

Decarbonization

نرجس عمادزاده - پارمیس کیانی
دانشگاه صنعتی شریف
پروژه درس تحلیل سیستم‌های انرژی
بهمن ۱۴۰۰

به نام خدا

چکیده

در این گزارش به اهمیت کربن زدایی و تلاش‌های بین‌المللی در این زمینه پرداخته شده است. در ادامه، برخی روش‌ها برای کاهش انتشار کربن، همچنین ایده‌های جدیدی که هنوز به مرحله اجرا نرسیده‌اند، مسئله قفل‌شدگی کربن، برخی روش‌های سیاسی موجود برای تسریع کربن زدایی، و ارائه مدل‌های جهانی با استفاده از کهن‌الگوها، معرفی شده‌اند.

فهرست مطالب

۱. مقدمه	2
۲. تلاش‌های بین‌المللی	4
۳. Kaya Identity (KI)	9
۴. افزایش راندمان	13
۴-۱. حمل و نقل	13
۴-۲. برق	14
۴-۳. ساختمان	16
۵. صرفه جویی	17
۵-۱. اقتصاد چرخشی	18
۶. کاهش شدت کربن انرژی	18
۶-۱. انرژی هسته‌ای	18
۶-۲. جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS)	19
۶-۳. تجدیدپذیرها	20
۶-۴. ذخیره انرژی	21
۶-۵. اقتصاد هیدروژن	25
۶-۶. مسئله سیستم‌های خنک‌کننده و پمپ حرارتی	25
۶-۷. کربن زدایی فرآیندهای صنعتی	26

31	۶-۷-۱. فرصت‌ها و چالش‌ها.....
32	۷. مسئله انتقال حرارت در فواصل زیاد.....
33	۸. کربن‌زدایی، دیجیتال‌سازی و تمرکززدایی.....
34	۸-۱. دیجیتالی شدن و کاربردهای فناوری اطلاعات و ارتباطات.....
34	۸-۲. عدم تمرکز و تولید پراکنده.....
35	۸-۳. تأثیر سامانه‌های فیزیکی مجازی هوشمند بر کربن‌زدایی.....
37	۹. ففل‌شدگی کربن.....
40	۱۰. روش‌های سیاسی.....
42	۱۱. تحلیل مدل‌های سیستم انرژی با کاربرد جهانی.....
43	۱۱-۱. تعریف کهن‌الگو.....
43	۱۱-۲. مدل ریاضی - الگوریتم خوشه بندی.....
45	۱۱-۳. تنظیم خودکار مدل.....
45	۱۱-۳-۱. مفروضات فنی و اقتصادی.....
46	۱۱-۳-۲. مفروضات مدل‌سازی دقیق.....
48	۱۱-۳-۳. تعریف سری‌های زمانی.....
48	۱۲. نتیجه‌گیری.....

۱. مقدمه

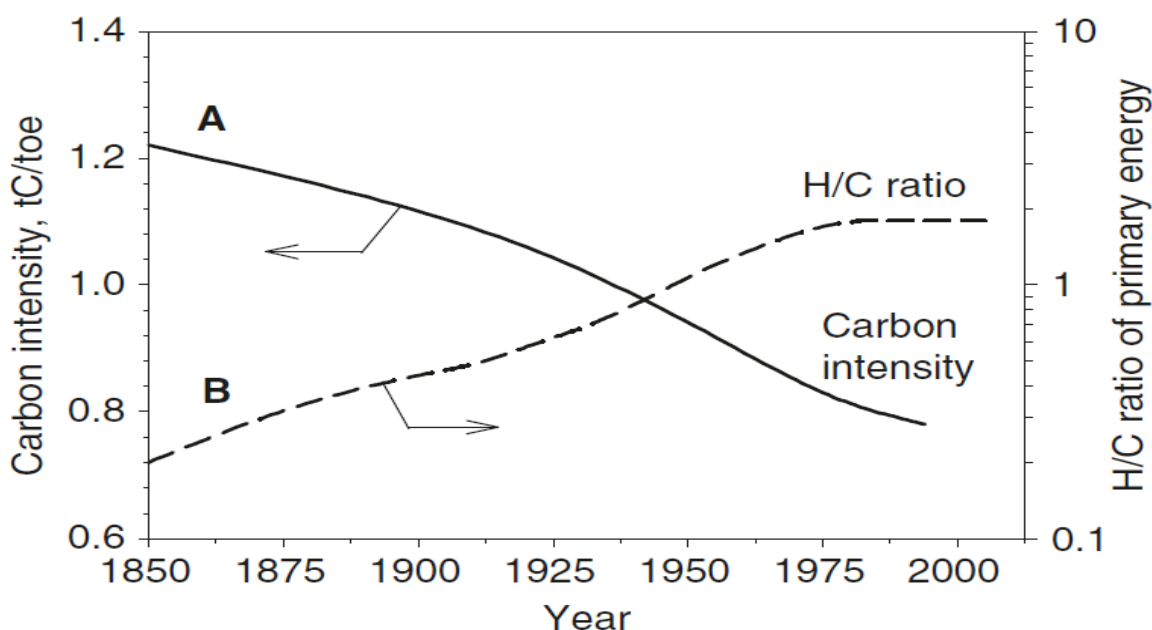
در طول تاریخ سوخت‌ها جایگزین شده‌اند، در ابتدا چوب غالب بود، سپس زغال سنگ جایگاه چوب را از آن خود کرد و بعد از زغال سنگ نفت و گاز مطرح شدند. در این روند هر سوخت از لحاظ انتشار کربن دی‌اکسید در واحد انرژی تولیدشده، که با نسبت اتمی هیدروژن به اکسیژن آن مشخص می‌شود، پاک‌تر از سوخت قبل است. در جدول ۱-۱ مقدار تقریبی متوسط نسبت هیدروژن به اکسیژن این سوخت‌های فسیلی مشخص شده است.

جدول ۱-۱- نسبت اتمی هیدروژن به اکسیژن برای سوخت‌های فسیلی [1]

سوخت	چوب	زغال سنگ	نفت	گاز طبیعی
H/C	< ۱	۱	۲	۴

کربن‌زدایی^۱ در اصل به معنای این روند کاهشی شدت کربن انرژی اولیه است. ولی در حال حاضر، این عبارت در معنای وسیع‌تر تمام سیاست‌ها و روش‌هایی که هدفشان حذف کربن از معادله انرژی و از بین بردن ردپای^۲ آن در اقتصاد است، استفاده می‌شود. نمودار ۱-۱ روند تاریخی کربن‌زدایی سوخت‌های فسیلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود و طبق تحقیقاتی که در مؤسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی^۳ صورت گرفته، از ۱۸۵۰ تا اوایل دهه ۹۰ میلادی روند تاریخی کربن‌زدایی سوخت‌های فسیلی به‌صورت پیوسته وجود داشته و شدت کربن انرژی و تولید ناخالص داخلی^۴ به‌طور متوسط ۰.۳٪ و ۱٪ در سال کاهش یافته است، ولی نرخ کاهش آن از اوایل دهه ۱۹۷۰ کم شده است و روند افزایشی نسبت هیدروژن به کربن هم متوقف شده و میزان آن تقریباً ثابت مانده است [۱].

نمودار ۱-۱- روند تاریخی کاهش شدت کربن انرژی اولیه [۱]



تغییرات اقلیمی چالش بزرگی است که در حال حاضر کشورهای سراسر جهان با آن مواجه هستند. در توافقی پاریس^۵ که در بیست و یکمین کنفرانس طرفین به تصویب رسید، همه کشورهای بر روی هدف مشترک برای حفظ

¹ Decarbonization

² Carbon Footprint

³ International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

⁴ Gross Domestic Product (GDP)

⁵ COP21

افزایش دما کمتر از ۲ درجه و ترجیحاً کمتر از ۱.۵ درجه سانتیگراد بالاتر از سطح قبل از صنعتی شدن، توافق کردند. چهار سال بعد، گزارشی که توسط «برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد»^۶ منتشر شد، نشان می‌دهد که انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی حدود ۱.۵ درصد در سال در طول دهه گذشته افزایش یافته است. این روند را می‌توان بیشتر به انتشار CO₂ از بخش انرژی و صنعت نسبت داد که تنها در سال ۲۰۱۸، ۲ درصد افزایش یافت. در نتیجه، این گزارش بر اهمیت کربن‌زدایی تأکید می‌کند [2].

کربن‌زدایی مستلزم گذار انرژی^۷ است، که یک تغییر ساختاری است که کربن را از تولید انرژی حذف می‌کند. گذار انرژی می‌تواند آهسته باشد ولی اگر شرایط مناسب آن ایجاد شود، سریع‌تر می‌شود. یک گذار موفقیت‌آمیز سیستم انرژی مستلزم تلاش‌های ترکیبی از پیشرفت فناوری، نوآوری اقتصادی، مداخله سیاست و تغییر رفتار است. [2]-[4].

۲. تلاش‌های بین‌المللی

سازمان‌های بین‌المللی مختلف، تنوع گسترده‌ای از مدل‌ها را برای کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید ارائه کرده‌اند. ولی تلاش‌های بین‌المللی کافی نبوده و پیشرفت کمی در این زمینه صورت گرفته است. طبق نمودار ۱-۲ در دهه گذشته به دلیل عواملی مثل رشد انرژی تجدیدپذیر و جایگزینی زغال‌سنگ توسط گاز، سرعت انتشار کربن‌دی‌اکسید کاهش یافته ولی برای دستیابی به اهداف توافق پاریس کاهش قابل توجهی در میزان انتشار CO₂ مورد نیاز است [4].

هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۸ برای دستیابی به اهداف توافق پاریس، چهار مسیر را تعریف کرده است:

مسیر ۱- شامل نوآوری‌های تجاری، اجتماعی و فناوری است که باعث کاهش تقاضای انرژی در کنار افزایش استاندارد زندگی می‌شوند؛ به خصوص در کشورهای در حال توسعه.

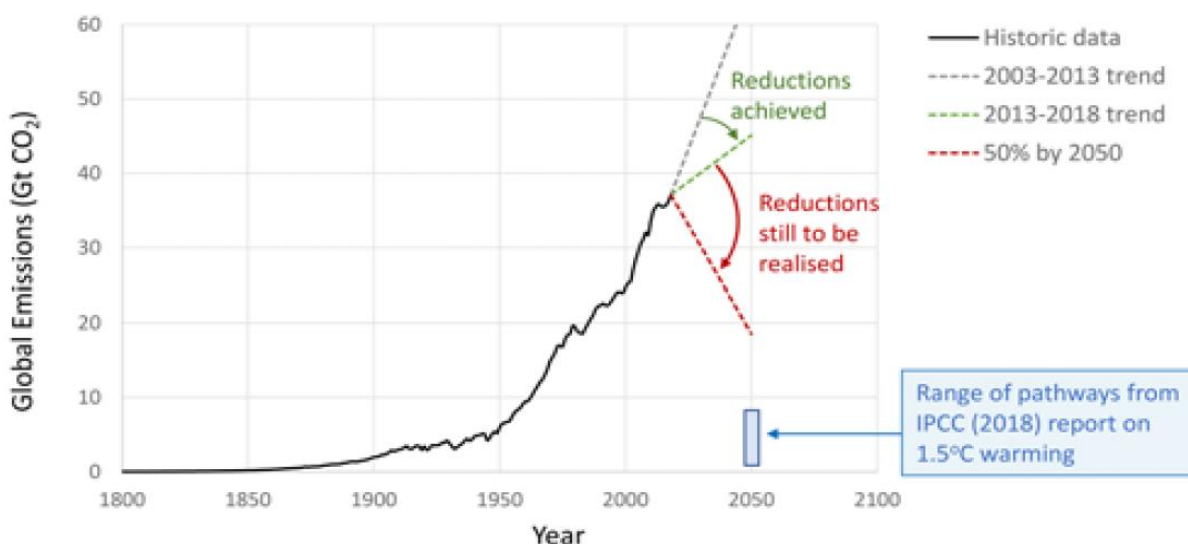
مسیر ۲- بر پایداری و همکاری بین‌المللی تمرکز می‌کند و شامل نوآوری در تکنولوژی‌های کم‌کربن، الگوی مصرف سالم و پایدار، و تکنولوژی BECC (انرژی زیستی با جذب و ذخیره‌ی کربن)^۹ با مقبولیت اجتماعی محدود است.

^۶ UNEP

^۷ Energy Transition

^۸ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

^۹ Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECC)

نمودار ۲-۱ - روند انتشار CO₂ [4]

مسیر ۳- توسعه اجتماعی و فناوری طبق روند گذشته ادامه می‌یابد و کاهش انتشار بیشتر توسط تغییر شیوه تولید محصولات و انرژی، و در درجه بعد کاهش تقاضای انرژی رخ می‌دهد.

مسیر ۴: تلاش‌ها برای کربن‌زدایی به اهداف لازم نمی‌رسند و نیاز به استفاده قابل توجه از تکنولوژی (BECC) است. زیرا این فناوری در حال حاضر تنها راه موجود برای دستیابی به انتشار منفی است [4].

سناریوی توسعه پایدار آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)¹⁰ که باعث دستیابی به اهداف قرارداد پاریس می‌شود، شامل افزایش بهره‌وری انرژی، افزایش در انرژی خورشیدی و بادی، گسترش وسایل نقلیه الکتریکی و استفاده از جذب و ذخیره کربن¹¹ است [4].

کمیسیون گذار انرژی (ETC)¹² با تمرکز بیشتر بر حوزه اقتصاد و سیاست، چهار استراتژی را مشخص کرده که باید به‌طور همزمان اجرا شوند:

۱- کربن‌زدایی برق همراه با توسعه برق‌رسانی.

¹⁰ International Energy Agency (IEA)

¹¹ Carbon Capture and Storage (CCS)

¹² Energy Transitions Commission (ETC)

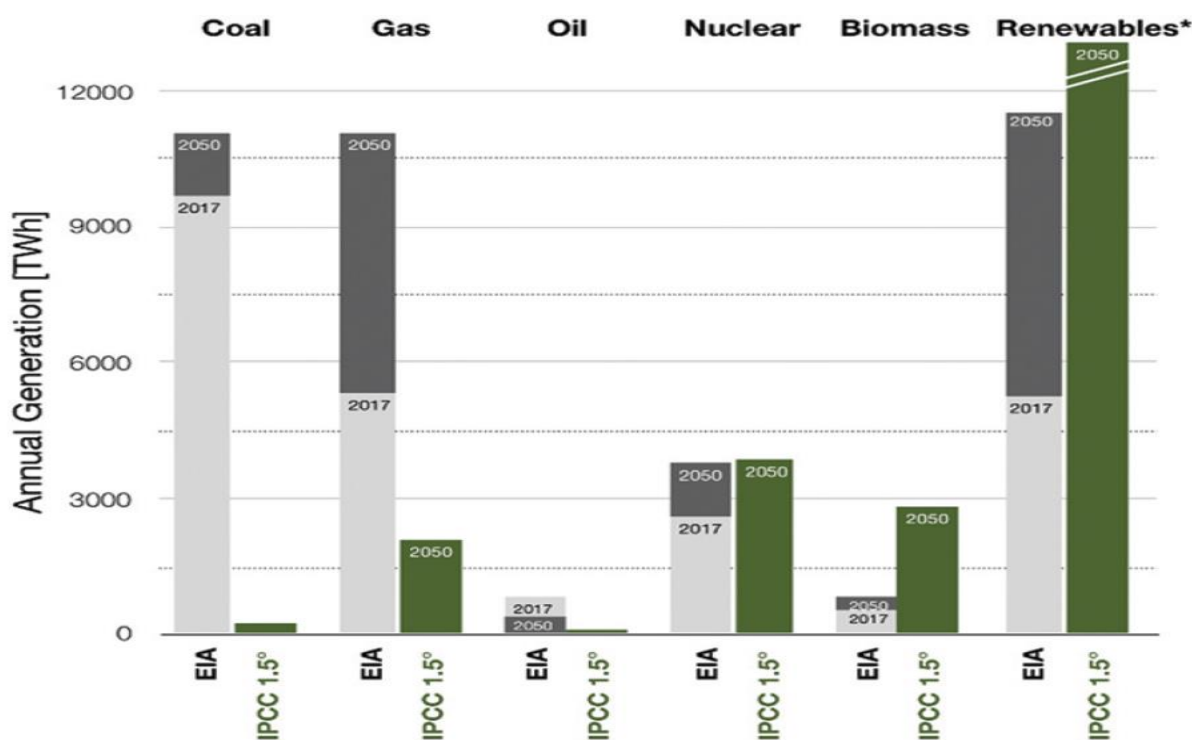
۲- کربن‌زدایی فعالیت‌هایی که نمی‌توان آن‌ها را به شیوهٔ مقرون‌به‌صرفه‌ای، الکتریکی کرد؛ مثل حمل‌ونقل و صنایعی مانند سیمان.

۳- شتاب در بهبود بهره‌وری انرژی که شامل مواردی مانند عایق‌کاری ساختمان‌ها، افزایش بازده لوازم خانگی، وسایل حمل و نقل و فرآیندهای صنعتی است.

۴- بهینه‌سازی مصرف سوخت‌های فسیلی با توجه به قیدهای مربوط به بودجه [4].

طبق سناریوی مرجع ادارهٔ اطلاعات انرژی آمریکا¹³، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر دو برابر شود، که این امر باعث دستیابی به هدف ۱.۵ درجهٔ سانتیگراد IPCC نمی‌شود. نمودار ۲-۲ ترکیب تولید برق جهانی را در سناریوهای مختلف IPCC و EIA نشان می‌دهد [2].

نمودار ۲-۲- ترکیب تولید برق جهانی در سناریوهای مختلف. سناریوی مرجع EIA (ستون سمت چپ) با رشد اقتصادی جهانی ۲.۸ درصد در سال از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ و قیمت نفت خام ۱۱۹ دلار در هر بشکه در سال ۲۰۵۰؛ سناریوی IPCC (ستون سمت راست) با مسیر ۱.۵ درجهٔ سانتیگراد گرمایش جهانی مطابقت دارد. سناریو IPCC محدوده‌ای را با عدم قطعیت ارائه می‌کند، تنها موردی که با تولید کل سال ۲۰۵۰ EIA مطابقت دارد، نشان داده شده است [2].



¹³ Energy Information Administration (EIA)

همچنین از ۱۷ هدف توسعه پایدار^{۱۴} تعیین شده توسط سازمان ملل متحد، چند مورد مستقیماً به موضوع کربن‌زدایی مرتبطند. به خصوص:

• هدف ۷: اطمینان از دسترسی به انرژی مقرون‌به‌صرفه، قابل اعتماد، پایدار و مدرن برای همه، در حالی که تمرکز اصلی برای دسترسی به برق برای بیشتر مردم جهان است، نگرانی در مورد افزایش قابل ملاحظه سهم انرژی تجدیدپذیر در ترکیب انرژی در سراسر جهان نیز وجود دارد.

علی‌رغم رشد زیاد تولید و عرضه انرژی در بخش برق و حمل و نقل، توزیع آن در جهان بسیار نامتناسب است. در سال ۲۰۱۶ در آفریقای سیاه و جنوب آسیا به ترتیب ۵۹۰ میلیون و ۲۵۵ میلیون نفر به برق دسترسی نداشتند. بنابراین علاوه بر تأمین تقاضای فزاینده انرژی، همراه با کاهش انتشار کربن، باید از دسترسی همه به آن اطمینان حاصل کرد.

• هدف ۹: ایجاد زیرساخت‌های انعطاف‌پذیر، ترویج صنعتی‌سازی پایدار و تقویت نوآوری، با توجه به توسعه زیرساخت‌های برق، این هدف به صورت زیر ترجمه می‌شود:

- توسعه زیرساخت‌های با کیفیت، قابل اعتماد، پایدار و انعطاف‌پذیر، از جمله زیرساخت‌های منطقه‌ای و فرامرزی؛
- تسهیل توسعه زیرساخت‌های پایدار و انعطاف‌پذیر در کشورهای در حال توسعه از طریق افزایش حمایت مالی، فناوری و فنی از کشورهای آفریقایی و کشورهای کمتر توسعه‌یافته.

سایر اهداف توسعه پایدار مستقیماً با موضوع کربن‌زدایی مرتبط نیستند. با این حال، اقداماتی که باید به عنوان اثری از تحقق آن‌ها اجرا شود، مستقیماً با موضوع کربن‌زدایی مرتبط است. این مورد، برای مثال، هدف زیر است:

• هدف ۱۱: شهرها را فراگیر، ایمن، انعطاف‌پذیر و پایدار کنید. این هدف اخیر مستلزم ارائه دسترسی به سیستم‌های حمل‌ونقل ایمن، مقرون‌به‌صرفه، قابل دسترس و پایدار برای همه تا سال ۲۰۳۰، بهبود ایمنی جاده‌ها، به ویژه با گسترش حمل‌ونقل عمومی، با توجه ویژه به نیازهای افراد در موقعیت‌های آسیب‌پذیر، زنان، کودکان، افراد دارای معلولیت و افراد مسن است [4]، [5].

پس از COP21، کشورهای ایالات متحده آمریکا، اتحادیه اروپا و چین برنامه‌های توسعه انرژی را برای اجرای تعهدات بین‌المللی تنظیم کرده‌اند. سپس این اهداف کلی به اهداف خاصی که هر کشور تعیین کرده تبدیل شده است. ایالات متحده تصمیم گرفته است تا انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را تا سال ۲۰۲۵ به میزان ۲۶ تا ۲۸ درصد کاهش دهد، در مقایسه با سال ۲۰۰۵، زمانی که این کشور به اوج انتشار خود (۵.۸ میلیارد تن CO₂) رسید. همچنین، کشورهای عضو اتحادیه اروپا متعهد شده‌اند که انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را تا سال ۲۰۳۰ در مقایسه

¹⁴ Sustainable Development Goals (SDG)

با سال ۱۹۹۰ تا ۴۰ درصد کاهش دهند^[5]. در سال‌های اخیر، اروپا قاطع‌ترین مروج گذار جهانی انرژی بوده است و از طریق سیاست‌گذاری و اهداف نظارتی از تحقق اقتصاد کم‌کربن حمایت کرده است. قرارداد سبز اروپا در پایان سال ۲۰۱۹ منتشر شد. این استراتژی کمیسیون اروپا، برای دستیابی به کربن خنثی¹⁵ و افزایش رقابت‌پذیری تا سال ۲۰۵۰ و جدا کردن رشد اقتصادی از استفاده از منابع است^[3]. برخلاف سوئیس، اتحادیه اروپا و ایالات متحده خود را متعهد کردند که امکان استفاده از بازار کربن¹⁶ را در تلاش برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خود لحاظ نکنند. درواقع، به لطف این بازار، یک کشور می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را با خرید اعتبار کربن یا با مشارکت در پروژه‌هایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای جبران کند^[5].

چین هم که در سال ۲۰۰۷ از ایالات متحده آمریکا پیشی گرفت و تبدیل به بزرگ‌ترین تولیدکننده کربن دی‌اکسید در جهان شد، اهدافی را برای سال ۲۰۳۰ مشخص کرده است، از جمله میزان ظرفیت تولید انرژی بادی و ظرفیت تولید انرژی خورشیدی که در سال ۲۰۱۸ به ترتیب ۱۳ و ۶ درصد از توان الکتریکی تولیدی را تشکیل دادند. با این حال، یک مطالعه در سال ۲۰۱۵ در مورد وضعیت بحرانی انرژی باد در چین گزارش داد و گفت که تقریباً ۱۶٪ از ظرفیت نصب‌شده به دلیل کمبود زیرساخت‌ها نمی‌تواند به شبکه اصلی متصل شود^[1]،^[5].

به عنوان نمونه‌هایی از برنامه‌های گذار انرژی در اروپا، می‌توان به دو کشور آلمان و فرانسه اشاره کرد:

• برنامه گذار انرژی در آلمان¹⁷

این کشور در سال ۲۰۱۰ برنامه‌ای را برای عرضه انرژی سازگار با محیط زیست، مقرون به صرفه و مطمئن، ارائه کرد که علاوه بر هدف اصلی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۸۰-۹۵٪ تا سال ۲۰۵۰، اهداف جانبی دیگری هم مشخص شدند، مانند حذف تدریجی انرژی هسته‌ای. در سناریوهای تعریف‌شده، بیش از ۳۰٪ از عرضه انرژی اولیه در ۲۰۳۰ و بیش از ۵۰٪ در ۲۰۵۰ را سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تشکیل می‌دهد، در حالی که این مقدار در سال ۲۰۱۴، ۱۱٪ بود. همچنین تقاضای انرژی نهایی تا ۲۰۵۰، به میزان ۴۰-۴۷٪ نسبت به سال ۲۰۱۰ کاهش خواهد یافت. ولی با گذشت چند سال از آغاز این برنامه، چالش‌هایی ایجاد شده و برای دستیابی به اهداف مورد نظر باید تلاش‌های بیشتری صورت بگیرد.

¹⁵ Carbon Neutrality

¹⁶ Carbon Market

¹⁷ die Energiewende

دولت آلمان روند اجرای این برنامه را به صورت مرتب پایش می‌کند و علاوه بر انتشار گزارش‌های سالانه، هر سه سال، یک گزارش جامع منتشر می‌کند که در یک کمیسیون متشکل از محققان مستقل حوزه انرژی، بررسی و ارزیابی شده و در صورت نیاز راهکارهای مناسب ارائه می‌شود [6].

• برنامه گذار انرژی در فرانسه

در سال ۲۰۱۳ دو هدف اصلی برای گذار انرژی در این کشور معرفی شد: ۲۵٪ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۲۰۵۰ نسبت به ۱۹۹۰، و کاهش سهم انرژی هسته‌ای و رساندن آن به ۵۰٪ در تولید برق، تا ۲۰۲۵ نسبت به ۲۰۱۲. سپس چهار خط سیر مختلف مشخص شدند که میزان تقاضای انرژی نهایی و ترکیب عرضه انرژی، آن‌ها را از هم متمایز می‌کند.

- مسیر ۱ (بهره‌وری): ۵۰٪ کاهش تقاضای انرژی نسبت به ۲۰۱۰ با استفاده از بهترین تکنولوژی‌های در دسترس، ۷۰٪ سهم تجدیدپذیرها تا ۲۰۵۰، سهم انرژی هسته‌ای بعد از ۲۰۲۵ کاهش می‌یابد تا به میزان یک چهارم آن در این سال برسد.

- مسیر ۲ (تنوع): ۲۰٪ کاهش تقاضای انرژی، سهم ثابت ۵۰ درصدی انرژی هسته‌ای بعد از ۲۰۲۵، ۴۰٪ سهم تجدیدپذیرها تا ۲۰۵۰.

- مسیر ۳ (هوشیاری): تغییرات اساسی در رفتار مصرف‌کننده و کاهش ۵۰٪ در تقاضای انرژی، حذف کامل انرژی هسته‌ای و ۹۰٪ سهم تجدیدپذیرها تا ۲۰۵۰.

- مسیر ۴ (کربن‌زدایی): کاهش ۲۰ درصدی تقاضای انرژی، محدودیت سهم تجدیدپذیرها به ۲۰٪ و سهم ۷۵ درصدی انرژی هسته‌ای.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر شماره ۴ برخلاف هدف کاهش سهم انرژی هسته‌ای است. قانون گذار انرژی برای رشد سبز که در ۲۰۱۵ تصویب شد، به مسیر شماره ۱ نزدیک‌تر است. ولی کاهش ۵۰٪ در تقاضای انرژی به آسانی ممکن نیست. به همین دلیل معمولاً بین این مسیر و مسیر شماره ۲ رابطه جایگزینی در نظر گرفته می‌شود [6].

۳. Kaya Identity (KI)

در اوایل دهه ۹۰ میلادی توسط یک محقق ژاپنی به نام کایا، به عنوان ابزاری برای محاسبه میزان انتشار CO₂ با توجه به عوامل اقتصادی و فناوری، معرفی شد. در اصل از دو بخش کلی اقتصاد و تکنولوژی تشکیل شده که هر یک از این بخش‌ها به دو زیربخش تقسیم می‌شوند. بخش اقتصاد شامل جمعیت و تولید ناخالص داخلی است و

بخش تکنولوژی از دو زیربخش شدت انرژی GDP و شدت کربن انرژی تشکیل شده است. رابطه ۱-۳ بیان ریاضی آن است؛ F انتشار کربن دی اکسید ناشی از احتراق سوخت های فسیلی و فرآیندهای صنعتی است، P جمعیت، E مصرف انرژی اولیه، G تولید ناخالص داخلی، g تولید ناخالص داخلی سرانه، e شدت انرژی GDP (میزان انرژی مصرف شده به ازای هر واحد GDP)، f شدت کربن انرژی (میزان انتشار CO_2 به ازای هر واحد انرژی تولید شده) [1].

$$F = P \left(\frac{G}{P} \right) * \left(\frac{E}{G} \right) * \left(\frac{F}{E} \right) = P * g * e * f \quad 1 - 3$$

معادله ۱-۳ می تواند به صورت ساده تر رابطه ۲-۳ نوشته شود که h شدت کربن GDP است.

$$F = P * \left(\frac{G}{P} \right) * \left(\frac{F}{G} \right) = P * g * h \quad 2 - 3$$

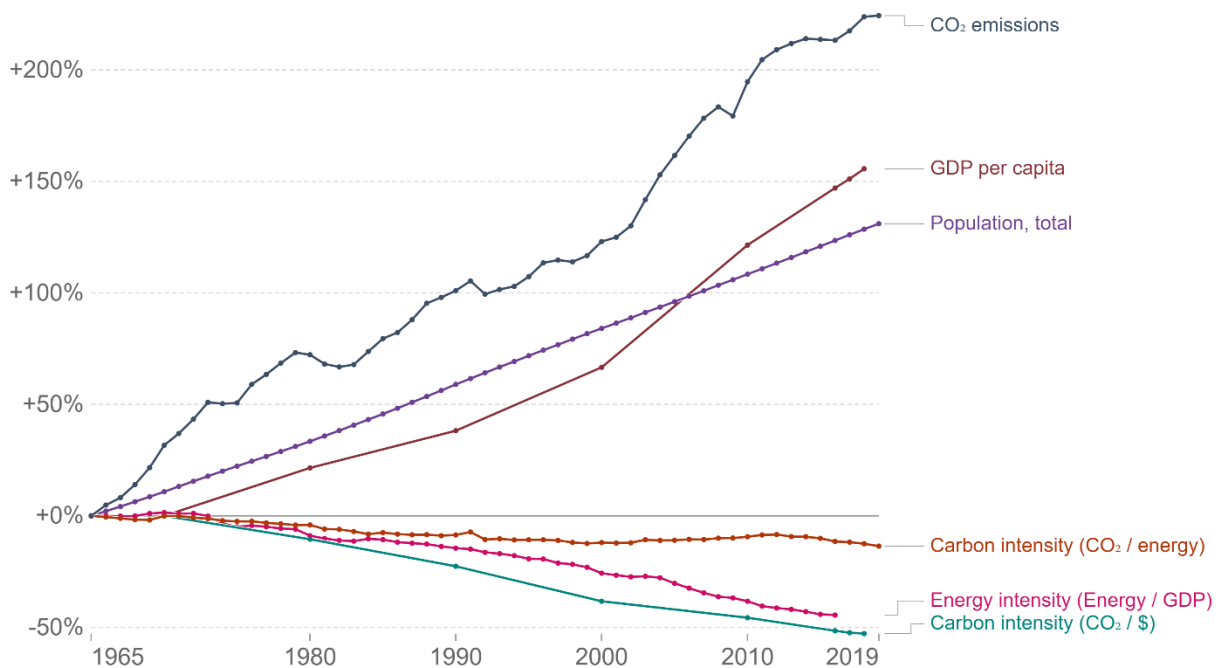
نمودار ۱-۳، روند تغییرات جهانی عوامل مختلف KI را نشان می دهد.

نمودار ۱-۳ - روند تغییرات عوامل KI [7]

Kaya Identity: drivers of CO₂ emissions, World

Percentage change in the four parameters of the Kaya Identity, which determine total CO₂ emissions.

Our World
in Data

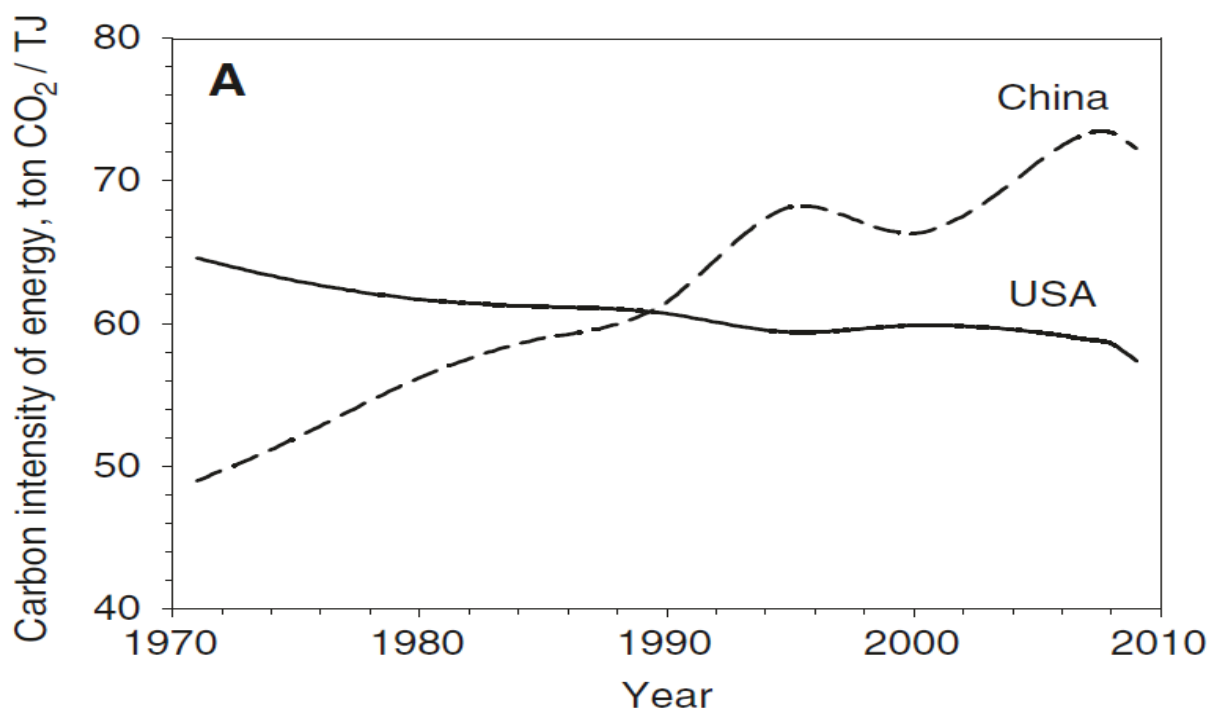


Source: Our World in Data based on Global Carbon Project; UN; BP; World Bank; Maddison Project Database
Note: GDP per capita is measured in 2011 international-\$ (PPP). This adjusts for inflation and cross-country price differences.
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

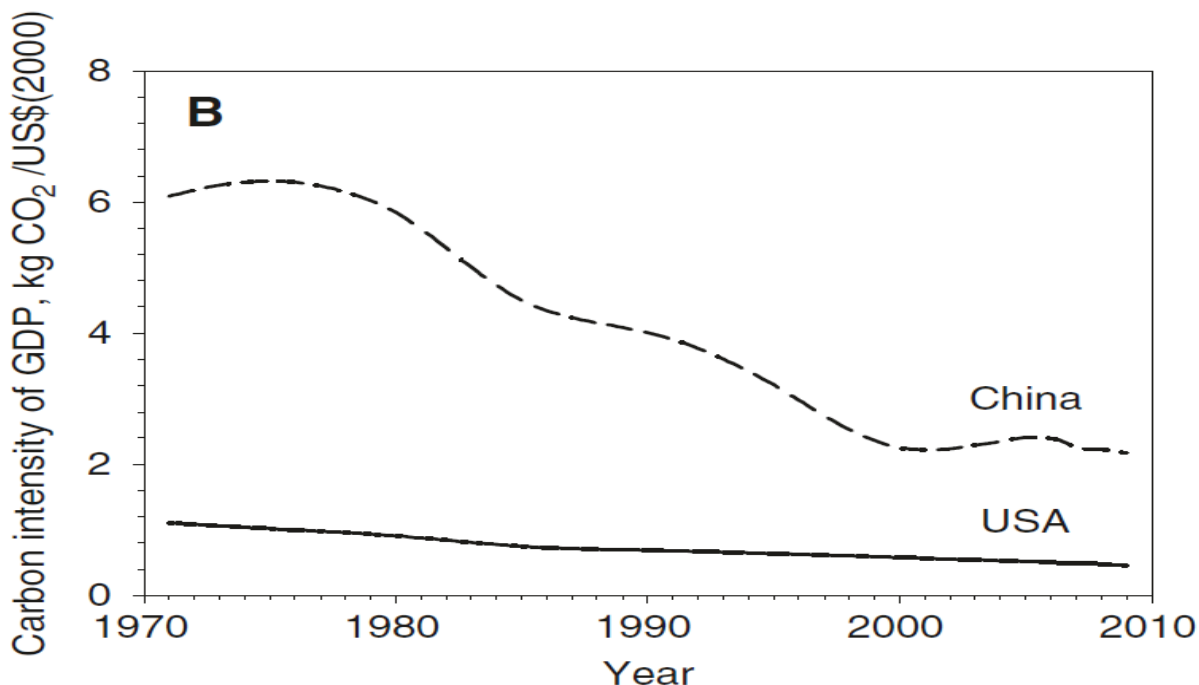
همان‌طور که مشاهده می‌شود، تا کمی بعد از سال ۲۰۱۰ افزایش قابل توجه انتشار CO_2 ، نه تنها به دلیل رشد جمعیت و GDP سرانه بوده، بلکه توقف روند کربن‌زدایی سال‌های گذشته هم، تأثیر مهمی داشته است [1]. ولی در سال‌های اخیر به دلیل تلاش‌های جهانی، شدت کربن انرژی و شدت انرژی GDP، روند کاهشی داشته‌اند، هرچند برای دستیابی به اهداف توافق پاریس، به کاهش بیشتری نیاز است.

نمودارهای ۲-۳ و ۳-۳، روند تغییرات شدت کربن انرژی و GDP را برای ایالات متحده و چین که بیشترین تولیدکنندگان کربن دی‌اکسید در جهان هستند، نشان می‌دهند.

نمودار ۲-۳- روند تغییرات شدت کربن انرژی در چین و ایالات متحده [1]



نمودار ۳-۳- روند تغییرات شدت کربن GDP در چین و ایالات متحده [1]



همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت کربن انرژی در چین روند افزایشی داشته و نرخ کاهش شدت کربن GDP این کشور، در سال‌های اخیر کم شده است. این پدیده بیشتر به علت مصرف قابل توجه زغال سنگ برای تولید برق در این کشور است. این پدیده را می‌توان در هند و سایر کشورهای در حال توسعه‌ای که اقتصادشان وابسته به سوخت ارزان زغال سنگ است، مشاهده کرد. بنابراین به هم خوردن نظم جایگزینی سوخت‌ها و بازگشت به زغال سنگ توسط کشورهای پرجمعیت و در حال توسعه یکی از دلایل مهم کاهش روند کربن‌زدایی است [1].

از طریق ایجاد تغییرات در فاکتورهای KI می‌توان انتشار کربن را کاهش داد، ولی باید توجه داشت که محدود کردن رشد اقتصادی به عنوان یک ابزار برای کاهش انتشار CO₂ مورد پذیرش سیاست‌های اقلیمی نیست. بنابراین تنها باید به دو زیربخش مربوط به تکنولوژی توجه کرد، یعنی شدت انرژی GDP (e) و شدت کربن انرژی (f). در زیربخش اول می‌توان به افزایش راندمان، بهبود تکنولوژی‌ها و صرفه‌جویی در مصرف انرژی پرداخت و در زیربخش دوم می‌توان به تکنولوژی‌ها و منابع انرژی کم کربن (مثل انرژی هسته‌ای، تجدیدپذیرها، استفاده از سوخت‌های فسیلی همراه با جذب و ذخیره کربن و استفاده از سوخت‌ها و حامل‌های انرژی کم کربن یا کربن صفر)¹⁸ توجه کرد [1].

¹⁸ Zero Carbon

۴. افزایش راندمان

افزایش راندمان انرژی، عاملی برای کاهش تقاضای انرژی نهایی است. آخرین مطالعه آژانس بین‌المللی انرژی تخمین می‌زند که ۴۰ درصد از انتشار CO₂ جهانی را می‌توان از طریق بهبود راندمان انرژی کاهش داد. صنعت، حمل و نقل و بخش ساختمان به عنوان حوزه‌های کلیدی برای توسعه بیشتر شناسایی شده‌اند. افزایش راندمان انرژی به عنوان یک راه حل (برد-برد-برد) شناخته می‌شود، زیرا انتشار کربن و رشد تقاضای انرژی را کاهش می‌دهد و طول عمر منابع انرژی جهان را افزایش می‌دهد. ولی باید به مسئله شکاف انرژی-راندمان¹⁹ اشاره کرد، که به اجرایی نشدن طرح‌های افزایش راندمان موفق در آنالیزهای اقتصادی اشاره می‌کند. از دلایل آن می‌توان به مشکلات در تأمین بودجه و عدم جدیت سیاستمداران در اجرای آن‌ها اشاره کرد [1], [6].

۴-۱. حمل و نقل

کربن‌زدایی از حمل و نقل باعث کاهش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. استراتژی‌های بهبود راندمان انرژی خودروها شامل تنظیم مصرف سوخت و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای است. راه‌های کاهش مصرف سوخت همراه با حفظ ایمنی و راحتی شامل موارد زیر است:

- بهبود طراحی وسیله نقلیه با هدف کاهش کشش آیرودینامیک
- استفاده از موتورهای و سیستم انتقال قدرت پیشرفته
- کاهش وزن وسیله نقلیه با استفاده از مواد سبک‌تر
- بهبود تایرها
- استفاده از پیشران‌های پیشرفته شامل هیبریدهای دیزلی یا بنزینی

در درازمدت، تغییر از موتورهای احتراق داخلی به پیشران‌های الکتریکی برای خودروها و وسایل نقلیه سبک یک مسیر پایدارتر برای حمل و نقل کم کربن است. مطالعات نشان داده‌اند که انتشار CO₂ مربوط به وسایل نقلیه الکتریکی²⁰ عمدتاً به دلیل انتشار شبکه برق است، بنابراین تولید برق کم کربن در این زمینه هم اهمیت دارد. علاوه بر این، تعامل بین وسایل نقلیه الکتریکی و شبکه، تأثیر زیادی بر طراحی و عملکرد شبکه‌های برق دارد. برای مثال شارژ باتری EV می‌تواند منحنی بار یک سیستم برق را تغییر دهد و بنابراین نیاز به افزایش ظرفیت الکتریسیته دارد [1], [2], [5].

¹⁹ Energy-Efficiency Gap Problem

²⁰ Electrical Vehicle (EV)

اخیراً اداره اطلاعات انرژی در ایالات متحده اعلام کرده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای از حمل و نقل، تا حد زیادی از سایر بخش‌ها (صنعتی، مسکونی و تجاری) پیشی گرفته است، بنابراین الکتریکی کردن حمل و نقل می‌تواند مزایای زیادی را در ایالات متحده ایجاد کند. "برنامه‌ریزی ویژه بلندمدت برای بهره‌وری انرژی" اولین سیاست برای حمایت از استقرار خودروهای برقی در چین است. پس از آن، چین سیاست‌های متفاوتی در مورد خودروهای الکتریکی اعمال کرد که از کاربرد در حمل‌ونقل عمومی شهری (به عنوان مثال اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها) حمایت می‌کرد. چین در حال حاضر گسترده‌ترین بازار برای وسایل نقلیه الکتریکی است و بیشترین تعداد خودروهای برقی BEV²¹ و PHEV²² در چین است. ولی باید توجه داشت که ممکن است به دلیل ساختار شبکه برق، خودروهای برقی در همه مناطق، منجر به نتایج مثبت در کربن‌زدایی نشوند [5].

۴-۲. برق

عرضه برق، مهم‌ترین بخش تولید انتشار دی‌اکسید کربن است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، برق به جای سوخت فسیلی، حامل اصلی انرژی در جهان شود (عقاید در این باره متفاوت است) و در حال حاضر حدود ۴۰٪ انتشار CO₂ در جهان مربوط به این بخش است؛ با این حال راه حل‌های کم‌هزینه‌ای برای کاهش انتشار در این حوزه، موجود است. به همین دلیل استراتژی‌های مقرون به صرفه که برای دستیابی به اهداف توافق پاریس طراحی شده‌اند، بخش برق را تا نیمه قرن ۲۱، تقریباً با انتشار کربن صفر در نظر می‌گیرند و برای کاهش مصرف سوخت فسیلی، بر الکتریکی کردن بخش‌های مختلف حمل‌ونقل، ساختمان و صنعت تأکید می‌کنند. از آنجایی که جمعیت زیادی در جهان به برق دسترسی ندارند، پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آینده تقاضای برق رشد قابل توجهی داشته باشد و در سال ۲۰۳۵، ۱۰۷ برابر مقدار آن در سال ۲۰۱۰ شود. بنابراین توجه به راه‌های کربن‌زدایی این حوزه ضروری است [1], [4], [8].

یکی از روش‌های اصلی برای افزایش راندمان برق، استفاده از تولید همزمان برق و حرارت (و برودت)²³ است. این روش قابلیت این را دارد که راندمان تولید را به حدود ۹۰٪ برساند. در بخش برق تجدیدپذیر، راندمان پایین است و باید تلاش‌ها و تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت گیرد [1].

²¹ Battery Electric Vehicle

²² Plug-in Hybrid Electric Vehicle

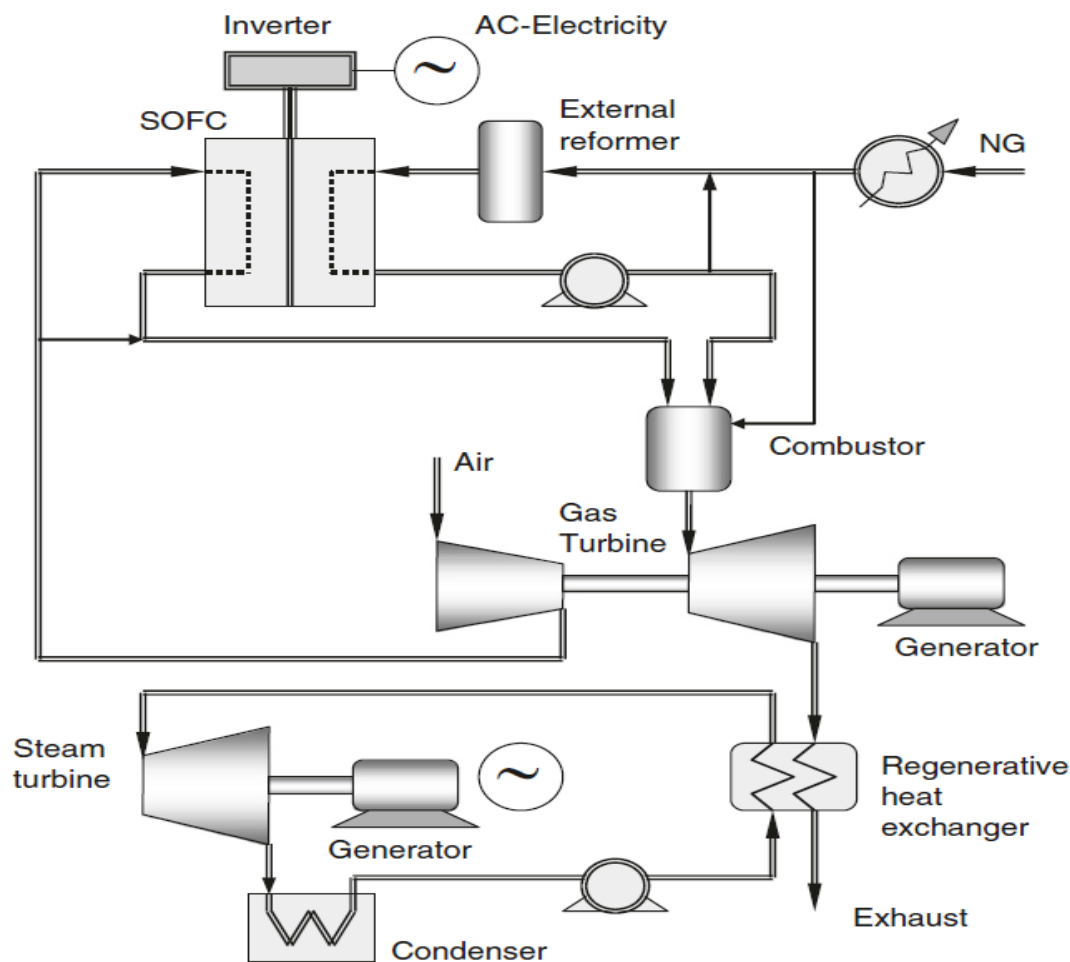
²³ (C)CHP

یکی از نوآوری‌هایی که در صورت کاملاً تجاری شدن، می‌تواند راندمان سیستم‌های تولید برق را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، پیل سوختی²⁴ است. برعکس تجهیزات مرسوم تولید برق (مثل توربین‌ها و موتورهای احتراق داخلی) که راندمانشان توسط سیکل کارنو محدود شده است، پیل سوختی مستقیماً انرژی شیمیایی سوخت را به برق تبدیل می‌کند و در نتیجه راندمان بالاتری نسبت به روش‌های سنتی دارد (تقریباً دو برابر)؛ مزیت دیگر آن این است که برخلاف توربین گاز و موتور احتراق داخلی، سوخت و هوا را با هم ترکیب نمی‌کند، بنابراین یکی از جریان‌های خروجی که عمدتاً از CO₂ تشکیل شده، می‌تواند جدا شود که این امر جذب و ذخیره کربن دی‌اکسید را ساده‌تر می‌کند [1].

پیل‌های سوختی در صورت ترکیب با سیکل توربین گاز (برایتون)، می‌توانند انتشار CO₂ را به میزان زیادی کاهش دهند. در این روش پیل سوختی به جای محفظه احتراق سیکل برایتون قرار می‌گیرد و انرژی حرارتی خروجی از آن در سیکل، برای تولید برق مصرف می‌شود. برای این روش، پیل‌های سوختی دما بالا مناسب هستند و میکروتوربین‌های گازی بهتر از سایر موتورهای گرمایی، عمل می‌کنند. همچنین افزودن سیکل رانکین به سیستم ذکرشده (سیکل ترکیبی سه‌گانه)، راندمان را هنوز هم به میزان بیشتری افزایش می‌دهد. شکل ۴-۲-۱ شماتیکی از سیکل ترکیبی سه‌گانه است [1].

²⁴ Fuel Cell

شکل ۴-۲-۱- سیکل ترکیبی سه گانه [1]



۴-۳. ساختمان

بخش ساختمان هدف مهم دیگری برای افزایش راندمان انرژی و کاهش انتشار کربن دی اکسید است. در حال حاضر بسیاری از کشورهای در حال توسعه، با سرعت زیادی در حال ایجاد ساختمان‌های جدید هستند. اگر این کشورها از نوآوری‌ها و پیشرفت‌هایی که در این حوزه ایجاد شده، بهره ببرند، می‌توانند تا حد زیادی انتشار کربن در ارتباط با این بخش را، کاهش دهند. ولی اگر روندهای سنتی را در پیش گیرند، ممکن است برای دهه‌ها، دچار قفل‌شدگی ساختمان‌های ناکارآمد شوند. پدیده‌ای که امروزه در برخی کشورهای OECD²⁵ مشاهده می‌شود. این

²⁵ Organization for Economic Co-operation and Development

کشورها ناچارند برای افزایش راندمان ساختمان‌ها، به ظرفیت پایین موجود برای ایجاد ساختمان‌های جدید و در صورت امکان، بازسازی ساختمان‌های کنونی اکتفا کنند [1]، [6].

بیشترین پتانسیل برای کاهش انتشار کربن بخش ساختمان، در روش‌های کاهش تقاضای انرژی در واحد مترمربع، استفاده از برق کربن‌زدایی‌شده، و سیستم‌های گرمایش و سرمایش با راندمان بالا بر اساس پمپ‌های حرارتی است. همچنین در شهرهای بزرگ و مناطق پرجمعیت، سیستم‌های تولید همزمان منطقه‌ای، می‌توانند مصرف انرژی ساختمان‌ها را به میزان بیشتری کاهش دهند [1].

در محیط داخلی ساختمان، دما، رطوبت و کیفیت هوای داخل به خوبی شناخته شده است و در طول روز تغییر نمی‌کند، اما دمای بیرونی تغییر می‌کند و شرایط می‌تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد. یکی از رویکردهای جدید که هنوز عملی نشده، این است که مدل اصلاحی رسانش حرارتی پوشش ساختمان‌ها را با استفاده از دستگاه‌های حرارتی غیرخطی به کار برد. این امر به دیوارهای ساختمان اجازه می‌دهد تا در روزهای گرم عایق باشند تا از نشت گرما از بیرون جلوگیری شود، اما اگر دما در شب کاهش یابد، دیوارها می‌توانند به طور هوشمند به حالت رسانا تغییر کنند تا گرما از ساختمان خارج شود؛ بنابراین سرمایش رایگان را ممکن می‌کند. اخیراً یک مطالعه نشان داد که پوشش ساختمان با رسانایی متغیر می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی از ۷٪ تا ۴۲٪ در شهرهای مختلف در سراسر ایالات متحده شود که تأثیر عمده‌ای در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. ویژگی‌های مورد نظر یک پوشش رسانای متغیر عبارتند از:

- نسبت رسانش حرارتی زیاد در حالت رسانا (روشن) به حالت عایق (خاموش)
- رسانایی بسیار کم در حالت عایق
- تعداد سیکل‌های زیاد بین حالت‌های روشن و خاموش
- مصرف برق کم

این روش به تحقیقات بیشتر در توسعه مواد و دستگاه‌های مقرون به صرفه و قابل اعتماد نیاز دارد [9].

۵. صرفه‌جویی

صرفه‌جویی انرژی مانند افزایش راندمان، باعث کاهش شدت انرژی GDP می‌شود، ولی این تفاوت را دارند که افزایش راندمان، به معنای کاهش مصرف انرژی به ازای دریافت خدمات ثابت است، در حالی که صرفه‌جویی از طریق کاهش خدمات انرژی، مصرف آن را کاهش می‌دهد. طبق آمار، مصرف انرژی سرانه حتی در میان کشورهای

توسعه یافته با شرایط اجتماعی نزدیک به هم، به صورت قابل توجهی متفاوت است. این امر می تواند نشان دهنده ی پتانسیل موجود برای کاهش تقاضای انرژی از این طریق باشد [1].

۵-۱. اقتصاد چرخشی²⁶

اقتصاد چرخشی (CE) یک رویکرد کلیدی برای صرفه جویی انرژی است. به جای اقتصاد خطی استفاده-مصرف-دورانداختن، در این رویکرد مواد قابل بازیافت وارد چرخه می شوند، از طریق بازیافت و بازتولید تا حداکثر زمان ممکن در چرخه باقی می مانند و در همه مراحل مقدار پسماند تولید شده و انرژی تلف شده به حداقل می رسد. به خصوص بازیافت مواد انرژی بر²⁷ در کاهش شدت انرژی اقتصاد نقش مهمی دارد. بر اساس اصول CE، همزیستی صنعتی²⁸ و اکوپارک های صنعتی²⁹ به طرح های صنعتی محبوب در بسیاری از کشورها تبدیل شده اند: در کاوازاکی ژاپن، استفاده مجدد از ضایعات صنعتی در تولید سیمان از سال ۲۰۰۹ تاکنون ۱۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه ای را کاهش داده است. همچنین در کارلسروهه آلمان، تبادل انرژی بین شرکت های مجاور منجر به کاهش ۲۱ درصدی انتشار کربن شده است [1], [2], [4].

۶. کاهش شدت کربن انرژی

۶-۱. انرژی هسته ای

انرژی هسته ای یکی از منابع انرژی کربن خنثی است که به طور مستقیم باعث انتشار کربن نمی شود. همچنین بالاترین چگالی انرژی را میان تمام تکنولوژی های موجود برای تولید برق دارد. ولی با چالش هایی هم روبروست که از میان آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هزینه بالا
- تولید زباله رادیواکتیو و مشکل نگهداری طولانی مدت و ایمن آن ها
- نگرانی های عمومی درباره خطرات آن، مخصوصاً با توجه به تجربه سوانح گذشته مانند چرنوبیل و فوکوشیما.

²⁶ Circular Economy (CE)

²⁷ Energy Intensive

²⁸ Industrial Symbiosis (IS)

²⁹ Eco-Industrial Park (EIS)

برای مثال بعد از حادثه فوکوشیما، دولت آلمان برنامه‌ای را برای حذف تدریجی انرژی هسته‌ای مشخص کرد. فرانسه هم هدف کاهش سهم هسته‌ای را در تولید برق دنبال می‌کند. مثال‌های ناموفقی از پروژه‌های زیرزمینی دفن زباله‌های هسته‌ای وجود دارد، که دلیل عدم موفقیتشان نگرانی‌های عمومی و عدم پذیرش آن‌ها توسط جامعه بود. همچنین در زمینه نیروگاه‌های هسته‌ای، علاوه بر بررسی خطرات سوانحی مانند زلزله، باید به تغییرات اقلیمی که می‌توانند ارتفاع سطح دریا را تغییر دهند، توجه جدی کرد [1]، [4]، [6].

۲-۶. جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS)

هدف این تکنولوژی، جلوگیری از ورود کربن دی‌اکسید به اتمسفر و ذخیره دائمی آن است. در این زمینه معمولاً کشور نروژ پیشتاز است و بزرگ‌ترین مرکز تست تکنولوژی‌های جذب کربن در جهان را دارد. شکل ۱-۲-۶-۶ نمایی از این مرکز است [1]، [4]، [10].

شکل ۱-۲-۶-۶ - مرکز تکنولوژی مانگستاد³⁰ در نروژ [10]



این روش برای صنایعی مانند سیمان و پالایشگاه‌ها و فولاد هم کاربرد دارد. پرهزینه‌ترین قسمت آن مربوط به جذب کربن دی‌اکسید است. برای جذب سه استراتژی وجود دارد: جذب قبل از احتراق، جذب بعد از احتراق، و احتراق با اکسیژن خالص (OFC)³¹. در رابطه با OFC، می‌توان به سیکل الم³² برای تولید برق اشاره کرد که به تازگی تجاری

³⁰ Technology Centre Mongstad (TCM)

³¹ Oxyfuel Combustion (OFC)

³² Allam Cycle

شده است [1]، [11]. کربن دی اکسید جذب شده می تواند به سه صورت مایع، گاز و جامد به محل مورد نظر برای ذخیره سازی منتقل شود. از میان شیوه های مختلف ذخیره کربن می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ذخیره در زیر زمین: در این زمینه استفاده از تجربه و تخصص شرکت های نفتی و گازی می تواند اهمیت داشته باشد، یکی از مناطق مناسب برای این کار میدان های نفتی و گازی تخلیه شده است.
- ذخیره در اقیانوس ها: بیشتر کربن دی اکسید که به صورت طبیعی در آب ها حل شده است، در لایه های بالایی قرار دارد، بنابراین ذخیره آن در لایه های زیرین آب های اقیانوس، می تواند راهکار مناسبی برای جلوگیری از ورود آن به جو باشد.
- ترسیب کربن³³: از طریق واکنش کربن با موادی مانند اکسیدهای فلزی، ترکیبات پایدار کربن ایجاد می شود.

در زمینه CCS باید به تکنولوژی BECCS، یعنی جذب و ذخیره کربن به همراه انرژی زیستی، اشاره کرد که باعث انتشار منفی می شود. به همین دلیل این روش یکی از بخش های کلیدی در استراتژی های معرفی شده توسط IPCC است. ولی باید توجه داشت که BECCS جدید است و به اندازه کافی آزموده نشده است و در نتیجه عدم قطعیت های زیادی همراه با آن وجود دارد. ولی در صورت موفقیت در استفاده از آن در مقیاس های بزرگ، تأثیر قابل توجهی در کربن زدایی خواهد داشت. در حال حاضر این تنها تکنولوژی موجود برای دستیابی به انتشار منفی است [1]، [4].

ولی چالش هایی هم وجود دارد، به دلیل هزینه هایی که این تکنولوژی خواهد داشت، باید قیمت کربن بیش از مقادیر کنونی در جهان باشد، تا انگیزه برای تقبل هزینه های مربوط به CCS ایجاد شود؛ در حال حاضر تعداد پروژه های CCS کمتر از مقداری است که چند سال قبل پیش بینی شده بود و برخی از پروژه ها هم لغو شده اند [6].

۳-۶. تجدیدپذیرها

انرژی تجدیدپذیر تنوع گسترده ای را از منابع انرژی در برمی گیرد مانند: خورشیدی، باد، زمین گرمایی، برق آبی، انرژی جزر و مد و

استفاده از انرژی تجدیدپذیر در جهان نسبت به سال ۱۹۶۰ تقریباً ۶ برابر شده که ۷۰٪ آن انرژی برق آبی است. مزیت آن ها علاوه بر کربن زدایی، تأمین انرژی مطمئن با هزینه هایی قابل پیش بینی است که معمولاً تحت تأثیر

³³ Carbon Sequestration

بازارهای جهانی و مسائل ژئوپولتیک قرار نمی‌گیرد. یکی از چالش‌هایی که در رابطه با این منابع وجود دارد، این است که اکثراً به یارانه نیاز دارند. همچنین بازدهشان نسبت به روش‌های دیگر تولید برق پایین است. اتصال برق تجدیدپذیر متغیر³⁴ به شبکه چالش دیگری را ایجاد می‌کند و به دلیل ایجاد هزینه‌های اضافه، مزیت اقتصادی این طرح‌ها را کاهش می‌دهد. در زمان‌های خاصی ممکن است میزان برق تولیدی بیشتر از تقاضای موجود شود، می‌توان برق اضافه را به مناطق دیگر منتقل یا از تکنولوژی‌های ذخیره انرژی استفاده کرد که این طرح‌ها هم به هزینه بیشتری نیاز دارند [1]، [4]، [6].

۴-۶. ذخیره انرژی

ضرورت ذخیره انرژی به شدت با عدم تعادل زمانی و مکانی بین عرضه و تقاضا در سیستم‌های انرژی مرتبط است، به ویژه برای انرژی‌های تجدیدپذیر متناوب، زیرا پایداری شبکه برق فعلی بدون ذخیره‌سازی بیش از ۲۰ درصد انرژی‌های تجدیدپذیر متناوب به خطر می‌افتد. روش‌های مختلف شیمیایی، حرارتی، مکانیکی و ... برای ذخیره انرژی ارائه شده است ولی مانند CCS درباره موفقیت آن‌ها، تردیدهایی وجود دارد. طبق پایگاه داده ذخیره انرژی جهانی در سال ۲۰۱۶، ۱۶۲.۲ گیگاوات از ۱۶۸.۶ ظرفیت ذخیره انرژی، مربوط به ذخیره انرژی هیدروالکتریک³⁵ است، روشی که از انرژی پتانسیل گرانشی استفاده می‌کند و شرایط جغرافیایی، استفاده از آن را محدود کرده است [2]، [9].

نمودار ۴-۶-۱ ظرفیت و سرعت تخلیه انرژی را برای روش‌های ذخیره انرژی الکتریکی، نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های ذخیره انرژی هیدروالکتریک و ذخیره انرژی با هوای فشرده³⁶، ظرفیت بالایی در مقیاس شبکه می‌توانند ایجاد کنند ولی سرعت تخلیه کمتری در مقایسه با باتری‌ها دارند. در CAES، مقادیر زیادی هوا با فشار بالا می‌تواند در محفظه‌هایی مانند حفره‌های زیرزمینی ذخیره شود تا در آینده به وسیله توربین از انرژی آن‌ها استفاده شود. چالشی که در این زمینه وجود دارد، مشکل افزایش دمای هوا، به دلیل افزایش فشار، به میزانی است که به کمپرسورها آسیب وارد کند [4]. باتری‌های لیتیوم یونی هم (هر ۱۰۰ کیلووات ساعت-۸۰ دلار آمریکا هزینه سرمایه‌گذاری) برای اهداف ذخیره‌سازی چند روزه بسیار گران هستند. حل مشکلات این

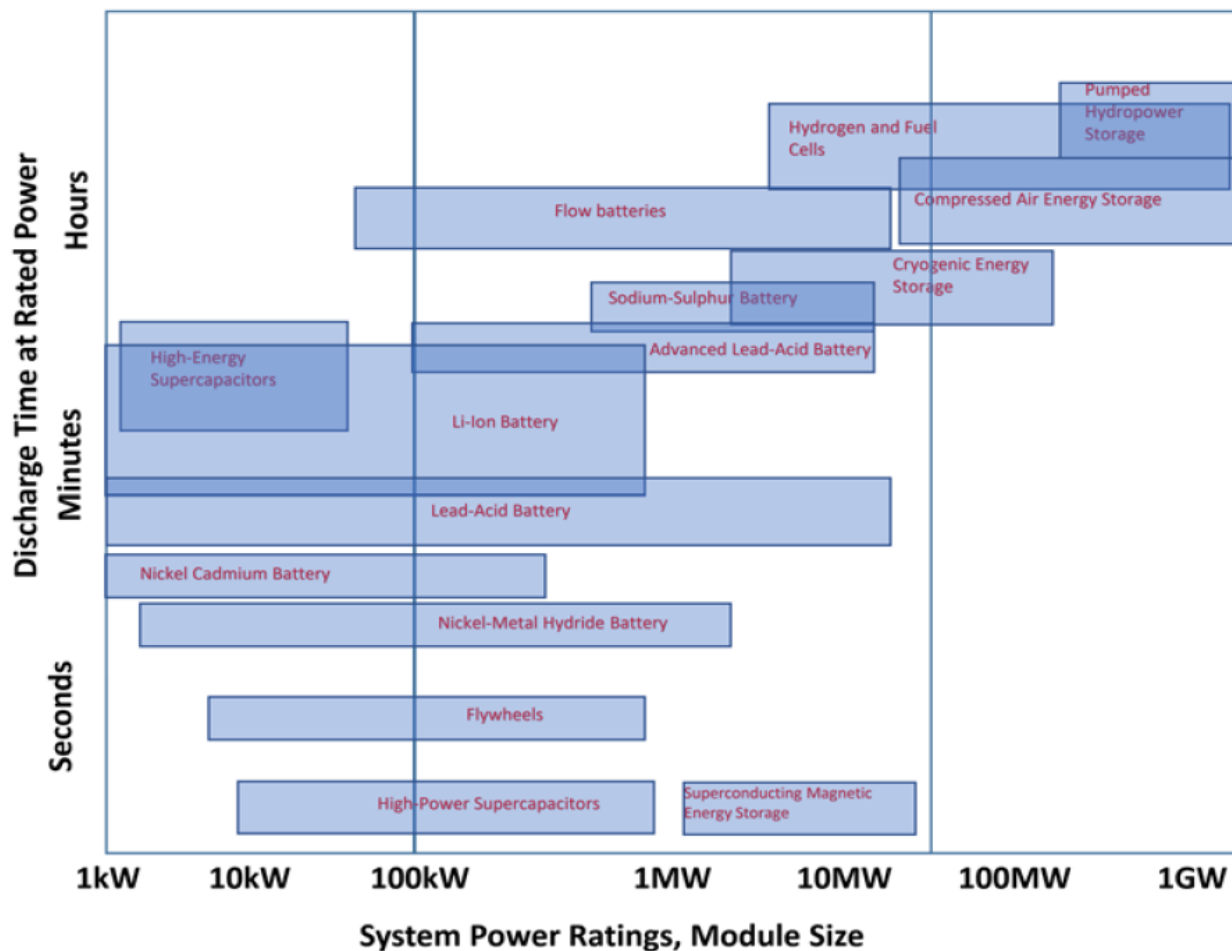
³⁴ Variable Renewable Electricity (VRE)

³⁵ Pumped Hydroelectric Storage

³⁶ Compressed Air Energy Storage (CAES)

روش‌ها، می‌تواند کربن‌زدایی کامل شبکه را امکان‌پذیر کند و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را تا ۲۵٪ کاهش دهد [9].

نمودار ۶-۴-۱ - مقایسه ویژگی‌های روش‌های مختلف ذخیره انرژی [4]



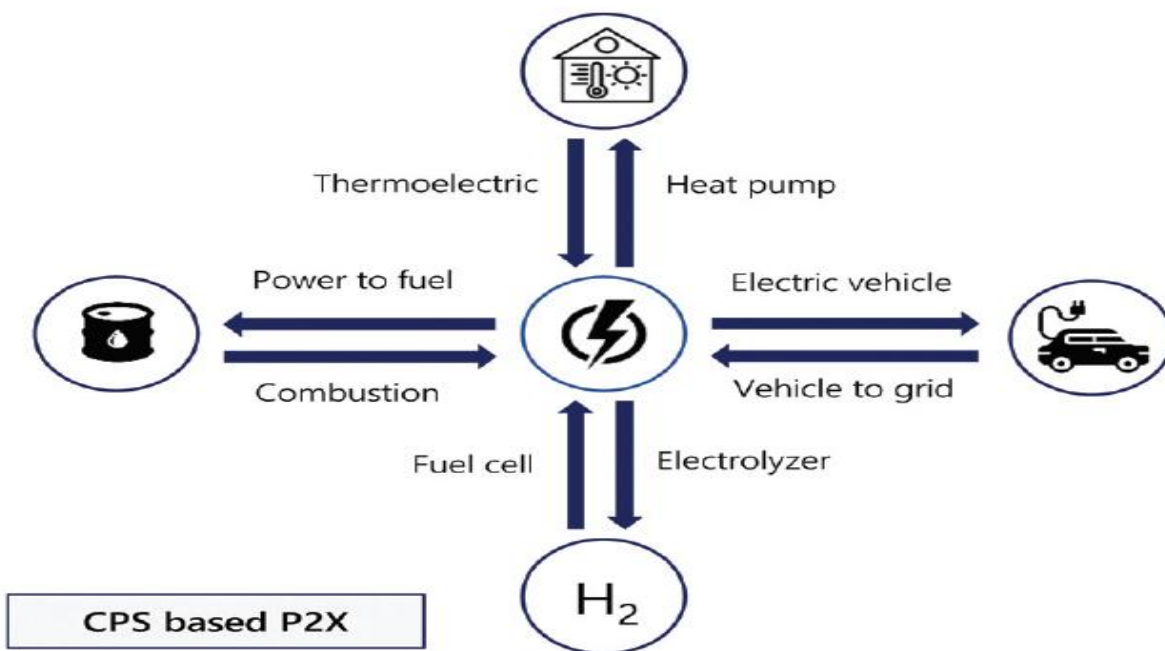
ادغام بین الکتریسیته و سایر حامل‌های انرژی مثل گرما یا سوخت که معمولاً به عنوان power-to-X (P2X) شناخته می‌شود نیز فرصت‌های قابل توجهی را برای ذخیره انرژی فراهم می‌کند. P2X ذخیره الکتریسیته را در قالب حامل‌های انرژی دیگر امکان‌پذیر می‌کند. برخی از نمونه‌های آزمایشی عبارتند از برق به گرما (از طریق پمپ‌های حرارتی)، برق به گاز (H₂ از طریق الکترولیز)، برق به سوخت (از طریق هیدروژن و CO₂)، و برق به تحرک (از طریق EV). مزایای P2X عبارتند از:

1. برق‌رسانی به یک روند اصلی در استفاده از انرژی اولیه تبدیل شده است، ولی برای بخش‌هایی مثل حمل‌ونقل و صنایع شیمیایی که الکتریکی کردن آن‌ها به راحتی ممکن نیست، P2X به کربن‌زدایی آن‌ها از طریق ارتباط دادن بخش‌ها به هم کمک می‌کند.

2. شبکه‌های یکپارچه برق، گاز و گرما می‌توانند انعطاف‌پذیری بیشتری را برای استفاده از برق فراهم کنند [2].

در شکل ۶-۴-۱، شماتیک مسیرهای مختلف P2X قابل مشاهده است و فناوری‌های مختلفی نشان داده شده‌اند که می‌توانند الکتریسیته را به دیگر مصرف‌کنندگان انرژی (مانند گرما، گاز، سوخت و حمل و نقل) تبدیل کنند و بالعکس.

شکل ۶-۴-۱ - شماتیک فناوری‌های مختلف (P2X) که در سیستم انرژی اعمال می‌شود و مسیرهای مربوط به آن‌ها [2].



چندین مفهوم جدید ذخیره‌سازی انرژی حرارتی³⁷ پیشنهاد شده است. در حالی که تبدیل الکتریسیته به گرما در دماهای مختلف نسبتاً آسان است، چالش اصلی، کارآمدی بالا مرتبط با قانون دوم ترمودینامیک است که باعث

³⁷ Thermal Energy Storage (TES)

تبدیل حرارت به برق می‌شود. با این حال مزیت اصلی TES پتانسیل آن برای هزینه پایین (کمتر از ۱ دلار آمریکا در برابر ۲۰ کیلووات ساعت) است. به این دلیل که برخلاف باتری که در آن تنها یک بخش کوچک از اتم‌ها دستگاه را می‌سازند، در واقع هر اتم در حال مشارکت است و البته با انرژی کمتر (یعنی meV برابر با eV). با این وجود از آنجایی که گرمای ویژه مولی تقریباً همه مواد در دماهای بالا یکسان است، TES می‌تواند از مواد بسیار فراوان و کم‌هزینه که حتی بازیافت می‌شوند، استفاده کند [9].

با این وجود آن‌ها هنوز در مرحله اولیه هستند و به مرحله تجاری نرسیده‌اند. بنابراین، نیاز به توسعه بیشتری وجود دارد. به طور خاص، توسعه مفاهیم سیستم کامل که با دقت تمام، مسائل عملی (برای مثال، تخریب مواد و سازگاری در طول زمان، ایمنی، یکپارچه‌سازی سیستم و غیره) را که ممکن است مانع رسیدن به مرحله تجاری شود، در نظر بگیرد. به عنوان مثال سیستم‌هایی که از محیط مایع استفاده می‌کنند معمولاً باید با مسائل مربوط به خوردگی سروکار داشته باشند و چگونگی پمپ مایع که می‌تواند در دماهای بالا بسیار چالش برانگیز باشد. با این حال، نمونه‌های اخیر پمپاژ در ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که این امر ممکن است. برای سیستم‌هایی که از یک محیط TES جامد استفاده می‌کنند، باید در نظر داشت که توربین‌های تولید برق معمولاً برای یک دمای ورودی خاص بهینه می‌شوند و اگر خروجی متوسط TES در طول تخلیه کاهش یابد، می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر کارایی داشته باشد [9].

سیستم‌های TES با چگالی انرژی بالا و کم‌هزینه نیز می‌توانند به طور قابل توجهی در توسعه وسایل نقلیه الکتریکی (EV) تأثیرگذار باشند، زیرا تا ۴۰ درصد ظرفیت باتری الکتریکی در خودروهای الکتریکی برای گرمایش/سرمایش کابین استفاده می‌شود. TES همچنین می‌تواند نقش مهمی در جبران بارهای گرمایشی/سرمایشی در ساختمان‌ها داشته باشد، زیرا انتظار می‌رود گرمایش/سرمایش، بیش از ۵۰٪ بار ساختمان را تشکیل دهد. به عنوان مثال می‌توان انرژی حرارتی را در زیر زمین به صورت فصلی ذخیره و در فصل‌های سرد، آن را استخراج کرد. به عنوان یکی از روش‌های ایجاد سرمایش، می‌توان به استفاده از جریان‌های زمین‌گرمایی با آنتالپی پایین اشاره کرد، که با ذخیره فصلی، قابلیت ایجاد گرمایش هم خواهند داشت [4]، [9].

یکی از چالش‌های اساسی در پذیرش TES این است که تنظیم‌پذیری محدودی در دمای مورد استفاده وجود دارد. به عنوان مثال، اگر دمای مورد نیاز ۲۵ درجه سانتیگراد باشد و دمای محیط از ۲۵ درجه سانتیگراد بالا یا پایین‌تر باشد، به دو ماده و سیستم TES مختلف نیاز است که به طور چشمگیری قابلیت استفاده از سیستم‌ها را کاهش می‌دهد و منجر به هزینه بالاتر می‌شود [9].

۵-۶. اقتصاد هیدروژن³⁸

عبارت اقتصاد هیدروژن اولین بار توسط فیزیکدانی به نام جان بوکر³⁹ به عنوان جایگزینی برای اقتصاد هیدروکربنی کنونی، مطرح شد. در این رویکرد، هیدروژن به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، و محیطی برای ذخیره انرژی، در نظر گرفته می‌شود. استفاده از هیدروژن در مقیاس بزرگ به فراهم کردن زیرساخت‌های مناسب نیاز دارد، ولی بخشی از زیرساخت‌های کنونی هم می‌تواند قابل استفاده باشد، به عنوان مثال خطوط لوله شبکه گاز، بی‌شبهت به شبکه مناسب برای انتقال هیدروژن نیستند. چالشی که در سوزاندن هیدروژن به عنوان سوخت وجود دارد، این است که ویژگی‌های احتراق آن مانند سرعت مشعل، با گاز طبیعی متفاوت است. همچنین اگرچه در بلندمدت می‌توان با استفاده از الکترولیز آب توسط برق، هیدروژن تولید کرد، ولی در کوتاه‌مدت این سوخت، بیشتر با روش ریفرمینگ بخار آب با متان⁴⁰، از گاز طبیعی به دست می‌آید، که منجر به تولید CO₂ می‌شود و به روش جذب و ذخیره CO₂ نیاز دارد [4].

در زمینه اقتصاد هیدروژن می‌توان به پروژه H₂1 که در انگلستان تعریف شده، اشاره کرد که در حال حاضر، بزرگ‌ترین پروژه کاهش انتشار کربن دی‌اکسید در جهان است و منجر به جلوگیری از انتشار ۱۲.۵ میلیون تن CO₂ در سال می‌شود. طبق این طرح قرار است بین سال‌های ۲۰۲۸ و ۲۰۳۵، شبکه گاز شمال انگلستان، تبدیل به زیرساختی برای هیدروژن شود. همچنین این پروژه شامل ۵۶ حفرة زیرزمینی به ظرفیت ۳۰۰۰۰ مترمکعب برای ذخیره فصلی هیدروژن متناسب با ۸ تراوات‌ساعت، و یک زیرساخت برای انتقال و ذخیره کربن دی‌اکسید به صورت ترسیب در ساختارهای اعماق دریای شمال است، ظرفیت ذخیره CO₂ حداکثر ۲۰ میلیون تن در سال است [4].

۶-۶. مسئله سیستم‌های خنک‌کننده و پمپ حرارتی

پتانسیل گرمایش جهانی هیدروفلوئوروکربن‌ها⁴¹ که به عنوان مبرد استفاده می‌شوند، بیش از ۲۰۰۰ برابر CO₂ است، و نیاز جهانی به سیستم‌های خنک‌کننده در حال افزایش است. پیش‌بینی‌هایی وجود دارد مبنی بر این که تا سال ۲۰۵۰، ۱۴ میلیارد وسیله سرمایش مورد نیاز باشد که ۴ برابر مقدار کنونی است. همچنین انتظار می‌رود که نشت به ظاهر اجتناب‌ناپذیر HFCها به تنهایی بتواند به بخش قابل توجه گرمایش جهانی سیاره تا سال ۲۰۵۰ (۱۰ تا ۴۰ درصد) تبدیل شود. بنابراین، سیستم‌های خنک‌کننده با راندمان انرژی بالا، مقرون به صرفه و مقیاس‌پذیر با

³⁸ Hydrogen Economy

³⁹ John Bockris

⁴⁰ Steam Methane Reforming

⁴¹ Hydrofluorocarbons (HFC)

استفاده از مبردهای غیرسمی، غیرقابل اشتعال که پتانسیل ایجاد گرمایش جهانی آن‌ها بیشتر از CO₂ نباشد، مورد نیاز است. با این حال، در حال حاضر هیچ راه حل قابل قبولی وجود ندارد که تمام این الزامات را برآورده کند [4], [9].

تحقیقات برای شناسایی و مشخص کردن مبردهای جدید، و رویکردی جدید برای جلوگیری از نشت مبرد، مورد نیاز است [9].

۶-۷. کربن‌زدایی فرایندهای صنعتی

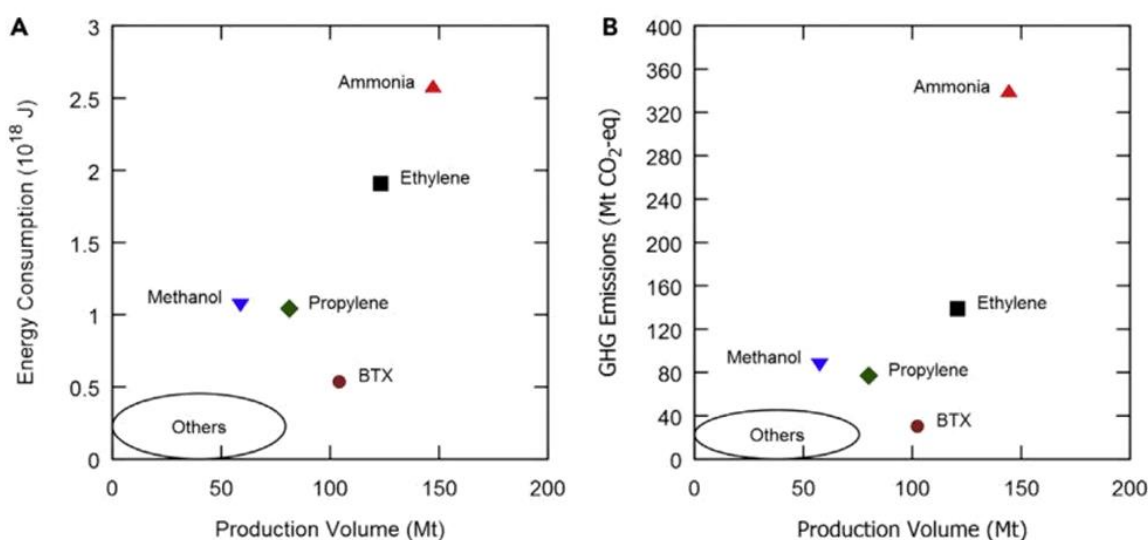
انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش صنعتی بیش از ۱۵ درصد از انتشار جهانی را تشکیل می‌دهد که اکثر آن‌ها با تأمین گرما در دمای ۱۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتیگراد مرتبط هستند. جدای از تأمین گرما، موارد زیادی وجود دارد که باعث انتشار CO₂ می‌شود. و هر صنعت چالش‌های منحصر به فرد خود را نیز دارد، مهم‌ترین صنایع عبارتند از: سیمان، آهن/فولاد، آلومینیوم و هیدروژن (H₂) که هر کدام به ترتیب مسئول تقریباً ۱۰٪، ۴٪، ۱٪ و ۱٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی هستند [9].

با کاهش هزینه برق تجدیدپذیر، اکنون می‌توان بخش صنعتی را با استفاده از گرم‌کن‌های مقاوم‌تری یا احتراق H₂ کربن‌زدایی کرد. فرایندهای صنعتی را می‌توان به گونه‌ای بازطراحی کرد که از انرژی‌های تجدیدپذیر متناوب کم‌هزینه برای تأمین گرمای مورد نیاز استفاده کنند. همچنین می‌توان گرما را تنها در جایی که مورد نیاز است، متمرکز کرد. همچنین فرصتی برای اختراع یا توسعه فرایندهای جدید وجود دارد که از یکی از رویکردهای ذکرشده برای جبران فرایندهای ترمودینامیکی استفاده می‌کنند [9].

با این حال، چالش‌های مهم علمی و مهندسی همچنان باقی است. برای برق تجدیدپذیر متناوب، یا باید ذخیره‌سازی ارزان قیمت در دمای بالا ایجاد شود یا کوره‌های با ضریب ظرفیت پایین باید توسعه یابد. گرمای حاصل از الکتریسیته نیز می‌تواند به صورت حجمی اضافه شود (مثلاً از طریق مایکروویو، گرمایش ژول یا القایی)، که مزیت عمده‌ای نسبت به همرفت دارد، زیرا گرما می‌تواند به صورت محلی نیز تحویل داده شود، اما هزینه و دوام آن باید بهبود یابد. H₂ بدون گازهای گلخانه‌ای می‌تواند به عنوان سوخت برای تأمین گرما مورد استفاده قرار گیرد، اگرچه هنوز مسائل مهمی در ارتباط با طراحی و دینامیک در احتراق‌های H₂ وجود دارد که به طور کامل حل نشده است. طرح‌های احتراق امیدوارکننده، مانند مشعل با چرخش کم، در چند سال گذشته به عنوان یک راه حل بالقوه ظاهر شده‌اند، اما مقیاس‌پذیری آن‌ها نیاز به توسعه بیشتر دارد [9].

تظاهرات اولیه رویکردهای جایگزین برای فولاد با استفاده از سیستم‌های الکتروشیمیایی با دمای بالا و H_2 به عنوان یک کاهنده به دست آمده است، اما تحقیقات بیشتری نیاز دارد. برای سیمان، هنوز هیچ ماده شیمیایی که CO_2 تولید نکند، شناسایی نشده است. بنابراین، تحقیقات برای یافتن جایگزین‌هایی بدون گازهای گلخانه‌ای مورد نیاز است، در غیر این صورت جذب CO_2 باید انجام شود. یکی از گزینه‌های H_2 که در حال حاضر در حال بررسی است، پیرولیز متان است که می‌تواند H_2 را با هزینه‌های رقابتی همراه با کربن جامد تولید کند که می‌تواند به عنوان مصالح ساختمانی استفاده شود. با این حال، رسوب کربن در راکتورها یک چالش بزرگ بوده است، و اگرچه به پیشرفت‌های چشمگیری مانند استفاده از فلز مایع برای حل این مشکل دست یافته‌ایم، اما به تحقیقات بیشتری نیاز دارد [9].

نمودار ۶-۸-۱- مصرف انرژی و ردپای کربن مواد شیمیایی با حجم بالا [3]



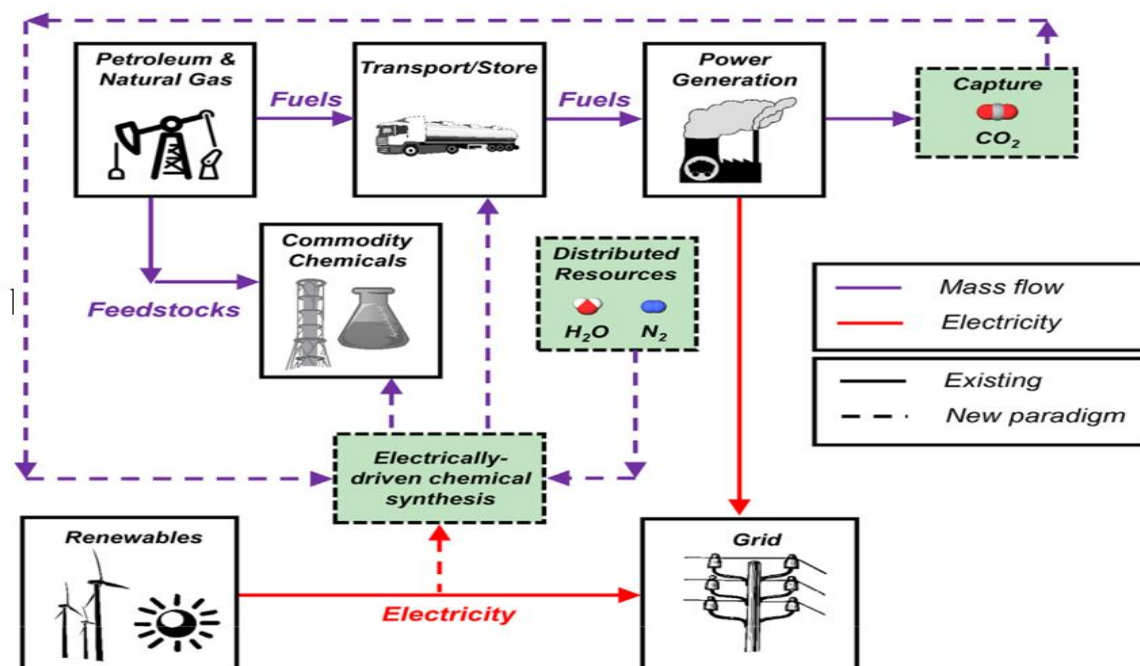
آمونیاک، اتیلن، پروپیلن، متانول، و بنزن / تولوئن / زایلن (BTX) پنج ماده شیمیایی برتر با بیشترین حجم تولید و انرژی هستند. این مواد شیمیایی با حجم بالا به سایر مواد شیمیایی، مواد شیمیایی ویژه یا محصولات نهایی تبدیل می‌شوند. به عنوان مثال، آمونیاک برای تولید آکریل نیتریل، هیدرازین، فنل، اسید نیتریک و اوره ضروری است. در نهایت به کودها، پاک‌کننده‌ها و پلاستیک‌ها تبدیل می‌شود [3].

تولید آمونیاک، اتیلن، پروپیلن، متانول و BTX همگی برای افزایش دما، اعمال فشار یا جداسازی محصولات به انرژی نیاز دارد و این انرژی عموماً از سوزاندن سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. علاوه بر این، برخی از مسیرهای سنتز، از جمله مسیرهای سنتز آمونیاک و متانول، به گاز هیدروژن به عنوان ماده اولیه نیاز دارند. گاز هیدروژن عموماً با ریفرمینگ بخار آب با متان تولید می‌شود که در

آن آب و گاز طبیعی به هیدروژن و مونوکسید کربن تبدیل می‌شوند. با استفاده از واکنش تغییر گاز آب، مونوکسید کربن و آب سپس به هیدروژن و دی اکسید کربن اضافی تبدیل می‌شوند و گازهای گلخانه‌ای را تولید می‌کنند [3].

یکی از راه‌های کربن‌زدایی می‌تواند شامل تبدیل دی اکسید کربن منتشرشده به مواد شیمیایی با ارزش باشد. راهبرد دوم اجتناب از تولید دی اکسید کربن به طور کلی است. برای مثال، این امر می‌تواند با تأمین هیدروژن منحصراً از شکافتن آب به جای متان بخار و واکنش‌های تغییر گاز آب به دست آید. وجه اشتراک هر دوی این مسیرها این است که احتمالاً شامل تبدیل گونه‌هایی در پایین چشم‌انداز انرژی آزاد مانند دی اکسید کربن، نیتروژن و آب به مواد شیمیایی مطلوب بالاتر از انرژی آزاد مانند آمونیاک و متانول است. انتقال این مواد اولیه در دسترس به سمت چشم‌انداز انرژی آزاد نیاز به ورودی انرژی دارد که در حالت ایده‌آل از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید و باد تأمین می‌شود. در حالی که روند تولید برق تجدیدپذیر می‌تواند اهداف بیشتری در کربن‌زدایی تولید مواد شیمیایی داشته‌باشد، عکس آن نیز صادق است. توانایی تبدیل انرژی الکتریکی به پیوندهای شیمیایی روشی را برای ذخیره انرژی الکتریکی فراهم می‌کند که به غلبه بر متناوب بودن منابعی مانند خورشید و باد کمک می‌کند [3].

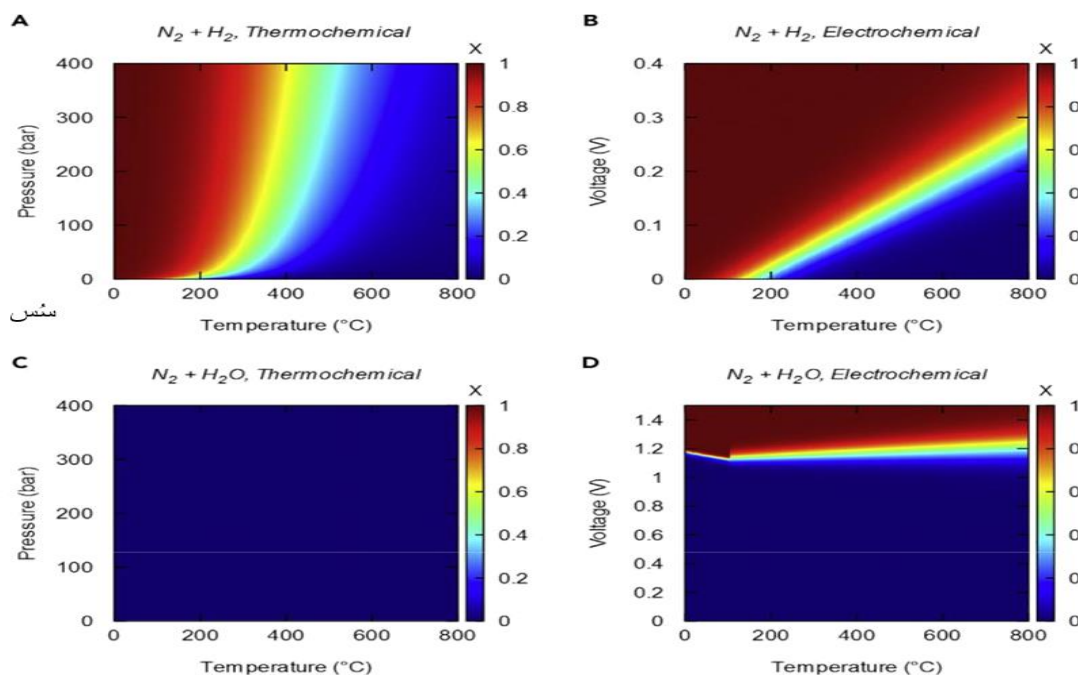
شکل ۶-۸-۱- دستگاه‌های سنتز شیمیایی چرخشی؛ نیتروژن، آب، دی اکسید کربن، الکتریسیته را از یک منبع تجدیدپذیر مانند خورشید یا باد دریافت می‌کنند [3].



دستگاه معرفی شده در شکل ۶-۸-۱ مواد شیمیایی مانند متانول و آمونیاک را تولید می کند که هم وسیله ای برای ذخیره انرژی به عنوان سوخت است و هم محصولات شیمیایی مورد نظر را فراهم می کند. بدون برق سازی صنایع شیمیایی، تعامل بین منابع برق تجدیدپذیر و سوخت های فسیلی مورد استفاده برای تولید برق از طریق الکترون ها در شبکه است. روش های الکتروشیمیایی کارایی زیادی داشته و نسبت به روش های ترموشیمیایی سنتی دارای مزایایی هستند. روش های الکتروشیمیایی مراحل تشکیل پیوند را با استفاده از الکتریسیته، که یک نیروی محرکه جایگزین (ولتاژ) ارائه می کند، امکان پذیر می سازد که می تواند در دماها و فشارهای ملایم کار کند. علاوه بر این، سلول های الکتروشیمیایی به دلیل استفاده از غشایی که محصولات تولید شده در کاتد و آنود را جدا نگه می دارد، اغلب منجر به جداسازی طبیعی محصول می شوند [3].

می توان تأثیر مسیرهای الکتروشیمیایی در مقابل ترموشیمیایی را با استفاده از تولید آمونیاک به عنوان مطالعه موردی درک کرد. در اینجا، به طور خاص به ترمودینامیک دو مسیر جایگزین با محاسبه تبدیل واکنش به عنوان تابعی از شرایط عملیاتی مختلف نگاه شده است [3].

نمودار ۶-۸-۲- تبدیل تعادلی محاسبه شده نیتروژن به آمونیاک با استفاده از هر دو مسیر ترموشیمیایی و الکتروشیمیایی [3]



(A) فرآیند ترموشیمیایی Haber-Bosch به فشارهای بالا برای جبران دماهای بالای مورد نیاز برای دستیابی به سینتیک سریع در واکنش نیتروژن و هیدروژن برای تولید آمونیاک نیاز دارد.

(B) در یک راکتور الکتروشیمیایی که بر روی مواد اولیه نیتروژن و هیدروژن کار می‌کند، می‌توان از ولتاژهای کوچک برای دستیابی به تبدیل‌های تعادلی بالا استفاده کرد.

(C) تبدیل نیتروژن و آب به آمونیاک با استفاده از دما و فشار ناچیز است.

(D) استفاده از یک پتانسیل مناسب می‌تواند باعث تبدیل نیتروژن و آب به آمونیاک شود که نوید مسیرهای الکتروشیمیایی برای تولید آمونیاک را نشان می‌دهد [3].

ثابت تعادل و تبدیل متناظر با استفاده از ویژگی‌های ترمودینامیکی جدول‌بندی‌شده واکنش‌دهنده‌ها و محصولات محاسبه می‌شوند. خطوط بنفش نشان دهنده جریان جرم و خطوط قرمز نشان دهنده انتقال انرژی الکتریکی است. خطوط یکپارچه وضعیت فعلی صنایع را نشان می‌دهد و خطوط نقطه چین نشان می‌دهد که چگونه روش‌های پیشنهادی برق‌رسانی و کربن‌زدایی می‌تواند گنجانده شود. به طور خاص، یک دستگاه سنتز شیمیایی با هدایت الکتریکی، به مواد شیمیایی مانند آمونیاک یا متانول اجازه می‌دهد تا به عنوان حامل انرژی برای برق تجدیدپذیر یا واسطه برای تولید سایر مواد شیمیایی و محصولات عمل کنند. چنین دستگاه الکتریکی می‌تواند صنایع انرژی و شیمیایی را بیشتر به هم متصل کند و به بسته‌شدن و جایگزینی چرخه کربن فعلی کمک کند [3].

ابتدا موردی را در نظر می‌گیریم که در آن نیتروژن و هیدروژن واکنش می‌دهند و آمونیاک تشکیل می‌شود.



اجرای این واکنش به صورت ترموشیمیایی به سادگی فرآیند تجاری Haber-Bosch است. با اینکه تبدیل تعادل

می‌تواند در دماهای پایین بسیار بالاتر باشد و آمونیاک از نظر ترمودینامیکی در شرایط محیطی مطلوب است،

سینتیک نسبتاً در دماهای بالا مساعد است و فشارهای بالا در آن دماهای بالا ضروری است. در نتیجه شرایط

عملیاتی استاندارد برای فرآیند هابر - بوش حدود ۴۵۰ درجه سانتیگراد و ۲۰۰ بار است. با جایگزینی فشار با

ولتاژ در یک مسیر الکتروشیمیایی برای تبدیل به آمونیاک، ترمودینامیک بدون استفاده از فشارهای بالا انجام

می‌شود. ولتاژ همچنین ممکن است به تسریع سینتیک با یک کاتالیزور مناسب کمک کند [3].

برای دستیابی به سنتز آمونیاک کم‌کربن، مسیر الکتروشیمیایی باید از گاز هیدروژن حاصل از شکافتن آب، از طریق یک مسیر الکتروشیمیایی نیز استفاده کند. به جای اینکه ابتدا آب را برای تولید هیدروژن شکافته و سپس

این هیدروژن را با نیتروژن در مکانی جداگانه واکنش دهیم، راکتورهای سنتز آمونیاک می‌توانند بسیار کوچک‌تر باشند و در کنار منابع تجدیدپذیر برق قرار گیرند. با تولید آمونیاک نزدیک به محل مورد نیاز، هزینه‌های توزیع را می‌توان کاهش داد. حتی اگر آمونیاک نیاز به توزیع داشته‌باشد، حمل و نقل و ذخیره آمونیاک به عنوان مایع مقرون به صرفه است [3].

راکتور الکتروشیمیایی، واکنش مستقیم نیتروژن و آب در یک راکتور منفرد مطلوب است:



از نظر ترموشیمیایی، واکنش آب و نیتروژن در شرایط ملایم امکان‌پذیر نیست. با این حال، هنگامی که ولتاژی بیش از ۱.۱۷ ولت در دما و فشار محیط اعمال می‌شود، آمونیاک از نظر ترمودینامیکی در مقایسه با نیتروژن و آب مطلوب است. این مسیر می‌تواند منجر به کربن‌زدایی قابل توجهی از سنتز آمونیاک شود، زیرا از آب به عنوان منبع هیدروژن به جای گاز طبیعی استفاده می‌شود و این فرآیند توسط برق قابل تجدید هدایت می‌شود. اگرچه این مطالب در رابطه با الکتروسیته‌سازی تولید مواد شیمیایی در زمینه آمونیاک است، اصول مشابهی برای تولید سایر مواد شیمیایی اعمال می‌شود [3].

۶-۷-۱. فرصت‌ها و چالش‌ها

بحث بالا بر تبدیل‌های تعادلی متمرکز است که محدودیت‌های ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. چالش‌های زیادی با توجه به سینتیک این واکنش‌ها وجود دارد که مطمئناً در کانون تحقیقات آینده باقی خواهند ماند. بر این اساس، توسعه کاتالیزورهای جدید برای برقی کردن صنایع شیمیایی ضروری است. زمینه کاهش دی‌اکسیدکربن در سال‌های اخیر رشد کرده است و در نتیجه درک بهتری از مکانیسم‌ها و روندهای درگیر در کاهش کاتالیزوری دی‌اکسیدکربن ایجاد شده است. با این حال، همچنان فرصت‌های زیادی برای توسعه کاتالیزورهایی برای کاهش دی‌اکسیدکربن با بهبود فعالیت، گزینش‌پذیری و پایداری برای محصولات مایع مانند متانول وجود دارد. کاتالیزورها برای سنتز آمونیاک الکتروشیمیایی در دمای پایین بسیار کمتر توسعه یافته‌اند، اگرچه مطالعات نظری کاتالیزورها و آزمایش‌های جدا شده امیدوارکننده است [3].

درحالی‌که تاکنون فقط درمورد شرایط عملیاتی راکتورهای ترموشیمیایی و الکتروشیمیایی بحث شده است، جداسازی محصولات پس از واکنش بهره‌برداری از واحد همچنین می‌تواند یک مرحله پراثری باشد که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در بسیاری از موارد، واکنش‌های مجدد الکتروشیمیایی، جداسازی محصول را تسهیل می‌کند، زیرا یک غشاء نیمه‌تراوا واکنش‌های اکسیداتیو و احیاکننده را جدا می‌کند. این در حال حاضر در زمینه الکترولیز آب محقق شده است، جایی که گازهای هیدروژن و اکسیژن محصول در الکترودهای مخالف تولید

می شوند و نیازی به جداسازی بیشتر ندارند. در مورد واکنش الکتروشیمیایی نیتروژن و آب، محصولات آمونیاک و اکسیژن را می توان در محفظه های جداگانه تولید کرد و از یک مرحله جداسازی اضافی اجتناب کرد [3].

حتی با توسعه کاتالیزورهای بهتر، شکاف قابل توجهی بین تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی و فرآیندهای صنعتی وجود دارد. دوام فرآیندهای الکتروشیمیایی یک ملاحظه کلیدی است. از لحاظ تاریخی، سنتزهای شیمیایی آلی خاصی با استفاده از مسیرهای الکتروشیمیایی انجام شده است. در واقع، نمونه های متعددی از تولید آمونیاک در اواسط قرن بیستم با استفاده از هیدروژن تولید شده از الکترولیز آب وجود دارد، و این مسیر سنتز تاریخی، الهام بخش مسیرهای آتی بدون کربن برای تولید آمونیاک است، زیرا هزینه الکترولیز آب همچنان در حال کاهش است. از این مثال های قبلی و همچنین تلاش ها برای استخراج مواد شیمیایی از زیست توده، می توان چیزهای زیادی آموخت تا به توسعه استراتژی های موفقیت آمیز برای افزایش مقیاس سنتز شیمیایی مبتنی بر الکتروشیمیایی کمک کند. تولید محلی مواد شیمیایی مورد نیاز در این روش های جدید چرخشی به کاهش ناکارآمدی های مرتبط با حمل و نقل، توزیع و ذخیره سازی مواد شیمیایی کمک می کند. با استفاده از الکتروشیمی برای واکنش دی اکسید کربن، نیتروژن و آب با منابع تجدیدپذیر برق، مانند خورشیدی و باد، می توان تولید محلی مواد شیمیایی مورد نیاز را تصور کرد. بنابراین، برقی سازی صنایع شیمیایی ممکن است فرصتی برای تولید کاملاً یکپارچه، کربن زدایی شده و محلی باشد که با منابع تجدیدپذیر شروع می شود و به محصولات تجاری مطلوب ختم می شود [3].

۷. مسئله انتقال حرارت در فواصل زیاد

برای استفاده از حرارت اتلافی نیروگاه ها در فواصل دور با افت دمای کم، باید به دنبال شیوه ای برای انتقال گرما در مقیاس چندین مگاوات، با استفاده از حداقل تجهیزات و مواد بود، به طوری که مانند انتقال برق، مقرون به صرفه باشد. با این حال، تفاوت اصلی با انتقال انرژی الکتریکی این است که در حالی که رسانایی الکتریکی ۳۰ مرتبه بزرگی را در برمی گیرد (به عنوان مثال، نقره در مقابل تفلون)، رسانایی حرارتی تنها حدود ۶ مرتبه بزرگی را شامل می شود (مثلاً هوا در مقابل الماس). هیچ حد بالایی برای رسانش حرارتی وجود ندارد، و بنابراین کشف یک ابررسانای حرارتی که انتقال گرما را در فواصل دور ممکن سازد، مورد نیاز است اما مشخص نیست که آیا می توان عملاً آن را ساخت یا خیر [9].

یک رویکرد می تواند استفاده از یک سیال انتقال حرارت ترموشیمیایی و محیط ذخیره سازی، مانند واکنش تجزیه آمونیاک باشد. با این حال، با پیشرفت های شیمی محاسباتی، که امکان پیش بینی اولیه آنتالپی های واکنش را فراهم می کند، اکنون ممکن است بتوان سیال قابل پمپاژ دیگری با واکنش های شیمیایی برگشت پذیر را کشف کرد

که می‌تواند برای انتقال آنتالپی مورد استفاده قرار گیرد. چنین انتقال حرارت از راه دور همچنین می‌تواند استفاده حرارتی بسیار مؤثرتری را در کارخانه‌های بزرگ شیمیایی که به طور کلی برای به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای طراحی و ساخته شده‌اند، امکان‌پذیر کند [9].

۸. کربن‌زدایی، دیجیتال‌سازی و تمرکززدایی

در این جا به تأثیر سه محرک اصلی بر زیرساخت‌های کلیدی برق پرداخته می‌شود: کربن‌زدایی، دیجیتال‌سازی و تمرکززدایی. به گفته ناظران برجسته، این سه پدیده بر همه زمینه‌های زندگی ما تأثیر می‌گذارند. آنچه به نظر می‌رسد این است که فناوری‌های ذخیره‌سازی و به اصطلاح انقلاب دیجیتال نقش پیشرو در بخش‌های مختلف جهان برای توسعه کربن‌زدایی عمیق بخش برق و مدل‌های کسب‌وکار انرژی جدید در سطح توزیع و توسعه دارد [5].

تحلیل‌های اخیر از سوی کارشناسان متعدد، سه «D» یعنی کربن‌زدایی، تمرکززدایی و دیجیتال‌سازی را به عنوان محرک‌های اصلی تغییر در این دوره و سال‌های آینده می‌دانند. این سه پدیده در هر زمینه‌ای محل به نظر می‌رسند و چالش بزرگی را برای ذینفعان ایجاد می‌کنند. سیستم‌های قدرت الکتریکی، به‌ویژه، تحت تأثیر مدیریت، هماهنگی، ترکیب منابع و مدل‌های بازار کاملاً متفاوت به شرح زیر هستند:

الف) سیاست‌های بین‌المللی و ملی، کربن‌زدایی را از طریق تولید انرژی کم‌کربن تشویق می‌کنند و در عین حال استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) و بهبود بهره‌وری در تولید برق، حمل و نقل و مصرف را حمایت می‌کنند. ب) افزایش مشارکت مشتری و افزایش تقاضا مستلزم تمرکززدایی از عرضه انرژی است که نیازهای جدید را به ویژه در سطح توزیع ایجاد می‌کند.

ج) توسعه شهری و دیجیتال‌سازی شدن، راه‌های جدیدی را برای مبادله کالاها و خدمات توسط مدل‌های کسب‌وکار جدید بر اساس پارادایم «کسب و کار دیجیتال» توسط تراکنش‌های همتا به همتا و شفاف ایجاد می‌کند [5]. انتظار می‌رود که دو مدل اصلی توسعه سیستم‌های قدرت در سال‌های بین 2020 و 2040 به وضوح ظاهر شوند:

1. BULK: شبکه‌های بزرگ انتقال و برای ایجاد ارتباطات بیشتر بین کشورها و بازارهای مختلف انرژی هستند.

2. MICRO: خوشه‌هایی از شبکه‌های توزیع کوچک و عمدتاً مستقل که شامل تولید غیرمتمرکز، ذخیره‌سازی و مشارکت فعال مشتری هستند که به روشی هوشمندانه عمل می‌کنند [5].

بسیاری از ۱۷ هدف توسعه پایدار تعیین شده در COP21 نیاز به افزایش چشمگیر دسترسی به فناوری اطلاعات و تلاش برای ارائه دسترسی همگانی و مقرون به صرفه به اینترنت در کشورهای کمتر توسعه یافته تا سال ۲۰۲۰ را یادآوری می کنند. در واقع، موضوع اخیر به ارائه یک فناوری توانمند برای مدل های تجاری جدید و پیشرفت های فناوری مرتبط است [5].

۸-۱. دیجیتالی شدن و کاربردهای فناوری اطلاعات و ارتباطات

با دیجیتالی شدن، جهان چهارمین انقلاب صنعتی را تجربه می کند. طبق تعریف گارتنر⁴²، دیجیتالی شدن عبارت است از "استفاده از فناوری های دیجیتال برای تغییر مدل کسب و کار و ارائه فرصت های جدید درآمد و تولید ارزش". مجمع جهانی اقتصاد سه فناوری را به عنوان انقلابی ترین فناوری ها در زمینه دیجیتالی شدن معرفی می کند: ابر، اینترنت اشیا و موبایل [5].

- ابر: محاسبه داده ها از راه دور و منابع ذخیره سازی را فراهم می کند، می تواند چابکی کسب و کار را بهبود بخشد و همراه با تجزیه و تحلیل داده های بزرگ، فرصت تجزیه و تحلیل حجم زیادی از داده ها را برای ایجاد بینش در زمان واقعی ارائه می دهد.
- اینترنت اشیا: اطلاعاتی را که شرکت های برق می توانند به آن ها دسترسی داشته باشند، با ابزارهای اندازه گیری و ساده نصب شده در ساختمان ها، اتومبیل ها، شارژرهای برقی و غیره افزایش داده است.
- تلفن همراه: سناریوهای تجاری جدید را فعال می کند، در حالی که کانال های اجتماعی توانایی ارتباط سریع، مستقیم و ارزان با مشتریان را تغییر می دهند [5].

در سال ۲۰۱۵، دولت چین برنامه "ساخت چین ۲۰۲۵" را بر اساس ارتقای صنایع کشور به لطف انفورماتیک، رباتیک و مدیریت کیفیت معرفی کرد. هر بخش از تولید چین به لطف این استراتژی در حال تجربه ارتقاء تکنولوژیکی و گذار به سمت مدیریت هوشمندتر است. در سال ۲۰۱۴، چین حدود ۹۰ درصد از کل رایانه های شخصی و ۷۰ درصد از کل تلفن های همراه جهان را تولید کرد. در این زمینه، استراتژی «اینترنت پلاس» ادغام فناوری های رایانش ابری، تلفن همراه و اینترنت اشیا در صنایع را ترویج می کند [5].

۸-۲. عدم تمرکز و تولید پراکنده

⁴² Gartner

رشد بشریت به سمت مصرف بیشتر کالاها و انرژی می‌رود و فناوری‌های دیجیتالی به تولید مقادیر فزاینده‌ای از داده‌های تولیدشده از افراد و حسگرها کمک می‌کنند. تمرکززدایی نیاز به کاهش پیچیدگی مدیریت زیرساخت‌ها بدون بارگذاری بیش از حد مراکز تصمیم‌گیری در همه حوزه‌ها (زمینه‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و فنی) است [5].

در مورد سیستم‌های برق، تمرکززدایی نشان‌دهنده تمایل به تولید و مدیریت برق، نزدیک به مراکز بار با استفاده از ژنراتورهای پراکنده متصل به شبکه‌های LV و MV است. این مفهوم ارتباط نزدیکی با کربن‌زدایی و دیجیتالی شدن دارد زیرا بیشتر واحدهای تولید نیروگاه‌ها مبتنی بر RES هستند که باید برای دستیابی به امنیت و کارایی هماهنگ شوند. فشار زیادی برای تمرکززدایی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر در دو دهه اخیر با انگیزه‌های عمومی تقریباً در سراسر جهان انجام شده است. کشورهای اتحادیه اروپا چهارچوب مشترکی را برای ترویج نیروگاه‌های DG مبتنی بر RES و ایجاد راه‌حل‌های یکپارچه برای مشتریان ایجاد کرده‌اند. اگرچه چین در سال ۲۰۱۵ به بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی و تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای در جهان تبدیل شد، دولت چین سیاست‌های متعددی را برای حمایت از DG مبتنی بر RES ارائه کرده است. قانون انرژی‌های تجدیدپذیر که در سال ۲۰۰۵ صادر شد، برای اولین بار یک چهارچوب ملی برای ارتقای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در چین ایجاد کرد و منجر به تعریف یک سری از سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر شد. ایالات متحده، DG مبتنی بر RES را از طریق طرح‌های حمایتی ملی مانند اعتبار مالیاتی تولید انرژی باد به مدت ده سال و اعتبار مالیاتی سرمایه‌گذاری انرژی خورشیدی (۳۰٪) ارتقا داده است. طرح حمایتی در سطح ملی با تغییراتی از ایالت به ایالت دیگر اجرا می‌شود [5].

۸-۳. تأثیر سامانه‌های فیزیکی مجازی^{۴۳} هوشمند بر کربن‌زدایی

فناوری‌های دیجیتالی مانند کلان داده^{۴۴}، یادگیری ماشینی^{۴۵} و اینترنت اشیا، می‌توانند به فرآیند کربن‌زدایی کمک کنند در حالی که نیاز به سرمایه‌گذاری محدود دارند. هماهنگ‌سازی این فناوری‌های جدید (سامانه‌های فیزیکی مجازی)، اثرات هم‌افزایی بیشتری را ایجاد می‌کند که کارایی تأمین انرژی و تولید صنعتی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، وقتی CPS با هوش مصنوعی ترکیب می‌شود، کربن‌زدایی می‌تواند به طور بالقوه با سرعت غیرقابل پیش‌بینی پیشرفت کند و هم‌چنین خطرات غیرقابل پیش‌بینی و بالقوه مشخص شوند [2].

^{۴۳} Cyber-Physical Systems (CPS)

^{۴۴} Big Data

^{۴۵} Machine Learning

اگرچه معمولاً، فناوری‌های CPS را ابزار مهمی برای شتاب دادن به تحول سیستم انرژی می‌دانند، چنین گذارهایی تنها با درک دقیق فرآیند گذار و طراحی هدف‌محور CPS، که تاب‌آوری⁴⁶ سیستم را به خطر نیندازد، می‌تواند رخ دهد[2].

در رابطه با اقتصاد چرخشی، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، همزیستی صنعتی و اکوپارک‌های صنعتی به طرح‌های محبوب در بسیاری از کشورها تبدیل شده‌اند. برای دستیابی به یک رابطه همزیستی بهینه بین صنایع، باید همه منابع به طور همزمان در نظر گرفته شوند. علاوه بر این، تغییرپذیری منابع باید در مدل‌های واقعی‌تر به دلیل عدم قطعیت‌های ذاتی فرآیندهای مرتبط مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه، ابزار یکپارچه برای تسهیل اشتراک‌گذاری داده‌ها بین کاربران نهایی مختلف مورد نیاز است. CPS فرصت‌های قابل توجهی را برای بهبود بهره‌وری انرژی از طریق چهارچوب‌های مدیریت انرژی پیشرفته فراهم می‌کند[2].

در زمینه ذخیره‌سازی انرژی، استفاده از اختلاف قیمت‌های زمانی در بازار برق با استفاده از ظرفیت ذخیره‌سازی که اصطلاحاً به آن آربیتراژ⁴⁷ برق گفته می‌شود، یک سرویس ارزش افزوده رایج است. مزایای آربیتراژ انرژی برحسب منطقه و بازار متفاوت است و مشخص است که آگاهی از قیمت‌های لحظه‌ای انرژی تأثیر زیادی بر آن دارد و CPS در این زمینه هم نقش مهمی دارد[2].

مورد دیگری که در رابطه با ذخیره‌سازی باید به آن اشاره کرد، P2X است. عدم تطابق مکانی و زمانی بین عرضه و تقاضا در سیستم‌های انرژی و مقایسه مسیرهای مختلف P2X از نظر تأثیر انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی در مطالعات مختلف انجام شده است. یک مطالعه با آنالیز انرژی خالص⁴⁸، حاکی از آن است که تبدیل برق به گاز هیدروژن و بازیابی آن از طریق پیل سوختی، بازده سرمایه‌گذاری انرژی⁴⁹ بالاتری را در مقایسه با ذخیره باتری، به دلیل هزینه کم ذخیره انرژی توسط هیدروژن، دارد. در مورد مسیر برق به سوخت این نتیجه به دست آمده که انتقال مستقیم الکتریسیته کم‌کربن، نسبت به ذخیره‌سازی سوخت از لحاظ پتانسیل کاهش CO₂ و کاهش هزینه، برتری دارد. با توجه به این مطالعات نتیجه‌گیری می‌شود که منافع زیست‌محیطی و هزینه‌های اقتصادی پروژه‌های P2X باید به دقت براساس شرایط مختلف ارزیابی شوند. طراحی و بهینه‌سازی سیستم انرژی با استفاده از CPS هوشمند می‌تواند راه حل مناسبی باشد[2].

⁴⁶ Resilience

⁴⁷ Arbitrage

⁴⁸ Net Energy

⁴⁹ Energy Return on Investment (EROI)

همچنین استفاده از فناوری‌های CPS در نیروگاه‌های CCS می‌تواند حجم وسیعی از داده‌های عملیاتی را به اطلاعات قابل اجرا به منظور ادغام و بهبود عملیات نیروگاه و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری انرژی تبدیل کند. برای مثال، می‌توان به تشخیص عیب از طریق الگوریتم‌های پیشرفته تشخیص الگو اشاره کرد. مثل تجزیه و تحلیل داده‌های ارتعاش پره‌های توربین برای جلوگیری از آسیب به توربین، تجزیه و تحلیل داده‌های دمای موتور برج خنک‌کننده برای شناسایی انسدادهای احتمالی در درازمدت و غیره. پیش‌بینی می‌شود که فناوری‌های CPS می‌توانند برای پایش محل ذخیره‌سازی CO₂ و تشخیص نشت از طریق هواپیماهای بدون سرنشین و بینایی رایانه‌ای⁵⁰ مورد استفاده قرار گیرند. کاربردهای موفق بینایی رایانه‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین در تشخیص نشت گاز طبیعی قبلاً گزارش شده است و امکان استفاده از یادگیری عمیق برای طبقه‌بندی مقادیر نشت متان در تأسیسات نفت و گاز نیز ثابت شده است. براساس این یافته‌های اولیه، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فن‌آوری‌های CPS در رابطه با CCS می‌تواند امکان‌پذیری اقتصادی این رویکرد برای کاهش تغییرات اقلیمی را افزایش دهد[2].

۹. قفل‌شدگی کربن⁵¹

تاکنون توجه زیادی به نوآوری‌های کم‌کربن در گستره وسیعی شامل تکنولوژی (مثل انرژی‌های تجدیدپذیر و وسایل نقلیه برقی)، مدل‌های تجاری (مثل خدمات حمل‌ونقل⁵²) و رفتارها (مثل صرفه‌جویی) جلب شده است. ولی این امر نباید باعث شود از سیستم‌های شدیداً کربن‌زای کنونی که دچار قفل‌شدگی و درجاتی از تغییرناپذیری شده‌اند، غافل شد. قفل شدن کربن مربوط است به عواملی از جمله هزینه از دست رفته⁵³ سیستم‌های کنونی، آزموده شدن روش‌های مرسوم، انتظارات درباره تداوم وضعیت کنونی که خودش باعث چنین امری می‌شود، و منافع وابسته به روند توسعه سنتی. این عوامل را می‌توان در سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد:

1. محدودیت‌های فناوری و اقتصادی
2. قفل‌شدگی ناشی از عادات و تصمیم‌گیری در سطوح مختلف
3. رفتارهای فردی و ساختارهای اجتماعی

⁵⁰ Computer Vision

⁵¹ Carbon Lock-in

⁵² Mobility-as-a-service

⁵³ Sunk Costs

همه‌ی این عوامل در کنار هم باعث می‌شوند سیستم‌های شدیداً کربن‌زا⁵⁴ در جایگاه خود باقی بمانند و حذف یا تغییر آن‌ها به راحتی ممکن نباشد. ولی راه‌هایی وجود دارد تا بتوان این سیستم‌ها را آگاهانه و عامدانه کاهش داد. کاهش عامدانه⁵⁵، (به معنای حذف مدیریت‌شده قفل‌شدگی‌هایی که تولید و مصرف سوخت‌های فسیلی را دائمی می‌کنند)، ارتباط نزدیکی با نوآوری‌های کم‌کربن دارد؛ زیرا بدون اجرای آن، نوآوری‌ها نمی‌توانند جایگاه خودشان را پیدا کنند. در رابطه با کاهش عامدانه، رویکردهایی وجود دارند که راه‌های مکملی را ارائه می‌دهند و هر کدام از آن‌ها بر محرک‌های متفاوتی تمرکز می‌کند ولی اشتراکاتی هم دارند که از میان آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **Phase out**: در زبان‌شناسی به معنی ادامه ندادن و متوقف ساختن تدریجی یک عادت، تولید یا استفاده از چیزی است. قانون محدودیت میزان سرب موجود در بنزین که با اعمال تدریجی سختگیری بیشتر، منجر به حذف جهانی سرب از بنزین شد، تلاش برای کاهش تدریجی وابستگی به انرژی هسته‌ای در آلمان و سوئد و پایان جهانی استفاده از مواد مخرب لایه اوزون مثال‌هایی عملی از این مفهوم هستند. هدف این رویکرد پایان استفاده از تکنولوژی، ماده یا فرآیندهایی است که تصور می‌شود اثرات جانبی منفی زیادی دارند. این رویکرد بیشتر در ارتباط با دولت‌ها و تصمیم‌گیرندگان سیاسی است ولی تردیدهایی هم درباره‌ی نقش بازار وجود دارد. در سال ۲۰۰۹ در نشست گروه ۲۰ (G20) توافق شد که یارانه‌های ناکارآمد سوخت‌های فسیلی (که مصرف بی‌رویه را تشویق می‌کنند) در میان مدت به صورت تدریجی حذف شود. بعد از این تاریخ Phase out در رابطه با کربن‌زدایی توجه محققان بیشتری را به خود جلب کرد. (البته پتانسیل حذف یارانه سوخت‌های فسیلی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد بحث و تردید است). مثالی دیگر در رابطه با کربن‌زدایی، قانون سال ۲۰۰۹ اتحادیه اروپا با هدف حذف استفاده از لامپ‌های پرمصرف است. ساده‌ترین نمونه از این رویکرد، ممنوعیت استفاده از یک تکنولوژی یا روش خاص است. سایر گزینه‌ها هم مانند ایجاد تغییر در قوانین بازار (مثل مالیات کربن)، کاهش حمایت از تکنولوژی‌های شدیداً کربن‌زا، تعریف استانداردهایی که در طول زمان سختگیرانه‌تر می‌شوند، وجود دارد. البته باید توجه داشت که ممکن است مناطق و صنایعی که از حذف سیستم‌های کربن‌زا متضرر می‌شوند، باعث ایجاد مقاومت سیاسی در برابر تغییرات شوند؛ که این امر اهمیت ایجاد حمایت عمومی از اهداف موردنظر را نمایان می‌کند [12].

- **Divestment**: ریشه اصلی این عبارت در رشته حقوق است؛ در رابطه با کربن‌زدایی، به معنای یک جنبش اجتماعی، استراتژی و گفتمان است که به دنبال از بین بردن جایگاه سوخت‌های فسیلی در سیستم‌های

⁵⁴ Carbon Intensive

⁵⁵ Deliberate decline

اقتصادی، سیاسی و انرژی است. اهداف اولیه این رویکرد، متمرکز بر برخی فرآیندهای مخرب محیط زیست بود، ولی به مرور زمان توسعه یافت و شامل کل مدل تجاری سوخت‌های فسیلی شد به طوری که شرکت‌های سوخت فسیلی اولین مسئول تغییرات اقلیمی تلقی می‌شوند و این رویکرد خواستار کاهش و تنزل در کل این صنعت است. باید توجه داشت که شکست سیاست‌های آب و هوایی، منجر به رشد و محبوبیت این رویکرد در میان بخش‌های مختلف جامعه می‌شود. همچنین در این جا، در کنار اهمیت نقش سیاستمداران، تنوع بیشتری از بازیگران نقش دارند (از طریق فعالیت‌های سیاسی و تصمیم‌گیری درباره سرمایه‌گذاری) [12].

در این روش علاوه بر پیگیری حذف منابع مالی صنعت سوخت فسیلی، استراتژی‌هایی با هدف هدایت کردن منابع مالی به سمت منابع انرژی جایگزین وجود دارد. بنابراین منابع مالی تکنولوژی‌های مشکل‌ساز مثل نیروگاه زغال‌سنگ به سوخت‌های فسیلی دیگر، داده نمی‌شود. به عنوان مثال بعضی از مؤسسات اقتصادی، سهام سرمایه‌گذاری با مسئولیت اجتماعی ارائه می‌کنند که به بنگاه‌ها کمک می‌کند نوآوری‌های کم‌کربن را توسعه دهند. با استفاده از این روش، دولت می‌تواند تحت فشار قرار گیرد تا سرمایه را از پروژه‌های سوخت فسیلی خارج کند و به این صنعت یارانه ندهد و زیرساخت‌های جدید برای آن فراهم نکند [12].

طرفداران Divestment با تمرکز بر صنایع بالادستی سوخت فسیلی، از نقش عوامل دیگر در کاهش انتشار کربن غافل می‌شوند. ولی مزیتی که این رویکرد دارد این است که زمینه‌ای را فراهم می‌کند تا فعالان محیط زیست، قدرت بیشتری برای اصلاح روندهای معیوب و مخرب موجود در مدل‌های تجاری سوخت فسیلی داشته باشند. همچنین Divestment می‌تواند یک عامل حمایتی برای اجرای سیاست‌های Phase out باشد [12].

- **Destabilization**: این عبارت در مفاهیم متنوعی به کار برده می‌شود ولی بیشتر به معنی فرآیندی است که باعث برهم خوردن پایداری یک منطقه یا سیستم (به طور خاص دولت) شود. در رابطه با کربن‌زدایی، این رویکرد چشم‌انداز وسیع‌تری را نسبت به دومفهوم قبلی، شامل می‌شود. ایجاد ناپایداری، نقش مهمی در مطالعه گذارهای پایدار⁵⁶ دارد. برای وقوع گذار، باید عدم پایداری در سیستم‌های کربن‌زا رخ دهد. در گذار انرژی، ناپایداری ارتباط دوطرفه‌ای با نوآوری‌های کم‌کربن دارد، به این صورت که این نوآوری‌ها باعث عدم پایداری سیستم‌های سنتی می‌شوند و همچنین عدم پایداری این سیستم‌ها، باعث می‌شود تکنولوژی‌های نوآورانه جایگاه خود را در سیستم انرژی پیدا کنند و گسترش یابند. ولی باید توجه داشت که ناپایداری معلول عوامل دیگری هم می‌باشد و تنها به نوآوری وابسته نیست [12].

⁵⁶ Sustainable Transitions

سیاست نقش مهمی در این رویکرد دارد. انواع سیاست‌ها برای رخ دادن ناپایداری را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

1. سیاست‌های کنترلی (مثل ممنوعیت یا مالیات)
2. تغییرات قابل توجه در قوانین موجود
3. کاهش حمایت از تکنولوژی‌های موجود
4. تغییر در شبکه‌بازیگران برای حذف منافع وابسته به روندهای سابق

بنابراین ناپایداری نه تنها بخش مهمی در گذار به سوی سیستم‌های کم کربن است، بلکه روشی برای تسریع آن هم می‌باشد و به شیوه عمیق‌تر و وسیع‌تری نسبت به دو مدل قبل، به این امر می‌پردازد. ولی با چالش عدم محبوبیت در میان تصمیم‌گیرندگان روبرو است؛ زیرا منافع سیاسی آن‌ها در اجتناب از عدم پایداری و پیچیدگی است [12].

در حال حاضر عدم تعادل قابل توجهی در به کار بردن این رویکردها مشاهده می‌شود. Phase out در میان عموم مردم و سیاست‌مداران محبوبیت بیشتری به عنوان یک روش مؤثر در کاهش عائدات سیستم‌های کربن‌زا دارد؛ که این امر باعث تأکید بیش از حد بر نقش سیاست در کربن‌زدایی می‌شود [12].

۱۰. روش‌های سیاسی

از میان ابزار سیاسی موجود برای کربن‌زدایی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استانداردهای ساختمان
- الزامات انرژی‌های تجدیدپذیر⁵⁷: در این روش، تولیدکنندگان برق ملزم می‌شوند، حداقل به میزان سهمیه مشخص شده، از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کنند [13].
- گواهی سبز قابل تجارت⁵⁸: در این روش تولیدکننده‌های برق تجدیدپذیر، متناسب با میزان تولیدشان، گواهی دریافت می‌کنند و طبق آن یارانه می‌گیرند، سپس این گواهی‌ها به خرده‌فروشان برق فروخته می‌شود که موظف هستند متناسب با کل فروششان، مقداری از این گواهی‌ها را بخرند. و مصرف‌کنندگان طبق هزینه‌ی این گواهی‌ها که توسط خرده‌فروشان برق، به قبضشان افزوده می‌شود، مالیات می‌دهند و بخشی از بار این مالیات بر دوش تولیدکنندگان سنتی برق قرار می‌گیرد. این سیاست می‌تواند باعث عدم پایداری قیمت شود [14].

⁵⁷ Renewable Energy Obligations

⁵⁸ Tradable Green Certificates

- مالیات‌های انرژی و معافیت‌های مالیاتی
- سیستم‌های کنترل و تجارت (سیستم‌های تجارت انتشار گازهای گلخانه‌ای)⁵⁹: در این روش، بنگاه‌ها می‌توانند متناسب با تعداد مجوزهایی که دارند، انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشند؛ ولی دولت از طریق محدود کردن تعداد مجوزهای قابل مبادله‌ای که به مجموعه‌ای از بنگاه‌ها می‌دهد، سقفی را برای انتشار تعیین می‌کند [15].
- تعرفه‌های تشویقی⁶⁰: این ابزار، دسترسی به شبکه، قراردادهای طولانی‌مدت و قیمت خرید متناسب با هزینه‌های تولید برق تجدیدپذیر را ضمانت می‌کند تا انگیزه اقتصادی لازم برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر ایجاد شود [13].
- اختصاص بودجه به توسعه و تحقیقات [16]

هر کدام از روش‌های سیاسی، بر منابع انرژی تجدیدپذیر متفاوتی، تأثیر بیشتری دارند. سیاست‌های گسترده و فراگیر مثل گواهی‌های انرژی قابل مبادله، برای تکنولوژی‌هایی که توانایی بیشتری برای رقابت با سوخت‌های فسیلی دارند، مناسب است. برای تکنولوژی‌هایی با هزینه‌ی بیشتر، یارانه‌های هدفمندتر مثل تعرفه‌های تشویقی نیاز است [6].

همچنین باید به این موضوع توجه کرد که کربن‌زدایی فرآیندی است که باید در طول زمان و دهه‌های مختلف انجام شود، مشخص کردن مسیر طولانی‌مدت آن طبق شرایط سال اول (سناریوهای ایستا)، باعث می‌شود عدم قطعیت‌ها و تغییرات شرایط در آینده، در نظر گرفته نشوند و ممکن است دستیابی به اهداف موردنظر، سخت یا ناممکن شود. بنابراین باید در جستجوی روش‌ها و استراتژی‌های پویایی بود که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بزرگ، امکان تغییر مسیر کربن‌زدایی را در آینده با حداقل هزینه‌های ممکن فراهم کنند (برنامه‌ریزی انطباق پذیر). این استراتژی‌ها باید علاوه بر سیاست‌های تطابق‌پذیر، سازوکارهای ایجاد انگیزه‌های طولانی‌مدت هم داشته باشند، زیرا در غیر این صورت ممکن است بازیگران به دلیل انتظار تغییر شرایط، دچار حالت صبر کردن و در انتظار حوادث بودن، شوند که این امر تأثیر منفی بر سرمایه‌گذاری در حوزه تکنولوژی‌های کم‌کربن خواهد داشت. اعمال سیاست‌هایی مانند مالیات کربن افزایشی، این نتیجه منفی را از بین می‌برد زیرا باعث می‌شود سرمایه‌گذاران و مصرف‌کنندگان، انتظارات پایداری نسبت به شرایط آینده داشته باشند. همچنین در کنار استراتژی‌های انطباق‌پذیر، باید سیستم پایش مناسبی هم وجود داشته باشد، مانند برنامه گذار انرژی آلمان [6].

⁵⁹ Cap and Trade Systems

⁶⁰ Feed-in Tariff

۱۱. تحلیل مدل‌های سیستم انرژی با کاربرد جهانی

مدل‌های سیستم انرژی به یافتن فناوری‌های بهینه کربن‌زدایی در جهان کمک می‌کند. این مطالعه یک رویکرد جدید از کهن‌الگوهای سیستم انرژی را پیشنهاد می‌کند. این کهن‌الگوها کشورهای مشابه در سراسر جهان را مستقل از موقعیت جغرافیایی آن‌ها طبقه‌بندی می‌کنند. مزایای این ایده، راه‌اندازی یک پایگاه داده جهانی قابل انتقال است که امکان بازسازی داده‌ها را بین کشورهایی که چالش‌های مشابه دارند، می‌دهد. برای دستیابی به این مدل، چهارچوبی ایجاد می‌شود که در آن کهن‌الگوها تعریف می‌شوند، قوانین مدل‌سازی استاندارد توسعه می‌یابند، و نتایج ارزیابی می‌شوند. برای طبقه‌بندی‌های جغرافیایی ساده، رویکرد خوشه‌بندی ارائه شده، که منجر به ۱۵ کهن‌الگو می‌شود. نتایج مدل این کهن‌الگوها نیاز به فناوری‌های متعادل‌کننده برای چرخه روزانه تولید فتوولتائیک و اهمیت کلی انعطاف‌پذیری در سیستم‌های انرژی کربن‌زدایی شده آینده را بیان می‌کند. به طور کلی، نتایج تأیید می‌کنند که کهن‌الگوها رویکردی مناسب برای استخراج مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها برای کربن‌زدایی از کشورهای سراسر جهان هستند [17].

به طور کلی، مدل‌های مختلف سیستم انرژی با کاربردهای مختلف وجود دارد. برخی از مقالات مروری طیف وسیعی از مدل‌های سیستم انرژی را پوشش می‌دهند، در حالی که برخی دیگر بر مدل خاصی به عنوان مدل‌های مبتنی بر عامل یا مدل‌های آماری تمرکز می‌کنند. مدل‌های بهینه‌سازی برای حمایت از فرآیندهای تصمیم‌گیری سیاسی برای کربن‌زدایی مناسب هستند. بنابراین، این مدل برای برنامه‌ما انتخاب شده است. چند مطالعه بر روی این مدل و ویژگی‌های آن با جزئیات بیشتر تمرکز می‌کند و توضیح می‌دهد که چرا این مدل برای استراتژی‌های کربن‌زدایی ملی مناسب است [17].

از آنجایی که هدف، تجزیه و تحلیل انتقال کربن‌زدایی در بسیاری از کشورهای سازمان ملل متحد است، مدل و داده‌های ورودی، باید در سطح جهانی قابل اجرا باشند. مدل فرض می‌کند که کشورهای منطقه جغرافیایی یکسان، سیستم‌های انرژی مشابهی دارند که لزوماً اینطور نیست. به منظور تفکیک ایده تجزیه و تحلیل کشورها در یک زمینه جهانی از قاره، شبه قاره یا منطقه‌ای که در آن واقع شده‌اند، ایده انواع سیستم‌های انرژی مطرح شد. بدین ترتیب می‌توان ویژگی‌های هر کشور و شباهت‌های بین کشورها را تحلیل کرد، مانند تفاوت کشوری مانند نروژ که تحت سلطه تولید برق آبی است و عربستان سعودی که سیستم انرژی آن تحت سلطه نفت و گاز است. در این مفهوم کهن‌الگو به شرح زیر توصیف شده است: «تحلیل کهن‌الگو: الگوهای تکرارشونده پدیده مورد نظر را در سطحی بررسی می‌کند تا مدل‌های متعددی که پدیده را در شرایط خاص توضیح می‌دهند شناسایی کند» [17].

کهن‌الگوها و نتایج آن‌ها در یک مدل سیستم انرژی دارای چندین مزیت است:

- برای مدل سازان: در صورت کمبود داده می‌توان داده‌ها را بین کشورهای مشابه منتقل کرد. این امکان ایجاد یک پایگاه داده قابل انتقال را فراهم می‌کند.
- برای سیاست‌گذاران: شباهت کشورهای مختلف را می‌توان در سیستم فعلی و همچنین هنگام مقایسه مسیرهای کربن‌زدایی در آینده تجزیه و تحلیل کرد. در نتیجه، سیاست‌ها را می‌توان بر اساس این مقایسه طراحی کرد، به عنوان مثال: ترویج بیشتر منابع انرژی تجدید پذیر.
- برای ارائه‌دهندگان فناوری: فناوری‌های خاص را می‌توان با تحلیل ساده بر اساس همان مجموعه داده‌های جهانی تخمین زد. مناسب‌ترین کشورها را می‌توان بعداً با جزئیات بیشتری ارزیابی کرد [17].

۱-۱۱. تعریف کهن‌الگو

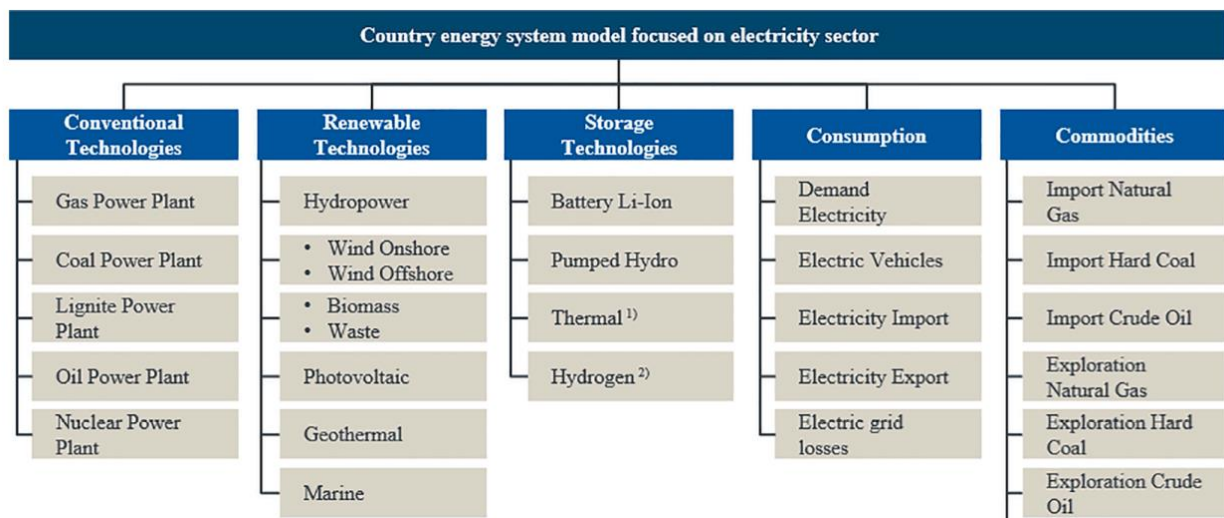
برای توصیف روش شناختی کهن‌الگوها، سه تعریف مورد نیاز است:

1- مجموعه‌ای از ویژگی‌ها

2- یک مدل ریاضی

3- یک تعریف از حوزه‌ای که در آن کهن‌الگوها معتبر هستند.

شکل ۱-۱۱- تنظیم اجمالی مدل سیستم انرژی [17]



۱-۲. مدل ریاضی - الگوریتم خوشه بندی

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای به عنوان یک روش مناسب برای طبقه‌بندی داده‌ها در کهن‌الگوها ذکر شده است. روش‌های خوشه‌بندی به طور کلی برای فشرده‌سازی داده‌ها از یک مجموعه داده کلان به عبارات ساده شده استفاده می‌شود. بنابراین، یک روش خوشه‌بندی برای تولید کهن‌الگوهای سیستم انرژی انتخاب شده است.

برای تعیین یک روش خوشه‌بندی مناسب، معیارهای زیر باید رعایت شود:

- ✓ روش باید مجموعه داده‌های کلان را مدیریت کند.
- ✓ هر کشور را مستقیماً به یک خوشه اختصاص دهد.
- ✓ همه دسته‌بندی داده‌ها را از پایین به بالا و به طور همزمان در نظر بگیرد.

الگوریتم K-means انتخاب شده است، زیرا با معیارهای تعریف شده مطابقت دارد. این الگوریتم نیز قبلاً در کاربردهای مشابه ثابت کرده است که برای طبقه‌بندی کشورها با خوشه‌بندی مختلف مناسب است و همچنین به عنوان الگوریتمی مناسب برای تولید کهن‌الگوها ذکر شده است [17].

یکی دیگر از معیارهای تعیین‌کننده در استفاده از K-means، تعداد خوشه‌های K است. تجزیه و تحلیل خوشه و تولید کهن‌الگو، بیان می‌کند که هیچ رویکرد کلی برای تعیین تعداد خوشه‌ها وجود ندارد. در این جا، تعریف K در سه مرحله انجام می‌شود:

1. مرحله اول، روش پرکاربرد اعمال می‌شود که فاصله را روی تعداد خوشه‌ها نشان می‌دهد، در این روش از محدود کردن K به یک بازه استفاده می‌شود.
2. با این حال، تعداد خوشه‌ها به کاربرد خوشه‌ها نیز بستگی دارد. برای کاربرد، مطالعات دیگری تجزیه و تحلیل می‌شود. تعداد خوشه‌ها و در نتیجه تعداد کهن‌الگوها به هدف آن‌ها بستگی دارد. چالش کلی در هنگام تعیین تعداد بهینه خوشه‌های K است.
3. مرحله سوم تعریف حوزه اعتبار است. کهن‌الگوهای ما برای داده‌هایی که سیستم انرژی، آن‌ها را مشخص می‌کند معتبر هستند [17].

برای اثبات این فرضیه، طبقه‌بندی جغرافیایی در مطالعات مختلف ارزیابی می‌شود و سپس با نتایج خوشه‌بندی مقایسه می‌شود. برای این مقایسه، مقدار متوسط هر دسته داده‌های خوشه‌ای برای هر منطقه جغرافیایی مشخص شده و فاصله اقلیدسی هر کشور در منطقه جغرافیایی تا مقدار متوسط تعیین می‌شود. با مقایسه فواصل خوشه‌ها با طبقه‌بندی جغرافیایی، می‌توان صحت رویکرد خوشه‌بندی را تأیید کرد. از آنجایی که کهن‌الگوها بر اساس داده‌های تاریخی تولید می‌شوند، انتظار نمی‌رود که پیش‌بینی انتقال کربن‌زدایی برای آینده در دامنه اعتبار کامل کهن‌الگوها که توسط الگوریتم خوشه‌بندی تعیین می‌شود، باشد. به همین دلیل، همه کشورهای دارای کهن‌الگوی

یکسان ممکن است در آینده از فناوری‌های یکسانی حمایت نکنند. با این وجود، همبستگی را می‌توان با مقایسه نتایج مدل کهن‌الگوهای منتخب و کشورهای آن تحلیل کرد [17].

۱۱-۳. تنظیم خودکار مدل

فرآیند توسعه یک راه‌اندازی مدل خودکار را می‌توان به سه زیردسته تقسیم کرد:

(1) مفروضات فنی و اقتصادی

(2) مفروضات مدل‌سازی دقیق

(3) تعریف سری‌های زمانی

به طور کلی، مدل‌های کهن‌الگو با استفاده از نتایج خوشه‌بندی تولید می‌شوند. از آنجایی که بسیاری از دسته‌های داده را نمی‌توان در مقادیر مطلق مقایسه کرد و برای خوشه‌بندی نرمال‌سازی می‌شوند، یک فرآیند مقیاس‌بندی ضروری است. مقیاس‌بندی با استفاده از میانگین جمعیت همه کشورهای در یک کهن‌الگو انجام می‌شود. یکی از مزیت‌های بزرگ روش ارائه‌شده این است که همه دسته‌های دیگر را می‌توان از این مقدار استخراج کرد. این رابطه راه‌اندازی مدل‌ها را آسان و سریع می‌کند، حتی برای کشورهایی که داده‌های زیادی ارائه نمی‌دهند. برای سری زمانی، کشورهای پیشرو انتخاب می‌شوند. این کشورها شبیه‌ترین کشورها به کهن‌الگو هستند که با نزدیک‌ترین فاصله به مراکز خوشه نشان داده می‌شود [17].

۱۱-۳-۱. مفروضات فنی و اقتصادی

به عنوان اولین قدم، ما بر مدل‌سازی بخش برق تمرکز می‌کنیم که برای کربن‌زدایی به دلیل افزایش برق در سایر بخش‌ها تعیین‌کننده است. بنابراین، تمام فناوری‌های ذخیره‌سازی، به ویژه ذخیره‌سازی حرارتی و هیدروژن، دوباره به برق تبدیل می‌شوند. برای تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی، هزینه‌های عملیاتی برای فناوری‌های مختلف از شاخص مرجع فناوری انرژی⁶¹ گرفته شده است؛ زیرا شامل طیف گسترده‌ای از پارامترها برای بسیاری از فناوری‌های مدل‌شده در یک منبع است که برای تنظیم مدل ضروری است. اگر بیش از یک نوع نیروگاه در یک دسته باشد، میانگین آن‌ها در نظر گرفته می‌شود [17].

برای ساده‌سازی مدل و حفظ ویژگی‌های کهن‌الگوها، واردات، اکتشاف و صادرات کالاها در مدل ثابت نگه‌داشته می‌شوند. در این رویکرد، تنها یک کهن‌الگو به طور همزمان مدل‌شده است. هنگام مدل‌سازی دو کهن‌الگو به صورت موازی و به هم پیوستن این مدل‌ها، می‌توان تجارت کالاها را بیشتر ارزیابی کرد. تلفات شبکه برق بر

⁶¹ ETRI

اساس درصد فعلی تولید انرژی است و در طول بازه زمانی مدل سازی ثابت می ماند زیرا هیچ اطلاعاتی از به روزرسانی شبکه برای هر کشور در دسترس نیست. کاهش تلفات شبکه بیشتر بر کشورهای با تولید ناخالص داخلی پایین تأثیر می گذارد و تقاضای انرژی آن ها را حدود ۵ تا ۱۰ درصد کاهش می دهد [17].

قیمت سوخت: برای تسهیل تفسیر نتایج، قیمت سوخت در زمان ثابت فرض می شود [17].

۱۱-۳-۲. مفروضات مدل سازی دقیق

توسعه یک رویکرد استاندارد مستلزم ایجاد قوانینی است که ویژگی های خاصی را در یک کهن الگو لحاظ می کند و آن ها را به یک پارامتر مدل سازی کلی گسترش می دهد [17].

۱۱-۳-۲-الف. انرژی کاربردی

انرژی کاربردی را می توان در مفروضات مدل تقسیم کرد، که برای تعیین مسیرهای انتقال برای کربن زدایی ضروری هستند. هر یک از فرضیات و ساده سازی های مدل قابل بحث است. مجموعه ای از ساده سازی های ارائه شده در اینجا نتیجه یک تلاش مدل سازی فشرده و تکراری در بسیاری از سیستم های انرژی در سراسر جهان است [17].

۱۱-۳-۲-ب. تعریف سناریوی آینده

رشد تقاضای برق: در این رویکرد مدل سازی، رشد اقتصادی و جمعیت، تقاضای انرژی آینده یک کشور را تعیین می کند. تولید ناخالص داخلی برای سال هدف با نرخ رشد در سال محاسبه می شود که یک نتیجه خوشه بندی است. با استفاده از همبستگی بین GDP و شدت انرژی، که بر اساس داده های تاریخی آژانس بین المللی انرژی⁶² و سازمان ملل متحد⁶³ در تجزیه و تحلیل آورده شده است، می توان شدت انرژی سرانه را برای سال ۲۰۵۰ تعیین کرد. هنگام تعیین مقادیر مطلق، از جمعیت پیش بینی شده برای تعیین کل مصرف برق کشور استفاده می شود. با استفاده از این فرمول، آرکتایپ ها در تولید ناخالص داخلی پیش بینی شده خود متفاوت هستند، اما عوامل a، b و c ثابت هستند [17].

$$E_{cap}^{2050} = a \cdot \left(e^{b \cdot GDP_{cap}^{2050}} - e^{c \cdot GDP_{cap}^{2050}} \right) \quad (1)$$

$$a = 7.721 \cdot 10^4 [kWh], b = -1.95 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\frac{EUR}{cap}} \right], c = -5.655 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\frac{EUR}{cap}} \right]$$

⁶² IEA

⁶³ UN

برای تأیید این رویکرد، برای مورد اروپایی، تقاضای برق سالانه، از آنچه که در برنامه توسعه شبکه ۱۰ ساله⁶⁴ و مطالعاتی که روی کربن‌زدایی کشورهای منفرد مانند کربن‌زدایی در آلمان تمرکز دارند، بیشتر است. در نتیجه تقاضای برق در سناریوی توسعه‌یافته نشان‌دهنده توسعه اقتصادی قوی و افزایش شدید تقاضای برق از طریق برق‌رسانی به بخش‌های دیگر است. در مطالعات برای آلمان، به عنوان مثال برق‌رسانی به بخش گرمایش، تقاضا تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. برای تعیین یک مسیر توسعه منطقه‌ای و اجتناب از نصب منابعی که از لحاظ فنی امکان‌پذیر نیست، گسترش برخی از فناوری‌ها محدود شده است. برای هر فناوری، یک نمای کلی در زیر ارائه شده است [17].

هسته‌ای: با توجه به برنامه‌های خلع سلاح بسیاری از کشورهای جهان و تأخیر تجربه شده در ساخت ظرفیت جدید، فرض می‌شود که هیچ فناوری هسته‌ای در آینده نصب نشود.

باد ساحلی: از آنجا که نصب منابع باد بستگی به دسترسی زمین و منابع دارد، لازم است نرخ رشد مجاز در هر سال تعیین شود. با تجزیه و تحلیل الگوی اصلی با بالاترین نفوذ باد، امکان تعریف یک حد توسعه سالانه نرمال شده برای این تکنولوژی‌ها وجود دارد.

برای باد ساحلی، ظرفیت نصب‌شده در هر کیلومتر مربع برای سال ۲۰۱۵ تعیین می‌شود. برای سال ۲۰۵۰ ظرفیت‌های تخمینی مورد بررسی قرار می‌گیرند و حداکثر مقدار، انتخاب می‌شود. با بیان ظرفیت نصب‌شده در این دو سال در هر واحد، دو نقطه در زمان وجود دارد. حداکثر انبساط سالانه توسط میان‌یابی بین این دو مقدار تعیین می‌شود [17].

جدول ۱۱-۳-۱- ضریب تصحیح برای گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر مجاز [17]

Share of renewables × in %	Correction Factor
$x < 10$	4
$10 < x < 30$	3
$30 < x < 50$	2
$x > 50$	1

نیروگاه آبی: تحلیل توسعه برق آبی در طول سال‌ها و با توجه به اینکه یک تکنولوژی تثبیت شده است، نیروگاه‌های جدید تنها می‌توانند در جایی نصب شوند که برق آبی در حال حاضر وجود دارد. زمانی که ظرفیت نصب‌شده بالاتر از ۵۰۰ مگاوات است، توسعه مجاز در هر سال ۶.۵ درصد از ظرفیت نصب‌شده در سال ۲۰۱۵ است. برای کشورهای

⁶⁴ TYNDP

که کمتر از ۵۰۰ مگاوات برق نصب کرده اند، حداکثر توسعه مجاز ۱۰ مگاوات در سال است. هر دو محدوده با تحلیل رشد کارخانه های برق آبی در سال های اخیر به دست می آیند [17].

زیست توده: از آنجایی که زیست توده توسط عوامل مشابه با باد یا PV محدود نمی شود، میزان حداکثر آن با سهم فعلی آن در ترکیب انرژی تعیین می شود.

زمین گرمایی، زباله و دریایی: برای این فناوری ها، ۱۰ درصد از ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۱۵ هر سال قابل نصب است. این سهم بر اساس نرخ های گسترش تاریخی به دست می آید و سپس با استفاده فعلی از هر فناوری مقیاس بندی می شود.

تجدیدپذیر: با توجه به نقش قابل توجهی که سهم فعلی انرژی های تجدیدپذیر در نرخ گسترش دارد، از ضریب تصحیح استفاده می شود. این فاکتور برای همه فناوری ها به جز برق آبی اعمال می شود و به کشورهایی که سهم کمتری از انرژی های تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۵ دارند، اجازه نصب ظرفیت بیشتری در سال را می دهد. بدین ترتیب مدل قادر است ظرفیت های نصب شده لازم در سال را برای رسیدن به هدف کربن زدایی ۸۰ درصد محاسبه کند. در جدول ۱۱-۲-۳ عوامل تصحیح بسته به سهم انرژی های تجدیدپذیر تعریف شده است. ضرایب تصحیح مربوطه آن ها با تجزیه و تحلیل رابطه بین سهم فعلی و بسط مجاز در چندین تکرار مدل به دست می آیند [17].

۱۱-۳-۳ تعریف سری های زمانی

با توجه به حساسیتی که مدل های انرژی به سری های زمانی دارند، لازم است که اطلاعات مربوط به دسترس پذیری منابع تجدید پذیر و نوسانات تقاضای انرژی به دست آید. از آنجا که مدل کاربردی یک توزیع ساعتی را محاسبه می کند، تقاضا و تولید باید در هر ساعت در نظر گرفته شود. برای این مقاله اطلاعات سری زمانی برای تقاضا برای هر کشوری به صورت جداگانه به دست آمده است [17].

۱۲. نتیجه گیری

همان طور که مشاهده شد، نوآوری های مختلفی برای کربن زدایی و دستیابی به اهداف توافق پاریس مطرح شده اند، ولی ثمربخش بودن آن ها به رفتار مصرف کنندگان هم بستگی دارد، تا زمانی که آن ها نخواهند از وسایلی با رانندمان بالاتر استفاده کنند، یا در مصرف انرژی صرفه جویی کنند، شدت کربن انرژی به میزان لازم کاهش نخواهد یافت. بنابراین شناخت رفتار مصرف کننده، و اعمال سیاست هایی که مصرف کنندگان را به سمت مسیر کربن زدایی هدایت کند، نقش مهمی خواهد داشت.

- [1] N. Muradov, "Pathways to Decarbonization of Energy BT - Liberating Energy from Carbon: Introduction to Decarbonization," *Liberating Energy from Carbon: Introduction to Decarbonization*, 2014, doi: 10.1007/978-1-4939-0545-4.
- [2] O. Inderwildi, C. Zhang, X. Wang, and M. Kraft, "The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy," *Energy and Environmental Science*, vol. 13, no. 3, pp. 744–771, 2020, doi: 10.1039/c9ee01919g.
- [3] Z. J. Schiffer and K. Manthiram, "Electrification and Decarbonization of the Chemical Industry," *Joule*, vol. 1, no. 1, pp. 10–14, 2017, doi: 10.1016/j.joule.2017.07.008.
- [4] M. H. Stephenson, P. Ringrose, S. Geiger, M. Bridden, and D. Schofield, "Geoscience and decarbonization: Current status and future directions," *Petroleum Geoscience*, vol. 25, no. 4, pp. 501–508, 2019, doi: 10.1144/petgeo2019-084.
- [5] M. L. di Silvestre, S. Favuzza, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, no. February, pp. 483–498, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.068.
- [6] S. Mathy, P. Criqui, K. Knoop, M. Fischedick, and S. Samadi, "Uncertainty management and the dynamic adjustment of deep decarbonization pathways," *Climate Policy*, vol. 16, no. June, pp. S47–S62, 2016, doi: 10.1080/14693062.2016.1179618.
- [7] ourworldindata.org/grapher/kaya-identity-co2?time=earliest..2019
- [8] G. Luderer *et al.*, "Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies," *Nature Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-13067-8.
- [9] A. Henry, R. Prasher, and A. Majumdar, "Five thermal energy grand challenges for decarbonization," *Nature Energy*, vol. 5, no. 9, pp. 635–637, 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0675-9.
- [10] tcmda.com/about-tcm
- [11] netpower.com/technology
- [12] D. Rosenbloom and A. Rinscheid, "Deliberate decline: An emerging frontier for the study and practice of decarbonization," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 11, no. 6, pp. 1–20, 2020, doi: 10.1002/wcc.669.
- [13] T. G. Hlalele, R. M. Naidoo, J. Zhang, and R. C. Bansal, "Dynamic Economic Dispatch with Maximal Renewable Penetration under Renewable Obligation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 38794–38808, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975674.

- [14] M. Hustveit, J. S. Frogner, and S. E. Fleten, "Tradable green certificates for renewable support: The role of expectations and uncertainty," *Energy*, vol. 141, pp. 1717–1727, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.11.013.
- [15] R. N. Stavins, *A meaningful U.S. cap-and-trade system to address climate change*, vol. 32, no. 2. 2008. doi: 10.2139/ssrn.1281518.
- [16] C. Peñasco, L. D. Anadón, and E. Verdolini, "Systematic review of the outcomes and trade-offs of ten types of decarbonization policy instruments," *Nature Climate Change*, vol. 11, no. 3, pp. 257–265, 2021, doi: 10.1038/s41558-020-00971-x.
- [17] M. Kueppers *et al.*, "Decarbonization pathways of worldwide energy systems – Definition and modeling of archetypes," *Applied Energy*, vol. 285, no. December 2020, p. 116438, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116438.