قرار گیرند.

فرصت‌ها و مسیر پیش رو

با وجود چالش‌ها، گذار عادلانه انرژی و به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند CCUS فرصت‌های ارزشمندی نیز ایجاد می‌کنند:

۱. فرصت‌های نوآوری و رشد اقتصادی

- توسعه فناوری‌های جذب و استفاده از کربن می‌تواند به ایجاد صنایع و بازارهای جدید منجر شود.
- تولید محصولات نوین بر پایه CO₂ (مانند سوخت‌های مصنوعی، مصالح ساختمانی و پلیمرها) می‌تواند ارزش افزوده اقتصادی بالایی ایجاد کند.

۲. ایجاد اشتغال و توسعه منطقه‌ای

- پروژه‌های CCUS و انرژی‌های پاک می‌توانند فرصت‌های شغلی جدید در مناطق صنعتی و جوامعی که پیش‌تر به صنایع فسیلی وابسته بودند، فراهم کنند.
- این امر به کاهش بیکاری و بازآفرینی اقتصادی در مناطق آسیب‌پذیر کمک خواهد کرد.

۳. تقویت همکاری‌های بین‌المللی

- مقابله با تغییرات اقلیمی یک مسئله جهانی است و نیازمند همکاری میان دولت‌ها، نهادهای بین‌المللی و بخش خصوصی است.
- CCUS می‌تواند بستری برای انتقال فناوری، سرمایه‌گذاری مشترک و تبادل دانش میان کشورها باشد.

۴. تقویت عدالت اجتماعی و زیست‌محیطی

- با سیاست‌گذاری درست، می‌توان اطمینان یافت که گذار انرژی منجر به افزایش نابرابری‌ها نمی‌شود.
- جوامع محلی و گروه‌های آسیب‌پذیر می‌توانند از منافع توسعه پایدار سهم بیشتری داشته باشند.

نتیجه‌گیری اولیه

گذار عادلانه انرژی و فناوری‌هایی مانند CCUS باید در چارچوبی جامع و یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند؛ چارچوبی که ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و حقوقی را در کنار هم ببیند.

- از نظر زیست‌محیطی: این فناوری‌ها می‌توانند به کاهش انتشار کربن و دستیابی به اهداف اقلیمی کمک کنند.
- از نظر اجتماعی: اگر سیاست‌ها به‌درستی طراحی شوند، گذار انرژی می‌تواند به ایجاد اشتغال، کاهش نابرابری‌ها و افزایش پذیرش عمومی منجر شود.
- از نظر اقتصادی: CCUS و انرژی‌های پاک فرصت‌هایی برای رشد و نوآوری فراهم می‌آورند که در صورت حمایت مالی و نهادی، می‌تواند موتور توسعه آینده باشند.
- از نظر حقوقی و سیاستی: چارچوب‌های قانونی ملی و بین‌المللی نقش اساسی در تضمین ایمنی، شفافیت و هماهنگی این فرایند دارند.



در نهایت، گذار عادلانه انرژی به ویژه در کشورهای در حال توسعه نیازمند همکاری و حمایت بین‌المللی است. انتقال فناوری، سرمایه‌گذاری مشترک و کمک‌های مالی می‌تواند شکاف میان کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه را کاهش دهد.

این بخش فصل دوم را با این نکته به پایان می‌رساند که:

CCUS نباید به عنوان یک هدف مستقل، بلکه باید به عنوان بخشی از یک استراتژی کلان جهانی برای توسعه پایدار و عدالت اقلیمی در نظر گرفته شود.

پیوند سیاست‌های اقلیمی با توسعه پایدار

در سال‌های اخیر، سیاست‌های اقلیمی نه تنها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته‌اند، بلکه به طور فزاینده‌ای با دستور کار توسعه پایدار همسو شده‌اند. این همسویی به دلایل زیر اهمیت دارد:

۱. یکپارچگی اهداف جهانی

- معاهدات و توافقات بین‌المللی مانند توافق پاریس و اهداف توسعه پایدار سازمان ملل (SDGs) مکمل یکدیگرند.
- هر دو بر ضرورت کاهش انتشار و تضمین رشد اقتصادی و اجتماعی پایدار تأکید دارند.

۲. هماهنگی میان سیاست‌ها

- سیاست‌های انرژی، اقلیم، صنعت و رفاه اجتماعی باید در کنار هم دیده شوند.
- برای نمونه، تصمیم در مورد کاهش مصرف زغال‌سنگ باید همزمان با برنامه‌هایی برای ایجاد شغل در جوامع وابسته به آن همراه باشد.

۳. نقش فناوری‌های نوآورانه

- فناوری‌هایی مانند CCUS، انرژی‌های تجدیدپذیر، و بهبود بهره‌وری انرژی ابزارهای کلیدی برای تحقق این هماهنگی هستند.
- این فناوری‌ها می‌توانند پل ارتباطی میان سیاست اقلیمی و اهداف توسعه پایدار باشند.

به طور خلاصه، سیاست‌های اقلیمی در صورتی موفق خواهند بود که نه تنها به کاهش انتشار توجه کنند، بلکه به ابعاد اجتماعی و اقتصادی توسعه پایدار نیز پاسخ دهند.

نقش عدالت در سیاست‌گذاری اقلیمی

تجربه نشان داده است که سیاست‌های اقلیمی اگر بدون در نظر گرفتن عدالت اجتماعی و اقتصادی طراحی شوند، با مقاومت جدی مواجه خواهند شد. در واقع:

- اگر هزینه‌های گذار تنها بر دوش کارگران صنایع فسیلی یا جوامع محلی وابسته به این صنایع بیفتد، اعتماد عمومی نسبت به سیاست‌های اقلیمی کاهش می‌یابد.
- اگر کشورهای در حال توسعه احساس کنند که بار اصلی کاهش انتشار بر دوش آنها گذاشته شده، در حالی که کشورهای ثروتمند همچنان از مزایای تاریخی صنعتی شدن خود استفاده می‌کنند، همکاری بین‌المللی تضعیف می‌شود.



اینجاست که مفهوم گذار عادلانه انرژی (Just Transition) اهمیت پیدا می کند. این مفهوم بر اصول زیر تأکید دارد:

۱. تقسیم عادلانه هزینه ها و منافع در داخل کشورها و در سطح بین المللی.
۲. حمایت از گروه های آسیب پذیر از طریق آموزش مجدد، ایجاد شغل و سرمایه گذاری در جوامع محلی.
۳. تأمین مالی پایدار از سوی کشورهای توسعه یافته برای کمک به کشورهای در حال توسعه در مسیر کربن زدایی.

به این ترتیب، عدالت به عنوان پایه مشروعیت سیاست های اقلیمی عمل می کند. بدون عدالت، حتی بهترین فناوری ها و سیاست ها نیز با چالش در اجرا روبه رو خواهند شد.

جایگاه فناوری CCUS در گذار عادلانه

فناوری های جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS) می توانند نقش ویژه ای در تحقق گذار عادلانه ایفا کنند. این نقش در چند سطح قابل بررسی است:

۱. در سطح ملی
 - کشورهایی که به صنایع انرژی بر (مانند فولاد، سیمان و پتروشیمی) وابسته هستند، می توانند از CCUS برای کاهش انتشار بدون توقف ناگهانی تولید استفاده کنند.
 - این امر به آنها اجازه می دهد همزمان هم به تعهدات اقلیمی خود پایبند باشند و هم از آسیب های اقتصادی شدید جلوگیری کنند.
۲. در سطح بین المللی
 - CCUS می تواند ابزاری برای همکاری میان کشورها باشد؛ به ویژه از طریق انتقال فناوری، سرمایه گذاری مشترک و استانداردسازی بین المللی.
 - این همکاری ها به کشورهایی که ظرفیت فناورانه یا مالی کمتری دارند کمک می کند تا در مسیر کربن زدایی باقی بمانند.
۳. از منظر اجتماعی
 - اگر پروژه های CCUS همراه با سیاست های حمایتی برای کارگران و جوامع محلی اجرا شوند، می توانند به جای تهدید، فرصتی برای اشتغال و توسعه منطقه ای باشند.
 - نمونه های موفق جهانی نشان داده اند که پروژه های CCUS می توانند به ایجاد زیرساخت های جدید و انتقال مهارت ها منجر شوند.

در مجموع، CCUS نباید صرفاً به عنوان یک ابزار فنی دیده شود، بلکه باید بخشی از راهبرد کلان عدالت اقلیمی و اجتماعی باشد.

سیاست های حمایتی برای موفقیت CCUS

برای اینکه CCUS بتواند به عنوان بخشی از گذار عادلانه عمل کند، نیازمند سیاست های حمایتی کارآمد است. این سیاست ها شامل موارد زیر می شود:



۱. مشوق‌های مالی و اقتصادی

- دولت‌ها می‌توانند با اعطای اعتبارهای مالیاتی، یارانه‌ها و حمایت‌های سرمایه‌گذاری، اجرای پروژه‌های CCUS را تسهیل کنند.
- ایجاد و توسعه بازارهای کربن (Carbon Markets) نیز می‌تواند انگیزه اقتصادی برای جذب و ذخیره کربن فراهم آورد.

۲. چارچوب‌های حقوقی شفاف

- قوانین باید به‌طور دقیق مالکیت، مسئولیت‌ها و ریسک‌های مرتبط با ذخیره‌سازی کربن را تعریف کنند.
- وجود سازوکارهای حقوقی روشن، از بروز منازعات حقوقی جلوگیری کرده و اعتماد سرمایه‌گذاران را افزایش می‌دهد.

۳. پایش، گزارش‌دهی و راستی‌آزمایی (MRV)

- برای افزایش اعتماد عمومی، لازم است انتشار و ذخیره‌سازی کربن به‌طور شفاف پایش و گزارش شود.
- نهادهای مستقل می‌توانند با انجام راستی‌آزمایی به شفافیت و اعتبار این گزارش‌ها کمک کنند.

۴. مشارکت جوامع محلی

- بدون جلب اعتماد و همراهی مردم، هیچ پروژه‌ای موفق نخواهد شد.
- اطلاع‌رسانی شفاف، مشارکت در تصمیم‌گیری و ارائه منافع مستقیم به جوامع محلی (مانند ایجاد شغل) ضروری است.

اهمیت همکاری‌های بین‌المللی

از آنجا که تغییرات اقلیمی مرز نمی‌شناسد، هیچ کشوری به‌تنهایی قادر به حل این بحران نخواهد بود. در این زمینه، همکاری‌های بین‌المللی نقشی کلیدی در موفقیت‌گذار عادلانه و توسعه CCUS دارد:

۱. انتقال فناوری

- کشورهای توسعه‌یافته می‌توانند با به‌اشتراک‌گذاری دانش فنی و تجربیات خود، به کشورهای در حال توسعه کمک کنند تا سریع‌تر فناوری‌های CCUS را به‌کار گیرند.

۲. سرمایه‌گذاری مشترک

- پروژه‌های بزرگ CCUS معمولاً نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان هستند.
- مشارکت شرکت‌ها و دولت‌های چند کشور می‌تواند منابع مالی لازم را تأمین کند و ریسک پروژه‌ها را کاهش دهد.

۳. استانداردسازی بین‌المللی

- وجود استانداردهای جهانی برای پایش، گزارش‌دهی و ایمنی پروژه‌های CCUS باعث می‌شود که نتایج قابل مقایسه و معتبر باشند.
- این استانداردها همچنین به توسعه بازارهای کربن جهانی کمک می‌کنند.

۴. عدالت شمال-جنوب

- کشورهای در حال توسعه استدلال می‌کنند که کشورهای صنعتی مسئول اصلی انتشار تاریخی هستند.
- بنابراین، عدالت ایجاب می‌کند که کشورهای ثروتمند در تأمین مالی و انتقال فناوری به کشورهای فقیرتر نقش فعالی ایفا کنند.



نقش نهادهای منطقه‌ای و ملی

علاوه بر همکاری‌های بین‌المللی، نهادهای منطقه‌ای و ملی نیز در پیشبرد گذار عادلانه و توسعه CCUS نقشی حیاتی دارند:

۱. اتحادیه اروپا (EU)

- یکی از پیشگامان در سیاست‌های اقلیمی و انرژی پاک است.
- اتحادیه اروپا با ایجاد نظام تجارت انتشار (ETS) و حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی، مسیر توسعه CCUS را هموار کرده است.

۲. ایالات متحده آمریکا

- با ابزارهایی مانند اعتبار مالیاتی Q ۴۵ مشوق‌های اقتصادی قوی برای سرمایه‌گذاری در CCUS فراهم آورده است.
- همچنین از طریق وزارت انرژی (DOE) سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در تحقیق و توسعه انجام داده است.

۳. کشورهای در حال توسعه

- برخی کشورها مانند چین، هند و برزیل به‌طور جدی در حال آزمایش و توسعه پروژه‌های CCUS هستند.
- با این حال، این کشورها همچنان به حمایت‌های مالی و فناورانه بین‌المللی نیاز دارند تا بتوانند ظرفیت‌های خود را ارتقا دهند.

۴. نهادهای ملی

- دولت‌ها می‌توانند از طریق قوانین، سیاست‌های مالی و برنامه‌های آموزشی، شرایط لازم برای پیاده‌سازی CCUS را در سطح ملی فراهم کنند.
- همکاری نزدیک میان دولت، صنعت و دانشگاه‌ها برای موفقیت این پروژه‌ها ضروری است.

هم‌افزایی سیاست‌ها و نقش CCUS

برای تحقق گذار عادلانه، لازم است سیاست‌های مختلف در حوزه‌های اقلیم، انرژی، صنعت، اشتغال و رفاه اجتماعی به‌صورت هماهنگ عمل کنند. در این زمینه:

۱. سیاست‌های اقلیمی

- چارچوبی برای کاهش انتشار فراهم می‌کنند.
- CCUS می‌تواند بخشی از استراتژی‌های ملی کاهش انتشار باشد.

۲. سیاست‌های انرژی

- بر امنیت انرژی و تنوع‌بخشی به منابع تمرکز دارند.
- CCUS به کشورها کمک می‌کند تا حتی در صورت ادامه استفاده از سوخت‌های فسیلی، تعهدات اقلیمی خود را رعایت کنند.

۳. سیاست‌های صنعتی

- صنایع انرژی‌بر می‌توانند با سرمایه‌گذاری در CCUS، ضمن کاهش انتشار، مزیت رقابتی خود را حفظ کنند.
- این امر همچنین موجب توسعه فناوری‌های نوین و تقویت صادرات می‌شود.

۴. سیاست‌های اجتماعی

- برای تضمین عدالت در گذار انرژی ضروری‌اند.
- شامل آموزش مجدد نیروی کار، ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و حمایت از جوامع محلی هستند.



بنابراین، CCUS در نقطه تلاقی این سیاست‌ها قرار دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیوند اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی عمل کند.

ضرورت نگاه چندرشته‌ای

یکی از نکات کلیدی در بحث گذار عادلانه و CCUS این است که این موضوع تنها با یک رویکرد چندرشته‌ای قابل درک و پیاده‌سازی است.

- علوم طبیعی و مهندسی: برای توسعه فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره کربن.
- علوم اجتماعی: برای بررسی ادراک عمومی، پذیرش اجتماعی و اثرات فرهنگی پروژه‌های CCUS.
- اقتصاد: برای تحلیل هزینه-فایده و طراحی ابزارهای مالی و بازارهای کربن.
- حقوق و سیاست عمومی: برای ایجاد چارچوب‌های قانونی، تضمین عدالت اجتماعی و هماهنگی بین‌المللی.

این همگرایی میان رشته‌ها باعث می‌شود که CCUS نه تنها به‌عنوان یک فناوری کاهش انتشار، بلکه به‌عنوان بخشی از راهبرد کلان توسعه پایدار دیده شود.

نویسندگان تأکید می‌کنند که بدون این نگاه میان‌رشته‌ای، خطر آن وجود دارد که سیاست‌ها ناقص، پروژه‌ها ناکارآمد و اعتماد عمومی تضعیف شود.

نقش آموزش و ظرفیت‌سازی

یکی دیگر از عناصر حیاتی برای موفقیت گذار عادلانه، آموزش و ظرفیت‌سازی است.

۱. آموزش نیروی کار

- کارگرانی که در صنایع مبتنی بر سوخت‌های فسیلی شاغل هستند، باید برای مشاغل جدید در حوزه انرژی‌های پاک و فناوری‌های کربن‌زدایی آموزش ببینند.
- این فرایند «بازآموزی» تضمین می‌کند که گذار انرژی باعث بیکاری گسترده نشود.

۲. آموزش عمومی

- اطلاع‌رسانی شفاف درباره مزایا، ریسک‌ها و ضرورت CCUS برای جلب اعتماد و پذیرش اجتماعی حیاتی است.
- آموزش عمومی می‌تواند از مقاومت اجتماعی در برابر پروژه‌های ذخیره‌سازی کربن جلوگیری کند.

۳. ظرفیت‌سازی نهادی

- دولت‌ها و نهادهای نظارتی باید توانایی فنی و نهادی لازم برای پایش، تنظیم‌گری و اجرای پروژه‌های CCUS را داشته باشند.
- این امر شامل توسعه استانداردها، دستورالعمل‌ها و سازوکارهای حقوقی شفاف است.

به بیان دیگر، گذار عادلانه انرژی نه تنها یک تغییر فناورانه و اقتصادی، بلکه یک فرایند یادگیری جمعی است که همه سطوح جامعه را دربر می‌گیرد.

تأمین مالی برای گذار عادلانه

یکی از مهم‌ترین مسائل در گذار عادلانه انرژی و توسعه فناوری‌های CCUS، موضوع **تأمین مالی پایدار** است.

۱. منابع داخلی

- دولت‌ها می‌توانند بخشی از بودجه ملی را به پروژه‌های کربن‌زدایی اختصاص دهند.
- همچنین، **مالیات بر کربن** یا **نظام‌های تجارت انتشار (ETS)** می‌توانند منابع مالی جدیدی برای سرمایه‌گذاری در CCUS ایجاد کنند.

۲. منابع بین‌المللی

- کشورهای در حال توسعه نیازمند کمک مالی و فنی از سوی کشورهای صنعتی هستند.
- صندوق‌های بین‌المللی اقلیم، بانک جهانی و سایر نهادهای مالی می‌توانند نقش کلیدی در تأمین این سرمایه ایفا کنند.

۳. سرمایه‌گذاری بخش خصوصی

- مشارکت شرکت‌های بزرگ انرژی و صنایع سنگین ضروری است.
- ابزارهایی مانند **اعتبارهای مالیاتی، یارانه‌ها و ضمانت‌های دولتی** می‌توانند ریسک سرمایه‌گذاری بخش خصوصی را کاهش دهند.

۴. نوآوری مالی

- ابزارهای نوین مانند **اوراق قرضه سبز (Green Bonds)** و **سرمایه‌گذاری‌های پایدار ESG** فرصت‌های تازه‌ای برای تأمین مالی ایجاد می‌کنند.

تأمین مالی برای گذار عادلانه

یکی از مهم‌ترین مسائل در گذار عادلانه انرژی و توسعه فناوری‌های CCUS، موضوع **تأمین مالی پایدار** است.

۱. منابع داخلی

- دولت‌ها می‌توانند بخشی از بودجه ملی را به پروژه‌های کربن‌زدایی اختصاص دهند.
- همچنین، **مالیات بر کربن** یا **نظام‌های تجارت انتشار (ETS)** می‌توانند منابع مالی جدیدی برای سرمایه‌گذاری در CCUS ایجاد کنند.

۲. منابع بین‌المللی

- کشورهای در حال توسعه نیازمند کمک مالی و فنی از سوی کشورهای صنعتی هستند.
- صندوق‌های بین‌المللی اقلیم، بانک جهانی و سایر نهادهای مالی می‌توانند نقش کلیدی در تأمین این سرمایه ایفا کنند.

۳. سرمایه‌گذاری بخش خصوصی

- مشارکت شرکت‌های بزرگ انرژی و صنایع سنگین ضروری است.
- ابزارهایی مانند **اعتبارهای مالیاتی، یارانه‌ها و ضمانت‌های دولتی** می‌توانند ریسک سرمایه‌گذاری بخش خصوصی را کاهش دهند.



نوآوری مالی

- ابزارهای نوین مانند اوراق قرضه سبز (Green Bonds) و سرمایه گذاری های پایدار ESG فرصت های تازه ای برای تأمین مالی ایجاد می کنند.

جمع بندی و مسیر آینده

گذار عادلانه انرژی فرایندی پیچیده است که نیازمند ترکیب سیاست های زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی است. فناوری CCUS در این میان نقشی دوگانه دارد:

- از یک سو، ابزاری برای کاهش انتشار کربن است که به کشورها و صنایع امکان می دهد تعهدات اقلیمی خود را عملی کنند.
- از سوی دیگر، می تواند به عنوان ابزاری برای توسعه پایدار عمل کند؛ چراکه فرصت های اقتصادی، اشتغال زایی و نوآوری فناورانه به همراه دارد.

نویسندگان تأکید می کنند که موفقیت این فرایند به چند عامل بستگی دارد:

۱. حمایت های سیاسی و قانونی پایدار در سطح ملی و بین المللی.
۲. تأمین مالی گسترده از سوی دولت ها، بخش خصوصی و نهادهای جهانی.
۳. نوآوری های فناورانه برای کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری CCUS.
۴. مشارکت اجتماعی و ایجاد اعتماد عمومی از طریق شفافیت و آموزش.

به بیان دیگر، گذار عادلانه و CCUS تنها در صورتی موفق خواهند شد که به عنوان بخشی از یک استراتژی جامع جهانی برای توسعه پایدار و عدالت اقلیمی دنبال شوند.



فصل سوم: تحولات و تکامل فناوری‌های CCUS – یک مرور

کریستینا ف. آ. رودریگز، هالین روشا، کلمبو تاسیناری و ام. جی. لموس د سوزا

مقدمه

فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS) در قلب تلاش‌های جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار دارند. این فناوری‌ها به کشورها و صنایع امکان می‌دهند که:

- وابستگی خود به سوخت‌های فسیلی را مدیریت کنند،
- انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های صنعتی و نیروگاهی را کاهش دهند،
- و در عین حال، از CO₂ به عنوان یک منبع برای تولید محصولات جدید بهره بگیرند.

نویسندگان این فصل تأکید می‌کنند که CCUS یک فناوری واحد نیست، بلکه مجموعه‌ای از راهکارها و نوآوری‌ها است که در طول زمان تکامل یافته‌اند. این راهکارها از روش‌های جذب مستقیم در نیروگاه‌ها گرفته تا استفاده‌های نوین صنعتی (مانند تولید سوخت‌ها و مصالح ساختمانی) را شامل می‌شود.

این فصل با هدف مرور پیشرفت‌های کلیدی در حوزه CCUS تدوین شده است و تلاش می‌کند تصویری جامع از وضعیت کنونی، مسیر تکامل تاریخی و چشم‌انداز آینده این فناوری‌ها ارائه دهد.

فناوری‌های CCUS در طول دهه‌های اخیر با سرعت قابل توجهی تکامل یافته‌اند. این فرایند تکاملی نتیجه‌ی ترکیب عوامل متعددی است، از جمله:

۱. پیشرفت‌های علمی و فناوریانه

- تحقیقات در زمینه علوم زمین، شیمی و مهندسی به بهبود فرآیندهای جذب و ذخیره کربن کمک کرده‌اند.
- توسعه روش‌های نوین مانند جذب مستقیم از هوا (DAC) و استفاده‌های صنعتی نوآورانه از CO₂ چشم‌اندازهای تازه‌ای ایجاد کرده است.

۲. سیاست‌های اقلیمی بین‌المللی

- توافق‌هایی مانند پروتکل کیوتو و توافق پاریس محرک‌های مهمی برای توسعه فناوری‌های کربن‌زدایی بوده‌اند.
- دولت‌ها با اعمال سیاست‌های کاهش انتشار و ارائه مشوق‌های مالی، زمینه‌ساز رشد پروژه‌های CCUS شدند.

۳. تقاضای صنعتی و اقتصادی

- صنایع انرژی‌بر مانند فولاد، سیمان و پتروشیمی به دنبال راهکارهایی هستند تا ضمن ادامه فعالیت، تعهدات زیست‌محیطی خود را رعایت کنند.
- CCUS به آنها اجازه می‌دهد تا در بازارهای جهانی رقابتی باقی بمانند.

۴. افزایش آگاهی عمومی و فشار اجتماعی

- فشار از سوی جوامع مدنی و سازمان‌های محیط‌زیستی، دولت‌ها و شرکت‌ها را وادار به پذیرش فناوری‌های کاهش انتشار کرده است.



این عوامل در کنار هم سبب شدند CCUS از یک ایده آزمایشگاهی به یک ابزار کلیدی در استراتژی‌های اقلیمی جهانی تبدیل شود.

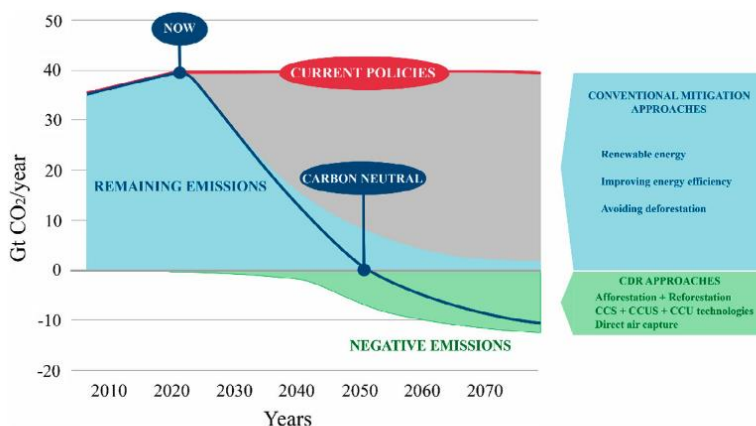


Fig. 1 CO₂ emissions scenarios (Adapted from Lebling et al. [2022]⁷)

تفسیر نمودار

محورها:

- محور عمودی: (Y) میزان انتشار CO₂ به گیگاتن در سال (Gt CO₂/year).
- محور افقی: (X) سال‌ها از ۲۰۱۰ تا ۲۰۷۰.

بخش‌های اصلی نمودار:

1. **NOW (اکنون - حدود ۲۰۲۰):**
است. Gt CO₂/year سطح انتشار جهانی نزدیک به ۴۰.
2. **Current Policies (سیاست‌های کنونی):**
(تا ۲۰۷۰ Gt حدود ۴۰) اگر فقط سیاست‌های فعلی ادامه یابند، انتشارها تقریباً ثابت می‌مانند.
3. **Carbon Neutral (خنثی‌سازی کربن - حدود ۲۰۵۰):**
می‌رسند (Carbon Neutral) در سناریوی اقدامات قوی اقلیمی، انتشارها تا حدود ۲۰۵۰ به صفر خالص.
4. **Negative Emissions (انتشار منفی - پس از ۲۰۵۰):**
(یا بیشتر Gt/year تا -۱۰) از جو حذف می‌کنند CO₂ در این بخش، فناوری‌ها و اقدامات فراتر از صفر عمل کرده و مقدار بیشتری.



رنگها و لایه‌ها:

- **آبی روشن (Remaining Emissions):** میزان انتشار باقی‌مانده‌ای که باید کاهش یابد.
- **خاکستری (ناحیه سیاست‌های کنونی):** نشان‌دهنده ادامه مسیر بدون مداخلات اضافی.
- **سبز (Negative Emissions):** جذب خالص CO₂ از جو، از طریق فناوری‌ها و اقدامات CDR.

راهکارهای کاهش (سمت راست نمودار):

1. Conventional Mitigation Approaches (روش‌های متداول کاهش انتشار):

- انرژی تجدیدپذیر (Renewable energy)
- بهبود بهره‌وری انرژی (Improving energy efficiency)
- جلوگیری از جنگل‌زدایی (Avoiding deforestation)

2. CDR Approaches (Carbon Dioxide Removal – روش‌های حذف کربن):

- جنگل‌کاری و احیای جنگل‌ها (Afforestation + Reforestation)
- فناوری‌های CCS/CCUS/CCU
- جذب مستقیم از هوا (Direct Air Capture)

جمع‌بندی

این نمودار نشان می‌دهد:

- اگر فقط سیاست‌های فعلی ادامه یابند → انتشار CO₂ تا ۲۰۷۰ تقریباً ثابت خواهد ماند (بحران اقلیمی ادامه می‌یابد).
- برای رسیدن به هدف کربن خنثی تا ۲۰۵۰ → باید انتشارها به سرعت کاهش یابند.
- پس از آن، برای جبران انتشارهای سخت‌کاهشی، باید به سمت انتشار منفی با استفاده از فناوری‌های CDR مانند CCUS، احیای جنگل‌ها و جذب مستقیم از هوا (حرکت کنیم).

چشم‌انداز کلی

جهان امروز در حال تجربه فشار بی‌سابقه‌ای برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن است. در این مسیر، CCUS به عنوان یکی از محدود فناوری‌هایی شناخته می‌شود که می‌تواند هم در صنایع انرژی‌بر و هم در نیروگاه‌های فسیلی نقشی اساسی ایفا کند.

این فناوری سه رکن اصلی دارد:

۱. جذب (Capture):

- جداسازی CO₂ از منابع انتشار عمده مانند نیروگاه‌های زغال‌سنگ و گاز یا صنایع سیمان و فولاد.
- فناوری‌های مختلفی برای جذب وجود دارد، از جمله جذب شیمیایی، فیزیکی و زیستی.



۲. استفاده (Utilization):

- استفاده از CO₂ در فرآیندهای صنعتی برای تولید محصولات با ارزش افزوده مانند سوخت‌های مصنوعی، مواد شیمیایی و مصالح ساختمانی.
- این بخش از CCUS به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته زیرا علاوه بر کاهش انتشار، فرصت‌های اقتصادی جدید ایجاد می‌کند.

۳. ذخیره‌سازی (Storage):

- تزریق CO₂ به سازه‌های زمین‌شناسی عمیق، مانند مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده یا سفره‌های آب شور.
- این روش پتانسیل ذخیره‌سازی میلیاردی تن CO₂ را دارد و در بسیاری از کشورها آزمایش و اجرا شده است.

نویسندگان تأکید می‌کنند که برای موفقیت CCUS باید این سه رکن به‌صورت یکپارچه دیده شوند و نه جدا از هم؛ چراکه تنها در این صورت به اثرگذاری واقعی بر کاهش تغییرات اقلیمی می‌توان دست یافت.

Table 1 CO₂ removal options

CDR option	Carbon dioxide removal potential (GtCO ₂ e/year)	
	Minimum	Maximum
Afforestation and Reforestation	0.01	14
Soil Carbon Sequestration	0.1	13
Biochar	0.03	1
Accelerated Weathering	0.001	18
Direct Air Capture	0.0004	16
Terrestrial BECCS	0.04	32
Aquatic BECCS	1.2	53
Ocean Fertilization	1	11
EOR "Cumulative Storage CO ₂ e"	0.05	370
Ocean Storage	0.01	0.9

Adapted from Martin et al. [2017]⁹

پتانسیل حذف دی اکسید کربن (GtCO ₂ e/year)	گزینه CDR
0.01 – 14	جنگل کاری و احیای جنگل‌ها (Afforestation & Reforestation)
0.1 – 13	ذخیره سازی کربن در خاک (Soil Carbon Sequestration)
0.03 – 1	بیوچار (Biochar)
0.001 – 18	هوازدگی تسریع شده (Accelerated Weathering)
0.0004 – 16	جذب مستقیم از هوا (Direct Air Capture)
0.04 – 32	BECCS زمینی (Terrestrial BECCS)
1.2 – 53	BECCS دریایی (Aquatic BECCS)
1 – 11	بارور سازی اقیانوس‌ها (Ocean Fertilization)
0.05 – 370	EOR (ذخیره تجمعی CO ₂)
0.01 – 0.9	ذخیره سازی اقیانوسی (Ocean Storage)

تفسیر و تحلیل

۱. گزینه‌های زیستی (Biological):

- اما محدود به زمین و تغییر کاربری (Gt/year حداکثر ۱۴) پتانسیل بالا → جنگل کاری و احیای جنگل‌ها
- ؛ نیازمند تغییرات کشاورزی گسترده Gt/year حداکثر ۱۳ → ذخیره کربن در خاک
- اما پایدار و قابل مدیریت در مقیاس کوچک (Gt/year حداکثر ۱) پتانسیل کمتر → بیوچار

۲. گزینه‌های شیمیایی و فناوریانه:

- حذف کند، اما در عمل نیازمند فناوری و هزینه‌های بالا است Gt/year می‌تواند تا ۱۸ → هوازدگی تسریع شده
- ؛ فناوری پیشرفته، اما بسیار پرهزینه و انرژی بر Gt/year محدوده ۰.۰۰۰۴ تا ۱۶ → (DAC) جذب مستقیم از هوا

3. BECCS (Bioenergy with Carbon Capture & Storage):

- Gt/year تا ۰.۰۴ ۳۲ → زمینی
- Gt/year تا ۱.۲ ۵۳ → دریایی
- جزو بالاترین ظرفیت‌ها محسوب می‌شوند، اما چالش‌هایی چون نیاز به زمین و منابع زیستی گسترده دارند

۴. گزینه‌های اقیانوسی:

- ؛ با مخاطرات زیست محیطی جدی Gt/year تا ۱ ۱۱ → بارور سازی اقیانوس‌ها
- (Gt/year حداکثر ۰.۹) ظرفیت پایین تر → ذخیره سازی اقیانوسی

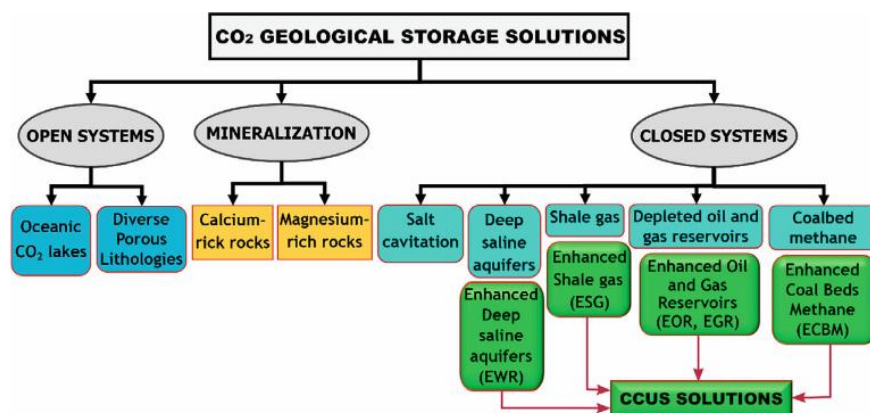
5. EOR (CO₂ افزایش برداشت نفت با):

- (Gt/year تا ۳۷۰) بیشترین پتانسیل در تئوری
- اما در عمل محدود به ذخایر نفت و زیرساخت‌های خاص است

بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

جمع بندی

- بالاترین پتانسیل تئوریک: EOR و BECCS دریایی.
- پایدارترین و عملی تر: جنگل کاری، احیای جنگل ها و ذخیره کربن در خاک.
- فناوری های نوین (DAC) و هوازدگی تسریع شده (ظرفیت بالایی دارند ولی هنوز هزینه بر و در مراحل توسعه اند).



ذخیره سازی زمین شناسی (CO₂ Geological Storage)

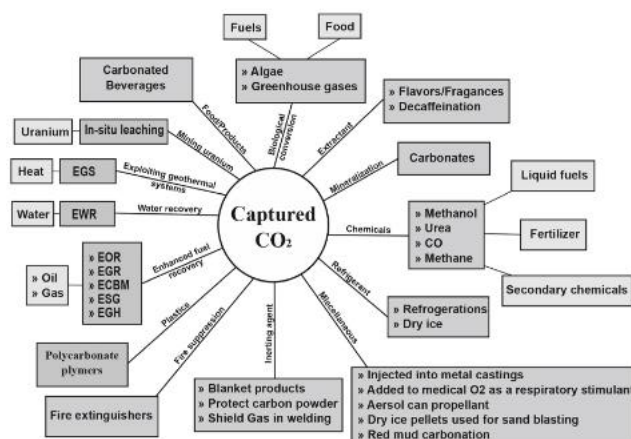
(اقتباس شده از Rodrigues و Lemos de Sousa)

این تصویر معمولاً فرآیند زیر را نشان می دهد:

۱. منبع انتشار CO₂ (مانند نیروگاه زغال سنگ یا واحد صنعتی)
۲. جذب و فشرده سازی CO₂
۳. انتقال CO₂ از طریق خط لوله یا کشتی
۴. تزریق در سازندهای زمین شناسی
 - مخازن نفت و گاز تخلیه شده (Depleted Oil & Gas Reservoirs)
 - سفره های آب شور عمیق (Deep Saline Aquifers)
 - لایه های زغال سنگ غیر قابل استخراج (Unmineable Coal Seams)

ذخیره سازی زمین شناسی CO₂ روشی ایمن و بلندمدت برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای است، به شرط آنکه سایت های مناسب انتخاب شوند و نظارت و پایش دائمی صورت گیرد.

بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»



3 Alternative CO₂ abatement options (Adapted from CSLF [2011]⁴⁸)

تفسیر نمودار: گزینه‌های استفاده از CO₂ جذب شده

CO₂ جذب شده می‌تواند در مسیرهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد:

۱. غذا (Food)

- نوشابه‌های گازدار (Carbonated Beverages)
- بسته‌بندی مواد غذایی (Food Packaging)
- بیهوشی (Anaesthesia)
- رشد گیاهان در گلخانه‌ها (Greenhouse Systems)

۲. سوخت‌ها (Fuels)

- متانول (Methanol)
- مونوکسید کربن (CO)
- متان (Methane)
- سوخت‌های مایع (Liquid Fuels)

۳. مواد شیمیایی (Chemicals)

- کربنات‌ها (Carbonates)
- کود (Fertilizer)
- مواد شیمیایی ثانویه (Secondary Chemicals)



۴. کاربردهای صنعتی و ساختمانی

- استفاده در مصالح ساختمانی (Mineral Carbonation, Aggregates, Cement, Building Materials)
- افزایش بازیافت نفت (EOR)
- افزایش بازیافت گاز (EGR)
- ذخیره انرژی زمین گرمایی پیشرفته (EGS)
- کربناتاسیون مواد معدنی (Mineral Carbonation)

۵. کاربردهای زیست محیطی و ایمنی

- اطفای حریق (Fire Extinguishers)
- تولید آب گازدار (Carbonated Water)
- کاهش آلودگی اورانیوم (Uranium Tailings Neutralization)
- کاربرد در باتری ها (Battery Products)

۶. دیگر کاربردها

- سردکننده ها و گازهای تبریدی (Refrigeration, Dry Ice)
- آب گازدار
- ذخیره سازی زمین شناسی بلندمدت

CO₂ جذب شده یک پسماند صرف نیست؛ بلکه یک منبع ارزشمند برای تولید سوخت ها، مواد شیمیایی، مصالح ساختمانی، کاربردهای پزشکی، صنایع غذایی و حتی افزایش بهره برداری نفت و گاز است.

روندهای تاریخی توسعه CCUS

پیشرفت فناوری های CCUS را می توان در چند مرحله تاریخی بررسی کرد:

۱. مرحله آزمایشی (دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰)

- در این دوران، اولین پروژه ها بیشتر بر بهبود استخراج نفت (EOR) از طریق تزریق CO₂ متمرکز بودند.
- نگاه به CO₂ به عنوان یک منبع برای افزایش بهره وری مخازن نفتی بود، نه لزوماً به عنوان ابزاری برای کاهش انتشار.

۲. مرحله گذار به محیط زیست (دهه ۱۹۹۰ تا اوایل ۲۰۰۰)

- با افزایش نگرانی ها درباره تغییرات اقلیمی، نگاه به CCUS تغییر کرد.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

- پروژه‌ها به تدریج به سمت ذخیره‌سازی بلندمدت CO_2 در مخازن زمین‌شناسی حرکت کردند.
- اولین پروژه‌های بزرگ مقیاس در این دوران شکل گرفتند.
- ۳. مرحله گسترش جهانی (۲۰۰۵ تا کنون)
 - با شکل‌گیری سیاست‌های اقلیمی بین‌المللی، سرمایه‌گذاری در CCUS افزایش یافت.
 - پروژه‌های متعددی در آمریکای شمالی، اروپا، آسیا و خاورمیانه آغاز شد.
 - فناوری‌های جدید مانند جذب مستقیم از هوا (DAC) و استفاده صنعتی از CO_2 وارد عرصه شدند.

چشم‌انداز آینده

- انتظار می‌رود تا سال‌های آینده، CCUS نه تنها در صنایع انرژی‌بر بلکه در بخش‌های حمل‌ونقل و ساختمان نیز نقشی ایفا کند.
- نوآوری‌های فناورانه و کاهش هزینه‌ها می‌توانند به مقیاس‌پذیری سریع‌تر این فناوری کمک کنند.
- همکاری‌های بین‌المللی و استانداردسازی برای اعتمادسازی و توسعه بازار جهانی CCUS ضروری خواهد بود.

نوآوری‌ها و محرک‌های اصلی در توسعه CCUS

توسعه و تکامل CCUS تحت تأثیر مجموعه‌ای از محرک‌های فناورانه، سیاسی و اقتصادی بوده است:

۱. پیشرفت‌های علمی و مهندسی

- نوآوری در زمینه جذب شیمیایی با استفاده از حلال‌ها، غشاهای غشای و فرآیندهای پیشرفته به افزایش کارایی و کاهش هزینه کمک کرده است.
- پژوهش‌های زمین‌شناسی امکان انتخاب مناسب‌ترین مخازن برای ذخیره‌سازی ایمن CO_2 را فراهم کرده‌اند.

۲. فشارهای سیاستی و قانونی

- مقررات سخت‌گیرانه‌تر در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای صنایع را به سمت استفاده از CCUS سوق داده است.
- ایجاد بازارهای کربن و وضع قیمت بر انتشار CO_2 انگیزه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در این حوزه ایجاد کرده است.

۳. حمایت مالی و سرمایه‌گذاری

- بسیاری از پروژه‌های CCUS به کمک یارانه‌های دولتی و سرمایه‌گذاری مشترک بخش خصوصی و عمومی امکان‌پذیر شده‌اند.
- در کشورهای توسعه‌یافته، بانک‌ها و نهادهای مالی بین‌المللی نیز نقش مهمی ایفا کرده‌اند.

۴. پذیرش اجتماعی و فشار افکار عمومی

- افزایش آگاهی عمومی درباره بحران اقلیمی و ضرورت کاهش انتشار، به پذیرش گسترده‌تر CCUS کمک کرده است.
- در عین حال، برخی جوامع محلی نگرانی‌هایی درباره ایمنی ذخیره‌سازی بلندمدت CO_2 دارند که باید با شفافیت و آموزش برطرف شود.

CCUS پرداخته و نشان می‌دهد چگونه از یک فناوری برای بهره‌برداری نفتی به یک ابزار کلیدی در سیاست‌های اقلیمی جهانی تبدیل شده است.



سناریوهای انتشار دی اکسید کربن

برای درک اهمیت CCUS، لازم است به سناریوهای جهانی انتشار CO₂ توجه کنیم. سازمان‌های بین‌المللی مانند آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و IPCC نشان داده‌اند که:

- بدون به کارگیری CCUS، رسیدن به اهداف اقلیمی توافق پاریس بسیار دشوار خواهد بود.
- حتی در سناریوهایی که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، همچنان حجم زیادی از انتشار باقی می‌ماند که تنها از طریق CCUS قابل مدیریت است.
- بر اساس برخی برآوردها، برای دستیابی به خالص صفر انتشار (Net Zero) تا سال ۲۰۵۰، سالانه باید میلیاردها تن CO₂ از طریق CCUS مدیریت شود.

جایگاه CCUS در این سناریوها

- CCUS به عنوان یک فناوری مکمل شناخته می‌شود، نه جایگزین انرژی‌های تجدیدپذیر.
- این فناوری به ویژه در صنایع سخت کاهش پذیر مانند فولاد، سیمان و پتروشیمی اهمیت دارد.
- همچنین در بخش نیروگاهی می‌تواند برای کاهش انتشار ناشی از زغال سنگ و گاز طبیعی حیاتی باشد.

گزینه‌های حذف دی اکسید کربن

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که برای کاهش غلظت CO₂ در جو، باید ترکیبی از فناوری‌های حذف و کاهش انتشار به کار گرفته شود. مهم‌ترین گزینه‌ها عبارتند از:

۱. جذب و ذخیره کربن (CCS/CCUS)
 - جداسازی CO₂ از منابع بزرگ انتشار و ذخیره‌سازی آن در سازه‌های زمین‌شناسی.
 - فناوری‌ای که تاکنون بیشترین پیشرفت و پروژه‌های عملیاتی را داشته است.
۲. جذب مستقیم از هوا (DAC)
 - فناوری نوینی که CO₂ را مستقیماً از جو استخراج می‌کند.
 - با وجود پتانسیل بالا، هنوز پرهزینه است و نیاز به مقیاس‌پذیری دارد.
۳. راهکارهای مبتنی بر طبیعت
 - جنگل کاری، احیای اکوسیستم‌ها و بهبود مدیریت خاک.
 - این روش‌ها همزمان مزایای زیست‌محیطی دیگری مانند حفاظت از تنوع زیستی دارند.
۴. فناوری‌های نوآورانه دیگر
 - تبدیل CO₂ به سوخت‌ها، مواد شیمیایی یا مصالح ساختمانی.
 - می‌تواند هم به کاهش انتشار کمک کند و هم بازارهای اقتصادی جدیدی ایجاد نماید.



جمع بندی

هیچ یک از این گزینه ها به تنهایی کافی نیستند. برای دستیابی به اهداف اقلیمی باید از ترکیبی از این راهکارها استفاده کرد، اما CCUS جایگاه ویژه ای دارد زیرا می تواند انتشار در بخش های صنعتی و نیروگاهی را که به سختی کاهش می یابد، مدیریت کند.

ضرورت مقیاس پذیری CCUS

یافته های علمی نشان می دهد که برای رسیدن به اهداف توافق پاریس، CCUS باید به سرعت و در مقیاس بسیار بزرگ توسعه یابد. در حال حاضر:

- ظرفیت جهانی پروژه های فعال CCUS تنها بخش کوچکی از نیاز واقعی برای دستیابی به خالص صفر انتشار را پوشش می دهد.
- شکاف بزرگی میان ظرفیت فعلی و آنچه باید تا سال ۲۰۵۰ محقق شود، وجود دارد.

چالش های پیش رو در مقیاس پذیری

۱. هزینه های بالا

- اجرای پروژه های CCUS پرهزینه است و بدون مشوق های مالی و بازارهای پایدار، برای بسیاری از صنایع جذابیت اقتصادی ندارد.

۲. زیرساخت های ناکافی

- شبکه های انتقال و محل های ذخیره سازی ایمن CO₂ در بسیاری از مناطق جهان هنوز توسعه نیافته اند.

۳. ابهام های حقوقی و نظارتی

- نبود قوانین شفاف درباره مالکیت مخازن زمین شناسی و مسئولیت های زیست محیطی مانعی جدی برای سرمایه گذاران است.

۴. پذیرش اجتماعی

- نگرانی های عمومی درباره ایمنی ذخیره سازی بلندمدت CO₂ می تواند مانع اجرای پروژه ها شود.

برای غلبه بر موانع توسعه CCUS، مجموعه ای از راهکارها پیشنهاد می شود:

۱. سیاست های حمایتی پایدار

- دولت ها باید مشوق های مالی بلندمدت مانند اعتبارات مالیاتی، یارانه ها و قیمت گذاری کربن را تضمین کنند.
- نبود ثبات در سیاست ها می تواند سرمایه گذاری بخش خصوصی را دلسرد کند.

۲. ایجاد بازارهای کربن کارآمد

- با توسعه بازارهای داخلی و بین المللی کربن، جذب و ذخیره CO₂ می تواند ارزش اقتصادی پیدا کند.
- این امر به صنایع انگیزه می دهد تا CCUS را در استراتژی خود بگنجانند.

۳. سرمایه گذاری در زیرساخت ها

- ساخت خطوط لوله برای انتقال CO₂ و شناسایی مخازن مناسب ذخیره سازی باید به عنوان اولویت مطرح شود.
- همکاری های منطقه ای می تواند هزینه توسعه این زیرساخت ها را کاهش دهد.



۴. شفافیت و اعتماد عمومی

- اطلاع رسانی دقیق درباره ایمنی و مزایای CCUS برای افزایش پذیرش اجتماعی ضروری است.
- مشارکت دادن جوامع محلی در تصمیم گیری ها اعتماد را تقویت می کند.

جدول: بازدهی حذف CO₂ و مصرف انرژی فناوری های مختلف

CO ₂ فناوری جذب	بازدهی حذف (حجمی % CO ₂)	مصرف انرژی برای جذب (GJ/تن CO ₂)
جداسازی صنعتی (Industrial Separation)	۹۰٪	۵.۰۰
پس سوز (Post-Combustion)	۹۰٪	۴.۱۴
پیش سوز (Pre-Combustion)	۹۰٪	۳.۳۵
سوزاندن با اکسیژن (Oxy-Fuel Combustion)	۹۰٪ >	۴.۰۵
حلقه شیمیایی (Chemical Looping Combustion - CLC)	۹۶ تا ۹۹٪	۰.۹۵
جذب مستقیم از هوا (Direct Air Capture - DAC)	۸۵ تا ۹۳٪	۵.۲۵

تفسیر و تحلیل

۱. بازدهی حذف (Removal Efficiency)

- بیشتر فناوری ها (Post, Pre, Oxy-fuel) حدود ۹۰٪ بازدهی دارند.
- بالاترین بازدهی مربوط به **Chemical Looping** است (۹۶٪ تا ۹۹٪).
- **DAC** (جذب مستقیم از هوا) کمی پایین تر است (۸۵٪ تا ۹۳٪).

2. مصرف انرژی (Energy Consumption)

- **Chemical Looping**: کمترین مصرف انرژی با حدود ۰.۹۵ GJ/تن CO₂.
- **DAC**: بیشترین مصرف انرژی با ۵.۲۵ GJ/تن CO₂.
- Post-Combustion و Industrial Separation دارند ۴ تا ۵ GJ/تن (نیز مصرف بالایی دارند)

۳. مقایسه کلی

- بهترین گزینه از نظر بازدهی و مصرف انرژی کم → اما هنوز در مقیاس تجاری اولیه است: **Chemical Looping (CLC)**.
- **DAC**: انعطاف پذیر و مستقل از منبع، اما پرهزینه ترین و پرمصرف ترین روش.
- **IGCC**، مناسب برای نیروگاه های یکپارچه با فناوری (تن/۳.۳۵ GJ) نسبتاً کم مصرف: **Pre-Combustion**.
- **Post-Combustion**: انرژی بیشتری نیاز دارد Pre-Combustion روش متداول و در حال استفاده صنعتی، اما نسبت به

- بازدهی خوب اما نیازمند تأمین اکسیژن خالص → هزینه بر **Oxy-fuel**.

نتیجه‌گیری

- در شرایط امروز بازار: فناوری‌های **Pre-Combustion** و **Post-Combustion** کاربرد بیشتری دارند چون به راحتی روی نیروگاه‌های موجود قابل پیاده‌سازی‌اند.
- برای آینده: **Chemical Looping** می‌تواند گزینه‌ای برتر باشد چون بازدهی بالا و مصرف انرژی پایینی دارد.
- **DAC** گرچه پرهزینه است، اما تنها فناوری‌ای است که می‌تواند CO_2 را مستقیماً از جو حذف کند و برای رسیدن به **Net Zero** واقعی در آینده اجتناب‌ناپذیر است.

جدول: گزینه‌های حمل‌ونقل CO_2

ظرفیت	فاز CO_2	شرایط عملیاتی (فشار و دما)	روش حمل‌ونقل
حدود ۱۰۰ میلیون تن CO_2 در سال (۶,۵۰۰ کیلومتر خطوط لوله در حال بهره‌برداری)	بخار یا فاز متراکم	۸۶ تا ۱۵۲ بار / ۱۲ تا ۴۳ درجه سانتی‌گراد	(Pipeline) خط لوله
بیش از ۷۰ میلیون تن CO_2 در سال	مایع	۱۷ بار / ۴۰- درجه سانتی‌گراد	(Ship) کشتی
بیش از ۱ میلیون تن CO_2 در سال	مایع	۲۰ بار / ۲۰- درجه سانتی‌گراد	(Truck) کامیون
بیش از ۳ میلیون تن CO_2 در سال	مایع	۲۰ بار / ۲۰- درجه سانتی‌گراد	(Railway) راه‌آهن

تفسیر و تحلیل

۱. خط لوله (Pipeline):

- رایج‌ترین و بالغ‌ترین روش حمل CO_2 در پروژه‌های بزرگ CCUS.
- قابلیت انتقال در فواصل بسیار طولانی روی زمین (بیش از ۲,۵۰۰ کیلومتر) و زیر دریا (تا عمق ۲.۲ کیلومتر).
- نیازمند فشار بالا (۸۶ تا ۱۵۲ بار) برای جلوگیری از جریان دو فازی و حفظ تراکم CO_2 .
- بهترین گزینه برای پروژه‌های عظیم و پایدار.

۲. کشتی (Ship):

- گزینه مناسب برای انتقال حجم‌های بالا بین کشورها یا مناطق دورافتاده.
- CO_2 به صورت مایع و در دمای بسیار پایین (-۴۰ °C) حمل می‌شود.
- انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به خط لوله دارد، اما هزینه و پیچیدگی بیشتری دارد.

۳. کامیون (Truck):

- برای مقیاس کوچک یا فاصله‌های کوتاه مناسب است.
- ظرفیت محدود (بیش از ۱ میلیون تن در سال در کل سیستم).
- معمولاً برای انتقال محلی (Local transport) و مقادیر کم CO_2 استفاده می‌شود.



۴. راه آهن (Railway):

- امکان حمل مقادیر متوسط CO_2 در فواصل طولانی تر نسبت به کامیون.
- به صرفه تر از کامیون برای حمل انبوه، ولی کمتر از کشتی یا خط لوله.

جمع بندی

- برای پروژه های صنعتی بزرگ و پایدار: خط لوله بهترین گزینه است.
- برای صادرات یا حمل و نقل بین المللی: کشتی اهمیت کلیدی دارد.
- برای مقیاس های کوچک یا انتقال های محلی: کامیون و راه آهن کاربرد دارند.

ویژگی های اصلی CO_2

ویژگی	مقدار
وزن مولکولی	44.01 g/mol
دمای بحرانی	31.1 °C
فشار بحرانی	73.9 bar
چگالی در حالت بحرانی	468 kg/m ³
نقطه ذوب	-56.6 °C (bar در فشار ۵.۲)
نقطه سه گانه	-56.6 °C و ۵.۲ bar
نقطه جوش	-78.5 °C (در فشار اتمسفری، به صورت تصعید)
حالت در شرایط استاندارد (STP)	گاز بی رنگ و بی بو، سنگین تر از هوا

تفسیر و تحلیل

۱. ویژگی بحرانی (Critical Point):

- دمای ۳۱.۱ °C و فشار ۷۳.۹ bar مرز گذار CO_2 به حالت فرا بحرانی (Supercritical) است.
- در این شرایط، CO_2 خواصی میان مایه از مایع و گاز دارد (مانند چگالی بالا و ویسکوزیته کم)، که آن را برای ذخیره سازی و تزریق در مخازن زمین شناسی ایده آل می سازد.

۲. چگالی بالا (468 kg/m³):

- در شرایط بحرانی، CO_2 متراکم است و فضای کمتری اشغال می کند.
- این ویژگی حمل و نقل و تزریق در اعماق زمین را اقتصادی تر می کند.

۳. نقطه سه گانه:

- دما و فشاری است که در آن سه حالت جامد، مایع و گاز همزمان وجود دارند.
- bar و ۵.۲ °C -56.6: CO_2 برای



۴. تصعید در فشار اتمسفری:

- CO₂ در فشار یک اتمسفر مستقیماً از جامد (یخ خشک) به گاز تبدیل می شود (نقطه جوش ندارد).
- این خاصیت در کاربردهای خنک کننده و صنعتی اهمیت دارد.

۵. گاز سنگین تر از هوا:

- باعث می شود در مکان های بسته جمع شود و ریسک خفگی ایجاد کند.
- بنابراین، ایمنی در حمل و نقل و ذخیره سازی بسیار مهم است.

جمع بندی

این جدول پایه ای ترین خصوصیات CO₂ را ارائه می دهد که نقش کلیدی در طراحی فناوری های CCUS دارند، از جمله:

- انتخاب روش جذب و خنک سازی،
- طراحی خطوط لوله و کشتی ها برای حمل CO₂،
- و تعیین شرایط تزریق در سازندهای زمین شناسی.

معیارهای غربالگری برای تزریق CO₂ در پروژه های EOR

ویژگی مخزن	شرایط مناسب برای تزریق امتزاج پذیر (Miscible)	شرایط مناسب برای تزریق غیرامتزاج پذیر (Immiscible)
عمق مخزن	بیشتر از ۲,۵۰۰ فوت (≈ ۷۶۰ متر)	کمتر از ۲,۵۰۰ فوت
فشار مخزن	(MMP) بالاتر از فشار حداقل امتزاج	MMP پایین تر از
نوع نفت	(API ≥ ۲۶) نفت سبک و متوسط	(API ≤ ۲۶) نفت سنگین
دمای مخزن	(۱۲۱ °C ≈ ۲۵۰ °F) کمتر از ۲۵۰	۲۵۰ °F بالاتر از
تخلخل و تراوایی	و نفت CO ₂ بالا - برای حرکت آسان	پایین - محدود به بخشی از مخزن
راندمان	بازیافت بالاتر (به دلیل امتزاج با نفت)	بازیافت پایین تر (عمدتاً رانش نفت با گاز)

تفسیر و تحلیل

۱. تزریق امتزاج پذیر (Miscible):

- CO₂ در فشارهای بالا با نفت امتزاج پیدا می کند.
- موجب کاهش ویسکوزیته نفت و افزایش تولید می شود.
- برای مخازن عمیق با فشار زیاد و نفت سبک یا متوسط مناسب است.
- مزیت: بازیافت نفت بیشتر.



۲. تزریق غیرامتزاج پذیر (Immiscible):

- CO₂ با نفت امتزاج پیدا نمی کند بلکه فقط به عنوان عامل جابجاکننده عمل می کند.
- بیشتر در مخازن کم عمق، با نفت سنگین یا فشار پایین کاربرد دارد.
- عیب: راندمان پایین تر در مقایسه با روش امتزاجی.

۳. کاربرد صنعتی:

- کشورهای دارای ذخایر نفتی قدیمی (مثل آمریکا، کانادا و خاورمیانه) از هر دو روش استفاده می کنند.
- انتخاب روش به شرایط مخزن (فشار، عمق، دما و کیفیت نفت) بستگی دارد.

جمع بندی

این جدول نشان می دهد که برای دستیابی به باز یافت بهینه نفت در پروژه های CO₂-EOR باید شرایط زمین شناسی مخزن بررسی شود.

- مخازن عمیق و پر فشار → روش امتزاجی (Miscible) بهترین گزینه است.
- مخازن کم عمق و کم فشار یا با نفت سنگین → روش غیرامتزاجی (Immiscible) انتخاب می شود.

گزینه های حمل و نقل CO₂

ظرفیت تقریبی	فاز CO ₂	شرایط عملیاتی (فشار و دما)	روش حمل و نقل
حدود ۱۰۰ میلیون تن CO ₂ در سال (۶,۵۰۰ کیلومتر خط لوله فعال)	بخار یا فاز متراکم	تا ۱۵۲ بار / ۱۲ تا ۸۶ °C	(Pipeline) خط لوله
بیش از ۷۰ میلیون تن CO ₂ در سال	مایع	۱۷ °C - بار / ۴۰	(Ship) کشتی
بیش از ۱ میلیون تن CO ₂ در سال	مایع	۲۰ °C - بار / ۲۰	(Truck) کامیون
بیش از ۳ میلیون تن CO ₂ در سال	مایع	۲۰ °C - بار / ۲۰	(Railway) راه آهن

تفسیر

۱. خط لوله:

- روش اصلی و صنعتی برای انتقال مقادیر بسیار زیاد CO₂.
- نیازمند فشار بالا (بالاتر از فشار بحرانی ۷۳.۸ بار) و در دمای ۱۲ تا ۴۳ درجه سانتی گراد.
- بیشترین ظرفیت انتقال را دارد و برای پروژه های گسترده CCUS استفاده می شود.

۲. کشتی:

- CO₂ در دمای بسیار پایین (-۴۰ °C) و فشار ۱۷ بار به حالت مایع منتقل می شود.
- روش مناسبی برای حمل در مقیاس بزرگ، به ویژه بین المللی یا در جاهایی که خط لوله اقتصادی نیست.

۳. کامیون:

- مناسب برای حمل مقادیر محدود (CO₂ محلی و کوتاه برد).
- ظرفیت جهانی آن بسیار کمتر از خط لوله و کشتی است.

۴. راه آهن:

- ظرفیت متوسط دارد و بین کامیون و کشتی قرار می گیرد.
- در کشورهایی با شبکه ریلی قوی می تواند گزینه عملی باشد.

جمع بندی

این جدول نشان می دهد که انتخاب روش حمل و نقل CO₂ به حجم، فاصله و زیرساخت موجود بستگی دارد:

- پروژه های بزرگ و پایدار → خط لوله.
- مسیرهای بین المللی یا طولانی → کشتی.
- انتقال های کوچک یا محلی → کامیون و راه آهن.

جمع بندی اولیه

CCUS ابزاری حیاتی در گذار به اقتصاد کم کربن است، اما تحقق کامل ظرفیت های آن تنها با ترکیب فناوری پیشرفته، سیاست های قوی، تأمین مالی پایدار و مشارکت اجتماعی امکان پذیر خواهد بود.

مسیرهای فناوری جذب کربن

فناوری های جذب CO₂ تاکنون در چند مسیر اصلی توسعه یافته اند:

۱. جذب پس از احتراق (Post-Combustion Capture)

- متداول ترین روش است که در آن CO₂ پس از سوزاندن سوخت های فسیلی از گازهای خروجی جدا می شود.
- معمولاً از حلال های شیمیایی مانند آمین ها استفاده می شود.
- مزیت اصلی: قابلیت نصب بر روی نیروگاه ها و صنایع موجود.
- نقطه ضعف: هزینه های انرژی بالا برای باززنی حلال ها.

۲. جذب پیش از احتراق (Pre-Combustion Capture)

- در این روش، سوخت های فسیلی ابتدا به گاز سنتز (Syngas) تبدیل می شوند و سپس CO₂ جدا می گردد.
- این روش در واحدهای تولید برق با سیکل ترکیبی یکپارچه سازی شده با گازی سازی (IGCC) کاربرد دارد.
- مزیت: غلظت بالای CO₂ در جریان گازی که جداسازی را آسان تر می کند.



۳. احتراق در اکسیژن خالص (Oxy-Fuel Combustion)

- در این فناوری، سوخت به جای هوا با اکسیژن خالص سوزانده می شود.
- محصول احتراق عمدتاً CO₂ و بخار آب است که به راحتی می توان آن را جدا کرد.
- مزیت: کارایی بالاتر در جداسازی.
- چالش: هزینه زیاد تولید اکسیژن خالص.

نوآوری ها در جذب کربن

تحقیقات جدید روی غشاها، جاذب های جامد و حلال های پیشرفته متمرکز است. این نوآوری ها به کاهش هزینه و افزایش بازده کمک می کنند و می توانند نقش مهمی در مقیاس پذیری CCUS ایفا کنند.

استفاده از دی اکسید کربن (CO₂ Utilization)

علاوه بر ذخیره سازی، CO₂ می تواند به عنوان یک منبع ارزشمند در فرآیندهای صنعتی و تولیدی به کار رود. مهم ترین مسیرهای استفاده عبارتند از:

۱. بهبود بازیافت نفت (EOR)

- تزریق CO₂ به مخازن نفتی قدیمی باعث افزایش فشار و استخراج نفت باقی مانده می شود.
- این روش سال هاست در صنعت نفت به کار می رود و یکی از نخستین شکل های «استفاده از CO₂» محسوب می شود.

۲. تولید سوخت های مصنوعی

- CO₂ می تواند به همراه هیدروژن سبز به سوخت های مایع یا گازی تبدیل شود.
- این مسیر می تواند به کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و ایجاد بازار جدید انرژی کمک کند.

۳. صنایع شیمیایی

- استفاده از CO₂ به عنوان ماده اولیه برای تولید پلیمرها، کودهای شیمیایی و مواد واسطه ای در صنایع شیمیایی در حال گسترش است.

۴. مصالح ساختمانی

- CO₂ می تواند در تولید سیمان، بتن و مواد ساختمانی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.
- این رویکرد علاوه بر ذخیره کربن، باعث بهبود ویژگی های فنی مصالح نیز می شود.

چالش ها

- در بسیاری از این کاربردها، مقیاس مصرف CO₂ هنوز محدود است.
- هزینه های تولید سوخت ها و مواد شیمیایی مبتنی بر CO₂ بالاست و رقابت با محصولات فسیلی دشوار است.
- نیاز به نوآوری فناوری و مشوق های سیاستی وجود دارد تا این بخش بتواند به مقیاس صنعتی برسد.



ذخیره سازی دی اکسید کربن (CO₂ Storage)

ذخیره سازی بلندمدت CO₂ بخش اساسی در زنجیره CCUS است. این ذخیره سازی معمولاً در سازه های زمین شناسی عمیق انجام می شود که ظرفیت بالایی برای پذیرش حجم های بزرگ دی اکسید کربن دارند. مهم ترین گزینه ها عبارتند از:

۱. مخازن نفت و گاز تخلیه شده

- این مخازن از نظر زمین شناسی برای نگهداری سیالات تحت فشار آزمایش شده اند.
- تزریق CO₂ در آنها علاوه بر ذخیره سازی، گاهی به باز یافت نفت و گاز باقیمانده نیز کمک می کند.

۲. سفره های آب شور عمیق (Saline Aquifers)

- از نظر ظرفیت ذخیره سازی بالقوه، یکی از گسترده ترین منابع هستند.
- می توانند صدها تا هزاران گیگاتن CO₂ را در مقیاس جهانی ذخیره کنند.

۳. ذخیره سازی در لایه های زغال سنگ غیر قابل استخراج

- تزریق CO₂ می تواند به آزاد سازی متان محبوس (ECBM) کمک کند.
- هر چند این گزینه هنوز در مراحل تحقیق و توسعه است.

مکانیسم های ایمنی ذخیره سازی

CO₂ تزریق شده می تواند از طریق چند سازوکار در مخازن زمین شناسی پایدار بماند:

- به دام افتادن ساختاری (Structural Trapping): گیر افتادن گاز زیر لایه های غیر قابل نفوذ.
- به دام افتادن باقیمانده (Residual Trapping): باقی ماندن CO₂ در خلل و فرج سنگ ها.
- انحلال (Solubility Trapping): حل شدن CO₂ در آب های شور زیر زمینی.
- معدنی شدن (Mineralization): واکنش شیمیایی CO₂ با مواد معدنی و تبدیل به سنگ های پایدار.

این مکانیسم ها باعث می شوند که ذخیره سازی در مقیاس بلندمدت ایمن و قابل اعتماد باشد.

پایش و ایمنی در پروژه های ذخیره سازی CO₂

برای اطمینان از ایمنی و اثربخشی پروژه های ذخیره سازی، یک سیستم جامع پایش، گزارش دهی و راستی آزمایی (MRV) ضروری است. این سیستم شامل موارد زیر است:

۱. پایش در زمان واقعی (Real-Time Monitoring)

- استفاده از حسگرهای فشار، دما و ترکیب شیمیایی در چاه های تزریق.
- کنترل مداوم جریان CO₂ برای جلوگیری از نشت احتمالی.



۲. روش‌های ژئوفیزیکی

- تصویربرداری لرزه‌ای سه‌بعدی (3D Seismic Imaging) برای ردیابی حرکت CO₂ در زیرزمین.
- استفاده از ابزارهای الکتریکی و مغناطیسی برای ارزیابی تغییرات مخزن.

۳. پایش سطحی و محیطی

- بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی و خاک اطراف محل ذخیره‌سازی.
- سنجش انتشار احتمالی CO₂ در سطح زمین یا به جو.

۴. راستی‌آزمایی مستقل

- حضور نهادهای نظارتی و سازمان‌های مستقل برای تأیید داده‌ها.
- این امر اعتماد عمومی و سرمایه‌گذاران را افزایش می‌دهد.

چالش‌های ایمنی

- یکی از نگرانی‌های اصلی، خطر نشت CO₂ است. هرچند مطالعات نشان داده‌اند که با انتخاب دقیق مخازن و مدیریت درست، این خطر بسیار پایین خواهد بود.
- همچنین، نیاز به چارچوب‌های حقوقی شفاف وجود دارد تا مسئولیت‌ها در صورت بروز مشکلات مشخص باشد.

ملاحظات زیست‌محیطی در ذخیره‌سازی CO₂

ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن علاوه بر مزایای بالقوه، نیازمند ارزیابی دقیق پیامدهای زیست‌محیطی است:

۱. کیفیت آب‌های زیرزمینی

- یکی از نگرانی‌ها، احتمال تغییر کیفیت آب‌های شور یا شیرین در اثر تماس با CO₂ است.
- پایش مستمر و طراحی صحیح پروژه می‌تواند این ریسک را به حداقل برساند.

۲. زیست‌بوم‌های محلی

- عملیات حفاری و احداث زیرساخت‌ها ممکن است اثراتی موقت بر اکوسیستم‌های محلی داشته باشد.
- اجرای استانداردهای زیست‌محیطی و برنامه‌های بازسازی می‌تواند این اثرات را کاهش دهد.

۳. انتشار غیرمنتظره CO₂

- در صورت بروز نشت گسترده، امکان تهدید سلامت انسان و حیوانات وجود دارد.
- با انتخاب دقیق مخازن زمین‌شناسی و استفاده از فناوری‌های پایش پیشرفته، احتمال چنین رخدادی بسیار اندک است.

۴. ردپای انرژی و کربن خود CCUS

- فرایند جذب، فشرده‌سازی و انتقال CO₂ به انرژی نیاز دارد.
- بنابراین لازم است کارایی سیستم بهینه شود تا مزایای زیست‌محیطی آن بر مصرف انرژی غلبه داشته باشد.

با رعایت اصول علمی، استانداردهای ایمنی و پایش دقیق، ذخیره‌سازی CO₂ می‌تواند روشی مطمئن برای کاهش انتشار باشد و نقش مهمی در راهبردهای جهانی مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا کند.



ناواری‌های CCUS به عنوان یک گزینه حذف CO₂

علاوه بر اجتناب از انتشار دی اکسید کربن، امروزه راهکارهایی برای کاهش و حتی حذف مستقیم CO₂ مطرح شده‌اند. توافق نامه پاریس به طور رسمی فناوری‌های CCS را به عنوان ابزاری کلیدی در دستیابی به بی طرفی کربن تا سال ۲۰۵۰ به رسمیت شناخته است.

با وجود سرمایه گذاری‌های چندین ساله، روشن شد که هزینه‌های سنگین زیرساخت‌های CCS مانع جدی برای سرمایه گذاران است. در نتیجه، فناوری‌های (CCUS) و حتی (CCU) جایگاه خود را در زمره ابزارهای کاهش انتشار پیدا کردند.

این فناوری‌ها اکنون از بهترین راهکارها برای دستیابی به بی طرفی کربن شناخته می‌شوند؛ زیرا هم می‌توانند منابع ارزشمند تولید کنند و هم مستقیماً CO₂ را از اتمسفر حذف نمایند، و در عین حال هزینه‌های ذخیره سازی زمین شناختی را کاهش دهند.

مسیرهای فناوریانه مختلف

- CO₂-EOR (افزایش برداشت نفت): استفاده از تزریق CO₂ برای بهبود استخراج از مخازن نفت و گاز تخلیه شده.
- CO₂-ECBM: تزریق CO₂ در لایه‌های زغال سنگ برای باز یافت متان.
- CO₂-ESR: تزریق در شیل گاز برای افزایش برداشت گاز طبیعی.
- CO₂-EWR: در آبخوان‌های شور عمیق به کار می‌رود. در این فناوری به جای تزریق ساده، همزمان برداشت آب انجام می‌شود؛ این آب پس از تصفیه می‌تواند برای کشاورزی، صنعت یا حتی مصارف خانگی به کار رود.
- CO₂-EGS: تولید انرژی زمین گرمایی برای گرمایش ساختمان‌ها و تولید برق، همراه با ذخیره CO₂.
- CO₂-EGH: تزریق CO₂ برای جایگزینی CH₄ در هیدرات‌های متان.
- لیچینگ اورانیوم با: CO₂ + O₂ تزریق محلولی از CO₂ و O₂ برای حل کردن کانه اورانیوم در محل و استخراج آن از طریق محلول باز یافتی.

این فناوری‌ها نشان می‌دهند که CCUS می‌تواند هم ابزاری پل گونه برای توسعه انرژی‌های پاک آینده باشد و هم راهکاری برای کاهش انتشار نیروگاه‌های فسیلی و صنایع پر کربن.

نتیجه گیری

در سناریوی جدید انرژی-اقلیم، رسیدن به بی طرفی کربن تا ۲۰۵۰ مستلزم یک راهبرد کارآمد است که هم نیازهای انرژی و هم حفاظت از محیط زیست را همزمان پاسخ دهد.

واقعیت این است که ترکیب انرژی جهان هنوز حدود ۸۰٪ متکی بر سوخت‌های فسیلی است. بنابراین، گذار به سیستمی کم کربن به زمان نیاز دارد و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به تنهایی کافی نیست.

در این مسیر، CCUS به عنوان یک فناوری کلیدی مطرح است؛ زیرا:

- می‌تواند انتشار صنایع انرژی بر را کاهش دهد.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

- امکان تولید محصولات جدید بر پایه دی اکسید کربن را فراهم کند.
- و به عنوان راه حل گذار موقت تا بلوغ کامل انرژی های تجدید پذیر عمل کند.

در عین حال، تحقق این چشم انداز نیازمند سرمایه گذاری های کلان، چارچوب های سیاستی شفاف، و پذیرش اجتماعی است. تنها با ترکیب این عوامل می توان اطمینان یافت که CCUS بخشی واقعی و پایدار از جعبه ابزار جهانی برای مقابله با تغییرات اقلیمی خواهد بود.



فصل چهارم: ملاحظات مالی توسعه CCUS

۴.۱ بی طرفی کربن و شکاف مالی

برای دستیابی به اهداف خالص صفر (Net-Zero)، سرمایه گذاری های عظیمی در زیرساخت ها و فناوری های کم کربن مورد نیاز است. یکی از بزرگ ترین چالش ها، شکاف بین منابع مالی موجود و سرمایه لازم برای تحقق پروژه های CCUS است.

۴.۲ اقتصاد پروژه های CCUS – هزینه ها

پروژه های CCUS سرمایه بر هستند و هزینه های زیادی در بخش های زیر دارند:

- زیرساخت جذب) CO₂ واحدهای صنعتی یا نیروگاهی (
- حمل و نقل (خطوط لوله یا کشتی های مخصوص)
- ذخیره سازی زمین شناختی (حفاری، تزریق، مانیتورینگ طولانی مدت)
- هزینه های جانبی مانند تحقیق و توسعه، بیمه و پایش زیست محیطی

این هزینه ها غالباً مانع ورود سرمایه گذاران خصوصی می شوند و نیازمند حمایت های دولتی هستند.

۴.۳ اقتصاد پروژه های CCUS – درآمدها

برای جذب سرمایه، پروژه باید جریان درآمدی پایدار ایجاد کند. منابع احتمالی درآمد شامل:

- قراردادهای فروش CO₂ برای مصارفی مانند افزایش برداشت نفت (EOR) یا کاربردهای صنعتی
- فروش اعتبارهای کربنی یا امتیازات زیست محیطی در بازارهای مبادله انتشار
- تعرفه های توافقی میان توسعه دهنده CCUS و واحدهای آلاینده (Emitterها)

اما عدم قطعیت در بازار و نبود سازوکار پایدار قیمت گذاری، ریسک مهمی برای سرمایه گذاران محسوب می شود.

۴.۴ حمایت های دولتی

از آنجا که CCUS هنوز صنعتی نوپا است، دولت ها نقش حیاتی در یارانه ها، معافیت های مالیاتی، خرید تضمینی و ایجاد بازارهای اعتبارات⁴³ کربنی دارند. کشورهایی که ثبات سیاسی و سیاست های حمایتی پایدار ارائه می دهند، جذاب تر برای سرمایه گذاران هستند.



۴.۵ منابع تأمین مالی پروژه‌ها

- تأمین مالی پروژه‌های (Project Finance) از طریق ایجاد شرکت‌های با هدف خاص (SPV) و جذب سرمایه از بانک‌ها و مؤسسات اعتباری
- سرمایه‌گذاری دولتی یا نیمه‌دولتی
- بازار سرمایه (اوراق قرضه سبز، صندوق‌های سرمایه‌گذاری پایدار)
- مشارکت بخش خصوصی-دولتی (PPP)

۴.۶ چالش‌های جذب سرمایه

سرمایه‌گذاران معمولاً به دلیل موارد زیر مردد هستند:

- نبود بازار تثبیت شده برای CO₂
- ابهام در سیاست‌های کربنی
- ریسک‌های فنی (نشت CO₂، عملکرد فناوری)
- ریسک‌های حقوقی و سیاسی

۴.۷ ریسک‌ها و مدیریت آن‌ها

ریسک‌های کلیدی پروژه‌های CCUS شامل:

- ریسک فناوری: شکست در کارایی فناوری یا نو بودن آن
- ریسک عملکردی: عدم دستیابی به ظرفیت پیش‌بینی شده
- ریسک زمین‌شناسی: نشت یا عدم پایداری مخازن
- ریسک حقوقی و سیاسی: تغییر قوانین، سیاست‌ها یا مقررات زیست‌محیطی
- ریسک مالی: نوسانات نرخ بهره، نرخ ارز و قیمت کربن

مدیریت این ریسک‌ها از طریق قراردادهای شفاف، بیمه، تضمین‌های دولتی و تنوع‌بخشی به درآمد انجام می‌شود.

۴.۸ جمع‌بندی

فناوری CCUS می‌تواند نقش حیاتی در گذار انرژی و تحقق اهداف اقلیمی ایفا کند، اما موفقیت آن وابسته به:

- مدل‌های مالی نوآورانه
- حمایت پایدار دولت‌ها
- بازار شفاف و قابل پیش‌بینی برای کربن
- همکاری نزدیک بخش خصوصی و دولتی



فصل پنجم: ارتباط و نقش CCUS در بی طرفی کربن

۵.۱ مقدمه

جهان در حال حرکت به سمت اهداف خالص صفر انتشار (Net-Zero) است. در این مسیر، CCUS یکی از فناوری‌های محوری به شمار می‌رود؛ زیرا هم می‌تواند انتشارهای دشوار (hard-to-abate) مانند صنایع سنگین را کاهش دهد و هم امکان حذف مستقیم CO₂ از جو را فراهم می‌سازد.

۵.۲ گذار انرژی و حرکت به سمت بی طرفی کربن

گذار انرژی نیازمند مجموعه‌ای از ابزارهاست: توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری، استفاده از انرژی هسته‌ای و همزمان به کارگیری CCUS. این فناوری نقش پلی میان مصرف کنونی سوخت‌های فسیلی و آینده کم کربن ایفا می‌کند.

۵.۳ گذار جهانی به Net Zero و CCUS

در بسیاری از کشورها، صنایع انرژی‌بر و وابستگی به سوخت‌های فسیلی مانع اصلی تحقق Net Zero است. به کشورها اجازه می‌دهد ضمن حفظ رشد اقتصادی و اشتغال، به کاهش انتشار هم دست یابند. از این رو، سازمان‌های بین‌المللی مانند آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و IPCC، CCUS را یک فناوری کلیدی معرفی کرده‌اند.

۵.۴ تأثیر توافق پاریس بر CCUS

۵.۴.۱ تعهدات کلی کاهش انتشار

توافق پاریس، کشورها را ملزم به کاهش تدریجی انتشار کربن کرده است. CCUS ابزاری است که می‌تواند به تحقق این تعهدات کمک کند.

۵.۴.۲ تعهدات مالی اقلیمی

برای کشورهای در حال توسعه، اجرای CCUS بدون حمایت مالی امکان‌پذیر نیست. توافق پاریس مکانیزم‌هایی مانند Green Climate Fund را برای تأمین مالی فراهم کرده است.

۵.۴.۳ تعهدات انتقال فناوری

کشورهای توسعه‌یافته باید دانش و فناوری CCUS را به کشورهای دیگر منتقل کنند. بدون این انتقال، شکاف فناورانه میان شمال و جنوب عمیق‌تر خواهد شد.

۵.۴.۴ تعهدات ظرفیت‌سازی

ظرفیت‌سازی شامل آموزش نیروی انسانی، ایجاد چارچوب‌های حقوقی، تنظیم‌گری و افزایش آگاهی عمومی است. این امر برای پذیرش اجتماعی پروژه‌های CCUS حیاتی است.



۵.۵ آینده CCUS و بی طرفی کربن

پیش بینی ها نشان می دهد نقش CCUS در دهه های آینده پررنگ تر خواهد شد.

- پیشرفت فناوری موجب کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری خواهد شد.
- همکاری بین المللی توسعه زیرساخت های حمل و نقل و ذخیره سازی CO₂ را تسریع می کند.
- حمایت های سیاستی و مالی شرط لازم برای جلب اعتماد سرمایه گذاران است.
- پذیرش اجتماعی با شفاف سازی ریسک ها و منافع پروژه ها تقویت خواهد شد.

۵.۶ نتیجه گیری

CCUS نه تنها یک فناوری مکمل در کنار انرژی های تجدید پذیر است، بلکه برای رسیدن به اهداف Net Zero یک ضرورت غیر قابل اجتناب محسوب می شود. تحقق موفقیت آن مستلزم ترکیب سیاست های حمایتی، انتقال فناوری، سرمایه گذاری پایدار و آگاهی عمومی است.



فصل ششم: محصولات مبتنی بر CCU و مسیرهای فناوری آنها

۶.۱ مقدمه

فناوری‌های (CCU) جذب و استفاده از کربن (نقش منحصربه‌فردی در کاهش تغییرات اقلیمی دارند؛ زیرا CO₂ را به محصولات ارزشمند تبدیل می‌کنند و بدین ترتیب یک اقتصاد چرخشی کربن ایجاد می‌شود. این رویکرد هم باعث کاهش انتشار ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌شود و هم فرصت‌های اقتصادی جدید خلق می‌کند.

۶.۲ مسیرهای فناوریانه CCU

دو مسیر اصلی برای تبدیل CO₂ وجود دارد:

- مسیر فیزیکی: شامل جذب و استفاده مستقیم از CO₂ در فرآیندهایی مانند نوشیدنی‌های گازدار، سردسازی و صنایع غذایی.
- مسیر شیمیایی: تبدیل CO₂ به محصولات جدید از طریق واکنش‌های شیمیایی، شامل تولید:
 - سوخت‌ها (مانند متانول، اتانول و سوخت‌های سنتزی)
 - پلیمرها و پلاستیک‌ها
 - مواد شیمیایی پایه (مانند اوره و کربنات‌ها)
 - مواد ساختمانی (مانند سیمان و بتن با کربن تثبیت‌شده)

۶.۳ سطح آمادگی فناوری (TRL)

فناوری‌های CCU در مراحل مختلف توسعه قرار دارند:

- برخی هنوز در مرحله تحقیق و توسعه آزمایشگاهی هستند.
- برخی به مرحله نمایشی (Pilot/Demo) رسیده‌اند.
- تعداد محدودی نیز در مرحله تجاری‌سازی و استقرار قرار دارند.

میزان تأثیر هر محصول بر کاهش تغییرات اقلیمی، بستگی به مدت زمان ذخیره کربن در آن دارد. برای مثال، استفاده از CO₂ در نوشیدنی گازدار ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت است، در حالی که تبدیل آن به مصالح ساختمانی می‌تواند یک ذخیره‌سازی بلندمدت باشد.

۶.۴ چالش‌های استانداردسازی

یکی از موانع کلیدی توسعه CCU، نبود اصطلاحات و تعاریف یکسان در سطح جهانی است. این مسئله باعث دشواری در:

- تدوین سیاست‌ها،
- مقایسه فناوری‌ها،
- و رعایت الزامات قانونی می‌شود.

بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

استانداردسازی بین‌المللی از طریق نهادهایی مانند ISO/TC 265 و CEN/TC 474 برای ایجاد چارچوب‌های شفاف و هماهنگ ضروری است.

۶.۵ چالش‌های اقتصادی و اجتماعی

- هزینه‌های بالا و نیاز به سرمایه‌گذاری کلان در زیرساخت و تحقیق و توسعه
- نبود زیرساخت‌های کافی در بسیاری کشورها
- پذیرش اجتماعی پایین به علت آگاهی محدود مردم از منافع CCU
- ابهامات سیاسی و ژئوپلیتیکی در خصوص آینده بازار کربن

۶.۶ نتیجه‌گیری

CCU می‌تواند یک رکن اساسی در گذار انرژی و تحقق Net Zero باشد، اما نیازمند:

- نوآوری فناورانه،
- سیاست‌های حمایتی مالی و قانونی،
- استانداردسازی بین‌المللی،
- و افزایش آگاهی و پذیرش اجتماعی است.



فصل هفتم: حقوق و سیاست گذاری‌های بین‌المللی CCUS

۷.۱ مقدمه

فناوری CCUS نه تنها یک ابزار فناورانه است، بلکه نیازمند چارچوب‌های حقوقی و سیاستی کارآمد برای اجرا و پذیرش است. بدون قوانین شفاف در زمینه مالکیت، مسئولیت، محیط زیست و بازار کربن، این فناوری نمی‌تواند به‌طور گسترده توسعه یابد.

۷.۲ ابعاد حقوقی CCUS

- **حقوق مالکیت:** مالکیت بر فضاهای زیرزمینی (pore space) و منابع مرتبط، چالشی اساسی است. بسیاری از کشورها هنوز مقررات روشنی برای تعیین حقوق ذخیره‌سازی زیرزمینی ندارند.
- **مسئولیت و جبران خسارت:** در صورت نشت CO₂ یا بروز خسارت زیست‌محیطی، مسئولیت حقوقی و جبران باید دقیقاً تعریف شود.
- **پایبندی زیست‌محیطی:** قوانین باید الزامات سخت‌گیرانه برای انتخاب محل ذخیره‌سازی، مانیتورینگ و مدیریت ریسک داشته باشند.

۷.۳ سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی

CCUS در قلب سیاست‌های اقلیمی جهانی قرار دارد:

- **توافق پاریس (۲۰۱۵):** نقش CCUS را در رسیدن به بی‌طرفی کربن به رسمیت شناخت.
- **IPCC:** در گزارش‌های خود CCUS را جزو فناوری‌های ضروری برای محدود کردن گرمایش جهانی به ۱.۵ درجه معرفی کرد.
- **آژانس بین‌المللی انرژی (IEA):** سناریوهای خود را بر اساس توسعه گسترده CCUS طراحی کرده است.

۷.۴ تجربه کشورها

- **انگلستان:** چارچوب مقرراتی برای پروژه‌های CCS ایجاد کرده و حمایت مالی دولتی را در اولویت قرار داده است.
- **اتحادیه اروپا:** CCUS را در چارچوب «European Green Deal» و دستورالعمل‌های اقلیمی گنجانده است.
- **ایالات متحده:** با قوانین مالیاتی مانند اعتبار Q۴۵، انگیزه اقتصادی برای جذب سرمایه‌گذاران فراهم کرده است.
- **چین:** در حال تدوین قوانین خاص CCUS در امتداد سیاست‌های اقلیمی ملی خود است.

۷.۵ چالش‌ها

- نبود هماهنگی بین مقررات ملی و بین‌المللی
- پیچیدگی‌های حقوقی مربوط به ذخیره‌سازی فرامرزی CO₂ (cross-border storage)
- تضاد منافع بین بخش خصوصی و دولت‌ها
- ناپایداری حمایت‌های سیاسی در برخی کشورها



بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

۷.۶ نتیجه گیری

CCUS بدون چارچوب‌های حقوقی و سیاستی روشن، نمی‌تواند به‌طور کامل نقش خود را در تحقق بی‌طرفی کربن ایفا کند. برای موفقیت این فناوری نیاز به:

- هماهنگی بین‌المللی
- تدوین قوانین جامع ملی
- سازوکارهای شفاف برای مسئولیت و مالکیت
- پشتیبانی پایدار دولت‌ها و نهادهای بین‌المللی



فصل هشتم: مسائل استانداردسازی مرتبط با CCUS

۸.۱ مقدمه

استانداردسازی یک رکن بنیادین برای موفقیت فناوری‌های CCUS است. بدون وجود چارچوب‌های استاندارد، نمی‌توان الزامات قانونی، ایمنی، شفافیت داده‌ها و همچنین توسعه بازار کربن را به‌طور پایدار تضمین کرد. هدف این فصل بررسی نقش راهبردی استانداردسازی و معرفی حوزه‌های اصلی آن در زمینه CCUS است.

۸.۲ نقش راهبردی استانداردسازی

- استانداردها در گذشته موتور محرک نوآوری در صنایع مختلف بوده‌اند.
- تدوین استانداردهای ملی و بین‌المللی، موجب تضمین کیفیت، ایمنی و سازگاری فناوری‌ها می‌شود.
- در حوزه انرژی، استانداردسازی نقش مهمی در مدیریت ریسک، حفاظت از محیط‌زیست و ایجاد بازار پایدار ایفا می‌کند.

۸.۳ وظایف کلیدی استانداردسازی در نوآوری

مطالعات نشان می‌دهند استانداردسازی پنج کارکرد اساسی برای نوآوری دارد:

۱. توسعه و انتقال دانش: انتشار دانش فنی و بهترین رویه‌ها.
۲. جهت‌دهی پژوهش: تعیین مسیر تحقیقات فناورانه.
۳. آزمایش کارآفرینانه: ایجاد فضای یادگیری و کاهش عدم قطعیت.
۴. ایجاد بازار: تسهیل رقابت و افزایش پذیرش محصولات.
۵. مشروعیت‌بخشی اجتماعی: افزایش اعتماد عمومی و قدرت سیاسی فناوری‌ها.

۸.۴ مسائل فنی نیازمند استانداردسازی در CCUS

- ذخیره‌سازی:
 - معیارهای انتخاب سایت‌های زمین‌شناسی
 - پروتکل‌های تزریق CO₂
 - روش‌های پایش و راستی‌آزمایی برای جلوگیری از نشت
- پایش و گزارش‌دهی:
 - استانداردهای پایش مداوم
 - پروتکل‌های یکسان برای گزارش و تبادل داده
- استفاده از CO₂:
 - تدوین استاندارد برای کیفیت محصولات (سوخت‌ها، مواد شیمیایی، مصالح ساختمانی)
 - تعیین شاخص‌های بهره‌وری و اثرات زیست‌محیطی فرآیندها



بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

• ایمنی و محیط زیست:

- رویه های استاندارد ارزیابی ریسک
- دستورالعمل های کاهش اثرات زیست محیطی (آب، خاک، هوا)
- دستورالعمل حسابداری کربن برای اندازه گیری دقیق CO₂ جذب و ذخیره شده

۸.۵ نهادهای بین المللی استانداردسازی

- **ISO/TC 265** (ایزو): از سال ۲۰۱۱ مسئول استانداردسازی در زمینه جذب، انتقال و ذخیره سازی زمین شناختی CO₂ است. تاکنون ۱۳ استاندارد منتشر کرده است.
- گروه های کاری تخصصی (WG1) تا (WG6) بر حوزه های جذب، حمل و نقل، ذخیره سازی، کمی سازی و راستی آزمایی، مسائل فرابخشی و تزریق برای EOR تمرکز داشته اند.
- از سال ۲۰۱۸، موضوع استفاده از CO₂ (CCU) نیز در دستور کار این کمیته قرار گرفته است.

۸.۶ نتیجه گیری

استانداردسازی برای توسعه جهانی CCUS حیاتی است؛ زیرا:

- ریسک ها را کاهش می دهد،
- رقابت سالم ایجاد می کند،
- پذیرش اجتماعی را افزایش می دهد،
- و توسعه بازارهای بین المللی کربن را تسهیل می نماید.

موفقیت CCUS تنها با استانداردهای شفاف، بین المللی و هماهنگ امکان پذیر است.



فصل نهم: نتیجه‌گیری‌ها و مسیرهای آینده CCUS

۹.۱ درس‌های آموخته‌شده

- استانداردسازی حیاتی است: تجربه‌ها نشان داد که بدون استانداردهای شفاف و بین‌المللی، مقایسه‌پذیری، پذیرش اجتماعی و انطباق مقرراتی CCUS امکان‌پذیر نیست.
- ابهام در اصطلاحات فنی: استفاده ناهم‌هنگ از تعاریف و اختصارات فنی، مشکلات جدی در همکاری‌ها و مقایسه فناوری‌ها ایجاد کرده است.
- ریسک‌های فنی و اقتصادی: از هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری گرفته تا پیچیدگی‌های ذخیره‌سازی زمین‌شناسی، همگی نیازمند سیاست‌های حمایتی و نوآوری در مدل‌های مالی هستند.
- پذیرش اجتماعی و اعتماد عمومی: یکی از عوامل کلیدی موفقیت پروژه‌ها، شفافیت در اطلاع‌رسانی و جلب اعتماد مردم است.

۹.۲ مسیرهای آینده CCUS

۱. پیشرفت‌های فناورانه: انتظار می‌رود با بهبود فناوری‌های جذب، حمل‌ونقل و استفاده، هزینه‌ها کاهش یافته و بهره‌وری افزایش یابد.
۲. استانداردهای جهانی جدید: نهادهایی مانند ISO/TC 265 و CEN/TC 474 به‌طور فعال در حال تدوین دستورالعمل‌های جدید برای حمل‌ونقل، استفاده و حسابداری کربن هستند.
۳. ادغام در سیاست‌های اقلیمی: CCUS بخشی جدانشدنی از استراتژی‌های بین‌المللی برای دستیابی به Net Zero تا سال ۲۰۵۰ خواهد بود.
۴. بازارهای کربن و تأمین مالی نوآورانه: توسعه بازار اعتبارات کربنی و ابزارهای مالی سبز، انگیزه بیشتری برای سرمایه‌گذاران ایجاد خواهد کرد.
۵. گسترش همکاری‌های بین‌المللی: پروژه‌های فرامرزی (cross-border) در زمینه حمل و ذخیره‌سازی CO₂ به شکل جدی‌تری دنبال خواهند شد.
۶. افزایش پذیرش اجتماعی: آموزش، ظرفیت‌سازی و شفافیت در مدیریت ریسک‌ها، نقش مهمی در مقبولیت اجتماعی CCUS ایفا خواهد کرد.

۹.۳ نتیجه‌گیری کلی

CCUS دیگر صرفاً یک فناوری آزمایشی نیست، بلکه به یک ابزار کلیدی و اجتناب‌ناپذیر در مبارزه جهانی با تغییرات اقلیمی تبدیل شده است. موفقیت آن در گروی:

- سیاست‌های پایدار و مشوق‌های اقتصادی
- استانداردسازی بین‌المللی و شفاف
- سرمایه‌گذاری کلان و مدل‌های مالی جدید
- پذیرش و اعتماد عمومی

تنها در این صورت است که CCUS می‌تواند به‌طور مؤثر به تحقق اهداف اقلیمی و بی‌طرفی کربن کمک کند و آینده‌ای پایدارتر برای جهان رقم بزند.





فصل دهم: CCUS در استرالیا

۱۰.۱ مقدمه

استرالیا به عنوان یک کشور تولیدکننده نفت و گاز، عمدتاً بر گاز طبیعی برای تولید برق و حرارت صنعتی متکی بوده است. گاز در حدود ۲۷٪ از مصرف انرژی این کشور را تشکیل می‌دهد و در کنار زغال سنگ و نفت نقش بزرگی در اقتصاد دارد. با توجه به تعهد استرالیا به توافق پاریس و هدف خالص صفر تا سال ۲۰۵۰، فناوری‌های CCUS به عنوان یکی از کلیدی‌ترین ابزارهای کاهش انتشار کربن معرفی شده‌اند.

۱۰.۲ پروژه‌ها و ظرفیت‌های زمین‌شناسی

استرالیا دارای حوضه‌های زمین‌شناسی گسترده و مناسبی برای ذخیره‌سازی CO₂ است. برخی از پروژه‌های شاخص:

- **پروژه موومبا (Moomba CCS):** توسط شرکت Santos در حوضه Cooper-Eromanga اجرا می‌شود. هدف آن ایجاد یک مرکز ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ است که قابلیت ذخیره بیش از ۴۰۰ میلیون تن CO₂ را دارد. این پروژه همچنین امکان استفاده از CO₂ برای افزایش برداشت نفت (EOR) را فراهم می‌کند.
- **پروژه ZeroGen (ایالت کوئینزلند):** در اوایل دهه ۲۰۱۰ با هدف ساخت نیروگاه ۴۰۰ مگاواتی با فناوری گازسازی زغال سنگ و ذخیره‌سازی CO₂ آغاز شد، اما در سال ۲۰۱۱ به دلیل مشکلات مالی متوقف گردید. با وجود شکست، این پروژه بستر حقوقی برای توسعه پروژه‌های بعدی در کوئینزلند فراهم کرد.
- **پروژه‌های ایالت ویکتوریا:** شامل پژوهش‌ها و طرح‌های آزمایشی ذخیره‌سازی در حوضه Gippsland Basin که هنوز در مراحل اولیه است.

۱۰.۳ چارچوب‌های حقوقی و زمین‌های بومی

یکی از ویژگی‌های مهم استرالیا، وجود نظام Native Title و زمین‌های بومی (Aboriginal freehold land) است. بر اساس قانون حقوق بومیان ۱۹۷۷، بسیاری از اراضی به مالکیت دائمی و غیرقابل انتقال قبایل بومی درآمده‌اند. هرگونه فعالیت مربوط به نفت، گاز یا CCUS در این اراضی نیازمند:

- رضایت مالکان سنتی (Traditional Owners)
- موافقت وزیر فدرال
- قرارداد رسمی میان طرفین

Native Title Act همچنین فرآیندهای ویژه‌ای مانند توافق‌های استفاده از زمین‌های بومی (ILUAs) را پیش‌بینی کرده است که طی آن می‌توان مجوز فعالیت‌های آتی (از جمله ذخیره‌سازی CO₂) را با توافق جامعه بومی اخذ کرد.



۱۰.۴ چارچوب‌های مقرراتی

- ذخیره‌سازی ساحلی (Onshore): عمدتاً در اختیار دولت‌های ایالتی و سرزمینی است.
- ذخیره‌سازی فراساحلی (Offshore): در حوزه دولت فدرال قرار می‌گیرد.

با این حال، مقررات هنوز پراکنده و ناقص هستند. برخی ایالت‌ها مانند نیوساوثولز فاقد قوانین جامع CCUS هستند، در حالی که ایالت‌هایی مانند ویکتوریا قانون خاصی برای گازهای گلخانه‌ای تدوین کرده‌اند. ایالت‌های دیگر (NT, SA, WA) CCUS را در چارچوب قوانین نفت و گاز خود گنجانده‌اند.

۱۰.۵ مسئولیت‌ها و چالش‌ها

- در حال حاضر، نبود قانون جامع باعث شده مسئولیت‌های حقوقی (مانند نشت احتمالی CO₂ به‌طور شفاف تعریف نشده باشد).
- نیاز به تعیین مسئولیت‌های مالی و محیط‌زیستی پروژه‌ها وجود دارد.
- هماهنگی بین دولت‌های ایالتی و دولت فدرال هنوز ناکافی است.

۱۰.۶ نتیجه‌گیری

استرالیا با داشتن ظرفیت‌های زمین‌شناسی غنی و تجربه در حوزه انرژی، می‌تواند به یک بازیگر کلیدی در CCUS جهانی تبدیل شود. با این حال:

- چارچوب‌های حقوقی و مقرراتی شفاف‌تر،
- سرمایه‌گذاری‌های کلان دولتی و خصوصی،
- و پذیرش اجتماعی

برای موفقیت این مسیر ضروری هستند.



فصل یازدهم: CCUS در چین

۱۱.۱ مقدمه

چین به عنوان بزرگ‌ترین منتشرکننده گازهای گلخانه‌ای جهان، اهداف بسیار بلندپروازانه‌ای برای کاهش انتشار و دستیابی به کربن خنثی (Carbon Neutrality) تعیین کرده است. فناوری CCUS نقشی حیاتی در تحقق این اهداف ایفا می‌کند. دولت چین از دهه ۲۰۰۰ تاکنون سیاست‌ها و برنامه‌های متعددی برای توسعه و تجاری‌سازی CCUS تصویب کرده است.

۱۱.۲ اهمیت CCUS در راهبرد اقلیمی چین

- CCUS در استراتژی‌های اقلیمی چین به عنوان ابزار مکمل انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته می‌شود.
- پروژه‌های پایلوت و صنعتی بزرگ (مانند پروژه Shenhua در صنعت زغال‌سنگ به مایعات) نشان‌دهنده تعهد دولت به توسعه این فناوری هستند.
- در چارچوب برنامه پنج‌ساله چهاردهم (۱۴th FYP)، CCUS یکی از حوزه‌های کلیدی برای تحقیق، توسعه و استقرار معرفی شده است.

۱۱.۳ وضعیت پروژه‌ها

- چین تاکنون بزرگ‌ترین زنجیره صنعتی CCUS در آسیا را ایجاد کرده است.
- پروژه Qilu Petrochemical – Shengli Oilfield با ظرفیت بیش از یک میلیون تن CO₂ در سال، نمونه شاخص تجاری است.
- ده‌ها پروژه در صنایع فولاد، برق، پتروشیمی و سیمان در حال توسعه یا برنامه‌ریزی هستند.

۱۱.۴ چارچوب‌های قانونی و سیاستی

- قوانین و سیاست‌های بعد از کنگره ملی حزب کمونیست در سال ۲۰۱۲ موجب جهش در R&D شدند.
- مقررات کنونی عمدتاً بر موارد زیر متمرکز هستند:
 - انتخاب محل ذخیره‌سازی و مجوزها
 - پایش، گزارش‌دهی و راستی‌آزمایی (MRV)
 - حفاظت زیست‌محیطی و ایمنی تزریق
- با این حال، هنوز چارچوب جامع اختصاصی برای CCUS وجود ندارد و مقررات به‌طور پراکنده در قوانین محیط‌زیست و انرژی دیده می‌شوند.

۱۱.۵ چالش‌ها و خلأها

- نبود دستورالعمل شفاف در زمینه مسئولیت‌های حقوقی و مالی بلندمدت ذخیره‌سازی CO₂
- ناکافی بودن مشوق‌های مالی و حمایتی برای جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی



بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

- کمبود پروتکل‌های یکپارچه برای پایش و مدیریت ریسک‌های زیست‌محیطی
- ضعف در هماهنگی بین دولت مرکزی، نهادهای پژوهشی و صنایع

۱۱.۶ پیشنهادات برای چارچوب حقوقی آینده

۱. تدوین یک چارچوب جامع قانونی ویژه CCUS در سطح ملی.
۲. تعیین دقیق مسئولیت‌ها در حوزه انتخاب، بهره‌برداری و بستن سایت‌های ذخیره‌سازی.
۳. ایجاد مشوق‌های مالی مانند اعتبارات مالیاتی و یارانه‌ها برای پروژه‌ها.
۴. تقویت همکاری بین وزارتخانه‌ها، پژوهشگاه‌ها و صنایع از طریق کنسرسیوم‌ها و کارگروه‌های مشترک.
۵. همسویی مقررات ملی با استانداردها و بهترین رویه‌های بین‌المللی جهت تسهیل همکاری‌های فرامرزی.
۶. گسترش سیاست‌های حمایتی مکمل، شامل بازار تجارت کربن (ETS) و مکانیزم‌های اعتبار کربنی.

۱۱.۷ نتیجه‌گیری

چین CCUS را بخشی جدایی‌ناپذیر از مسیر کاهش انتشار و بی‌طرفی کربنی می‌داند. آینده CCUS در چین با توجه به تعهد سیاسی قوی، ظرفیت‌های صنعتی عظیم و سرمایه‌گذاری‌های رو به رشد بسیار امیدوارکننده است. با رفع خلأهای قانونی، گسترش همکاری بین‌المللی و تقویت پذیرش اجتماعی، چین می‌تواند به یکی از رهبران جهانی CCUS تبدیل شود.



فصل دوازدهم: CCUS در ژاپن

۱۲.۱ مقدمه

ژاپن یکی از کشورهای صنعتی پیشرفته و در عین حال از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی در آسیاست که متکی بر واردات سوخت‌های فسیلی است. این کشور برای دستیابی به هدف کربن خنثی تا سال ۲۰۵۰، فناوری CCUS را به عنوان یک رکن کلیدی در استراتژی خود در نظر گرفته است.

۱۲.۲ پروژه‌ها و ابتکارات کلیدی

- دولت ژاپن از اوایل دهه ۲۰۰۰ سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در تحقیق و توسعه CCUS آغاز کرد.
- پروژه **توماکومای (Tomakomai CCS Project)** نخستین پروژه صنعتی کامل کشور بود که از سال ۲۰۱۶ آغاز و بیش از ۳۰۰ هزار تن CO₂ را در هر سال به زیر بستر دریای ژاپن تزریق کرد.
- تجربه موفق این پروژه، پایه‌گذار طرح‌های بعدی از جمله پروژه **Kashiwazaki-Kariwa** در بخش انرژی هسته‌ای و پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی در هوکایدو شد.
- ژاپن همچنین در پروژه‌های مشترک بین‌المللی، به‌ویژه با **اندونزی، مالزی و استرالیا** در زمینه انتقال فناوری و ساخت زنجیره ارزش CCUS همکاری دارد.

۱۲.۳ چارچوب سیاستی و قانونی

- سیاست‌های CCUS در ژاپن تحت نظارت وزارت اقتصاد، تجارت و صنعت (METI) و آژانس منابع طبیعی و انرژی (ANRE) اجرا می‌شود.
- CCUS در برنامه نوآوری سبز (Green Innovation Fund) جایگاه ویژه‌ای دارد که بیش از ۲ تریلیون ین برای توسعه فناوری‌های کربن‌زدایی تخصیص داده است.
- چارچوب قانونی فعلی بیشتر از مقررات موجود در قانون نفت و گاز فراساحلی (Offshore Resources Act) و قانون ایمنی محیط‌زیست دریایی تبعیت می‌کند.
- هنوز یک قانون جامع مستقل برای CCUS تدوین نشده، اما دولت در حال تهیه پیش‌نویس آن است.

۱۲.۴ موانع و چالش‌ها

- هزینه‌های بالا: اجرای پروژه‌های ذخیره‌سازی در زیر بستر دریا نیازمند سرمایه‌گذاری سنگین است.
- پذیرش اجتماعی: مردم در ژاپن نگرانی‌هایی درباره ایمنی زیرزمینی CO₂ دارند، به‌ویژه در مناطقی که سابقه زلزله زیاد است.
- نبود چارچوب قانونی جامع: در حال حاضر قوانین موجود از سایر بخش‌ها اقتباس شده‌اند و برای CCUS اختصاصی نیستند.
- وابستگی به فناوری‌های خارجی: برخی تجهیزات تزریق و پایش از اروپا وارد می‌شود.



۱۲.۵ فرصت‌ها و مزایا

- ژاپن دارای ظرفیت زمین‌شناسی مناسبی برای ذخیره CO₂ در بستر دریایی است (حدود ۱۰۰ میلیارد تن ظرفیت ذخیره‌سازی تخمین زده شده است).
- صنایع فولاد، شیمیایی و نیروگاهی به عنوان مشتریان بالقوه CCUS شناسایی شده‌اند.
- با ترکیب CCUS با تولید آمونیاک و هیدروژن کم‌کربن، ژاپن در حال ساخت زنجیره انرژی پاک جدیدی است.
- ژاپن به عنوان یکی از بنیان‌گذاران «شبکه آسیایی CCUS» نقش فعالی در انتقال فناوری و همکاری منطقه‌ای دارد.

۱۲.۶ همکاری‌های بین‌المللی

- در سال ۲۰۲۲، تفاهم‌نامه همکاری با اندونزی برای توسعه فناوری‌های کربن‌زدایی از جمله هیدروژن، آمونیاک و CCUS امضا شد.
- همکاری مشترک با IEA، آژانس همکاری‌های اقتصادی آسیا-اقیانوسیه (APEC) و بانک توسعه آسیایی (ADB) برای ایجاد استانداردهای مشترک و تأمین مالی پروژه‌ها در حال انجام است.
- ژاپن همچنین میزبان چندین کارگروه تخصصی در زمینه استانداردسازی و ایمنی CCUS است.

۱۲.۷ نتیجه‌گیری

ژاپن با وجود محدودیت‌های جغرافیایی و منابع طبیعی، با تکیه بر فناوری پیشرفته و سیاست‌های نوآورانه، مسیر روشنی برای توسعه CCUS ترسیم کرده است. پروژه‌هایی مانند Tomakomai و برنامه‌های مشترک آسیایی، نشان‌دهنده تعهد ژاپن به تبدیل شدن به رهبر منطقه‌ای در فناوری‌های جذب و ذخیره کربن هستند.

در صورت تدوین قانون جامع و افزایش حمایت مالی و اجتماعی، ژاپن می‌تواند تا سال ۲۰۳۵ یکی از پیشگامان جهانی CCUS باشد.



فصل سیزدهم: CCUS در اندونزی

۱۳.۱ مقدمه

اندونزی یکی از بزرگ‌ترین مراکز صنعتی در آسیای جنوب شرقی است و متأسفانه از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای در جهان نیز محسوب می‌شود. در راستای روند جهانی کاهش انتشار کربن، دولت اندونزی هدف خنثی‌سازی کربن تا سال ۲۰۶۰ را اعلام کرده است؛ در حالی که همچنان وابستگی زیادی به منابع طبیعی، به‌ویژه نفت و گاز دارد.

در این شرایط، فناوری‌های (CCS) جذب و ذخیره کربن (و) (CCUS) جذب، استفاده و ذخیره کربن (به عنوان راهبردهای کلیدی برای کاهش انتشار کربن و حفظ رشد اقتصادی مطرح شده‌اند. مطالعات انجام‌شده توسط مؤسسه ملی تحقیقات انرژی (LEMIGAS) نشان می‌دهد که ظرفیت بالقوه ذخیره‌سازی CO₂ در اندونزی حدود ۱۲.۲ میلیارد تن است (۲.۵ میلیارد تن در مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده و ۹.۷ میلیارد تن در سفره‌های آب شور).

۱۳.۲ پروژه‌های شاخص CCUS در اندونزی

اندونزی در سال‌های اخیر چندین پروژه بزرگ CCUS را آغاز کرده است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

تاریخ بهره‌برداری	ظرفیت ذخیره‌سازی	شرکت‌های درگیر	پروژه
۲۰۲۶	چند صد میلیون تن	Carbon Aceh & PEMA	Arun CCS
۲۰۲۷	۳ میلیون تن در سال	Pertamina, JOGMEC, ITB	Gundih CCS
۲۰۲۷/۲۰۲۶	۲۵ تا ۳۳ میلیون تن در ۱۵ سال	BP Indonesia	Tangguh CCUS
۲۰۲۹	۷۰ میلیون تن تا ۲۰۵۵	INPEX Masela Ltd	Abadi CCUS
۲۰۲۸	در حال ارزیابی	Pertamina	Kutai Basin CCUS Hub
۲۰۲۸	۱۹ میلیون تن در ۲۰ سال	Mitsubishi, Pertamina, JOGMEC	Blue Ammonia CCUS

طبق پیش‌بینی‌ها، ظرفیت حذف CO₂ از سال ۲۰۲۶ حدود ۲.۵ میلیون تن در سال آغاز و تا سال ۲۰۳۱ به ۸.۶ میلیون تن در سال افزایش خواهد یافت.

۱۳.۳ چارچوب قانونی و نهادی

اجرای پروژه‌های CCUS در اندونزی بر اساس مقررات وزارت انرژی و منابع معدنی (MEMR Regulation No. 2/2023) صورت می‌گیرد که ناظر بر فعالیت‌های بالادستی نفت و گاز است.

ویژگی‌های کلیدی این مقررات:

- الزام به ارائه برنامه‌های پایش، ایمنی و بستن چاه‌ها.
- اخذ مجوز از وزارت انرژی برای تزریق و ذخیره CO₂.
- مسئولیت کامل مالی پروژه‌ها بر عهده پیمانکاران است.
- در صورت بروز وضعیت نایمن یا فورس‌ماژور، شرکت موظف است ظرف ۲۴ ساعت گزارش ارائه دهد.

اندونزی در حال تدوین پیش‌نویس آیین‌نامه ریاست‌جمهوری برای گسترش کاربرد CCUS به سایر صنایع (غیر از نفت و گاز) است.

۱۳.۴ مشوق‌های مالی و مالیاتی

بر اساس مقررات MEMR، پیمانکاران فعال در CCUS می‌توانند از مشوق‌های مالیاتی بهره‌مند شوند، از جمله:

- معافیت از عوارض واردات تجهیزات صنعتی،
- معافیت از مالیات بر ارزش افزوده و مالیات بر کالاهای لوکس،
- معافیت از مالیات بر درآمد برای کالاهای وارداتی پروژه،
- و تخفیف ۱۰۰٪ مالیات زمین و ساختمان.

همچنین شرکت دولتی SKK Migas در حال بررسی افزایش سهم تولید (production entitlement) برای پیمانکاران نفت و گازی است که CCUS را پیاده‌سازی می‌کنند.

۱۳.۵ چالش‌ها و نگرانی‌ها

۱. هزینه‌های بالا: هزینه جذب در بخش نفت و گاز حدود ۱۶ دلار در هر تن CO₂ و در صنایع دیگر به طور میانگین ۴۵ دلار در هر تن است؛ اما در برخی فناوری‌ها ممکن است تا ۲۰۰ دلار برسد.
۲. هزینه حمل‌ونقل: بخش اعظم انتشارها در جزیره جاوه رخ می‌دهد، در حالی که محل‌های مناسب ذخیره در سوماترا و کالیمانتان قرار دارند. این اختلاف جغرافیایی هزینه انتقال را افزایش می‌دهد.
۳. ریسک‌های زیست‌محیطی: خطر نشت از مخازن زیرزمینی و نبود تجربه عملی در مقیاس بزرگ.
۴. نبود مشوق‌های مشخص: با وجود وعده دولت، هنوز سازوکارهای مشخصی برای انگیزه‌دهی سرمایه‌گذاران وجود ندارد.
۵. قیمت پایین کربن در بازار داخلی: در بازار کربن اندونزی (راه‌اندازی شده در ۲۰۲۳)، قیمت هر تن CO₂ حدود ۴ تا ۵ دلار است؛ در حالی که در اتحادیه اروپا بیش از ۱۰۰ دلار است.

۱۳.۶ درس‌های آموخته‌شده

- تدوین مقررات MEMR 2/2023 گام مهمی برای ایجاد شفافیت در بخش نفت و گاز بود.
- با این حال، نبود قانون جامع برای سایر صنایع مانع جذب سرمایه‌گذاری است.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

- ایجاد خوشه‌های صنعتی (CCUS (Cluster Hubs می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد.
- فناوری هنوز نوظهور و پرهزینه است، لذا دولت باید مشوق‌های مالی مستقیم ایجاد کند.

۱۳.۷ نتیجه‌گیری

اندونزی با ظرفیت ذخیره‌سازی بیش از ۱۲ میلیارد تن CO_2 ، پتانسیل تبدیل شدن به قطب منطقه‌ای CCUS در جنوب شرق آسیا را دارد. با وجود چالش‌های اقتصادی و نهادی، گام‌های اخیر دولت – از جمله تصویب مقررات MEMR 2/2023 و تدوین مقررات ریاست‌جمهوری جدید – نشان می‌دهد که مسیر توسعه CCUS در اندونزی آغاز شده است.

در صورت حمایت قانونی و مالی مناسب، اندونزی می‌تواند تا میانه قرن بیست‌ویکم به یکی از بازیگران اصلی جهان در کاهش انتشار کربن تبدیل شود.



فصل چهاردهم: CCUS در هند

۱۴.۱ مقدمه

هند به عنوان سومین انتشاردهنده بزرگ گازهای گلخانه‌ای در جهان، در مسیر توسعه اقتصادی خود با چالش بزرگی در کاهش انتشار مواجه است. دولت هند CCUS را به عنوان یکی از ابزارهای استراتژیک برای دستیابی به اهداف اقلیمی و امنیت انرژی معرفی کرده است.

۱۴.۲ نگرش‌ها و انتقادات

- برخی کارشناسان معتقدند استقرار گسترده CCUS در هند هنوز غیراثبات شده و پرهزینه است.
- گروه‌های محیط‌زیستی نگرانی‌هایی درباره ذخیره‌سازی پسماندهای خطرناک ناشی از CCS مشابه با انرژی هسته‌ای مطرح کرده‌اند.
- یکی از انتقادهای اصلی، کاهش بازدهی نیروگاه‌ها به دلیل مصرف انرژی اضافی CCS (بین ۱۰ تا ۴۰ درصد انرژی تولیدی) است.

۱۴.۳ مسائل زیست‌محیطی و پذیرش عمومی

- ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment) نشان داده که هرچند CCS می‌تواند کاهش چشمگیر CO₂ ایجاد کند، اما ممکن است برخی آثار منفی زیست‌محیطی دیگر را افزایش دهد.
- پذیرش اجتماعی عامل مهمی در موفقیت CCUS است و نیازمند آگاهی‌رسانی و جلب اعتماد مردم می‌باشد.

۱۴.۴ سیاست‌ها و چارچوب‌های قانونی

- دولت هند CCUS را در سیاست‌های انرژی و اقلیمی گنجانده است، اما هنوز چارچوب قانونی جامع برای این فناوری وجود ندارد.
- برخی برنامه‌های تحقیق و توسعه و پروژه‌های پایلوت با حمایت وزارت انرژی و وزارت محیط‌زیست اجرا شده‌اند.
- نیاز به تدوین قوانین ملی ویژه CCUS برای تعیین مسئولیت‌ها، مجوزها، ایمنی و استانداردسازی وجود دارد.

۱۴.۵ پروژه‌ها و ابتکارات

- پروژه‌های پایلوت در صنایع زغال‌سنگ، فولاد و پتروشیمی راه‌اندازی شده‌اند.
- همکاری‌های تحقیقاتی با مراکز بین‌المللی (مانند IEA و بانک جهانی) در حال گسترش است.
- ظرفیت بالقوه ذخیره‌سازی زمین‌شناسی در حوضه‌های رسوبی هند مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱۴.۶ چالش‌ها

- هزینه‌های سنگین سرمایه‌گذاری و نبود مشوق‌های مالی کافی.
- نبود هماهنگی بین ایالت‌ها و دولت مرکزی در سیاست‌گذاری.
- ضعف در توسعه زیرساخت‌های حمل و ذخیره‌سازی CO₂.
- ابهامات حقوقی و مسئولیت‌های بلندمدت ذخیره‌سازی.



۱۴.۷ نتیجه گیری

CCUS برای هند یک ضرورت استراتژیک به شمار می رود، اما مسیر توسعه آن نیازمند:

- چارچوب حقوقی شفاف و جامع،
- سرمایه گذاری دولتی و مشوق های مالی،
- توسعه فناوری بومی همراه با انتقال فناوری بین المللی،
- و تقویت پذیرش اجتماعی و زیست محیطی است.

هند با وجود چالش ها، می تواند با استفاده از CCUS جایگاه مهمی در تحقق اهداف جهانی کربن خنثی داشته باشد.



فصل پانزدهم: CCUS در خاورمیانه

۱۵.۱ مقدمه

منطقه خاورمیانه با داشتن ذخایر عظیم نفت و گاز، نقش اساسی در بازار جهانی انرژی ایفا می‌کند، اما همین امر باعث شده این منطقه از جمله مناطق با بیشترین شدت انتشار CO_2 در جهان باشد. با این وجود، کشورهای منطقه در دهه اخیر با هدف کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تحقق اهداف خنثی‌سازی کربن (Net Zero)، به فناوری‌های CCUS (جذب، استفاده و ذخیره کربن) به عنوان ابزار اصلی انتقال انرژی روی آورده‌اند.

در اجلاس COP28 (در دبئی) ۲۰۲۳، کشورهای عربی حوزه خلیج فارس از جمله عربستان سعودی، امارات، قطر و عمان تعهدات جدیدی در زمینه کاهش انتشار و سرمایه‌گذاری در CCUS اعلام کردند.

۱۵.۲ وضعیت کنونی و پروژه‌های شاخص

- **عربستان سعودی:** از پیشگامان منطقه در حوزه CCUS است. شرکت **Aramco** پروژه‌های جذب و تزریق CO_2 در میادین نفتی خود (به‌ویژه در میدان Ghawar) را اجرا کرده است.
 - پروژه **Uthmaniyah CO_2 -EOR** سالانه حدود ۸۰۰ هزار تن CO_2 تزریق می‌کند.
 - هدف عربستان دستیابی به ظرفیت ۴۴ میلیون تن CO_2 در سال تا ۲۰۳۵ است.
- **امارات متحده عربی:** پروژه **Al Reyadah** نخستین پروژه تجاری CCS در خاورمیانه است که در سال ۲۰۱۶ توسط **ADNOC** و **Masdar** آغاز شد. این پروژه سالانه حدود ۸۰۰ هزار تن CO_2 را از صنایع فولاد **Emirates Steel** جذب و در میادین نفتی ذخیره می‌کند.
- **قطر:** در پروژه‌های LNG خود در رأس‌لافان ظرفیت ۲.۲ میلیون تن در سال را ایجاد کرده و قصد دارد تا سال ۲۰۳۵ به ۱۱ میلیون تن در سال برسد.
- **عمان و بحرین:** نیز برنامه‌هایی برای توسعه پروژه‌های مشترک با شرکت‌های بین‌المللی دارند.

۱۵.۳ چارچوب سیاستی و قانونی

- کشورهای منطقه در حال تدوین مقررات جدید برای ذخیره زمین‌شناسی CO_2 و تجارت کربن هستند.
- امارات در سال ۲۰۲۳ نخستین استراتژی ملی CCUS خود را تصویب کرد که شامل حمایت از پروژه‌های CCUS، ایجاد مشوق‌های مالی و همکاری با نهادهای بین‌المللی مانند IEA است.
- عربستان سعودی نیز در چشم‌انداز ۲۰۳۰ (Vision 2030)، CCUS را به‌عنوان رکن کلیدی در گذار انرژی معرفی کرده است.



۱۵.۴ چالش‌ها

۱. هزینه‌های بالا: اجرای پروژه‌های CCUS در مقیاس صنعتی نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان است.
۲. نبود چارچوب حقوقی یکپارچه: مقررات ملی هنوز پراکنده و غیرهماهنگ هستند.
۳. پذیرش اجتماعی پایین: افکار عمومی هنوز آگاهی محدودی از مزایای زیست‌محیطی CCUS دارد.
۴. تکیه بر درآمدهای نفت و گاز: این وابستگی موجب کندی در تنوع‌بخشی انرژی می‌شود.

۱۵.۵ فرصت‌ها و مزیت‌های منطقه‌ای

- ظرفیت زمین‌شناسی بالا: سازندهای نفت و گاز تخلیه‌شده در خاورمیانه برای ذخیره‌سازی CO₂ بسیار مناسب‌اند.
- زیرساخت‌های انرژی پیشرفته: شبکه گسترده خطوط لوله، پایانه‌های LNG و تأسیسات صنعتی، توسعه CCUS را تسهیل می‌کند.
- منابع مالی قوی: دولت‌های ثروتمند منطقه قادرند از صندوق‌های ملی و حاکمیتی برای تأمین مالی پروژه‌ها استفاده کنند.
- هم‌افزایی با تولید هیدروژن آبی: CCUS به‌ویژه برای حذف کربن از فرآیند تولید هیدروژن از گاز طبیعی حیاتی است.

۱۵.۶ نقش همکاری‌های بین‌المللی

- کشورهای خلیج فارس در حال همکاری با شرکت‌های بین‌المللی مانند **Shell**، **TotalEnergies**، **BP** و **Mitsubishi** و **JOGMEC** برای توسعه پروژه‌های CCUS هستند.
- ایجاد شبکه‌های تحقیقاتی مشترک مانند **Gulf CCUS Network** برای تبادل دانش فنی و استانداردسازی در حال گسترش است.
- بانک جهانی و **IEA** نیز برنامه‌هایی برای حمایت از تأمین مالی پروژه‌های اولیه CCUS در منطقه دارند.

۱۵.۷ نتیجه‌گیری

خاورمیانه با در اختیار داشتن منابع عظیم مالی، زیرساخت‌های انرژی پیشرفته و ظرفیت زمین‌شناسی مناسب، می‌تواند به هاب جهانی CCUS تبدیل شود.

اما برای تحقق این چشم‌انداز، کشورهای منطقه باید:

۱. چارچوب‌های قانونی و نظارتی جامع و شفاف تدوین کنند،
۲. آگاهی عمومی و پذیرش اجتماعی را افزایش دهند،
۳. و سازوکارهای مالی پایدار (از جمله تجارت کربن و مشوق‌های مالیاتی) ایجاد کنند.

با تحقق این موارد، CCUS می‌تواند به ابزاری مؤثر برای دستیابی به اهداف اقلیمی و اقتصادی خاورمیانه تبدیل شود.



فصل شانزدهم: CCUS در آفریقا

۱۶.۱ مقدمه

CCUS شامل سه مرحله اصلی است:

۱. جذب کربن از منبع انتشار یا مستقیماً از جو،
۲. فشرده سازی و انتقال کربن به سایت های ذخیره سازی از طریق خط لوله، راه آهن یا کامیون،
۳. تزریق در سازندهای زمین شناسی عمیق برای ذخیره دائمی.

در برخی موارد نیز، CO₂ می تواند به طور موقت در مخازن نفتی تخلیه شده ذخیره و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این ویژگی باعث شده CCUS به عنوان یک ابزار حیاتی برای اقدامات اقلیمی جهانی مطرح شود. در COP27 (۲۰۲۲) نقش CCUS در صنعتی سازی همراه با کاهش کربن پررنگ شد و به ویژه برای کشورهایی با صنایع سنگین، فرصتی اقتصادی و زیست محیطی به شمار آمد.

۱۶.۲ وضعیت آفریقا و ضرورت CCUS

آفریقا با وجود سهم کمتر در انتشار جهانی، به شدت از تغییرات اقلیمی آسیب می بیند. کشورهایی مانند نیجریه، آفریقای جنوبی و الجزایر به دلیل وابستگی به نفت، گاز و زغال سنگ، انتشار بالایی دارند.

- نیجریه: به دلیل مشعل سوزی گاز و صنایع انرژی بر، یکی از بازیگران اصلی انتشار در آفریقا است. این کشور با تصویب توافق پاریس (۲۰۱۵) و تعهد به کاهش ۲۰٪ غیرمشروط و ۴۷٪ مشروط تا ۲۰۳۰، و همچنین تعهد به خنثی سازی کربن تا ۲۰۶۰، گام های مهمی برداشته است.

۱۶.۳ تعهدات بین المللی

- کشورهای آفریقایی از طریق (NDCs) مشارکتهای تعیین شده ملی (تعهدات خود را به کنوانسیون تغییرات اقلیم سازمان ملل ثبت کرده اند.
- در اجلاس های COP26 و COP27، اهمیت CCUS به عنوان ابزاری برای توسعه همراه با کاهش انتشار، به ویژه در آفریقا مورد تأکید قرار گرفت.

۱۶.۴ فرصتها

- آفریقا دارای ظرفیت زمین شناسی عظیم برای ذخیره سازی کربن است.
- امکان استفاده از CCUS برای افزایش برداشت نفت (EOR) وجود دارد.
- سرمایه گذاری در CCUS می تواند بازارهای جدید و اشتغال ایجاد کند.



۱۶.۵ چالش‌ها

- هزینه‌های بالا و محدودیت‌های مالی بزرگ‌ترین مانع توسعه CCUS در آفریقا هستند.
- فقدان چارچوب‌های قانونی جامع برای مجوزها، ایمنی و مسئولیت‌ها.
- کمبود زیرساخت‌های حمل و نقل CO₂ و فناوری بومی.
- پذیرش اجتماعی پایین به دلیل کمبود آگاهی عمومی و ترس از ریسک‌های زیست‌محیطی.

۱۶.۶ نتیجه‌گیری

اگرچه آفریقا سهم کمی در انتشار جهانی دارد، اما پتانسیل بزرگی برای تبدیل شدن به یک پیشرو در CCUS دارد. تحقق این هدف منوط به:

- حمایت مالی و فنی بین‌المللی،
- ایجاد چارچوب‌های حقوقی و سیاستی شفاف،
- سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و فناوری‌های بومی،
- و جلب اعتماد اجتماعی از طریق آموزش و مشارکت عمومی است.

CCUS می‌تواند هم به کاهش انتشار و هم به توسعه پایدار در آفریقا کمک کند، به شرط آنکه همکاری بین‌المللی و داخلی تقویت شود.



فصل هفدهم: CCUS در نروژ

۱۷.۱ مقدمه

نروژ به عنوان یکی از کشورهای پیشرو در اروپا، سابقه‌ای طولانی در توسعه پروژه‌های CCUS دارد. این کشور با تکیه بر تجربه چند دهه‌ای خود در صنعت نفت و گاز دریایی و همچنین برخورداری از شرایط زمین‌شناسی منحصربه‌فرد، توانسته است پروژه‌های بزرگ و اثرگذاری در زمینه ذخیره‌سازی زیرزمینی CO₂ اجرا کند.

۱۷.۲ پروژه‌های شاخص

- **پروژه: Sleipner (1996)** نخستین پروژه بزرگ مقیاس ذخیره‌سازی CO₂ در جهان بود که در دریای شمال اجرا شد. این پروژه به عنوان نقطه عطفی در تاریخ CCUS جهان شناخته می‌شود.
- **پروژه: Snøhvit (2008)** شامل جداسازی و تزریق CO₂ به سازندهای زمین‌شناسی زیر بستر دریا در شمال نروژ است.
- **Northern Lights:** پروژه‌ای فرامرزی که امکان حمل‌ونقل و ذخیره CO₂ از کشورهای دیگر (مانند هلند) به زیر بستر دریای نروژ را فراهم می‌کند. این پروژه بخشی کلیدی از برنامه Longship دولت نروژ است.

۱۷.۳ سیاست‌ها و چارچوب قانونی

- نروژ از نخستین کشورهایی بود که مالیات بر انتشار CO₂ را در اوایل دهه ۱۹۹۰ وضع کرد و این عامل مهمی در انگیزه بخشی به پروژه‌های CCS بود.
- چارچوب‌های قانونی و مقرراتی نروژ به‌ویژه در حوزه ذخیره‌سازی دریایی (offshore) الگویی برای اتحادیه اروپا و دیگر کشورها محسوب می‌شود.
- اصلاحات پروتکل لندن (London Protocol) نیز با ابتکار نروژ زمینه‌ساز توسعه همکاری‌های فرامرزی در انتقال و ذخیره CO₂ شد.

۱۷.۴ چالش‌ها

- **هزینه‌های بالا:** پروژه‌های CCS در نروژ بسیار پرهزینه‌اند و نیازمند حمایت مالی گسترده دولتی هستند.
- **وابستگی به سیاست‌های انرژی:** تغییرات در سیاست‌های اتحادیه اروپا یا بازار انرژی جهانی می‌تواند بر پایداری این پروژه‌ها اثرگذار باشد.
- **پذیرش اجتماعی:** هرچند اعتماد عمومی نسبت به نروژ بالاست، اما نگرانی‌هایی درباره ایمنی ذخیره‌سازی بلندمدت وجود دارد.

۱۷.۵ چشم‌انداز آینده

- نروژ قصد دارد ظرفیت ذخیره‌سازی CO₂ خود را افزایش دهد و به هاب منطقه‌ای برای CCS در اروپا تبدیل شود.
- پروژه Northern Lights و ابتکارات مشابه می‌توانند زمینه‌ساز همکاری‌های فرامرزی گسترده و الگویی جهانی برای تجارت خدمات ذخیره‌سازی کربن باشند.



بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

- تمرکز بیشتر بر توسعه فناوری‌های حمل‌ونقل دریایی CO_2 ، و تجاری‌سازی استفاده از CO_2 (CCU) بخشی از راهبرد آینده نروژ خواهد بود.

۱۷.۶ نتیجه‌گیری

نروژ را می‌توان پیشگام جهانی CCUS دانست. تجربه موفق، چارچوب‌های قانونی پیشرفته و تعهد سیاسی قوی این کشور، جایگاه ویژه‌ای برایش در عرصه بین‌المللی ایجاد کرده است. با این حال، پایداری مالی و گسترش همکاری‌های منطقه‌ای تعیین‌کننده مسیر آینده این کشور خواهد بود.



فصل هجدهم: CCUS در قطر

۱۸.۱ مقدمه

قطر به عنوان بزرگ‌ترین صادرکننده گاز طبیعی مایع (LNG) در جهان، نقش مهمی در امنیت انرژی بین‌المللی دارد. در عین حال، اتکای شدید به نفت و گاز موجب انتشار بالای دی‌اکسید کربن شده است. به همین دلیل، قطر توسعه CCUS را به عنوان بخشی کلیدی از راهبرد کاهش کربن و پایداری خود در دستور کار قرار داده است.

۱۸.۲ وضعیت کنونی CCUS در قطر

- در سال ۲۰۱۹، قطر بزرگ‌ترین تأسیسات CCUS در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) را در راس‌لافان افتتاح کرد. این پروژه نماد تعهد کشور به مقابله با تغییرات اقلیمی و همزمان تضمین امنیت انرژی است.
- ظرفیت کنونی قطر در حدود ۲.۲ میلیون تن در سال (MMTPA) است و برنامه دارد آن را به ۷-۹ میلیون تن تا ۲۰۳۰ و بیش از ۱۱ میلیون تن تا ۲۰۳۵ افزایش دهد.
- پروژه انتقال CO₂ در حال تکمیل است (بیش از ۹۴٪ پیشرفت) که گازهای گرفته‌شده از تأسیسات LNG را به میدان دوخان برای افزایش برداشت نفت (EOR) منتقل می‌کند.
- قطر تاکنون دو پروژه از مجموع شش پروژه CCUS منطقه را در اختیار دارد؛ دیگر پروژه‌ها در عربستان، امارات و عراق مستقر هستند.

۱۸.۳ چارچوب‌های قانونی و سیاستی

- قطر دارای یک چارچوب حقوقی پایه برای تسهیل CCUS است که در مقررات زیست‌محیطی با عنوان «مقابله با آثار آلودگی در اشکال مختلف» گنجانده شده است.
- این چارچوب بر جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی فوری و بلندمدت ناشی از فعالیت‌های صنعتی و اقتصادی تأکید دارد.
- با این وجود، هنوز یک قانون جامع اختصاصی برای CCUS در قطر وجود ندارد.

۱۸.۴ چالش‌ها

- انتشار بالا: بخش انرژی (به‌ویژه گاز و برق) ۹۶.۵٪ انتشار قطر را تشکیل می‌دهد.
- ریسک‌های زیست‌محیطی: نگرانی‌هایی در مورد احتمال نشت CO₂ از مخازن ذخیره‌سازی و اثرات احتمالی بر اکوسیستم وجود دارد.
- زیرساخت: توسعه خطوط لوله و فناوری‌های ذخیره‌سازی همچنان محدود است.

۱۸.۵ فرصت‌ها

- بهره‌گیری از CCUS برای افزایش برداشت نفت (EOR) به‌ویژه در دوخان.
- هدف‌گذاری برای جذب سالانه بیش از ۱۱ میلیون تن CO₂ تا ۲۰۳۵.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست‌گذاری و استانداردسازی»

- ایجاد مرکز Qatar Carbonates and Carbon Storage Research Centre (QCCSRC) با همکاری قطر پترولیوم، شل و کالج امپریال لندن به منظور تحقیق روی مخازن کربناته و توسعه راهکارهای نوین CCUS.
- تنوع‌بخشی به اقتصاد از طریق تولید آمونیاک و هیدروژن کم‌کربن با استفاده از CO₂ جذب‌شده.
- قرار گرفتن قطر در جایگاه قطب دانش و فناوری CCUS در خاورمیانه و توسعه همکاری‌های بین‌المللی.

۱۸.۶ چشم‌انداز آینده و نتیجه‌گیری

قطر تاکنون پیشرفت چشمگیری در اجرای پروژه‌های CCUS داشته است. تعهد به کاهش انتشار، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، و هدف‌گذاری بلندپروازانه نشان‌دهنده مسیر روشن این کشور در آینده است. با وجود چالش‌های حقوقی، زیست‌محیطی و زیرساختی، قطر با اتکا بر منابع مالی قوی و ظرفیت‌های صنعتی می‌تواند به یکی از پیشگامان جهانی در CCUS تبدیل شود.



فصل نوزدهم: CCUS در مالزی

۱۹.۱ مقدمه

مالزی به عنوان یکی از کشورهای تولیدکننده و صادرکننده مهم نفت و گاز در جنوب شرق آسیا، با چالشی دوگانه مواجه است: از یک سو وابستگی به سوخت‌های فسیلی برای رشد اقتصادی و از سوی دیگر تعهد به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای طبق توافق پاریس. فناوری (CCUS) (Carbon Capture, Utilization and Storage) در این کشور به عنوان بخشی اساسی از استراتژی ملی برای دستیابی به بی طرفی کربن تا سال ۲۰۵۰ مطرح شده است.

۱۹.۲ وضعیت کنونی و پروژه‌های شاخص

- شرکت ملی نفت مالزی PETRONAS نقش محوری در توسعه CCUS دارد.
 - در سال ۲۰۲۲، این شرکت پروژه‌ای بزرگ برای ذخیره زیرزمینی CO₂ در ساحل ساراواک آغاز کرد.
 - هدف اولیه پروژه، ذخیره‌سازی ۳.۳ میلیون تن CO₂ در سال است که در فاز دوم به بیش از ۵ میلیون تن در سال خواهد رسید.
 - این پروژه با همکاری شرکت‌های ژاپنی و کره‌ای (از جمله Mitsui و JX Nippon) در حال توسعه است.
- علاوه بر آن، مالزی در حال بررسی چندین سایت دیگر در حوضه‌های ساباه، ترنگانو و ساراواک است تا ظرفیت ذخیره‌سازی را تا سال ۲۰۳۵ به بیش از ۱۰۰ میلیون تن CO₂ برساند.

۱۹.۳ چارچوب قانونی و سیاستی

مالزی هنوز قانون اختصاصی CCUS ندارد، اما قوانین فعلی در حوزه انرژی، نفت و محیط زیست به عنوان پایه مقرراتی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- قانون توسعه نفت و گاز (Petroleum Development Act 1974)
- قانون محیط زیست (Environmental Quality Act 1974)
- قانون منابع طبیعی و معدنی (Mineral Development Act 1994)

وزارت انرژی و منابع طبیعی مالزی (KeTSA) در حال تهیه چارچوب قانونی ویژه CCUS است که پیش‌نویس آن در سال ۲۰۲۵ منتشر می‌شود.

همچنین، دولت مالزی در حال بازنگری سیاست انرژی ملی با هدف ادغام CCUS در برنامه گذار انرژی ملی (NETR) است.

۱۹.۴ مشارکت بین‌المللی

- مالزی در سال ۲۰۲۳ به شبکه آسیایی CCUS به رهبری ژاپن پیوست.
- همکاری‌های گسترده‌ای با کشورهای استرالیا، کره جنوبی، نروژ و ژاپن در زمینه تحقیق، آموزش و تبادل فناوری در حال انجام است.

- شرکت PETRONAS همچنین با شرکت Shell در پروژه‌های مشترک ذخیره‌سازی دریایی CO₂ در دریای جنوبی چین همکاری دارد.

۱۹.۵ چالش‌ها

۱. نبود چارچوب قانونی جامع:
 - قوانین فعلی برای فعالیت‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی کافی نیستند.
۲. هزینه‌های بالا:
 - هزینه جذب و ذخیره CO₂ در هر تن حدود ۶۰ تا ۸۰ دلار برآورد می‌شود.
۳. پذیرش اجتماعی پایین:
 - آگاهی عمومی از مزایای CCUS محدود است.
۴. مسائل زمین‌شناسی:
 - برخی مناطق دارای خطرات زلزله یا شکستگی لایه‌های سنگی هستند که ذخیره‌سازی را دشوار می‌کند.

۱۹.۶ فرصت‌ها

- پتانسیل زمین‌شناسی بالا: مالزی بیش از ۳۵۰ میلیارد تن ظرفیت ذخیره زمین‌شناسی CO₂ دارد.
- زیرساخت‌های موجود نفت و گاز: امکان استفاده از چاه‌های تخلیه‌شده و خطوط لوله قدیمی برای تزریق CO₂ وجود دارد.
- توسعه صنعت هیدروژن آبی: CCUS می‌تواند انتشار حاصل از فرآیند تولید هیدروژن از گاز طبیعی را کاهش دهد.
- جذب سرمایه‌گذاری خارجی: همکاری با کشورهای آسیایی و اروپایی می‌تواند منجر به انتقال فناوری و تأمین مالی پروژه‌ها شود.

۱۹.۷ نتیجه‌گیری

مالزی با توجه به موقعیت جغرافیایی، ذخایر طبیعی و زیرساخت‌های نفت و گاز پیشرفته، ظرفیت بسیار بالایی برای تبدیل شدن به مرکز منطقه‌ای CCUS در آسیای جنوب شرقی دارد.

با این حال، موفقیت این مسیر منوط به ایجاد چارچوب قانونی اختصاصی، مشوق‌های مالیاتی، آموزش نیروی انسانی و ارتقای آگاهی اجتماعی است.

در صورت اجرای کامل سیاست‌های «برنامه گذار انرژی ملی» (NETR) و تصویب قانون جامع CCUS تا ۲۰۲۵، مالزی می‌تواند در کنار ژاپن و اندونزی یکی از رهبران آسیایی در حوزه کربن خنثی و فناوری‌های ذخیره کربن باشد.



فصل بیستم: CCUS در کره جنوبی

۲۰.۱ مقدمه

کره جنوبی، به عنوان یکی از اقتصادهای صنعتی پیشرفته آسیا، وابستگی زیادی به انرژیهای فسیلی دارد و از صادرکنندگان بزرگ محصولات صنعتی با شدت انرژی بالا (فولاد، پتروشیمی، سیمان و الکترونیک) محسوب می شود. در راستای تحقق اهداف اقلیمی، دولت کره جنوبی در سال ۲۰۲۰ اعلام کرد که این کشور تا سال ۲۰۵۰ به کربن خنثی (Net Zero) دست خواهد یافت. فناوری (CCUS) جذب، استفاده و ذخیره کربن (به عنوان ستون کلیدی در «استراتژی گذار سبز کره» تعریف شده است.

۲۰.۲ پروژه های شاخص

کره جنوبی از نخستین کشورهای آسیایی است که پروژه های آزمایشی CCUS را از اوایل دهه ۲۰۱۰ آغاز کرده است. برخی پروژه های شاخص عبارتند از:

توضیح	ظرفیت یا هدف	شرکت یا نهاد مسئول	پروژه
نخستین پروژه پایلوت ملی ذخیره سازی زمین شناسی	ذخیره ۱۰۰ هزار تن CO ₂ در سال	مؤسسه تحقیقات انرژی کره (KIER)	Korea-CCS 1 (در بندر اولونگ، Pohang)
اجرای مرحله دوم تا ۲۰۲۷	طراحی برای ذخیره بیش از ۱ میلیون تن CO ₂ در سال	وزارت بازرگانی و صنعت (MOTIE)	Korea-CCS 2 (در حوضه شرق (دریای کره)
بخشی از برنامه اقتصاد دایره ای	تبدیل CO ₂ به مواد شیمیایی (اوره و متانول)	Hyundai + KITECH	صنعتی با شرکت CCU پروژه Hyundai Steel
در مرحله مطالعه امکان سنجی	ذخیره مشترک CO ₂ در بستر دریای نروژ	و Equinor همکاری KOGAS	پروژه تجاری کره-نروژ (Longship-East Asia)

بر اساس اهداف «وزارت انرژی و منابع طبیعی کره»، ظرفیت جذب و ذخیره CO₂ این کشور باید تا ۲۰۳۵ به بیش از ۱۰ میلیون تن در سال برسد.

۲۰.۳ چارچوب قانونی و نهادی

کره جنوبی در حال تدوین قانون جامع CCUS است که از سال ۲۰۲۲ در دستور کار مجلس ملی قرار گرفته است. در حال حاضر، مقررات موجود در چند قانون پراکنده اند:

- قانون مدیریت گاز طبیعی – (Natural Gas Business Act) شامل مقررات تزریق و حمل و نقل گاز.
- قانون حفاظت محیط زیست دریایی – (Marine Environment Management Act) برای ذخیره سازی زیر بستر دریا.
- قانون توسعه فناوری انرژی های پاک – (Clean Energy Technology Development Act) پشتیبانی از تحقیق و توسعه.
- قانون تجارت کربن – (Emission Trading Act, 2015) ایجاد انگیزه مالی برای جذب CO₂.



بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

نهاد اصلی اجرایی، وزارت تجارت، صنعت و انرژی (MOTIE) است که سیاست گذاری کلان را انجام می دهد و مؤسسه تحقیقات انرژی کره (KIER) مسئول تحقیقات فنی است.

۲۰.۴ مشوق های مالی و سیاستی

دولت کره از طریق «برنامه سرمایه گذاری سبز ۲۰۵۰» حدود ۲.۵ میلیارد دلار بودجه برای توسعه فناوری های جذب و ذخیره کربن اختصاص داده است.
مشوق ها شامل:

- معافیت های مالیاتی برای شرکت های دارای پروژه CCUS،
- وام های کم بهره برای احداث تأسیسات جذب و حمل CO₂،
- خرید تضمینی محصولات بازیافتی (CO₂ مثل سوخت های مصنوعی).

همچنین شرکت های صنعتی بزرگ (POSCO)، Hyundai، SK Group) موظف شده اند تا ۲۰۳۰ حداقل ۳۰٪ از انتشار خود را از طریق فناوری های CCUS کاهش دهند.

۲۰.۵ همکاری های بین المللی

کره جنوبی فعالانه در پروژه های بین المللی CCUS مشارکت دارد:

- همکاری با نروژ (Equinor) در پروژه ذخیره سازی فراساحلی،
- همکاری با ژاپن در توسعه خطوط لوله CO₂ در شرق آسیا،
- عضویت در شبکه آسیایی (CCUS Asia Network) تحت رهبری ژاپن،
- مشارکت در برنامه IEA-GHG برای پایش ایمنی مخازن زیرزمینی.

۲۰.۶ چالش ها

۱. کمبود ظرفیت ذخیره زمین شناسی در خاک اصلی:
 - بیشتر بسترهای مناسب در دریای شرق کره قرار دارند که ذخیره سازی در آن ها پرهزینه است.
۲. هزینه بالای جذب و حمل:
 - هزینه فعلی جذب حدود ۶۰ تا ۸۰ دلار به ازای هر تن CO₂ است.
۳. نبود تجربه تجاری گسترده:
 - تاکنون بیشتر پروژه ها آزمایشی و تحقیقاتی بوده اند.
۴. پذیرش اجتماعی:
 - مردم محلی نگرانی هایی در مورد خطر نشت زیرزمینی دارند.



۲۰.۷ فرصت‌ها

- زیرساخت صنعتی قوی: پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و صنایع سنگین نقاط تمرکز مناسب برای CCUS هستند.
- پیشرفت در فناوری جذب مستقیم از هوا (DAC): شرکت‌های کره‌ای از جمله **Samsung Engineering** و **Hanwha** در حال توسعه واحدهای DAC هستند.
- پتانسیل همکاری منطقه‌ای: کره می‌تواند به مرکز تبادل CO₂ بین کشورهای شرق آسیا (ژاپن، چین، اندونزی) تبدیل شود.
- توسعه بازار کربن کره (K-ETS): این بازار ابزار اصلی برای ارزش‌گذاری بر کاهش انتشار از طریق CCUS است.

۲۰.۸ نتیجه‌گیری

کره جنوبی با رویکردی فناورانه و برنامه‌ریزی بلندمدت، در حال تبدیل CCUS به بخشی از ساختار صنعتی خود است. با سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس، همکاری بین‌المللی و تدوین قوانین اختصاصی، این کشور می‌تواند تا سال ۲۰۵۰ به یکی از رهبران آسیایی در فناوری‌های جذب و ذخیره کربن تبدیل شود.



فصل بیست و یکم: CCUS در بریتانیا

۲۱.۱ مقدمه

بریتانیا با برخورداری از زیرساخت‌های صنعتی پیشرفته، تجربه در بخش نفت و گاز و ظرفیت زمین‌شناسی عظیم زیر بستر دریای شمال، یکی از پیشگامان جهانی در توسعه فناوری‌های CCUS است. این کشور تا سال ۲۰۳۰ ظرفیت ذخیره سالانه ۲۰ تا ۳۰ میلیون تن CO_2 را هدف گذاری کرده است؛ رقمی معادل حذف حدود ۴ تا ۶ میلیون خودرو از جاده‌های بریتانیا. دولت بریتانیا متعهد شده است تا سال ۲۰۵۰ به بی‌طرفی کربن (Net Zero) دست یابد و برای تحقق آن، بیش از ۲۰ میلیارد پوند در صنعت جذب و ذخیره کربن سرمایه‌گذاری کرده است.

۲۱.۲ روند انتشار گازهای گلخانه‌ای

- انتشار گازهای گلخانه‌ای بریتانیا از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ ۵۳٪ کاهش یافته و به ۳۸۳ میلیون تن CO_2e رسیده است — کمترین میزان از سال ۱۸۷۹.
- انتشار CO_2 خالص نیز از ۶۰۳ میلیون تن (در ۱۹۹۰) به حدود ۳۰۳ میلیون تن (در ۲۰۲۳) کاهش یافته است.
- بیشترین کاهش‌ها در بخش تولید برق، سوخت‌های فسیلی و صنایع سنگین رخ داده است.

۲۱.۳ پروژه‌های کلیدی و خوشه‌های صنعتی CCUS

بریتانیا توسعه CCUS را از طریق خوشه‌های صنعتی منطقه‌ای (Cluster Projects) هدایت می‌کند.

چهار خوشه اصلی «Track 1» و «Track 2» عبارت‌اند از:

نام خوشه	موقعیت	شرکت‌های کلیدی	ظرفیت تقریبی	زمان بهره‌برداری
HyNet North West	شمال غرب انگلستان	Eni, Progressive Energy	۱۰ میلیون تن در سال	تا ۲۰۳۰
East Coast Cluster (Teesside & Humber)	شمال شرق انگلستان	BP, Equinor, Drax	۲۷ میلیون تن در سال	تا ۲۰۳۰
Acorn Project (اسکاتلند)	St Fergus	Storegga, Shell	۵ تا ۶ میلیون تن در سال	۲۰۲۸
Viking CCS (Lincolnshire)	Humber & North Sea	Harbour Energy, BP	۱۰ میلیون تن در سال	۲۰۳۵



۲۱.۴ سیاست‌ها و چارچوب‌های قانونی

۱. قانون تغییر اقلیم (Climate Change Act 2008):

- نخستین قانون الزام‌آور جهان برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای.
- دولت موظف است مسیر کربن خنثی تا ۲۰۵۰ را طی کند.

۲. White Paper 2020: "The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution"

- هدف: جذب سالانه ۱۰ میلیون تن CO₂ تا ۲۰۳۰.
- افزایش سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه به ۲.۴٪ از تولید ناخالص داخلی تا ۲۰۲۷.

۳. استراتژی سرمایه‌گذاری (CCUS Investment Roadmap, 2023):

- تأمین مالی مستقیم دولتی تا سقف ۲۰ میلیارد پوند.
- تضمین خرید خدمات ذخیره‌سازی CO₂ از سوی دولت برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری.

۴. نهادهای کلیدی:

- Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) – سیاست‌گذاری کلان.
- North Sea Transition Authority (NSTA) – صدور مجوز برای ذخیره‌سازی زیرزمینی CO₂.
- CCUS Council – هماهنگی بین دولت و صنعت.

۲۱.۵ فرصت‌ها و چالش‌ها

فرصت‌ها

- بریتانیا دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بیش از ۷۸ میلیارد تن CO₂ زیر بستر دریای شمال است.
- امکان تبدیل میادین نفت و گاز تخلیه‌شده به مخازن ذخیره‌سازی ایمن.
- ایجاد بیش از ۵۰ هزار شغل سبز مستقیم و غیرمستقیم.
- توسعه صنایع مکمل مانند هیدروژن کم‌کربن و سوخت‌های مصنوعی.

چالش‌ها

- ۱. هزینه‌های بالای جذب و زیرساخت‌های حمل‌ونقل.
- ۲. پیچیدگی‌های حقوقی و مجوزهای فراساحلی.
- ۳. نگرانی‌های زیست‌محیطی درباره ایمنی ذخیره‌سازی طولانی‌مدت.
- ۴. نیاز به سرعت‌بخشی در تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری‌های بزرگ.



۲۱.۶ نتیجه‌گیری

بریتانیا با زیرساخت‌های صنعتی قوی، ظرفیت زمین‌شناسی عظیم و چارچوب قانونی روشن، یکی از رهبران جهانی در CCUS است. این کشور نه تنها از منظر کاهش انتشار، بلکه از نظر خلق فرصت‌های اقتصادی جدید، صادرات فناوری و تقویت امنیت انرژی نیز به CCUS نگاه راهبردی دارد. در صورت حفظ روند فعلی و تحقق سرمایه‌گذاری‌ها، بریتانیا تا ۲۰۵۰ می‌تواند به اولین اقتصاد بزرگ اروپایی با کربن خنثی کامل تبدیل شود.





بر اساس کتاب «جذب، استفاده و ذخیره کربن: حقوق، سیاست گذاری و استانداردسازی»

فصل بیست و دوم: CCUS در ایالات متحده آمریکا

۲۲.۱ مقدمه

ایالات متحده به عنوان یکی از بزرگترین انتشاردهندگان CO₂ در جهان، دارای سابقه طولانی در پژوهش و سرمایه گذاری در CCUS است. این کشور از دهه ۱۹۷۰ پروژه های تزریق و ذخیره سازی CO₂ برای افزایش برداشت نفت (EOR) را آغاز کرده و امروزه میزبان برخی از بزرگترین پروژه های جهانی CCUS است.

۲۲.۲ پروژه های شاخص CCUS

- پروژه **Petra Nova (تگزاس)**: بزرگترین پروژه جذب و ذخیره سازی در نیروگاه زغال سنگ، هرچند با چالش های اقتصادی روبه رو شد.
- پروژه های ایالت های غربی و میانه: شامل تزریق CO₂ در مخازن نفتی و گازی برای EOR.
- ابتکارات جدید: پروژه های ذخیره سازی در لایه های نمکی عمیق و پروژه های CCUS در صنایع فولاد، سیمان و شیمیایی.

۲۲.۳ چارچوب های قانونی و سیاستی

۲۲.۳.۱ مشوق های فدرال - اعتبار مالیاتی Q۴۵

- یکی از ابزارهای اصلی حمایت از CCUS در آمریکا، اعتبار مالیاتی Q۴۵ است.
- این اعتبار به ازای هر تن CO₂ ذخیره شده یا مورد استفاده قرار گرفته اعطا می شود.
- در سال های اخیر، میزان این اعتبار افزایش یافته و جذابیت بیشتری برای سرمایه گذاران ایجاد کرده است.

۲۲.۳.۲ قوانین فدرال

- آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) مسئول صدور مجوز چاه های کلاس VI برای ذخیره سازی CO₂ در زیرزمین است.
- وزارت انرژی (DOE) سرمایه گذاری گسترده ای در تحقیق و توسعه CCUS انجام داده است.
- اداره مدیریت اقیانوسی و انرژی (BOEM) و اداره ایمنی و اجرای زیست محیطی (BSEE) در حال تدوین مقررات ذخیره سازی در فلات قاره خارجی (OCS) هستند.

۲۲.۳.۳ قوانین ایالتی

- برخی ایالت ها مانند لوئیزیانا، داکوتای شمالی و وایومینگ (Primacy) در مدیریت چاه های کلاس VI را دریافت کرده اند.
- قوانین ایالتی درباره مالکیت فضای متخلخل (Pore Space) و مسئولیت های بلندمدت متفاوت است.
- در بسیاری از ایالت ها، مقررات خاصی برای تملک اجباری یا یکپارچه سازی مخازن وجود دارد.



۲۲.۴ چالش‌ها و نگرانی‌ها

- مالکیت و کنترل فضای متخلخل (Pore Space): یکی از مسائل پیچیده حقوقی، چه در خشکی و چه در دریا.
- مسئولیت‌های حقوقی بلندمدت: هنوز مشخص نیست پس از پایان پروژه‌ها، چه نهادی مسئول نشت‌های احتمالی خواهد بود.
- هزینه‌های بالا: سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری CCUS همچنان پرهزینه است.
- پذیرش اجتماعی: نگرانی عمومی از ایمنی و ریسک‌های زیست‌محیطی ذخیره‌سازی.

۲۲.۵ درس‌های آموخته‌شده

- حمایت‌های مالی (مانند ۴۵ Q) نقش کلیدی در جذب سرمایه‌گذاری دارد.
- هماهنگی میان قوانین فدرال و ایالتی برای توسعه پایدار CCUS ضروری است.
- تجربه آمریکا نشان می‌دهد که CCUS می‌تواند همزمان برای کاهش انتشار و تولید انرژی (EOR) مورد استفاده قرار گیرد.

۲۲.۶ نتیجه‌گیری

ایالات متحده یکی از رهبران جهانی در توسعه CCUS است. این کشور با بهره‌گیری از چارچوب‌های قانونی متنوع، تجربه گسترده در صنعت نفت و گاز و سرمایه‌گذاری دولتی و خصوصی، جایگاه ویژه‌ای در این عرصه دارد. با این حال، رفع چالش‌های حقوقی (مالکیت و مسئولیت‌ها)، کاهش هزینه‌ها و افزایش پذیرش اجتماعی برای گسترش بیشتر CCUS حیاتی است.

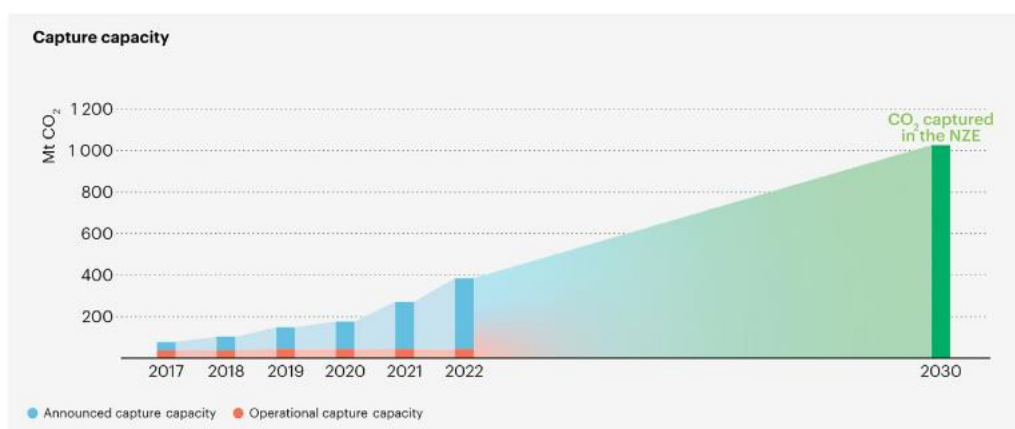


نتیجه گیری

فناوری های جذب، استفاده و ذخیره سازی کربن (CCUS) به عنوان بخشی حیاتی از مجموعه راهکارهای جهانی برای مقابله با تغییرات اقلیمی مطرح شده اند. این فناوری ها می توانند به طور قابل توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، به ویژه دی اکسید کربن، نقش آفرینی کنند. همان گونه که در فصل های مختلف این کتاب نشان داده شد، CCUS نه تنها از منظر زیست محیطی، بلکه از نظر اقتصادی، اجتماعی و حقوقی نیز دارای اهمیت است.

۱. وضعیت کنونی و ضرورت تسریع در توسعه

در حال حاضر، تعداد پروژه های CCUS در سطح جهانی در حال افزایش است و ظرفیت های قابل توجهی در حال توسعه هستند. با این حال، سرعت رشد این پروژه ها هنوز کافی نیست تا بتواند به اهداف جهانی خنثی سازی کربن تا سال ۲۰۵۰ برسد. تسریع در سرمایه گذاری ها، حمایت های قانونی، و توسعه زیرساخت های مرتبط (مانند خطوط لوله و سایت های ذخیره سازی) برای تحقق این اهداف ضروری است.

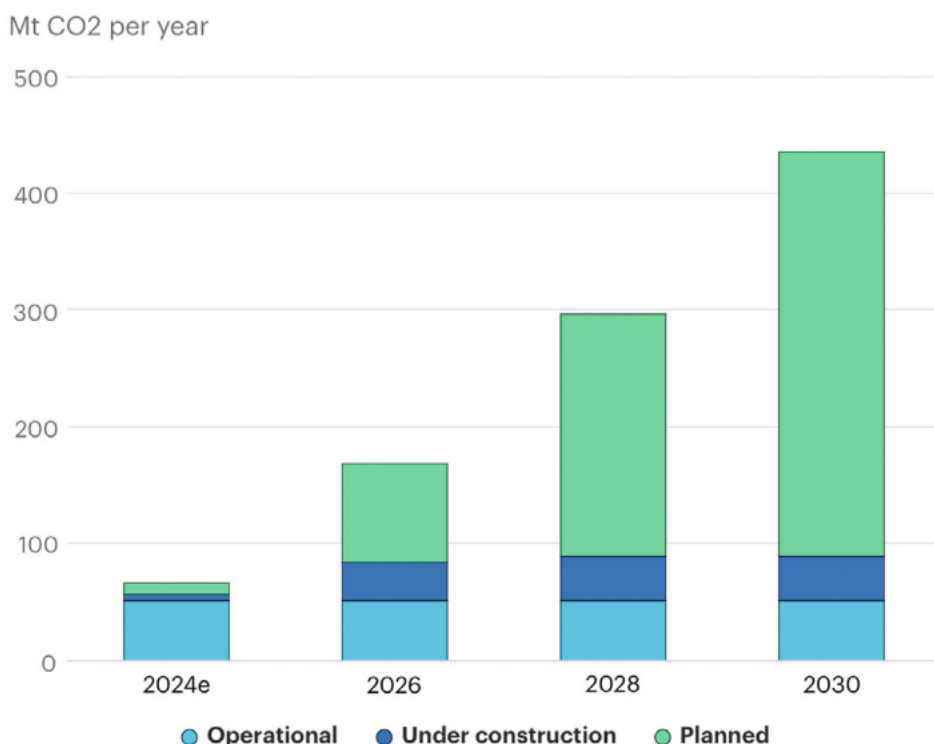


پیش بینی ظرفیت جذب کربن.

ظرفیت جهانی جذب CO₂ می تواند تا سال ۲۰۳۰ به سطح مورد نیاز برای بی طرفی کربن (NZE – Net Zero Emission) برسد، مشروط بر این که روند رشد کنونی ادامه یابد و تمام پروژه های اعلام شده به مرحله بهره برداری برسند. تسریع در زمان بندی پروژه ها، به ویژه در توسعه زیرساخت های ذخیره سازی CO₂، برای دستیابی به این هدف بسیار حیاتی است. منبع: IEA (2023), CCUS, IEA, Paris –

۲. نقش قانون، سیاست و استانداردسازی

چارچوب‌های حقوقی و سیاست‌گذاری از ارکان کلیدی در موفقیت CCUS هستند. بدون قوانین شفاف و استانداردهای فنی هماهنگ، امکان توسعه پایدار و مقبولیت اجتماعی این فناوری‌ها دشوار خواهد بود. بسیاری از کشورها (از جمله ایالات متحده، نروژ، چین، استرالیا و قطر) با ایجاد رژیم‌های قانونی و سیاستی خاص، گام‌های مهمی برداشته‌اند. با این حال، هنوز نیاز به همکاری بین‌المللی و هماهنگی میان دولت‌ها و نهادهای استانداردسازی احساس می‌شود.



ظرفیت جذب عملیاتی و برنامه‌ریزی شده در سراسر جهان.

این شکل شامل تمام تأسیسات جذب CO₂ عملیاتی، در حال ساخت، و برنامه‌ریزی شده با ظرفیت اعلام شده بیش از ۱۰۰,۰۰۰ تن در سال (یا ۱,۰۰۰ تن در سال برای تأسیسات جذب مستقیم از هوا (Direct Air Capture) – و دارای جدول زمانی مشخص است. ظرفیت‌ها بر اساس ترکیب برآورد ظرفیت جذب، پروژه‌های کامل زنجیره (Full Chain)، و پروژه‌های CCU در پایگاه داده پروژه‌های CCUS آژانس بین‌المللی انرژی (IEA CCUS Projects Database) محاسبه شده‌اند. مقدار 2024e شامل تمام ظرفیت‌های اعلام شده‌ای است که می‌توانند تا پایان سال ۲۰۲۴ وارد مدار شوند. منبع: IEA (2024), *CCUS Projects Explorer*, IEA, Paris



۳. ابعاد اقتصادی و اجتماعی

گرچه هزینه‌های CCUS بالا است، اما این فناوری می‌تواند فرصت‌های اقتصادی و صنعتی جدیدی ایجاد کند؛ از جمله تولید محصولات جدید از CO₂ (مانند سوخت‌ها و مواد شیمیایی)، ایجاد شغل، و کمک به گذار عادلانه در بخش انرژی. پذیرش اجتماعی و اعتماد عمومی نیز نیازمند شفافیت، مشارکت جوامع محلی، و تضمین ایمنی پروژه‌ها است.

۴. مسیر آینده

برای آنکه CCUS بتواند به طور کامل در استراتژی جهانی اقلیم نقش ایفا کند، باید اقدامات زیر انجام شود:

- تسریع در تأمین مالی و جذب سرمایه‌گذاری خصوصی و عمومی.
- گسترش همکاری‌های بین‌المللی و تبادل تجربیات.
- توسعه سیاست‌های حمایتی پایدار و سازگار با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل (SDGs).
- تقویت استانداردها و مقررات ایمنی و زیست‌محیطی.
- توجه به ابعاد اجتماعی، از جمله آگاهی‌رسانی و جلب اعتماد عمومی.

جمع‌بندی نهایی

CCUS به تنهایی راه‌حل نهایی برای بحران تغییرات اقلیمی نیست، اما یک ابزار اساسی و مکمل در کنار انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری انرژی، و تغییرات رفتاری محسوب می‌شود. موفقیت آن نیازمند ترکیب نوآوری فناورانه، چارچوب‌های قانونی قوی، سیاست‌گذاری مناسب، و پذیرش اجتماعی است. تنها از طریق یک رویکرد جامع و چندبعدی می‌توان از ظرفیت کامل CCUS در دستیابی به اهداف اقلیمی جهانی بهره برد.

