



## Sürdürülebilir yeşil bir kalkınma için salınan karbonun yakalanması, depolanması ve kullanımına yönelik bir araştırma

### A research on capture, storage and utilization of released carbon for a sustainable green development

Sena Kumcu<sup>1,\*</sup> , Bahar Özyörük<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara Türkiye

#### Öz

Günümüzde küresel ısınma çok ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bunda başta fosil yakıtlı enerji santralleri olmak üzere, demir-çelik sanayisi, ağır sanayi gibi pek çok sektörün payı büyüktür. Dolayısıyla, küresel ısınma probleminin asıl unsurları olan bu sektörlerin temiz enerji üretimine geçişi çok önemlidir. Bu sebeple, karbonsuzlaşma sürecinin başarıyla tamamlanabilmesi ve sürdürülebilir, rekabetçi bir kalkınmanın sağlanabilmesi için çeşitli teknolojiler ve yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojiler arasında yer alan karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisi (CCUS- carbon capture, utilization and storage technology) karbon emisyonunu azaltma konusunda yakın ve orta vadede kesin ve hızlı bir şekilde karbonsuzlaşmayı sağlayacak bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada ise ülkemizin Avrupa 2050 net sıfır emisyon hedefine ulaşmasını sağlamak için bu teknoloji ele alınmıştır. Bu doğrultuda optimum CCUS tedarik zinciri ağı tasarımı üzerine detaylı bir literatür araştırması yapılmış ve literatürde yer alan boşluklar tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ülkemizde bir CCUS tedarik zinciri ağının bütünlük bir şekilde ele alınabilmesi için öneriler sunulmuştur. Bu çalışmanın gelecekte yapılan çalışmalar için araştırmacılara ışık tutacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), Karbon emisyonu azaltma, Karbonsuzlaşma teknolojileri

#### 1 Giriş

Günümüzde karbon emisyonunun çevreye verdiği zararlar çok ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu sebeple büyük oranda karbon emisyonuna sebep olan enerji, ağır sanayi ve ulaştırma sektörleri gibi sektörlerin temiz enerji üretimine geçişleri çok önemlidir. Bu sektörlerin karbonsuzlaşma süreçlerinin başarıyla tamamlanabilmesi ve sürdürülebilir, rekabetçi bir kalkınmanın sağlanabilmesi için çeşitli teknolojilerin ve yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojiler arasında günümüzde trend olarak; nükleer enerji, değişken yenilenebilir enerji (VRE-variable

#### Abstract

Today, global warming has reached very serious dimensions. Many sectors such as fossil fuel power plants, iron and steel industry and heavy industry have a great share in this. Therefore, the transition of these sectors, which are the main elements of the global warming problem, to clean energy production is very important. For this reason, various technologies and approaches need to be developed in order to successfully complete the decarbonization process and ensure sustainable, competitive development. Among these technologies, carbon capture, utilization and storage technology (CCUS) is a technology that will ensure decarbonization in the near and medium term in order to reduce carbon emissions. In this study, this technology was discussed to ensure that our country reaches the 2053 green development goal. Accordingly, a detailed literature search on the design of the optimum CCUS supply chain network was conducted and gaps in the literature were identified. As a result of the analyzes, suggestions were presented for an integrated handling of a CCUS supply chain network in our country. It is thought that this study will shed light on researchers for future studies.

**Keyword:** Carbon capture, utilization and storage (CCUS), Carbon emission reduction, Decarbonization technologies

renewable energy) kaynakları ve karbon yakalama ve depolama (CCS- carbon capture and storage) gibi CO<sub>2</sub> gazı salınımını azaltılmasına yönelik geliştirilen teknolojiler karşımıza çıkmaktadır [1]. İklim değişikliği konusu öne çıkmaya başladığından beri hükümetlerin yatırımlarını iyileştirmesi ve net sıfır emisyonuna yönelik politikaların gelişmesiyle birlikte bu teknolojiler yükselen bir trend yakalamışlardır. Bu teknolojiler arasında CCS teknolojisi ise yakın ve orta vadede net sıfır emisyonlu enerjiye geçmek için kullanılan bir köprü teknolojisi olarak görülmektedir [2] Ancak bu teknoloji maliyetli bir teknolojidir ve yapılan

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: , e-posta / e-mail: senakumcu@gazi.edu.tr (S. Kumcu)

Geliş / Received: 20.07.2022 Kabul / Accepted: 04.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023  
doi: 10.28948/ngumuh.1145904

çalışmalarda depolanan karbonun bir kısmının kullanılmak üzere dönüştürülmesi ile CCS maliyetlerinin düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Yakalanan karbonun başka bir kullanım amacıyla dönüştürülmesi teknolojilerine ise karbon yakalama kullanma ve depolama teknolojileri (CCUS) adı verilmektedir.

Bu çalışmada; CCUS teknolojileri ile ilgili literatürde optimizasyon tekniklerini kullanan çalışmalar incelenmiş ve ülkemizde bütünleşik bir model geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Önerilen bu modelin geliştirilmesiyle gelecekte ülkemiz için sadece bir bölgede sınırlı kalmayıp birçok bölge açısından karbon emisyonuna sahip olan kaynaklarının değerlendirildiği kapsamlı bir çalışmanın gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda karbon emisyonunu azaltma teknolojilerinden biri olan karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerine ülkemizde yatırım yapılması için bir yol haritası ortaya konması hedeflenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde, küresel iklim politikaları ve karbon emisyonunu azaltma teknolojileri incelenmiştir, üçüncü bölümde karbon yakalama ve depolama teknolojilerine ait literatür çalışmaları sunulmuştur, dördüncü bölümde kapsamlı bir model geliştirme önerileri verilmiştir ve beşinci bölümde sonuç bölümü yer almaktadır.

## 2 Türkiye'nin sera gazı emisyonu kaynakları

Küresel ısınma, dünyanın karşı karşıya olduğu en zor ve en önemli problemlerden biridir. Bugüne kadar küresel ısınma problemini çözme yolunda atılan ilk adım ilk adım Kyoto Protokolüdür. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi adı altında oluşturulan Kyoto Protokolü, 1997'de imzalanmasına rağmen 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe girebilmiştir [3]. Daha sonra Kyoto Protokolünün genişletilmesiyle 2016 yılında Paris İklim Anlaşması ile günümüzde küresel iklim politikaları son halini almıştır. Paris Anlaşması'nın uzun vadeli hedefi, ortalama küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerden 2 °C (3.6 °F) artış seviyesi ile sınırlı tutmaktır ve 1.5 °C indirilmesi için çaba harcanmasıdır. Çünkü sıcaklık artışını 2 °C yerine 1.5 ile sınırlanması iklim değişikliği risk ve etkilerini önemli ölçüde azaltacağı kabul edilmektedir [4]. Bu stratejiye önemli ölçüde katkı sağlamak amacıyla 11 Aralık 2019 yılında Avrupa Birliği (AB), "Avrupa Yeşil Mutabakatı" belgesini yayınlamıştır [5]. Bu belge ile karbon emisyonlarının mümkün olan en kısa sürede azaltılması ve 2050 yılına kadar sıfır karbon emisyonu hedeflenmektedir. Bu hedef petrol, kömür gibi fosil yakıt kullanımını azaltarak, karbon emisyonunu azaltma teknolojilerine yönelmeyi de beraberinde getirmektedir. Aynı zamanda ülkelerin sera gazı salınımlarını azaltmak için kullanılan araçlardan bir tanesi de etkin bir karbon fiyatlandırma mekanizmasının uygulanmasıdır. Karbon fiyatlandırma yöntemleri olarak iki ana karbon fiyatlandırma yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; emisyon ticaret sistemi (ETS) ve karbon vergisidir [5]. ETS, toplam sera gazı emisyonu seviyesini sınırlayarak düşük emisyonlu endüstrilerin ekstra tahsisatlarını daha büyük emisyonlara satmasına izin veren bir yöntemdir. Karbon vergisi ise sera gazı emisyonları veya daha yaygın olarak fosil yakıtların karbon içeriği üzerinde bir vergi oranı

tanımlayarak doğrudan karbon fiyatı belirlenmesine dayalı bir yöntemdir. Karbon vergisi, karbon fiyatının önceden tanımlanmış olması bakımından ETS'den farklı bir yöntemdir [6].

6 Ekim 2021 tarihinde Paris Anlaşmasını onaylamasıyla birlikte Türkiye için iklim değişikliği ile mücadelesinde hedef ve politikalarını yeniden belirleyeceği bir dönem başlamıştır. Gelişen ekonomisi ile dünyanın önemli enerji tüketicileri arasında yer alan Türkiye'nin 2019 sera gazı envanteri sonuçlarına bakıldığında ise, toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %3.1 azalmış ve 506.1 milyon ton (Mt) CO<sub>2</sub> eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplanmıştır. Türkiye'nin 1990-2019 yılları arasındaki sera gazı emisyon istatistikleri Şekil 1'de yer almaktadır [7]. Ayrıca TÜİK'in açıklamış olduğu 1990-2019 verilerine göre Türkiye'nin neden olduğu sera gazı emisyonlarında en büyük payın %72 ile enerji kaynaklı emisyonlara ait olduğu tespit edilmiştir. Enerji kaynaklı emisyonları sırasıyla %13.4 ile tarımsal faaliyetler, %11.2 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %3.4 ile atık sektörü takip etmektedir.



Şekil 1. Türkiye'nin 1990-2019 arasındaki sera gazı emisyon istatistikleri [7].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2020 yılında son açıkladığı verilere göre toplam birincil enerji arzı 147.2 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiş olup 2019 yılındaki 144.2 milyon TEP'lik değere göre %2.05 oranında artmıştır. Bir önceki yıla göre katı yakıt arzı %3.1 oranında azalarak 40.6 milyon TEP, petrol arzı %2.2 oranında artarak 42.2 milyon TEP, doğal gaz arzı %7.2 oranında artarak 39.8 milyon TEP ve yenilenebilir enerji arzı %2.8 oranında artarak 24.6 milyon TEP düzeyinde gerçekleşmiştir. Yenilenebilir kaynaklar bazında incelendiğinde; bir önceki yıla göre rüzgâr %14.3, güneş %10.0, jeotermal %9.6, biyoenerji ve atıklar %7.6 oranında artış göstermiştir [8]. Türkiye son 10 yılda elektrik, kömür, petrol ve doğal gaz talep artış oranları bakımından ise Avrupa'da ilk sırayı almaktadır [9]. Türkiye'nin 2020 yılı itibarıyla, toplam elektrik üretiminin %34.8'i kömürden, %25.6'sı hidrolik kaynaklardan, %22.6'sı doğalgazdan, %8.1'i rüzgardan, %3.6'sı güneşten, %3.3'ü jeotermalden, %1.68'i biyoyakıtlardan ve atık ısıdan ve %0.2'si sıvı yakıtlardan karşılanmıştır. EPDK verilerine göre Ocak-2021 itibarıyla projesi inşa halinde devam eden santrallerden yakın ve orta vadede devreye girmesi planlanan kurulu güç kapasitesinin %29.6'sının kömür santrallerine ait olduğu

tespit edilmiştir. Ardından nükleer (%24.8), doğalgaz (%14.2), hidrolik (%8.7), rüzgar (%13.1) ile güneş (%6.5) santralleri gelmektedir [10].

Türkiye'nin ilk defa Paris Anlaşması'nı onaylayarak katıldığı 12 Kasım 2021 tarihinde 26.sı düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (BMİDK)'nda, Paris Antlaşmasından sonra geçen 6 yılda yaşanan en yüksek sıcakların olduğu ve küresel ısınmanın 1.5 derece sınırlandırma hedefi için somut eylemlere geçilmesi gerektiği konuşulmuştur. Konferansta alınan kararlar incelendiğinde iklim değişikliğine daha çok sebep olan fosil kaynakların sera gazı salınımının etkilerini bertaraf etme yönünde olduğu görülmüş ve bu doğrultuda karbon emisyonu azaltma faaliyetlerinin artarak devam etmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [11].

Türkiye açısından konferansta alınan kararları eyleme geçirme adına durumun daha ciddi olduğu düşünülmektedir. Dünyada sera gazı salınımında 16.sırada olan Türkiye fosil enerji kaynaklarından yakın vadede vazgeçecek gibi gözükmemektedir. Hali hazırda kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıt ile çalışan termik santral inşaatları devam etmektedir. Bu sebeple sera gazı salınımında en çok payı olan enerji sektöründeki karbon salınımını azaltma yollarını benimsemese Avrupa Birliği'nin 2050 karbonsuzlaşma hedefine de ulaşamayacağı düşünülmektedir.

Tarihte ilk kez Covid 19 pandemisinden dolayı 2020 yılında kömürden elektrik üretimi %8 oranında düşmüştür. Ancak uzun dönem için kömürden elektrik üretimi ile ilgili projeksiyonlar;  $CO_2$  emisyonlarını kabul edilebilir sınırlara çekebilecek karbon tutma, kullanma ve depolama yöntemlerinde (CCUS) sağlanabilecek önemli ilerlemelere, devreden çıkarılacak verimsiz kömür santrallerine, kömür ve doğal gaz fiyatlarının değişimine, hava kalitesini artırmaya dolayısıyla sera gazı emisyonlarını azaltmaya veya sınırlamaya yönelik yeni ulusal politikaların veya uluslararası anlaşmaların yürürlüğe girmesine, kömür dışı kaynak kullanan diğer santrallerle yaşayacağı zorlu rekabet ve finansman koşullarına ve sabit karbon vergisi gibi doğrudan maliyet artırıcı uygulamalara, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelen ulusal politikalara göre önemli ölçüde değişebilecektir [12].

Karbon salınımını azaltma konusunda günümüzde yükselen bir trend olarak karşımıza çıkan CCUS teknolojileri bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

## 2.1 Karbon yakalama kullanma ve depolama (CCUS)

Kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıtlar kullanımı global boyutta hızla artmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanan enerji santralleri atmosfere yoğun şekilde sera gazı emisyonu salınımı yapmaktadır. Bunun önüne geçebilmek ve 2050 karbon nötr hedefine ulaşmak doğrultusunda yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Bu teknolojilerden birisi de karbon yakalama ve depolama (carbon capture and storage) (CCS) teknolojileridir. Ancak bu teknoloji maliyetli bir teknolojidir, ancak yapılan çalışmalarda depolanan karbonun bir kısmının kullanılmak üzere dönüştürülmesi ile CCS teknoloji maliyetlerinin düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Yakalanan karbonun başka bir kullanım amacıyla

dönüştürülmesi teknolojisine karbon yakalama kullanma ve depolama teknolojileri (CCUS) adı verilmektedir.

Şu anda küresel olarak faaliyette olan yaklaşık 35 ticari CCUS tesisi bulunmaktadır ve yıllık toplam yakalama kapasitesi neredeyse 45 Mt  $CO_2$ 'dir. Bu projelerin yaklaşık üçte ikisi Kuzey Amerika'da yoğunlaşmış olsa da, ticari CCUS tesisleri şu anda 25'ten fazla ülkede geliştirilmektedir [13-14]. Son birkaç yılda CCUS teknolojileri daha güçlü iklim hedefleri ve finansal teşvikler sayesinde yeni bir ivme kazanmıştır. Fakat, Dünya'yı endüstri öncesi dönemdeki seviyeye göre 1.5 C° fazla ısıtan karbon yayılımını engelleyebilmek için bu projelerden daha fazlasına ihtiyaç olduğu bilinmektedir [15]. Uluslararası Enerji Ajansı raporunda CCUS projelerinin, karbondioksit yayılımını neredeyse beşte bir oranında; iklim krizi ile mücadeledeki maliyeti ise %70 oranında azaltabileceği belirtilmiştir. CCUS'in gerekli olmasının en önemli nedenlerinden biri, ağır sanayinin; yani gübre üreticileri, çelik fabrikaları ve çimento üreticilerinin daha temiz enerjiyle çalışmaya uyum sağlamasının zor ve pahalı olmasıdır [12]. Bu projeler arasında ise ülkemiz henüz yer almamaktadır. Bu doğrultuda çeşitli kamu kurum ve kuruluşları tarafından proje önerileri yürütülmektedir.

CCUS teknolojilerinin optimize edilmesi için şu kararların doğru bir şekilde verilmesi gerekmektedir; (1) ne kadar  $CO_2$  yakalanacak? (2) hangi kaynaklardan yakalanacak? (3)  $CO_2$  yakalamak için hangi teknoloji kullanılacak? (4) boru hatları nereye inşa edilecek? (5)  $CO_2$  taşıyan boru hattının çapı ne olmalı? (6) hangi rezervuarlarda  $CO_2$  depolanacak? (7) rezervuarlara ne kadar  $CO_2$  enjekte edilecek? (8) kaynak ve rezervuar arasındaki dağıtım ağı nasıl olmalıdır? (9) yakalanan  $CO_2$  hangi kullanım alanlarında değerlendirilebilir? [16]. CCUS teknolojileri için önemli bir role sahip olan bu kararlardan; karbondioksit yakalama seçenekleri, taşıma seçenekleri, depolama alanları ve kullanım alanları detaylı bir şekilde aşağıda ele alınmıştır.

### 2.1.1 Karbondioksit yakalama seçenekleri

$CO_2$  yakalamanın üç farklı seçeneği vardır. Bu yöntemler aşağıda belirtilmiştir [17];

1. Yanma sonrası yakalama: yanmadan sonra baca gazı akışından  $CO_2$  yakalanması,
2. Yanma öncesi yakalama: yanmadan önce gazlaştırma veya reforming gibi kimyasal yöntemlerden sonra gaz karışımının elde edilmesi ( $CO_2$  ve hidrojen gazı karışımı) ve sonra bu karışımdan  $CO_2$ 'nin yakalanması;
3. Oksiyakıt ile yakalama: yakıtı yakmak için (neredeyse) saf oksijen kullanılması

### 2.1.2 Karbondioksit taşıma seçenekleri

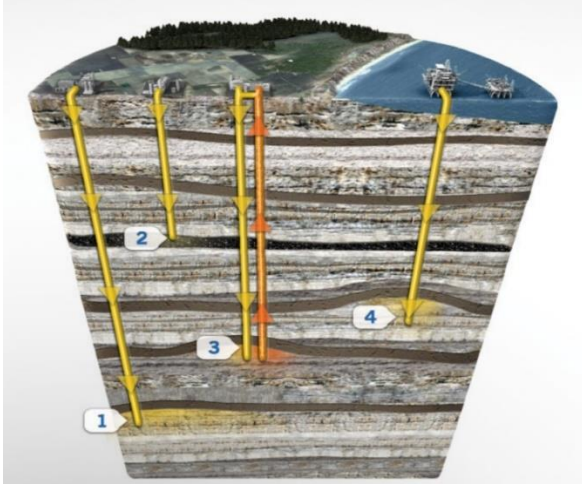
Başlıca karbondioksit taşıma seçenekleri aşağıda verilmiştir [18];

1. Boru hattı ile taşıma
2. Gemi tankerleri ile taşıma
3. Kara tankerleri ya da trenler ile taşıma seçenekleri bulunmaktadır.



### 2.1.3 Karbondioksit depolama alanları

Karbondioksitin tutulması için birkaç alternatif metot bulunmaktadır. Bunlar; (1) yer altı tuzlu oluşumlarında, (2) kömür çıkarılmayan yer altı kömür ocaklarında, (3) petrol sahalarından petrol üretimini arttırılmasında (EOR) ve (4) tükenmiş petrol ve doğal gaz sahalarında jeolojik depolama alternatifleri bulunmaktadır. Şekil 2’de bu numaralandırılan sırada karbondioksit depolama alternatifleri gösterilmektedir [19]:



Şekil 2. Karbondioksit depolama alanları [19].

### 2.1.4 Karbondioksitin kullanım alanları

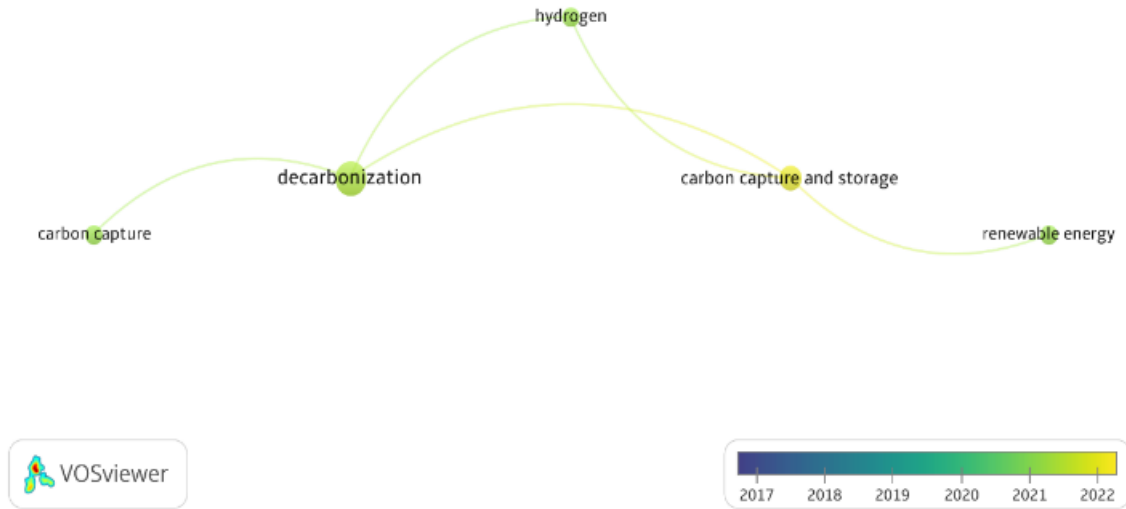
CCS ile yakalanmış, konsantre  $CO_2$ 'nin herhangi bir değer katan yeniden kullanılması ile CCUS kavramı ortaya çıkmıştır.  $CO_2$ 'in yeniden kullanılmasına olanak sağlayan bu teknolojiler finansal, çevresel, sosyal ve daha birçok alanda fayda sağladığı tespit edilmiştir. CCUS teknolojisiyle yakalanan karbondioksitin kullanım alanları aşağıda verilmiştir; arttırılmış petrol geri kazanımı (EOR), diğer petrol ve doğal gaz endüstrisi uygulamalarında, gıda işleme,

muhafaza ve paketlenme, kahve kafeinsizleştirme, selüloz ve kağıt işleme, çelik imalatı, kömür yataklarında metan gazının üretiminde, kimya endüstrisinde metanol ve üretilmesinde, yangın tüplerinde ve yangın söndürme sistemlerinde, dondurulmuş gıda meyve ve sebze stoklanması ve muhafazasında, madenlerde patlayıcı maddelerin soğutulmasında, tehlikeli sıvıların transferinde ve daha birçok uygulama alanında kullanıldığı bilinmektedir [20].

## 3 Materyal

### 3.1 Bibliyometrik analiz

14.11.2022 tarihinde SCOPUS veritabanında “Decarbonization Technologies” kelimesiyle arama yapılmış ve bu anahtar kelimenin özet, başlık ve anahtar kelimelerde taratılması sonucunda 1999 yılından günümüze kadar 61 adet çalışma tespit edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalara yön verebilmek adına, karbon emisyonunu azaltma teknolojileri hakkında daha detaylı bilgi elde etmek için elde edilen eserlerin bibliyometrik analizi Vosviewer (1.6.17) programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bibliyometrik analizde sık kullanılan bir yöntem olan bilimsel haritalama tekniği kullanılmış ve Vosviewer (1.6.17) programı aracılığıyla görselleştirilmiştir. Günümüzde bu alandaki trendleri belirlemek ve gelecekte yapılacak çalışmalara yön verebilmek amacıyla bu çalışmanın konusuna uygun olarak yayınlanmış eserlerde en sık birlikte kullanılan anahtar kelimeler belirlenmiştir. Vosviewer (1.6.17) programında yapılan ortak kelime analizi ile bir eserde en az 3 kez birlikte kullanılma sıklığı dikkate alınmış ve birbirleriyle bağlantısı olan 5 kelimenin olduğu tespit edilmiştir. En sık birlikte kullanılan kelimelerin günümüzdeki trendlerini belirlemek için yıllara göre ortak kelime analizi gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Yıllara göre ortak kelime analizi

Şekil 3'te de görüldüğü gibi, 2017'den günümüze doğru yapılan çalışmalarda en sık birlikte kullanılan kelimelerin ağ yapısı çıkarılmıştır. Bu analize göre 2017'den günümüze kadar olan çalışmalarda karbon emisyonunu azaltma konusunda "yenilenebilir enerji kaynakları", "karbon yakalama", karbon yakalama ve depolama" ve "hidrojen" kelimelerinin en sık kullanılan kelimeler olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlarla iklim değişikliğini azaltma konusunda günümüzde trend olan bu teknolojilere yapılan yatırımların artması için bu konularda daha çok çalışmanın yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu teknolojiler arasında yer alan karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin yüksek maliyetli olması bu alanda çeşitli zorluklar doğurmuştur. Bu kapsamda bu zorlukların üstesinden gelecek CCS sistemlerinin tasarımını optimize edecek yöntemlerin geliştirilmesi çok önemlidir [2].

Bu çalışmada da günümüzde karbon emisyonunu azaltma konusunda gelişmekte olan teknolojilerden biri olan karbon yakalama ve depolama (CCS) ya da karbon yakalama kullanma ve depolama (CCUS) konusunda yapılan optimizasyon çalışmaları bir sonraki bölümde incelenmiştir.

### 3.2 Karbon yakalama teknolojilerinde optimizasyon tekniklerini kullanan çalışmalar

CCS ve CCUS tedarik zinciri tasarımı malzeme, süreç ve farklı tedarik zinciri düzeylerindeki etkileşime dayanan karmaşık sistemlerdir. Bu sistemlerin karmaşıklığı sebebiyle yaşanan zorlukların üstesinden gelecek optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda bu çalışmada literatürde yer alan CCS ve CCUS tedarik zincirinde optimizasyon modellerini ele alan çalışmalar incelenmiş ve literatürdeki boşluklar tespit edilmiştir.

14.11.2022 tarihinde SCOPUS ve WOS veritabanında "carbon capture" OR "carbon capture and storage" OR "carbon capture utilization and storage" OR "carbon capture utilization" AND "optimization" AND "supply chain" anahtar kelimesi özet, başlık ve anahtar kelimelerde taratılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem araştırma konusu ile hem de Endüstri Mühendisliği ile ilgili olan 2009'dan günümüze kadar toplam 25 adet çalışma tespit edilmiştir. Bu eserlerin genel olarak toplam maliyetleri en aza indiren ve karbondioksit emisyonlarını önemli ölçüde azaltan optimal tedarik zincirlerini tasarlamak üzere ele alındığı görülmüştür. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Middleton ve Bielicki [16] çalışmalarında, CCS için nerede ve ne kadar  $CO_2$  yakalanıp depolanacağını ve maliyetleri en aza indirmek için farklı boyutlarda boru hatlarının nereye kurulacağını belirleyen kapsamlı bir CCS altyapı modelini karma tamsayılı doğrusal program (MILP) ile geliştirmişlerdir.

Markewitz vd. [21] çalışmalarında, CCS için nerede ve ne kadar  $CO_2$  yakalanıp depolanacağını ve maliyetleri en aza indirmek için farklı boyutlarda boru hatlarının nereye kurulacağını belirleyen kapsamlı bir CCS altyapı modelini karma tamsayılı doğrusal program (MILP) ile geliştirmişlerdir.

Han vd. [22] yayınladıkları makalelerinde, enerji altyapısı için ekonomik durum ve çevresel zorlukları ele

almak için bir iki aşamalı bir tasarım stratejisi önermişlerdir. Bunlardan biri, karbon yakalama ve depolama tesislerini kurmak (CCS), diğeri ise yenilenebilir enerji sistemlerinin girişini hızlandırmaktır. Entegre enerji altyapı sistemi Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) problemi olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmalarıyla Kore'de CCS kurulmasıyla yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak hidrojen enerji altyapısının sistematik tasarımının karşılaştırılmasını yapmışlardır.

Huang vd. [23] yaptıkları çalışmalarında, optimizasyon modelleri ve algoritmaları kullanarak karbon yakalama ve depolamanın teknik gelişmelerine ve ekonomik analizine odaklanmışlardır. Çalışmalarında karbon yakalama ve depolamanın üç ana bileşenini ele almışlardır. Bunlar: karbon yakalama, karbondioksit taşıma ve karbon tutma. Ek olarak, karbondioksit azaltma gerekliliklerini yerine getirmek için, enerji genişleme planlamasını,  $CO_2$  ağ tasarımı ve  $CO_2$  depolama problemlerini çözen matematiksel programlama modellerini tartışmışlardır. Sonuç olarak karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin teknik ve ekonomik analiz ile birleştirilmesiyle, olası düşük karbonlu enerji ekonomisinin sürdürülebilir açıdan gelişme sağlayacağını savunmuşlardır.

Lee vd. [24] çalışmalarında enerji santrallerini güçlendirmek için karbon yakalama ve depolama teknolojisini ele almışlardır. Bu amaçla karbon yakalama ve depolama planlaması için karmaşık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model hem şebeke gücü etkilerini hem de  $CO_2$  kaynak-depo eşleşmesini dikkate almaktadır.

Lee vd. [25] çalışmalarında karbon yakalama ve depolama (CCS) ağının tasarımı ve işletilmesi iki aşamalı stokastik bir karar verme algoritması sunmuşlardır. Bu algoritmayı çok amaçlı karma tamsayılı programlama modelini kullanarak ele almışlardır. Bu önerilen algoritma ile CCS altyapısının en uygun planı ve değerlendirme yöntemini sağlamak için, yıllık maliyeti, çevresel etkiyi ve risk belirsizliğini en aza indirmek hedeflenmiştir.

Zhang vd. [26] makalelerinde, Çin'deki stratejik karbon yakalama kullanma ve depolama (CCUS) ağını optimize etmek için, emisyon kaynaklarının, yakalama teknolojilerinin, boru hattının, araç nakliye sisteminin, kullanma ve depolama lokasyonlarının dahil olduğu karışık tam sayılı doğrusal programlama önermişlerdir. Modelin amaç fonksiyonunda maliyetlerle birlikte  $CO_2$ 'in yeniden kullanım alanı olarak kullanılan geliştirilmiş petrol kazanımı (EOR)'ndan elde edilen gelirden hesaplanmıştır.

Kim vd. [27] çalışmalarında kritik koşullar altında optimal bir CCS boru hattının geliştirilmesi için boru hattı tasarımına etki eden belirsiz depolama kapasitesi ve politika koşulları gibi faktörlerin modele dahil edilmesiyle karma tamsayılı doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir.

d'Amore vd. [28] karbon yakalama, taşıma ve jeolojik depolama (hem karada hem de denizde) için bir Avrupa Tedarik Zinciri'nin ekonomik optimizasyonu için bir karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önermişlerdir. Yaptıkları bu çalışma, toplumsal (sosyal) risk

analizini ilk kez modelleme çerçevesine dahil eden ilk çalışmadır.

Jarvis ve Samsatli [29] karbon yakalama ve depolamaya ek olarak, hem doğrudan çalışan bir akışkan olarak hem de kimyasal dönüşüm süreçlerinde yakalanan  $CO_2$ 'nin iklim değişikliğini hafifletmek ve kaynak verimliliğini sağlamak için kilit bir strateji olarak kullanılmasına yönelik çabalara odaklanılması gerektiğini ve  $CO_2$ 'den değerli ürünlerin üretimini desteklemek için güçlü bir değer zinciri gerekli olduğunu çalışmalarında vurgulamışlardır. Bu amaçla çalışmalarında çeşitli  $CO_2$  dönüştürme teknolojilerini ve temel kaynakların taşınması ve depolanması için gerekli olan teknolojileri karşılaştırıp sonuçları tartışmışlardır.

Pieri vd. [30] çalışmalarında daha önce teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir bir CCU değer zincirlerini optimize etmek ve geliştirmek için bütünsel bir yaklaşımın ele alınmadığına vurgu yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarıyla, CCU değer zincirlerinin simülasyonu veya optimizasyonuna odaklanan başlıca mevcut yöntemlerin, algoritmaların ve araçların eleştirel bir incelemesini gerçekleştirmişlerdir.

Ağralı vd. [31] çalışmalarında Türkiye'nin farklı bölgelerinde bulunan iki kömürlü termik santral ile ilgili verileri kullanarak karbon yakalama birimlerinin kapasitelerine, bunları kurmanın optimal olup olmadığına, yakalanan karbonun taşınması için kurulması gereken ulaşım ağına ve eğer varsa depolama alanlarının konumlarına karar veren bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Önerdikleri model, karbon yakalama ünitesinin kurulumu ve işletilmesi ve karbonun taşınması ile ilgili maliyetlerin toplamının net bugünkü değerini, karbon yakalama ve depolama (CCS) durumunda depolama maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca karbonun kullanılacağı (CCU) süreç olarak gelişmiş petrol geri dönüşümünü (EOR) seçmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, EOR pazarında yeterli talep olduğu sürece CCU'nun CCS'ye tercih edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bundan yola çıkarak Türkiye için CCU, ülke çapındaki karbon emisyonlarını çevresel ve ekonomik açıdan faydalı bir şekilde azaltmanın bir yolu olarak gündeme gelmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Zhang vd. [32] makalelerinde, karbon vergisi belirsizliğini göz önünde bulundurarak,  $CO_2$  azaltımı için beklenen toplam maliyeti en aza indirmek için önerilen iki seçenek arasındaki ilişkiyi araştırmak için iki aşamalı bir stokastik karışık tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli formüle etmişlerdir.

Leonzio vd. [33] çalışmalarında karbon yakalama, kullanım ve depolama tedarik zincirinin optimal tasarımı için matematiksel bir model geliştirildi. Karbondioksit, metan kuru reformasyonu yoluyla metanol üretmek için depolanabilir ve/veya kullanılabilir. Almanya'daki on ana karbondioksit emisyon kaynağı için karma tam sayılı doğrusal program modeli geliştirilmişlerdir.

Leonzio ve Zondervan [34] İtalya'nın bölgeleri için karbon yakalama, kullanım ve depolama tedarik zincirleri için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Model, karbondioksit emisyonlarına sahip on bölge için geliştirilen karbon sistemlerinin tasarımına

uygulanırken, depolama alanları olarak farklı tuzlu su akiferleri önerilmiştir. Karbondioksitin kullanım alanı olarak metan üretim alanı incelenmiştir. Sonuçlar, Adriyatik denizinin tedarik zincirindeki en uygun açık deniz depolama alanı olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, diğer depolama alanlarına kıyasla daha düşük net metan üretim maliyetini vermiştir.

Leonzio vd. [35] çalışmalarında, İtalya, Almanya ve Birleşik Krallık'taki Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (CCUS) tedarik zincirlerini optimize etmek için iki aşamalı bir stokastik karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelin amacı, karbondioksit bazlı bileşiklerin belirsizlikler altında toplam üretim maliyetlerini en aza indirmektir.

Huang vd. [36] Çin kömür kimyası endüstrisinde  $CO_2$  emisyonlarını azaltmak ve ekonomik büyümeyi, enerji güvenliğini sağlamak için bu sektörde karbon emisyonunu azaltan teknolojilerin devreye alınmasının kısa (2020), orta (2030) ve uzun (2050) vadede değerlendirmesi için için doğrusal olmayan programlama önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, sektörün karbon emisyonlarını azaltmak için karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerini kullanmasını tavsiye etmişlerdir.

Quarton ve Samsatli [37] çalışmalarında CCUS ve hidrojen teknolojilerinin enerji sistemi içindeki rolünün tüm sistem değerlendirmesini sağlayan, karbon dioksit ve hidrojen için entegre değer zincirlerini modellemeye ve optimize etmeye yönelik ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir.

Zhang vd. [38] CCUS tedarik zincirinin optimizasyona dayalı ekonomik ve çevresel faktörlerin de ele alındığı bir çerçeve geliştirilmiştir. Çalışmada karbon yakalama ve ayırma alanlarının yeri ve ölçeğinin yanı sıra emisyon azaltma hedefini karşılayabilecek en verimli  $CO_2$  taşıma rotalarını sağlamak için 20 yıllık bir zaman ufku boyunca tedarik zinciri probleminin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu problemi, hedefleri toplam yıllık maliyeti ve çevresel etkiyi en aza indirmeyi içeren çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) ile ele almışlardır. Elde edilen sonuçlar, ele alınan soruna ilişkin değerli bilgiler sağlamış ve karar vericiye CCUS'un yerleştirilmesinde daha sürdürülebilir alternatifleri benimsemesi için rehberlik etmiştir.

d'Amore vd. [39] yaptıkları bu çalışmada Avrupa çapında; minimum karbon yakalama, taşıma ve ayırma maliyetleri açısından en iyi tedarik zinciri ağ tasarımını ve teknoloji seçimini belirlemek amacıyla birçok faktörün ele alındığı senaryolar oluşturularak karışık tamsayılı doğrusal programlama ile bunlardan optimum senaryoyu belirlemişlerdir.

d'Amore vd. [40] Avrupa bağlamında karbon yakalama, taşıma, kullanım ve depolama tedarik zincirlerinin tasarımı için bir optimizasyon çerçevesi önermişlerdir. Yapılan bu çalışma ile Avrupa  $CO_2$  emisyonunda önemli bir düşüş sağlamak için yapılacak olan stratejik analizlere metodolojik bir çerçeve sağlamak ve kapsamlı CCUS sistemlerinin dikkate değer bir coğrafi ölçekte optimum tasarımı hakkında öngörüler sağlanması amaçlanmıştır.

Niazvand vd. [41] çalışmalarında karbon yakalama kullanımını ve depolama (CCUS) teknolojisini ve bazı belirsiz



parametreleri (elektrik fiyatı ve rüzgar türbini çıkış gücü) aynı anda göz önünde bulunduran senaryo tabanlı bir değerlendirme stratejisi sunan bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modele dayalı olarak CCUS teknolojisinin kullanılmasıyla, tüm planlama ufukları için maliyet ve kirliliğin uygun şekilde azaltıldığı sonucuna varmışlardır.

Balaji ve Rabiei [42] yaptıkları çalışmalarında ABD'nin Kuzey-Orta bölgesindeki çeşitli potansiyel karbondioksit kaynak ve depoları arasındaki boru hattı rotalarını haritalamak ve optimize etmek için bir karma tamsayılı model önermişlerdir.

Bjerketvedt vd. [43] çalışmalarında Norveç endüstrilerinden karbon yakalama ve depolamayı mümkün kılmak için bir nakliye altyapısının zaman içindeki dağıtımını araştırmışlardır. Makalede taşıma zincirinin tasarımı ve genişletilmesine ve CO<sub>2</sub>'nin nerede tutulduğu kararlarına odaklanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda çok önemli bir karma tamsayılı modeli geliştirmişlerdir. Model ile gerçekleştirilen nakliye portföyü optimizasyonu sayesinde ölçek ekonomisinin potansiyel faydaları ve çok duraklı seferlerin potansiyel faydaları analiz edilmiştir.

Becattini vd. [44] çalışmalarında karbon yakalama, taşıma ve depolama tedarik zincirlerinin optimal tasarımı için yeni bir optimizasyon çerçevesi sunmuşlardır. Geliştirdikleri modeli 25 yıllık bir zaman ufku boyunca farklı emisyon azaltma yollarına uyum sağlayan ve aynı zamanda tedarik zincirlerinin toplam maliyetlerini de en aza indiren çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal bir program olarak formüle etmişlerdir. Bu çalışmaları, literatürde yer alan CCUS tedarik zinciri ağının optimizasyonunda ekonomik ve çevresel düzenlemelerin birlikte ele alındığı az sayıdaki çalışmadan biri olmuştur.

Yapılan literatür araştırması ile son zamanlarda ülkelerin ihtiyaçları doğrultusunda karbon yakalama teknolojileri ile ilgili çalışmaların hız kazandığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalar arasında CCUS tedarik zinciri ağını baştan uca bütünleşik olarak ekonomik ve çevresel hedeflerin aynı anda optimize edildiği çok amaçlı programlama modellerinin sınırlı sayıda olduğu görülmüştür.

#### 4 Sonuç ve tartışma

Son yıllarda “küresel ısınma” ve “iklim değişikliği” kavramları Dünya gündemine oturmuş ve bunu önlemek için neler yapılabileceği düzenlenen tüm toplantılarda en tartışılan konulardan birisi haline gelmiştir. İskoçyanın Glasgow şehrinde 2021 yılında 26.sı düzenlenen iklim değişikliği konferansına Türkiye ilk defa Paris Antlaşmasını onaylayarak katılmıştır. Bu konferansta, Paris Antlaşmasından sonra geçen 6 yılda yaşanan en yüksek sıcakların olduğu ve küresel ısınmanın 1.5 derece sınırlandırma hedefi için somut eylemlere geçilmesi gerektiği konuşulmuştur. Bu kapsamda karbon emisyonunu azaltma konusunda çeşitli faaliyetler yürütülmektedir. Bu faaliyetler arasında, enerji üretiminde daha az karbondioksit çıkaran alternatiflere yönelmek, örneğin kömürden doğal gaz, yenilenebilir enerjiye geçmek veya nükleer enerjinin payını artırmak ya da karbon yakalanması ve depolanması gibi yöntemler karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada karbon yakalanması, kullanılması ve depolanması teknolojileri üzerinde durulmuştur. Bu teknolojide optimizasyon tekniklerini uygulayan çalışmaların günümüzde yeşil uygulama alanında yeni trend konular içerisinde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada literatürde yer alan optimizasyon modellerinin incelenmesiyle, ülkemiz açısından birçok bölgesinin içine alındığı bütünleşik bir modelin geliştirilmesi için aşağıda sıralanan öneriler sunulmuştur;

- Ağralı vd. [31]'nin önerdikleri modele ilave edilebilecek, ülkemizdeki uygun karbondioksit depolama alternatifleri de düşünülmelidir. Örneğin Akdeniz ve Tuz gölünden sonra ülkemizin jeolojik açıdan Batman Batı Raman petrol sahası ve Siirt Dodan Sahası karbondioksit depolama alanları olarak uygun görülmüştür [45].
- Yakalama tesisinde kullanılan farklı teknolojiler araştırılarak uygun olan teknolojiler modele dahil edilebilir.
- Karbon taşınmasında farklı türde araçlar (boru hattı, tanker ya da deniz taşımacılığı gibi) modele entegre edilebilir.
- Karbon emisyon oranları yüksek olan farklı bölgedeki fosil yakıtlı termik santraller kaynak olarak modele dahil edilebilir.
- Karbondioksitin yeniden kullanıldığı alanlardan sadece petrol geri kazanımı alanında sınırlı kalınmayıp diğer kullanım alanları da araştırılıp modele dahil edilebilir.
- Lee vd. [25] ve d'Amore vd. [28]'nin geliştirdikleri optimizasyon modeline dahil ettikleri çevresel ve toplumsal risk faktörleri ile birlikte sürdürülebilirlik ve sosyo-ekonomik faktörler gibi çeşitli risk faktörleri belirlenip modele dahil edilebilir.

Bu öneriler doğrultusunda, ülkemizde karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerini kullanarak birçok bölgenin içine alındığı bütünleşik bir model geliştirilmesiyle birlikte ülkemizin sürdürülebilir yeşil kalkınmasına önemli ölçüde katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %19

#### Kaynaklar

- [1] A. S. Brouwer, M. van den Broek, W. Zappa, W. C. Turkenburg, and A. Faaij, Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems, *Applied Energy*, 161, 48–74, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.090>
- [2] M. F. Hasan, M. S. Zantye, & M. K. Kazi, Challenges and opportunities in carbon capture, utilization and storage: A process systems engineering perspective, *Computers & Chemical Engineering*, 166, 1–26, 2022, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107925>
- [3] M. Wara, Measuring the clean development mechanism's performance and potential, *UCLA Law Review*, 55(6), 1759–1803, 2008.

- [4] UNFCCC., Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Erişim adresi: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [5] T.C. Ticaret Bakanlığı, Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021.
- [6] The World Bank (2020). Pricing carbon. Erişim adresi: <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>
- [7] TÜİK, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri-1990-2019, 2021. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>
- [8] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019 Yılı Ulusal Enerji Denge Tablosu, 2021.
- [9] BP, Statistical Review of World Energy – Electricity Section, 2020.
- [10] EÜAŞ, 2020 Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu, 2021.
- [11] UNFCCC., Draft Decision 1/CP.26. Draft COP Decision Proposed by the President, 2021.
- [12] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2020, 2020.
- [13] International Energy Agency (IEA), Legal and Regulatory Frameworks for CCUS, 2022a. Erişim Adresi: <https://www.iea.org/reports/legal-and-regulatory-frameworks-for-ccus>
- [14] International Energy Agency (IEA), Carbon Capture, Utilization and Storage, 2022b. Erişim Adresi: <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage-2>
- [15] J. Ambrose, What Is Carbon Capture, Usage And Storage – And Can It Trap, Emissions?, Theguardian, 2020. Erişim adresi: <https://www.theguardian.com/environment/2020/sep/24/what-is-carbon-capture-usage-and-storage-and-can-it-trap-emissions>
- [16] R. S. Middleton and J. M. Bielicki, A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS, Energy Policy, 37(3),1052–1060, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.049>.
- [17] R. T. J. Porter, M. Fairweather, C. Kolster, N. Mac Dowell, N. Shah, and R. M. Woolley, Cost and performance of some carbon capture technology options for producing different quality CO<sub>2</sub> product streams, International Journal of Greenhouse Gas Control, 57, 185–195, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.11.020>.
- [18] H. Lu, X. Ma, K. Huang, L. Fu, and M. Azimi, Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review, Journal of Cleaner Production, 266, 121994, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994>.
- [19] Global CCS Institute., Accelerating the Uptake of CCS: Industrial Use of Captured Carbon Dioxide, Parsons Brickerhoff, New York, NY, USA, 2011.
- [20] Z. Zhang et al., Recent advances in carbon dioxide utilization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 125, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109799>.
- [21] P. Markewitz et al., Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO<sub>2</sub>, Energy and Environmental Science, 5(6), 7281–7305, 2012. <https://doi.org/10.1039/C2EE03403D>.
- [22] J. H. Han, J. H. Ryu, and I. B. Lee, A preliminary infrastructure design to use fossil fuels with carbon capture and storage and renewable energy systems, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37(22), 17321–17335, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.117>
- [23] Y. Huang, S. Rebennack, and Q. P. Zheng, Techno-economic analysis and optimization models for carbon capture and storage: A survey, Energy Systems, 4(4), 315–353, 2013, <https://doi.org/10.1007/s12667-013-0086-0>.
- [24] J.-Y. Lee, R. R. Tan, and C.-L. Chen, A unified model for the deployment of carbon capture and storage, Applied Energy, 121, 140–148, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.080>.
- [25] S. Y. Lee, J. U. Lee, I. B. Lee, and J. Han, Design under uncertainty of carbon capture and storage infrastructure considering cost, environmental impact, and preference on risk, Applied Energy, 189, 725–738, 2017, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.12.066>.
- [26] S. Zhang, L. Liu, L. Zhang, Y. Zhuang, and J. Du, An optimization model for carbon capture utilization and storage supply chain: A case study in Northeastern China, Applied Energy, 231,194–206, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.09.129>.
- [27] C. Kim, K. Kim, J. Kim, U. Ahmed, and C. Han, Practical deployment of pipelines for the CCS network in critical conditions using MINLP modelling and optimization: A case study of South Korea, International Journal of Greenhouse Gas Control, 73, 79–94, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2018.03.024>.
- [28] F. d'Amore, P. Mocellin, C. Vianello, G. Maschio, and F. Bezzo, Economic optimisation of European supply chains for CO<sub>2</sub> capture, transport and sequestration, including societal risk analysis and risk mitigation measures, Applied Energy, 223, 401–415, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.04.043>.
- [29] S. M. Jarvis and S. Samsatli, Technologies and infrastructures underpinning future CO<sub>2</sub> value chains: A comprehensive review and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 85, 46–68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.007>.
- [30] T. Pieri, A. Nikitas, A. Castillo-Castillo, and A. Angelis-Dimakis, Holistic assessment of carbon capture and utilization value chains, Environments - MDPI, 5(10), 1–17, 2018. <https://doi.org/10.3390/environments5100108>.
- [31] S. Ağralı, F. G. Üçtuğ, and B. A. Türkmen, An optimization model for carbon capture & storage/utilization vs. carbon trading: A case study of



- fossil-fired power plants in Turkey, *Journal of Environmental Management*, 215, 305–315, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.054>.
- [32] S. Zhang, Y. Zhuang, L. Liu, L. Zhang, and J. Du, Risk management optimization framework for the optimal deployment of carbon capture and storage system under uncertainty, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 1-13, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109280>.
- [33] G. Leonzio, P. U. Foscolo, and E. Zondervan, An outlook towards 2030: Optimization and design of a CCUS supply chain in Germany, *Computers and Chemical Engineering*, 125, 499–513, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.04.001>
- [34] G. Leonzio and E. Zondervan, Analysis and optimization of carbon supply chains integrated to a power to gas process in Italy, *Journal of Cleaner Production*, 269, 1-18, 122172, 2020a, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122172>
- [35] G. Leonzio, P. U. Foscolo, and E. Zondervan, Optimization of CCUS supply chains for some european countries under the uncertainty, *Processes*, 8(8), 1-29,2020b, <https://doi.org/10.3390/pr8080960>
- [36] Y. Huang et al., Investigation and optimization analysis on deployment of China coal chemical industry under carbon emission constraints, *Applied Energy*, 254, 1-15, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113684>
- [37] C. J. Quarton and S. Samsatli, The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation, *Applied Energy*, 257, 1-23, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113936>
- [38] S. Zhang, Y. Zhuang, R. Tao, L. Liu, L. Zhang, and J. Du, Multi-objective optimization for the deployment of carbon capture utilization and storage supply chain considering economic and environmental performance, *Journal of Cleaner Production*, 270, 1-15, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122481>
- [39] F. d'Amore, M. C. Romano, and F. Bezzo, Carbon capture and storage from energy and industrial emission sources: A Europe-wide supply chain optimisation, *Journal of Cleaner Production*, 290, 1-17, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125202>
- [40] F. d'Amore, M. C. Romano, and F. Bezzo, Optimal design of European supply chains for carbon capture and storage from industrial emission sources including pipe and ship transport, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109,1-16, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103372>
- [41] F. Niazvand, S. Kharrati, F. Khosravi, and A. Rastgou, Scenario-based assessment for optimal planning of multi-carrier hub-energy system under dual uncertainties and various scheduling by considering CCUS technology, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 1-18, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101300>
- [42] K. Balaji and M. Rabiei, Carbon dioxide pipeline route optimization for carbon capture, utilization, and storage: A case study for North-Central USA, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 1-15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101900>
- [43] V. S. Bjerketvedt, A. Tomasgard, and S. Roussanaly, Deploying a shipping infrastructure to enable carbon capture and storage from Norwegian industries, *Journal of Cleaner Production*, 333, 1-15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129586>
- [44] V. Becattini, P. Gabrielli, C. Antonini, J. Campos, A. Acquilino, G. Sansavini, & M. Mazzotti, Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117, 1-18, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>
- [45] E. Okandan et al., Assessment of CO2 storage potential in turkey, modeling and a prefeasibility study for injection into an oil field, *Energy Procedia*, 4, 4849–4856, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.452>

