

DÜŞÜK KARBON EKONOMİSİNE GEÇİŞ VE BU GEÇİŞTE KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMANIN ROLÜ

Tunç DURMAZ*

Öz

Bu makalenin amacı, iklim değişikliği sorununu çözmek için oldukça önemli olduğu düşünölen ve fosil kaynaklı enerji, demir çelik, çimento, alüminyum ve kimya gibi karbon yoğun saniyeler ve yakıt imalat sektörlerinde karbondioksit salımlarının azaltılmasında kilit bir teknoloji olan karbon yakalama ve depolamanın (KYD'nin) neden istenilen düzeyde kullanılmadığını tartışmaktır. Bu doğrultuda çalışma, KYD teknolojilerinin küresel iklim değişikliğiyle mücadeledeki rolünü farklı bakış açılarıyla irdelemekte ve yenilenebilir enerji üretimi ile karşılaştırmalı biçimde sunmaktadır. Bununla birlikte makalede, KYD teknolojilerine yönelik talebin artması için gerekli Şartlar ortaya konulmakta, gerçekçi karbon fiyatlamasının bu konuda önemli bir rol oynayabileceği öne sürölmekte ve basit bir iktisadi model çerçevesinde karbon vergisi ve KYD teknolojisine yönelik teşviklerin bu teknolojilerin yaygınlaşmasındaki rolü açıklanmaktadır. Çalışma, politik desteğin KYD teknolojilerinin yaygınlaşması için önemli bir etken olduğunu ve iklim değişikliğiyle mücadelede KYD teknolojileri ile yenilenebilir enerji teknolojilerinin birbirlerini tamamlayıcı nitelikte olduklarını vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İklım değişikliği, karbon yakalama ve depolama, düşük karbon ekonomisi, yenilenebilir enerji, karbon fiyatlandırması.

TRANSITION to A LOW-CARBON ECONOMY and THE ROLE of CARBON CAPTURE and STORAGE

Abstract

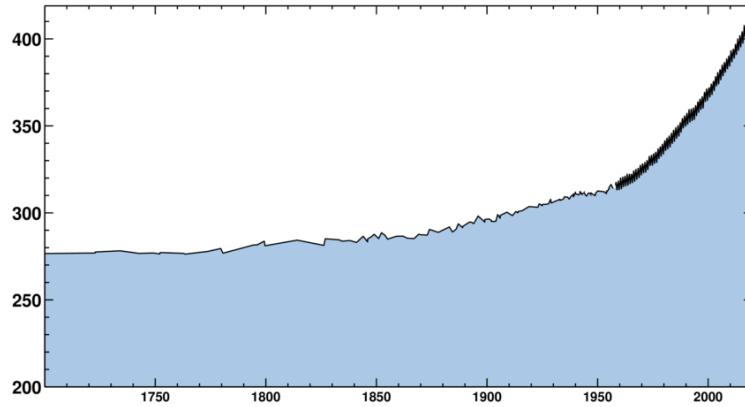
Among low-carbon energy technologies, carbon capture and storage (CCS) is a distinct type of technology. The main reason for its existence is to slow down climate change, and it is considered as one of the most cost-effective solutions for a sustainable energy transformation. Even though CCS is a crucial technology to capture emissions from emissions-intense industrial processes, such as energy, cement, steel, and petrochemicals, we are witnessing a period of slow growth in its activity. This article discusses the reasons for this slow progress and, by using a simple economic model, presents factors, such as a sufficiently high carbon price or a pure CCS subsidy, that can promote CCS. The study highlights that political support is a critical factor for the development of CCS technologies and that CCS and renewable energy are complementary in combating climate change.

Key Words: Climate change, carbon capture and storage, low-carbon economy, renewable energy, carbon pricing.

* Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İktisat Bölümü, mailbox@tuncdurmaz.com, ORCID: 0000-0001-5693-3350.

GİRİŞ

Mauna Loa Gözlemevinden sağlanan atmosferik karbondioksit (CO₂) konsantrasyonuna bakıldığında 4 Eylül 2019'daki günlük ortalama değerin milyonda 408,59 parçacığa (parts per million – ppm) ulaştığı görülmektedir. 4 Eylül 2018'de bu rakam 405,77 ppm idi. Atmosferik CO₂ konsantrasyonunun yıllar itibariyle gelişimi Şekil 1'de görülebilir.¹ Grafikten de görüldüğü üzere sanayi devrimiyle birlikte fosil yakıtların artan kullanımı neticesinde yaklaşık 260ppm olan atmosferik CO₂ konsantrasyonu yıllar içerisinde artmış ve bu artış 1950 sonrası hızlanmıştır.



Şekil 1: Yıllar itibariyle atmosferik CO₂ konsantrasyonu

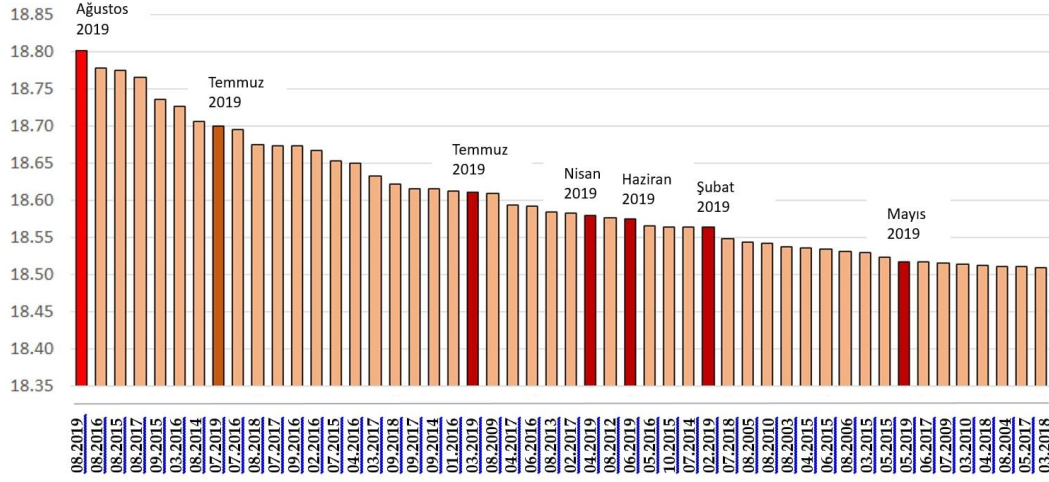
Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesinin (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) genişletilmiş yeniden yapılandırılmış deniz yüzeyi sıcaklığı verisine göre Ağustos 2019, ölçümlerin yapılmaya başlandığı 1854 yılından itibaren küresel deniz yüzeyinin en sıcak ayı olarak tarihe geçmiştir. Gerçekleşmiş en sıcak 50 aya bakıldığında (Şekil 2), hepsinin 2002 yılını takip eden yıllara tekabül ettiği görülebilmektedir.²

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneline (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) göre insan faaliyetlerinin, sanayi devrimi öncesi seviyelere kıyasla, küresel çapta yaklaşık 1 derece Celsius (°C) (muhtemelen 0,8°C ile 1,2°C aralığında) ısınmaya sebep olduğu tahmin edilmektedir. Bu şekilde sürdüğü takdirde küresel sıcaklık artışının 2040 civarında 1,5°C'a ulaşması beklenmektedir (IPCC, 2018). Dolayısıyla, yüksek miktarda karbon salımına sebep olan enerji üretim teknolojilerinin kullanımının önemli derecede azalmasını sağlayacak hızlı bir enerji dönüşümü küresel ısınmanın yıkıcı ve geri dönüşü olmayan etkilerini önlemek için oldukça önemlidir.

¹ Grafiğin 1958'e kadar olan kısmı kutuplardan alınan buz kalıpları sayesinde analiz edilebilmektedir. 1958 sonrası veriler ise Mauna Loa Gözlemevinden sağlanmaktadır (bkz. <https://www.CO2.earth/global-warming-update--Erişim tarihi: 09.09.2019>).

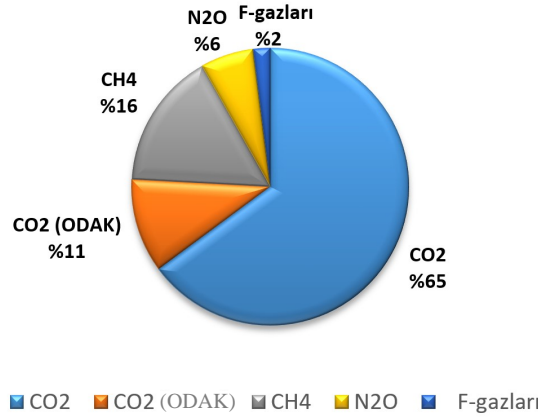
² Bkz. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html> (Erişim tarihi: 04.09.2019)

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü



Şekil 2: Küresel deniz yüzeyi sıcaklıkları: 1854'ten itibaren en sıcak 50 ay

Küresel ölçekte, insan faaliyetlerinin neden olduğu (antropojenik) sera gazları, CO₂, metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve florlu sera gazları (F-gazları) olarak dörde ayrılabilir. Şekil 3'te görülebileceği üzere CO₂ toplam emisyonlar içerisinde %76 ile en büyük paya sahip olan sera gazıdır (IPCC, 2014, Şekil SPM.1, s.7).³



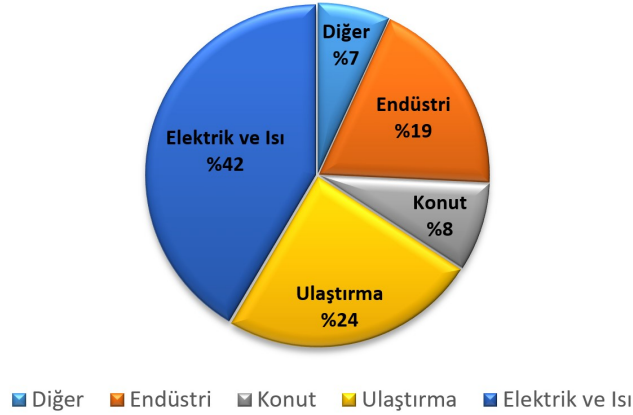
Şekil 3: 2014 itibarıyla antropojenik sera gazlarının dağılımı

Sektörel bazda bakıldığında ise (Şekil 4) elektrik ve ısı üretiminin %42 ile 2016 yılı küresel CO₂ emisyonlarında en büyük paya sahip olduğu görülmektedir.⁴ Enerji, endüstri ve ulaştırma sektörlerinin CO₂ salımlarındaki toplam payı da %85'tir.⁵

³ Şekil 3'teki CO₂ (Odak), ormancılık ve diğer arazi kullanım (ODAK) türlerinden kaynaklanan CO₂ salımlarını ifade etmektedir.

⁴ Bkz. <https://www.iea.org/statistics/CO2emissions/> (Erişim Tarihi: 19.11.2018).

⁵ Makalede emisyon ve salım birbirlerinin yerine geçecek şekilde kullanılacaktır.



Şekil 4: Sektörel bazda küresel CO₂ emisyonları

Enerji, ağır sanayi ve ulaştırma sektörleri, gelişmiş ve gelişmekte olan toplumların temelini oluşturup ekonomilerin ve ekonomik gelişmenin merkezinde olsalar da, büyük oranda CO₂ salımına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, küresel ısınma probleminin asıl unsurları olan bu sektörlerin temiz enerji üretimine geçişin de önemli parçaları olmaları beklenmektedir. Havacılık, uzun mesafeli taşımacılık, çelik ve çimento gibi bazı endüstrilerin sebep oldukları karbon salımının azaltılması ise özellikle zordur. Dolayısıyla, dekarbonizasyon sürecini başarıyla tamamlayabilme ve sürdürülebilir ve rekabetçi bir kalkınmanın sağlanabilmesi için çeşitli teknolojiler ve yaklaşımlar portföyü gerekmektedir.

Üç düşük karbonlu enerji üretim teknolojisi vardır: (i) yenilenebilir enerji; (ii) KYD'nin uygulandığı fosil enerji ve (iii) nükleer enerji. Küresel ısınma endişelerinin ciddi bir biçimde artmasından önce bile nükleer ve yenilenebilir enerji teknolojilerine önemli yatırımlar yapılmaktaydı. İlk başlarda bu teknolojilerin gelişmesinde rol oynayan bazı faktörler (örn. hava/çevre kirliliği veya enerji bağımsızlığı) hala söz konusu olsa da nükleer enerjinin çok ucuzlayacağı ve fosil yakıtların terk edileceği gibi diğer nedenler artık geçerliliğini yitirmiş durumdadırlar. Yine de, iklim değişikliği konusu öne çıkmaya başladığından beri bu teknolojiler yeni bir varoluş sebebi ve beraberinde yükseliş trendi yakalamışlardır. KYD ise farklılık arz eden bir teknolojidir. KYD'nin temel varoluş nedeni iklim değişikliğinin yavaşlatılması ya da önüne geçilmesi olup sürdürülebilir bir dönüşüm için en uygun maliyetli teknolojik çözümlerden biri olarak görülmektedir.

Küresel sıcaklığın artmaya devam etmesiyle birlikte KYD teknolojisinin kritik bir rol oynaması beklense de, uluslararası düzeyde KYD çalışmalarının ve KYD teknolojisindeki ilerlemenin yavaşladığı bir döneme şahitlik etmekteyiz (Reuters, 2019a). Dünyada 18 büyük ölçekli ticari tesis bulunsa da (Global CCS Enstitüsü, 2018, s.9) bu rakam ve dolayısıyla büyük ölçekli KYD tesislerinin sayısındaki sınırlı artış sosyal ve ekonomik refahı artırması yönünden yeterli görülmemektedir (IEEFA, 2018). Örneğin, IPCC senaryolarında 2°C hedefine ulaşmada enerji santralleri ve endüstriyel

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

işlemlerde 2020'den itibaren KYD'nin rolünde ciddi artış beklenmektedir. Bunun nedeni 2°C hedefine ulaşma maliyetinin KYD ile kayda değer bir biçimde düşmesidir (örn. Tablo SPM.2, Summary for Policymakers, IPCC, 2014.) Bir başka deyişle, KYD'nin yer almadığı senaryolarda 2°C (ya da 450ppm) hedefine çok daha yüksek maliyetlerle ulaşılmaktadır (Clark ve ark. 2014). Sıfır Karbon Platformunun yaptığı bir araştırmaya göre, küresel sıcaklık artışını 2°C ile sınırlama hedefine KYD'siz ulaşılmaya çalışılması durumunda ortalama maliyetin %70 civarında artacağı belirtilmektedir (Whiriskey, 2017).

KYD teknolojisinin önemi IPCC ve Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency–IEA) gibi birçok uluslararası kuruluş tarafından vurgulansa da büyük ölçekli KYD tesislerin sayısındaki artış sınırlı kalmıştır. Bu makalenin amacı iklim değişikliği sorununu çözmek için oldukça önemli olduğunun düşünülmesine ve fosil kaynaklı enerji, demir çelik, çimento, alüminyum ve kimya gibi karbon yoğun sanayi ve yakıt imalat sektörlerinde CO₂ salımlarının azaltılmasında kilit bir teknoloji olmasına rağmen KYD'nin neden istenilen düzeyde kullanılmadığını tartışmaktır. Bu doğrultuda çalışma, KYD teknolojilerinin küresel iklim değişikliğiyle mücadeledeki rolünü avantaj ve dezavantajlarını da içerecek şekilde farklı bakış açılarıyla tartışmakta ve yenilenebilir enerji üretimi ile karşılaştırmalı biçimde sunmaktadır. Bununla birlikte makalede, KYD teknolojilerine yönelik talebin artması için gerekli şartlar ortaya konulmakta, gerçekçi karbon fiyatlamasının (vergiler aracılığıyla ya da karbon ticareti çerçevesinde piyasada) bu konuda önemli bir rol oynayabileceği öne sürülmekte ve basit bir iktisadi model çerçevesinde karbon vergisi ve KYD teknolojisine yönelik teşviklerin bu teknolojilerin yaygınlaşmasındaki rolü açıklanmaktadır. Çalışma, politik desteğin KYD teknolojilerinin yaygınlaşması için önemli bir etken olduğunu ve iklim değişikliğiyle mücadelede KYD teknolojileri ile yenilenebilir enerji teknolojilerinin birbirlerini tamamlayıcı nitelikte olduklarını vurgulamaktadır. Türkiye için yeni sayılabilecek bu konunun çeşitli yönleriyle tartışıldığı ve farklı politika seçeneklerinin analitik bir çerçevede değerlendirildiği bu çalışmanın, özellikle Türkçe yazında, ileride yapılacak olan yeni çalışmalara yol göstermesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın izleyen bölümleri şu şekildedir. İkinci bölüm KYD teknolojisini irdelerken, üçüncü bölüm KYD'nin dünya genelindeki mevcut durumuna bakmaktadır. Dördüncü bölüm KYD'nin neden yeterince talep edilmediğini basit bir iktisadi model çerçevesinde tartışırken ve beşinci bölüm KYD'nin geçici bir çözüm olup olmadığı sorusuna cevap aramaktadır. Altıncı bölüm ise yazına ilişkin değerlendirmelere yer vermekte ve çalışmayı sonlandırmaktadır.

1. KYD Teknolojisi

KYD üç faaliyetten oluşmaktadır: (1) yakalama; (2) taşıma ve (3) depolama. Bu faaliyetler için kullanılan teknolojiler yeni olmamakla birlikte KYD yıllardır işlevsel ve kullanılabilir bir durumdadır. Örneğin, Norveç'in yirmi yıldan fazla bir süredir karbon depolama tecrübesi söz konusudur. Deniz tabanının birkaç kilometre altından elde edilen doğal gaz yüksek bir CO₂ içeriğine sahip olabilmektedir. Eğer çıkarılan gazdaki

CO₂ konsantrasyonu %2,5'ten fazla olursa, ki Norveç'in Sleipner havzasında CO₂ konsantrasyonu %9'dur, doğal gazın satılabilmesi için CO₂'nin ayrıştırılması gerekmektedir. Norveç'te 1991'de uygulamaya konulan karbon vergisiyle birlikte doğal gazdan ayrıştırılan CO₂'yi atmosfere salıp salınan CO₂'nin vergisini ödemektense CO₂'yi depolamak daha ekonomik hale geldiğinden Sleipner havzasında elde edilen doğal gazdan ayrıştırılan CO₂ birkaç yıl sonra Utsira yeraltı depolama alanına enjekte edilip burada depolanmaya başlanmıştır. Sleipner'den önce de karbon yakalama çalışmaları söz konusu olsa bunların asıl amacı yakalanan CO₂'den ticari kazanç elde etmektir. Sleipner'da ise amaç, karbon vergisinden kaynaklanan giderlerin olabildiğince azaltılmasıdır.

Elektrik santrallerinden CO₂'nin (karbonun)⁶ atmosfere salınmadan tutulması için üç farklı teknolojiye, (1) yakma sonrası (post-combustion); (2) yakma öncesi (pre-combustion); ve (3) oksijen yakıt yakma (oxy-fuel combustion), yararlanılabilir (Durmaz, 2018, Arnette, 2017 ve Leung ve ark. 2014).⁷ Birinci teknolojiye CO₂, yanma gerçekleştiği sonra oluşan baca gazından ayrıştırılır. İkinci teknolojiye CO₂, yanma gerçekleşmeden ayrıştırılır. Oksijen yakıt yakma işleminde ise fosil yakıt hava yerine saf oksijen ile yakılmaktadır. Oksijen yakıt yakma sonucunda oluşan gazlar ağırlıklı olarak su buharı ve CO₂'den oluşur ki bu durumda CO₂'nin yakalanması oldukça kolaylaşır. Yakma sonrası teknolojisi mevcut enerji santrallerinde ve sanayi tesislerinde kullanılabilirken, diğer iki teknoloji sadece yeni inşa edilmiş tesislerde kullanılabilir.

KYD'deki ikinci aşama CO₂'nin depolanacağı alana taşınmasıdır. Yakalanan CO₂'nin nakliyesi gemi veya boru hatlarıyla gerçekleştirilebilir. KYD'de üçüncü aşama tutulan ve nakliye edilen karbonun depolanması veya tekrar kullanılmasıdır. Örneğin, CO₂, derin ve verimsiz kömür damarları, derin tuz formasyonları, tükenmiş petrol, gaz ve kömür rezervlerine pompalanabileceği gibi gelişmiş petrol veya polimer, üre ve kireçtaşı üretimi gibi ticari amaçlar için de kullanılabilir. Özellikle jeolojik formasyonlar CO₂ için yüksek miktarda depolama kapasitesi sağlayabilmektedir.

2. KYD'de Mevcut Durum

Bugün itibarıyla dünya genelinde enerji ve ağır sanayi sektörlerinde faaliyet gösteren 16 KYD tesisi vardır. Bunlar yılda toplam 28 milyon ton (megaton – Mt) CO₂ yakalama kapasitesine sahip olup bu kapasitenin yaklaşık %80'i gelişmiş petrol geri kazanımından (enhanced oil recovery – EOR) kaynaklanmaktadır.⁸ Elektrik sektörüne bakıldığında, dünyada faaliyette olan ve biri Kanada (Boundary Dam Projesi, Saskatchewan) ve diğeri de Amerika Birleşik Devletleri'nde (Petra Nova Carbon Capture projesi, Teksas) olmak üzere sadece iki KYD tesisi vardır. Boundary Dam KYD tesisinin yıllık yakalama kapasitesi 1 MtCO₂ iken Teksas'taki tesisin yıllık yakalama kapasitesi 1,4 MtCO₂'dir. Her iki tesis de sonradan uyarlanmış (retrofit edilmiş) yakma sonrası teknolojiye sahip kömürle çalışan elektrik santralleridir. Ek olarak, dünya

⁶ Makalede CO₂ ve karbon birbirlerinin yerine geçecek şekilde kullanılacaktır.

⁷ Endüstriyel uygulamalarda KYD için bkz. IEA & UN (2011).

⁸ EOR: enhanced oil recovery (gelişmiş petrol geri kazanımı).

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

genelinde enerji sektöründe geliştirme aşamasında olan yedi KYD projesi var. Bu yedi tesis faaliyete geçtiğinde yıllık toplam yakalama kapasite yaklaşık 13 MtCO₂'ye çıkacaktır. CO₂'nin oksijen yakıt işlemleriyle bir doğal gaz santralinde kullanılacağı ABD de dahil olmak üzere (NET Power, 50-MW temiz enerji tesisi, La Porte, Teksas) birçok KYD inovasyon projesi de devam etmektedir (bkz. IEA, 2019).⁹

Son yıllarda sanayide ve yakıt imalatında KYD'den daha fazla faydalanılmaya başlanmıştır. Örneğin, Abu Dabi, Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki bir demir-çelik sanayi tesisinin neden olduğu CO₂ salımlarını yakalamak üzere Al Reyadah KYD tesisi 2016 yılında faaliyete geçmiştir. Bunu takiben bir yıl sonra Illinois, Amerika Birleşik Devletleri'nde mısırdan etanol (biyoenerji) üretiminden kaynaklanan CO₂'yi yakalayıp depolayacak Illinois Endüstriyel KYD tesisi 2017'de faaliyete geçmiş ve Mart 2018'e gelindiğinde yaklaşık 640.000 MtCO₂ depolanmıştır (Gollakota & McDonald, 2018). Şubat 2017 itibarıyla, Daqing, Çin, petrol sahasında, EOR amacıyla günlük ortalama 330 tCO₂ petrol sahasına enjekte edilmiştir (Ma ve ark. 2018). Bu miktarın 2019 itibarıyla 550 tCO₂'ye çıktığı tahmin edilmektedir (Global CCS Institute, 2019). EOR'a bir başka örnek Chevron'un Avustralya'daki Gorgon depolama projesidir. Projeye amaçları Gorgon havzasında elde edilen doğal gazdaki %14'lük CO₂ oranını düşürülmesi ve Gorgon'daki CO₂ salımlarının %40 azaltılmasıdır (Reuters, 2019b). Gorgon depolama faaliyete geçmesiyle birlikte 2019 yılı itibarıyla ağır sanayi ve yakıt imalatı sektörlerindeki KYD tesisi sayısı 17'ye yükselmiş olup ilave sekiz proje de geliştirme aşamasında veya geliştirme aşamasının son evresindedir (IEA, 2019).

Zaman içinde KYD'ye olan talebin arttığı görülse de, KYD, fosil yakıt kaynaklı enerji ve sanayi üretiminden kaynaklanan CO₂ salımlarının ciddi bir miktarda azalması için yeterli olacak ölçüde sahip değildir. Örneğin, IEA enerji sisteminin dekarbonizasyonunda KYD'ye önemli bir rol atfederken, bu rolün IEA senaryolarından son yıllarda aşağı doğru çekildiğini görmekteyiz (bkz. Durmaz ve Schroyen, 2020, Tablo 1). Bir sonraki bölüm KYD'ye olan düşük talebin nedenlerini irdelenecektir.

3. KYD'ye Yeterli Talebin Gelmemesi

İklim değişikliğiyle mücadelede büyük önem verilmesine karşın KYD'nin beklenildiği kadar talep edilmemesinin birkaç nedeni olabilir. Örneğin, KYD'nin uygulama maliyeti IEA, IPCC ve diğer büyük ölçekli model ve senaryo analizlerinde varsayıldığından daha yüksek gerçekleşmiş olabilir. Diğer taraftan, rüzgar ve güneş gibi diğer 'sıfır emisyon' teknolojilerinin maliyetlerinin öngörülenden daha fazla düşüş göstermiş olabileceği de düşünülebilir. KYD ve diğer sıfır emisyon teknolojilerinin maliyetleri hakkındaki bilgi eksikliklerine rağmen KYD, çeşitli senaryo analizlerinde 2°C hedefine ulaşılmasında önemli rol oynamaktadır (Clark et al. 2014, Whiriskey, 2017).

⁹ Demonstrasyon aşaması başarılı olursa, NET Power, 300 MW'lık ticari tesislerin küresel çapta dağıtımına 2021'de başlayacağını belirtmiştir (POWER, 2019).

3.1 Piyasa Aksaklıkları ve KYD Politikaları

Günümüzde KYD'den yeterince faydalanılmamasının bir başka nedeni, belki de en önemlisi, piyasa aksaklıkları ve bu aksaklıkların giderilememesidir. Örneğin, fosil yakıt kullanımının sebep olduğu en önemli (negatif) dışsallık ve günümüzün en büyük piyasa başarısızlığı, iklim değişikliğine sebep olan sera gazlarının, özellikle de CO₂'nin, fiyatlandırılmamasıdır. Bu durum, fosil yakıt kullanımının ve bu kullanımdan kaynaklanan sera gazları salımının toplum için (en) faydalı düzeyde yapılamamasına sebep olmaktadır. Burada en faydalı düzeyden kastedilen, fosil yakıt kullanımından elde edilen ekonomik faydanın çevreye verilen zarara karşı dengelenmesidir.¹⁰ Dolayısıyla, üretiminden elde edilen fayda ve üretimin neden olduğu çevre kirliliğinin maliyetleri de dahil tüm maliyetlerin hesaba katılması KYD'ye gelebilecek talep için oldukça önem arz etmektedir.

KYD'nin talep edilmesi ve teknolojinin zaman içinde daha verimli hale gelmesi için ekonomik ve politik önlemlerin alınması, örneğin, yeterli düzeyde belirlenecek bir karbon vergisi, çok önemlidir (Durmaz, 2018). Karbon vergilerinin veya CO₂ emisyon fiyatlarının yeterince yüksek olmaması nedeniyle yenilenebilir enerji teknolojileri ve/veya CO₂ salımına neden olan geleneksel teknolojiler KYD seçeneğinden göreceli olarak daha ucuz hale gelmektedir. Karbon vergisinin yeterince yüksek olmamasının KYD'ye olan talebi nasıl etkilediği tek dönemli basit bir ekonomik model yardımıyla gösterilebilir. Buna göre, sebep olduğu CO₂ emisyonları nedeniyle vergilendirilen bir fosil enerji üreticisinin kar maksimizasyonu problemi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \max_{(x,k)} \quad & p x - c(x) - v(x - k) - c_k(k) \\ \text{k. s. } \quad & x \geq 0, k \geq 0 \text{ ve } x \geq k \end{aligned}$$

Yukarıdaki problemde p enerjin birim fiyatını, x fosil enerjiyi, $c(x)$ toplam enerji üretim maliyetini, v emisyon vergisi, k ve $c_k(k)$ ise sırasıyla KYD ve toplam KYD maliyetini göstermektedir. Modeli basitleştirmek amacıyla enerji üretimi ve CO₂ salımı arasındaki ilişkinin birebir olduğunu ve koşullar sağlandığında emisyonların %100'ünün yakalanıp depolanabileceğini varsaydık.¹¹ Dolayısıyla, x kadar enerji üretiminin sebep olduğu emisyon miktarı da x kadar olmaktadır ve fosil enerji üretimi veya emisyonların vergilendirilmesi arasında bu basitleştirmeden ötürü bir fark yoktur. Fosil enerji ve KYD toplam maliyetlerinin fonksiyonel formları sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} c(x) &= \frac{\alpha_1}{2} x^2, \quad \alpha_1 > 0, \\ c_k(k) &= \alpha_2 k + \frac{\alpha_3}{2} k^2, \quad \alpha_2, \alpha_3 > 0. \end{aligned}$$

¹⁰ Daha doğru bir ifadeyle, en faydalı düzeyle kastedilen optimal üretim düzeyinde son birim üretimden elde edilen ekonomik faydanın aynı üretim düzeyindeki birim üretim maliyeti ve negatif dışsallıktan kaynaklanan birim maliyetin toplamına eşit olmasıdır.

¹¹ KYD oranları %90-95'e kadar çıkabilmektedir (Leung ve ark. 2014).

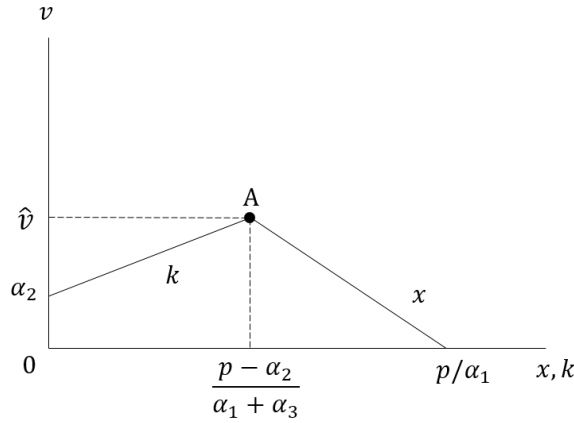
Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

Son olarak, analizi basitleştirmek amacıyla yenilenebilir kaynaklarla enerji üretimini analize dahil etmedik.

Fosil enerji üreticisinin karını maksimize eden x ve k 'den hareketle aşağıdaki grafiği (Şekil 5) çizebiliriz. Karbon vergisinin olmadığı durumda fosil enerji üretimi p/α_1 ile maksimum seviyesine ulaşırken KYD'ye olan talep sıfırdır. Bu durum vergi seviyesi yeterince yüksek olmadığı her durum için ($v \leq \alpha_2$) geçerlidir. Her ne kadar fosil enerji üretimi vergi seviyesi ile birlikte azalsa da yeterince yüksek bir karbon vergisi ($v > \alpha_2$) KYD için talep yaratacaktır. KYD'ye olan talep karbon vergisinin artmasıyla devam edecek ve vergi yeterince yüksek bir değer aldığında, yani

$$\hat{v} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_3 p}{\alpha_1 + \alpha_3},$$

olduğu durumda (Şekil 4'te A noktası), emisyonların %100'ünün yakalanıp depolandığı ve beraberinde sıfır karbonlu üretimin sağlandığı bir sonuç ortaya çıkacaktır. Bu seviyeden (\hat{v}) yüksek CO₂ vergisinin fosil enerji talebi üzerinde etkisinin olmaması bütün emisyonların atmosfere salınmadan yakalanıp depolanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4: Karbon (CO₂) vergisinin KYD ve fosil enerji üretimine etkileri

Farklı karbon yakalama teknolojileri için maliyet tahminleri Tablo 1'de görülebilmektedir. Örneğin, Rubin ve ark. (2015)'a göre süperkritik pulverize kömür santralinde ortalama karbon yakalama maliyeti birim ton başına 63 ABD Dolarıdır (\$). Dolayısıyla, ve yukarıdaki analizden de hareketle, ton başına 63\$'dan düşük bir karbon vergisi, süperkritik pulverize kömür santralinde karbon yakalanması için yeterli değildir. Yine tablodan görülebileceği üzere, ortalama en yüksek yakalama maliyetinin doğal gaz kombine çevrim santralleri için söz konusu olduğu görülmektedir. Enerji santrallerindeki yakalama maliyetlerindeki farklılıklar, tüm enerji santrallerinde karbonun yakalanması hedeflendiğinde karbon vergisinin en yüksek maliyetli teknolojiye göre belirlenmesini gerektirecektir.

Tablo 1: Farklı karbon yakalama teknolojilerinin maliyet tahminleri.

	SPK		DKC		EGKC		OKSI-SPK	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Kaçınılan (avoided) CO2 maliyeti (\$/tCO2)	63	59	87	80	46	43	62	52

Not: Farklı karbon yakalama teknolojilerinin maliyet tahminleri. SPK: Süperkritik pulverize kömür; DKC: Doğal gaz kombine çevrim; EGKC: Entegre gazlaştırma kombine çevrim; OKSI-SPK: SPK santralinde oksijen yakıt yakma. A ve B sütunlarındaki rakamlar, sırasıyla, Rubin ve ark. (2015) ve Finkenrath (2011) makalelerinden alınmıştır. Rakamlara nakliye ve depolama maliyetleri ve olası EOR etkileri dahil değildir.

Diğer düşük emisyonlu teknolojilerde olduğu gibi KYD'nin ticarileşmesinin (yani KYD kullanımının karlı bir hal alabilmesinin) ilk aşamasında KYD için yapılan yatırımın güvence altına alınması politik desteğe bağlı olacaktır. Yeterli düzeyde yüksek bir karbon fiyatı (veya CO₂ vergisi) önemli ve uzun vadeli bir yatırım sinyali sağlayabilse de başlangıçta – erken yatırımın sağlanabilmesi amacıyla – tamamlayıcı ve belli bir hedefe yönelik politik önlemler gerekmektedir. Ulusal tercihlere ve koşullara bağlı olarak yeni düzenlemeler (regülasyon), piyasa bazlı oluşturulacak çerçeveler ve vergi istisnaları, teşvikler, destekleme tarifeleri, kamu alımları, düşük karbonlu ürün teşvikleri ve KYD yükümlülükleri ve sertifikaları gibi araçlar ve bu önlemlere örnek gösterilebilir.

Karbonun vergilendirilmediği durumda ($v = 0$) KYD'ye yapılacak finansal teşvikin KYD'ye olan talebi nasıl etkilediğini anlamak için yukarıdakine benzer bir modellemeden faydalanabiliriz. Fosil enerji üreticisinin kar maksimizasyonu problemi aşağıdaki gibidir:

$$\max_{(x,k)} p x - c(x) - c_k(k) + s k$$

$$k. s. x \geq 0, k \geq 0 \text{ ve } x \geq k$$

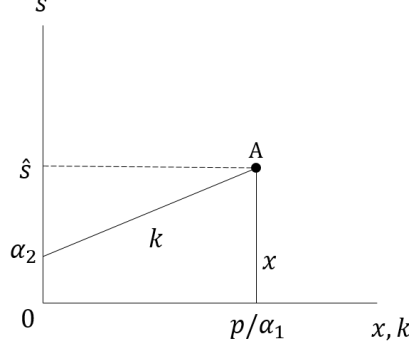
Problemde, KYD'ye verilen teşvikler birim KYD başına s ile gösterilmektedir. Fosil enerji üreticisinin karını maksimize eden x ve k 'nin teşvik miktarı ile olan ilişkisi Şekil 5'da görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere KYD'ye yeterli talebin oluşması için birim teşvik miktarının da yeterli düzeyde ($s > \alpha_2$) olması gerekmektedir. Birim teşvik miktarının

$$\hat{s} = \frac{\alpha_3}{\alpha_1} p + \alpha_2$$

olduğu durumda emisyonların %100'ü yakalanıp depolanacaktır (Şekil 5'da A noktası). Önceki problemde farklı olarak bu problemde fosil enerji üretimi vergilendirilmediğinden p/α_1 seviyesinde sabittir. Yeterli yükseklikte bir teşvik miktarı bütün emisyonların yakalanıp depolanmasına sağlayacaktır. Fosil enerji üretimi bu problemde vergilendirilmediğinden, enerji üretim seviyesi bir önceki probleme kıyasla daima daha fazla olacaktır. Enerji üretimini negatif etkilemediğinden ve birim KYD

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

maliyetini düşürdüğünden, teşviklerin üreticiler tarafından daha çok tercih edilen bir enstrüman olduğu aşikardır.



Şekil 5: Teşvik ödemelerinin KYD ve fosil enerji üretimine etkileri

Bilgi taşması (knowledge spillover), pozitif dışsallık yaratmasından ötürü, bir başka piyasa aksaklığıdır. Olgunlaşmamış teknolojilerin detaylı bir test sürecinden geçirilmesi yoluyla kişi veya kurumlar genellikle teknolojiyi iyileştirme fırsatları yakalamaktadır. Bu, birçok yeni tesis inşa edildiğinde, yakalanıp depolanmış CO₂'nin birim maliyetinin düşmesi anlamına gelir. KYD teknolojisi üreticileri (kendilerinden bağımsız olarak) kurulan her tesisten yeni bilgiler öğrenebildikleri sürece pozitif öğrenme dışsallıkları söz konusu olacaktır. Bu süreçte yatırım yapan kişi ve kuruluşların gerçekleştirdikleri inovasyonlar ve geliştirdikleri teknolojilerden diğer kişi ve kuruluşların rahatça faydalanabilmesi durumunda bu kişiler yeterince kar elde edemeyeceklerdir. Dolayısıyla, karbon fiyatlandırmasına ek olarak KYD teknolojilerine parasal teşvikler verilmesi karlılıktaki bu olumsuzlukları giderebilir. Bu durum, politik desteğim önemini ortaya koyan bir başka örnektir.

3.2 Belirsizlikler

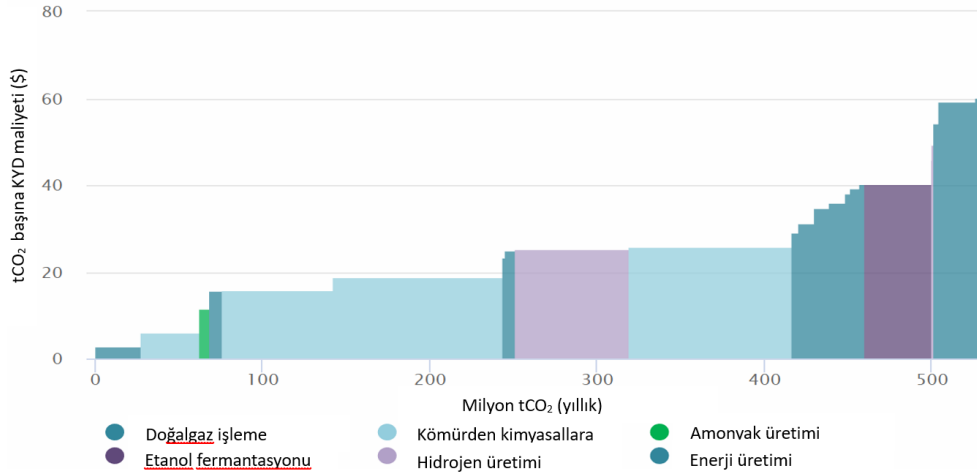
Gelecekte uygulanacak politikalar konusundaki belirsizlikler, örn. ülkelerin Paris İklim Anlaşmasının hedeflerine ulaşmak için yeterli önlemleri alıp almayacakları, yenilenebilir enerji yatırımlarına kıyasla, KYD yatırımları için daha fazla risk arz edebilmektedir. Buna benzer bir durum, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sisteminde yaşanan karbon fiyatlarındaki büyük dalgalanmaların KYD yatırımları için ciddi olumsuzluklar yarattığını gösteren Walsh ve arkadaşları (2014) tarafından da desteklenmektedir. Bu bakımdan, yazarlar, CO₂'ye vergi getirilmesinin KYD'ye talep yaratması bakımından daha iyi sonuçlar doğurabileceğini belirtmektedirler. Dahası, KYD'nin yatırım maliyetlerindeki belirsizlikler, teknolojinin oldukça sınırlı bir şekilde yayılmasının önemli bir başka nedeni olarak görülmektedir (Durmaz, 2018, Lohwasser ve Madlener, 2012).

KYD'nin başarısızlığının diğer nedenleri olarak (i) tutulan karbonun depolama olanaklarındaki eksiklikler; (ii) sektörde çalışabilecek profesyonellerin eksikliği; (iii) bu profesyonellerin petrol ve gaz endüstrisi gibi yüksek ücretli endüstrilerde istihdam edilmesi; (iv) yasal koşulların oluşmaması; ve (v) jeolojik formasyonlarda depolanan

CO₂'nin yüzeye kaçma riskine karşı duyulan toplumsal hassasiyet gösterilebilir (Budinis ve ark. 2018, Bui ve ark. 2018; Herzog, 2011).

3.3 Yapararak öğrenme

Yeterli olgunluk seviyesine ulaşamamış teknolojiler için öğrenme eğrileri (*learning curves*) üretim ve maliyet verilerini kullanarak tahmin edilebilir. Buna göre öğrenme eğrisi, yani verilere en iyi uyumu sağlayan fonksiyonel form, üretim seviyesi iki katına çıktığında üretimin birim maliyetinde belirli bir yüzdesel azalmayı verir. Öğrenme eğrileri, enerji ve iklim değişikliğiyle ilgili birçok ampirik çalışmada kullanılmıştır. İlk olarak, güneş ve rüzgar enerjisindeki birim maliyetlerin toplam üretimin iki katına çıktığı her durum için %8-22 düştüğünü gösteren ekonometrik çalışmalar yapılmıştır (bkz. McDonald ve Schrattenholzer, 2001). Daha yeni bir çalışmada elektrikli otomobiller için üretilen lityum pillerin üretiminde güçlü bir öğrenme eğilimi görülmektedir. Buna göre, lityum pillerin üretimindeki artış devam ettiği takdirde maliyetler 2025 yılına kadar yaklaşık %75 oranında düşebilir (Hensley ve ark. 2012).



Şekil 6: Çeşitli KYD projelerinin başa baş yatırım maliyetleri
Kaynak: Carbon capture, utilisation and storage: A critical tool in the climate energy toolbox, IEA. <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/policiesandinvestment/> (Erişim Tarihi: 30.05.2019)

Yapararak öğrenmenin (*learning-by-doing*) ve öğrenme eğrilerinin öneminden hareketle hem IEA hem de IPCC'nin senaryolarında KYD için önemli bir öğrenme potansiyeli varsayıldığı düşünülebilir. Örneğin, Şekil 6'de görülebileceği üzere, IEA, 20\$tCO₂'lik bir karbon fiyatının doğal gaz işleme, amonyak üretimi ve kömürden üretilen kimyasalların neden olduğu CO₂'yi tutacak KYD yatırımlarını tetikleyeceğini, 40\$tCO₂'lik bir karbon fiyatının ise birçok sektörde büyük KYD yatırımlarını harekete geçireceğini öngörmektedir. Ek olarak, 60\$tCO₂'lik bir karbon fiyatının ilgili tüm sektörlerde KYD yatırımlarına sebep olacağı beklenmektedir. Şekilden ortaya çıkan

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

sonuçlar yeterli düzeyde belirlenecek bir karbon fiyatını gerektirdiğinden politika yapıcıların desteğinin gerekliliği açıktır.

4. KYD'nin geleceği: KYD geçici bir çözüm mü?

Çeyrek asırdan fazla bir süredir faaliyette bulunmasına rağmen KYD'nin geleceğiyle ilgili önemli belirsizliklerin olduğu söylenebilir. Bir önceki bölümden de anlaşılacağı üzere bunun en önemli nedeni teknik nedenlerden ziyade politik nedenlerdir. KYD, CO₂'yi atmosfere salmaktan her zaman daha pahalı olacağından KYD için talep ve beraberinde pazar oluşturacak politikalar (örn. CO₂ emisyonlarının fiyatlandırılması) olmadığı sürece (karbon yakalama, kullanımı ve depolama (KYUD) veya EOR gibi durumlar hariç) KYD için ekonomide talep olamayacaktır (bkz. Durmaz, 2018). KYD'den büyük ölçekte faydalanabilmek ve KYD'nin iklim değişikliğiyle olan mücadelede etkili olabilmesi için güçlü ekonomik saiklere ihtiyaç vardır. Bu politikalar KYD'yi genel olarak iki şekilde teşvik edebilir. Bunlardan birincisi talebin getirdiği politika diğeri de teknolojinin (ileri) sürüklediği politikadır. Talebin getirdiği politika araçları karbonun fiyatlandırılması (karbonun vergisi ve emisyon haklarının ticareti—cap and trade), zorunlu minimum yenilenebilir enerji standardı getiren yenilenebilir (enerji) portföy standartları ve sabit fiyat garantileri şeklinde sınıflandırılabilir.¹² İlgili teknolojileri ve bu teknolojilerle üretimi teşvik eden araştırma ve geliştirme çalışmaları (Ar-Ge), vergi istisnaları (gelir vergisi stopajı teşviki, sigorta primi desteği, damga vergisi istisnası vb.), doğrudan yatırım ve özel finansman teşvikleri de teknolojinin sürüklediği politikanın araçlarına örnek olarak verilebilir.

İktisatçılar arasında karbon emisyonlarının neden olduğu negatif dışsallıkların fiyatlandırılmasının en etkili ve verimli politika olacağına dair güçlü bir dayanışma vardır.¹³ Karbon fiyatının belirlenmesi için başvurulabilecek yöntemlerden biri salınan karbonun vergilendirilmesidir. Bir diğer yöntem de emisyonlar için bir üst sınırın belirlenmesi ve bu sınır üzerinden emisyon haklarının ticaretidir. Karbon salımının vergilendirilmesine piyasa aktörleri karbon salımlarını azaltarak tepki verir (bkz. Şekil 4). Karbon fiyatı ne kadar yüksek olursa salımlar da o kadar düşecektir. Emisyon üst sınırı ve ticaretinde belirlenen tavan emisyon miktarının aşılmasını sağlayacak olan karbon fiyatı piyasa dinamikleriyle belirlenir. Karbonun fiyatlandırıldığı her iki durumda da KYD gibi düşük emisyonlu teknolojilere olan talep artacaktır.

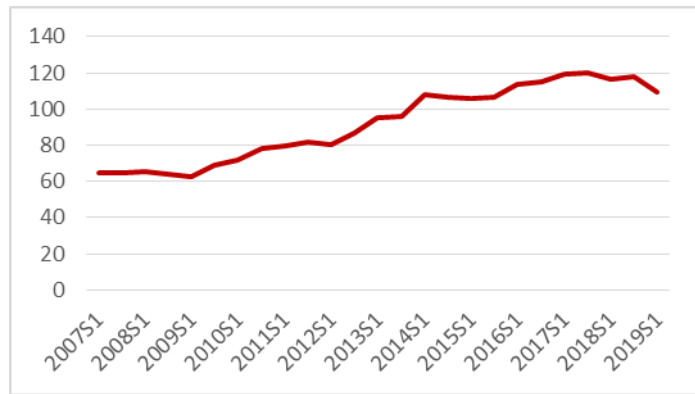
Karbon fiyatı belirlemede temel sorun karbon fiyatının üreticileri farklı şekillerde etkileyebilmesidir. Dolayısıyla salınan karbonun fiyatlandırılmasıyla bir kesim kazanırken bir başka kesim de kaybedecektir. Örneğin, karbonun fiyatlandırılması sonrası fosil yakıt kullanan üreticilerin pazar payı düşecek, yenilenebilir enerji

¹² Yenilenebilir portföy standartlarıyla kastedilen, elektrik üreticilerinin yenilenebilir portföy standartlarıyla getirilen minimum portföy şartını karşılamak amacıyla fosil yakıtlarla ürettikleri birim enerji başına yenilenebilir enerji sertifikası (renewable energy certificate) satın almasıdır.

¹³ Bkz. Ekonomistlerin Karbon Fiyatlandırması Deklarasyonu: Economists' Statement on Carbon Pricing - <https://www.eaere.org/statement/> (Erişim Tarihi: 07.07.2019)

kullanan üreticiler ve yenilenebilir enerji üreticilerinin pazar payları artacaktır. Dolayısıyla, karbonun vergilendirilmesi veya emisyon üst sınırı ve ticareti, (özetle, karbon fiyatlandırılması) en uygun seçenek olarak görülse de, tekrar seçilememeye korkusu yaşayan siyasetçiler, karbonun fiyatlandırılmasıyla seçmenlerin ciddi biçimde etkilenebilecek olmasından ötürü karbonun fiyatlandırılmasına oldukça mesafeli yaklaşabilmektedirler. Bu sebeple, teknolojinin sürüklediği politikalar siyasetçiler tarafından daha çok tercih edilmektedir. Karbonun fiyatlandırıldığı durumlarda dahi teknolojinin sürüklediği politikalar yeni ve temiz teknolojilerin üretilmesi ve teknolojilerin geliştirildiği ilk zamanlarda öğrenmeyi teşvik etmesinden dolayı oldukça önemlidir.

Avrupa'da yaygın uygulamalardan biri güneş panelleri ve rüzgar türbinleri vasıtasıyla üretilip şebekeye beslenen elektrik için üreticilere verilen sabit fiyat garantileridir. Bu gibi uygulamaların ortak noktası, uygulamanın yapıldığı ülkelerin siyasi liderlerinin yenilenebilir enerji teknolojilerini teşvik etmek istediklerine dair karar almış olmalarıdır. Çoğu kez bu uygulamalar seçmenler arasında da popülerdir. Lakin, teşvik edici bu uygulamalar, vergi istisnaları gibi durumlarda vergi mükellefleri tarafından, portföy standartları veya sabit fiyat garantilerinde ise daha yüksek elektrik fiyatları vasıtasıyla karşılanmaktadır. Almanya'da uygulamaya konulan Energiewende, yani düşük karbonlu, çevreye duyarlı, güvenilir ve uygun fiyatlı bir enerji üretim arzına geçiş planının (daha çok yenilenebilir enerji üretimi için sabit fiyat garantilerinin verilmesi vs.) elektrik fiyatı üzerindeki etkisine bakıldığında hanehalkı perakende elektrik fiyatının 2007'de kiloWatt saat (kWh) başına 0.20 Avro'dan 2019'da 0.31 Euro'ya çıktığı görülmektedir. Bu %52,5'lik bir artışa tekabül etmektedir. Şekil 7, Almanya'da vergi ve harçların elektrik fiyatında yarattığı yüzdesel artışı göstermektedir. Buna göre 2007 yılının ilk yarısında vergi ve harçların sebep olduğu %65'lik fiyat artışı 2019'da %110'a çıkmıştır.



Şekil 7: Almanya'da vergi ve harçların elektrik fiyatında yarattığı artış (%) (Kaynak: Eurostat - Hanehalkı elektrik fiyatları - 2007 itibariyle altı aylık veriler. <https://ec.europa.eu/eurostat> (Erişim Tarihi: 25.09.2019))

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

Elektrik fiyatları ve toplanan vergilerde bahsi geçen destekler nedeniyle devlet bütçesi üzerinde oluşan ek maliyetler detaylandırılmadığından çoğu kişinin bu teşvikler için para ödediğini fark etmesi oldukça güçtür. Masrafların üstünün örtülebilmesi ve beraberinde meydana gelebilecek siyasi baskıları önleyebilmesi sebebiyle politikacılar sabit fiyat garantisi vb. destekleri daha çok tercih etmektedirler. Dolayısıyla, ekonomistler salınan karbonun fiyatlandırılmasını ve dolayısıyla talebin getirdiği politikaların daha etkin ve düşük maliyetli olacağını savunsalar da politik arenada teknolojinin sürüklediği politikaların uygulanması daha kolay olabilmektedir. Bir başka sorun da teknoloji seçimlerinin politika yapımcılarının tercihlerine bağlı olmasıdır. Bu nedenle, politik desteği arkasına alamayan teknoloji geliştirme ve uygulama programlarının başarıya ulaşması güçtür. Talebin getirdiği politikalar en uygun teknolojiyi belirleme kararını piyasalara bırakabildiğinden çok daha etkin sonuçlar verebilmektedir.

Teknolojinin sürüklediği politikalara bakıldığında vergi istisnaları oldukça tercih edilmektedir. Bu politikalar yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmesi ve yaygınlaşması bakımından da önemli bir rol oynamıştır. Yenilenebilir enerji destekleri gibi kapsamı geniş olmasa da KYD için de teknolojinin sürüklediği programlar söz konusudur. Norveç, İngiltere, Kanada, Avustralya, Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Almanya, Hollanda ve İzlanda gibi ülkelerde KYD Ar-Ge çalışmalarına önemli destekler verilmiş ve verilmeye devam etmektedir. İlgili Ar-Ge çalışmalarına örnek olarak hidrojen ve CO₂'den metan ve CO₂ emisyonuna sebebiyet vermeden demir üretimi (bkz. Licht et al. 2010) verilebilir.

Ek olarak, düşük karbonlu yenilikçi enerji üretimi projeleri için dünyanın en büyük finansman programlarından biri olan ve Avrupa Birliği tarafından finanse edilen NER300 programı, KYD ve inovatif yenilenebilir enerji teknolojilerinin Avrupa Birliği içerisinde ticari ölçekte kullanılıp etkin bir şekilde işleyebildiklerini gösterebilmek için tasarlanmıştır.¹⁴

Alberta Eyaletindeki petrol kumlarında (oil sands) bulunan ham petrol Suudi Arabistan'daki ham petrol rezervinden sonra dünyanın en büyük ikinci petrol rezervinin Kanada'da olmasını sağlasa da Suudi petrolünden farklı olarak, bu kumlardan elde edilen petrol üretiminin karbon ayak izi oldukça büyüktür. Bu büyük karbon ayak izi özellikle Kaliforniya gibi çevreye daha duyarlı eyalet ve ülkelerin Alberta petrolünü reddetme politikalarıyla sonuçlanmıştır. Karbon ayak izini küçültüp bu durumu bertaraf etme çabalarının bir sonucu olarak Alberta hükümeti, Quest KYD projesi ve bir CO₂ boru hattının inşası ile sonuçlanan 2 milyar dolarlık bir KYD fonu oluşturmuştur (Lipponen ve ark. 2017).

Norveç'in KYD yatırımlarındaki öncü rolü uzun zamandır bilinmektedir. 2007'de yaptığı bir konuşmada eski Norveç başbakanı Jens Stoltenberg, Norveç'in Mongstad şehrinde bir karbon yakalama tesisinin hayata geçirileceğini ilan edip projeyi Norveç'in "aya iniş" (moon-landing) projesi olarak nitelendirmiştir. Bu karbon yakalama tesisinde Ar-Ge çalışmalarına devam edilse de yakalama, taşıma ve

¹⁴ Bkz. NER 300 Programı: <https://setis.ec.europa.eu/NER300> (Erişim Tarihi: 10.09.2019).

depolama faaliyetlerinin tümünün işlevsel olduğu tam ölçekli bir KYD tesisi planı 2013 senesinde rafa kaldırılmıştır. Tam ölçekli bir KYD tesisini hayata geçirme çabası Norveç hükümetin 2018'de KYD projeleri için başlangıç/planlama aşaması mühendisliği tasarımı (Front-End Engineering Design – FEED) çalışmalarına 80 milyon Norveç Kronu (yaklaşık olarak 9,8 milyon ABD Doları) yatırım yapma planıyla¹⁵ yakın zamanda yeniden başlamıştır. Buna göre, gösterilen yönetim becerileri ve göreceli olarak daha düşük maliyet verisi nedeniyle ilk aşamada Norcem'in Brevik'teki çimento fabrikasında CO₂ yakalama için bir FEED çalışması finanse edilecektir.¹⁶ Bu FEED çalışmasını takiben Norveç Parlamentosu, 2020/2021 yürütme döneminde nihai bir yatırım kararı almayı planlamaktadır (Gardarsdottir ve ark. 2019).

TARTIŞMA VE SONUÇ

KYD bir fosil yakıt teknolojisi olarak görülse de KYD'nin iklim değişikliği problemini çözmeye yarayan bir teknoloji (ya da teknolojiler topluluğu) olduğunu gözden kaçırmamak gerekir. Bu nedenle, KYD'nin kaderi, iklim değişikliğini nasıl ele aldığımızla iç içe geçmiş durumdadır. Dolayısıyla, iklim değişikliği ile ne kadar kararlı mücadele edilirse KYD'yi daha yaygın olarak kullanmak için de o kadar çok fırsat doğacaktır.

KYD'nin enerji dönüşümünde geçici bir çözüm sağlayacağı düşünülse de, Grimaud ve ark. (2011), Kalkuhl ve ark. (2015) ve Durmaz ve Schroyen (2020) KYD'nin yenilenebilir enerjiye dayalı bir ekonomiye geçiş sürecinde ciddi ekonomik katkılar sunabileceğini ortaya koymaktadır. Birçok kurum ve kuruluş tümüyle yenilenebilir enerjiye bağlı bir ekonomiye geçmenin daha iyi olacağını ve KYD'nin fosil yakıtların kullanım süresini gereksiz yere uzattığını düşünse de fosil bazlı bir takım üretim süreçlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının önüne geçilmesinde KYD'nin pek bir alternatifi yoktur. Dolayısıyla, bu ve benzeri muhakemelerin oldukça dikkatli yapılması gerekmektedir. Uzun dönemde küresel sıcaklık artışının 2°C altında tutulmasını hedefleyen Paris Anlaşmasına uyulması ve düşük karbonlu ekonomiye küresel düzeyde geçilmesi hususu KYD'nin gelecekteki rolü açısından oldukça önemlidir.

Sadece yenilenebilir ve beraberinde üretimini talebe göre kısıp artıramayan (non-dispatchable) bir enerji portföyünün enerji arz güvenliği açısından büyük riskler taşıyacağı da açıktır. Buna çözüm olarak rüzgar ve güneş enerjisi çiftlikleri portföyün oluşturulması, enerji depolama sistemlerinin kurulması, talep tarafı yönetimi (demand side response), dağıtık üretim gibi öneriler getirilse de bu öneriler KYD ile sağlanacak

¹⁵ Petrol ve Enerji Bakanlığının 15 Mayıs 2018 tarihli basın bülteni: The Norwegian Government continues with the planning of a demonstration project for CO₂ capture, transport and storage. Kaynak: [https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/the-norwegian-government-continues-with-the-planning-of-a-demonstration-project-for-CO₂-capture-transport-and-storage/id2601399/](https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/the-norwegian-government-continues-with-the-planning-of-a-demonstration-project-for-CO2-capture-transport-and-storage/id2601399/) (Erişim Tarihi: 29.09.2019)

¹⁶ Çimento üretiminin, küresel sanayi CO₂ emisyonlarının %8'ine sebep olduğu tahmin edilmektedir (Lehne ve Preston, 2018).

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

çözümlere nazaran daha maliyetli olabilirler.¹⁷ Örneğin, Sinn (2017), Almanya'da sadece yenilenebilir enerjiye sahip bir güç sistemi için yaptığı analizde, yenilebilir enerjinin enerji portföyündeki oranını %50'den daha yukarıya çekmenin çok zor olduğunu tespit etmektedir. Ek olarak, bazı üretim tesislerinde (örn. çimento ve hazır beton, alüminyum, doğal gaz, hidrojen vb.), CO₂ salımları üretimde kullanılan endüstriyel işlemlerden kaynaklanmaktadır. Son olarak, KYD, karbon fiyatlaması vb. politikalar sonucu önemli ölçüde değer kaybedecek fosil yakıt varlıklarının (örn. fosil yakıt bazlı enerji santralleri) kullanımının (Saskatchewan, Kanada'daki Boundary Dam retrofit enerji santrali ve Avustralya, Gorgon'daki LNH tesisinde olduğu gibi) devam etmesine olanak tanıyacağından iklim değişikliğiyle mücadelede ve enerji dönüşümünde daha az maliyete olanak tanıyabilir.

Son olarak, iklim değişikliğiyle mücadelede tek bir çözüm yolu yoktur. Bunun yerine mücadelede başarılı olmak için farklı çözüm yollarının eş zamanlı kullanım gerekmektedir. Dolayısıyla, kimi zaman yenilebilir enerji yatırımı daha ucuz ve dolayısıyla daha etkin bir çözüm olabilirken ağır sanayi ve enerji güvenliği konularında olduğu gibi doğru belirlenen bir karbon fiyatının varlığında KYD, yenilenebilir enerjiye kıyasla daha doğru bir tercih olabilir. Gelecekte KYD'nin rolü (i) iklim değişikliğinin ne kadar yıkıcı olabileceği ve bunun beraberinde belirlenecek karbon fiyatı seviyesine, (ii) ülkelerin karbonu doğru seviyede fiyatlandırma motivasyonlarına, (iii) ülkelerin hali hazırdaki enerji portföylerine (hidroelektrik, termik, yenilenebilir, nükleer enerjinin toplam enerji üretimindeki payları) ve (iv) diğer düşük karbonlu enerji üretim teknolojilerinin, teknolojik gelişme ve öğrenmeye bağlı olarak zamanla değişecek olan birim üretim maliyetlerine göre şekillenecektir.

KAYNAKÇA

- Arnette, A. N. (2017). Renewable energy and carbon capture and sequestration for a reduced carbon energy plan: An optimization model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 254-265.
- Arsoy, A., & Perdahçı, T. (2004). Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Dağıtılmış Üretim. ELECO'2004 Elektrik-Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu: http://www.emo.org.tr/ekler/1d1cd3a02276948_ek.pdf (Erişim Tarihi: 11.12.2019)
- Budinis, S., Krevor, S., Mac Dowell, N., Brandon, N., & Hawkes, A. (2018). An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*, 22, 61-81.
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., ... & Hallett, J. P. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062-1176.

¹⁷ Dağıtık üretim, tüketicilere yakın, elektrik dağıtım şebekesine bağlı veya tek başına çalışabilen (örn. rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, yakıt pili ve enerji depolama sistemleri) ve coğrafi olarak dağınık halde bulunan küçük ölçekli üretim kaynaklarıyla yapılan elektrik enerjisi üretimi ve depolamasıdır (Arsoy ve Perdahçı, 2004)

- Durmaz, T. (2018). The economics of CCS: Why have CCS technologies not had an international breakthrough?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 328-340.
- Durmaz, T., & Schroyen, F. (2020). Evaluating Carbon Capture and Storage in a Climate Model with Directed Technical Change. *Climate Change Economics*, 11(01).
- Clarke, L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J. C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P. R. Shukla, M. Tavoni, B. C. C. van der Zwaan, and D. van Vuuren (2014). Assessing Transformation Pathways. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Finkenrath, M. (2011). Cost and performance of carbon dioxide capture from power generation. International Energy Agency.
- Gardarsdottir, S. O., De Lena, E., Romano, M., Roussanaly, S., Voldsund, M., Pérez-Calvo, J. F., ... & Gazzani, M. (2019). Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production – Part 2: Cost Analysis. *Energies*, 12(3), 542.
- Global CCS Institute, The Carbon Capture and Storage (CCS) Facilities Database: <https://co2re.co/FacilityData> (Erişim Tarihi: 23.09.2019)
- Global CCS Institute (2018). The global status of CCS: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (Erişim Tarihi: 03.05.2019)
- Gollakota & McDonald (2018). Successful Demonstration of Illinois Industrial Carbon Capture and Storage in a Saline Reservoir. 18AIChE Annual Meeting, Pittsburgh, PA, ABD. (Conference Proceedings: <https://www.aiche.org/conferences/aiche-annual-meeting/2018/proceeding/paper/329c-successful-demonstration-illinois-industrial-carbon-capture-and-storage-saline-reservoir>) (Erişim Tarihi: 10.10.2019)
- Grimaud, A., Lafforgue, G., & Magné, B. (2011). Climate change mitigation options and directed technical change: A decentralized equilibrium analysis. *Resource and Energy Economics*, 33(4), 938-962.
- Hensley, R., Newman, J., Rogers, M., & Shahinian, M. (2012). Battery technology charges ahead. *McKinsey Quarterly*, 3, 5-50.
- Herzog, HJ (2011). Scaling up carbon dioxide capture and storage: From megatons to gigatons. *Energy Economics*, 33(4), 597-604.

Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş ve Bu Geçişte Karbon Yakalama ve Depolamanın Rolü

- IEA & UN (2011). Technology roadmap: carbon capture and storage in industrial applications. International Energy Agency, United Nations Industrial Development Organizations.
- IEA (2019). Carbon capture, utilisation and storage: a critical tool in the climate energy toolbox. International Energy Agency <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/power/>
- IEEFA (2018). Holy Grail of Carbon Capture Continues to Elude Coal Industry. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. Cleveland, OH. http://ieefa.org/wp-content/uploads/2018/11/Holy-Grail-of-Carbon-Capture-Continues-to-Elude-Coal-Industry_November-2018.pdf (Erişim Tarihi: 03.04.2019)
- IPCC (2014). Summary for policymakers. In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, O Edenhofer, R Pichs-Madruga, Y Sokona, E Farahani, S Kadner, K Seyboth, A Adler, I Baum, S Brunner, P Eickemeier, B Kriemann, J Savolainen, S Schlömer, C von Stechow, T Zwickel and J Minx (eds.), pp. 1-30. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
- Kalkuhl, M., Edenhofer, O., & Lessmann, K. (2015). The role of carbon capture and sequestration policies for climate change mitigation. *Environmental and Resource Economics*, 60(1), 55-80.
- Leung, D. Y., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443.
- Lehne, J., & Preston, F. (2018). Making Concrete Change. Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. Cambridge: Chatham House, The Royal Institute of International Affairs.
- Licht, S., Wang, B., Ghosh, S., Ayub, H., Jiang, D., & Ganley, J. (2010). A new solar carbon capture process: solar thermal electrochemical photo (STEP) carbon capture. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(15), 2363-2368.
- Lipponen, J., McCulloch, S., Keeling, S., Stanley, T., Berghout, N., & Berly, T. (2017). The politics of large-scale CCS deployment. *Energy Procedia*, 114, 7581-7595.

- Lohwasser, R., & Madlener, R. (2012). Economics of CCS for coal plants: Impact of investment costs and efficiency on market diffusion in Europe. *Energy Economics*, 34(3), 850-863.
- Ma, J., Kang, R., Dong, M., & Conroyl, P. (2018, May). The Impact of the Carbon Market on the Economics of CCUS. In 2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018). Atlantis Press.
- McDonald, A., & Schratzenholzer, L. (2001). Learning rates for energy technologies. *Energy policy*, 29(4), 255-261.
- POWER (2019). Inside NET Power: Gas Power Goes Supercritical: www.powermag.com/inside-net-power-gas-power-goes-supercritical (Erişim Tarihi: 08.08.2019)
- Reuters (2019a), Carbon capture struggles to accelerate in race to avert climate crash by Laurie Goering <https://www.reuters.com/article/us-climate-change-emissions-storage/carbon-capture-struggles-to-accelerate-in-race-to-avert-climate-crash-idUSKCN1VY21A> (Erişim Tarihi: 14.09.2019s)
- Reuters (2019b). Chevron starts burying CO₂ off Australia at huge Gorgon storage Project. <https://www.reuters.com/article/us-chevron-australia-lng-carbon/chevron-starts-burying-CO2-off-australia-at-huge-gorgon-storage-project-idUSKCN1UY0A7> (Erişim Tarihi: 09.08.2019)
- Rubin, E. S., Davison, J. E., & Herzog, H. J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 378-400.
- Sinn, H. W. (2017). Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution. *European Economic Review*, 99, 130-150.
- Walsh, D. M., O'Sullivan, K., Lee, W. T., & Devine, M. T. (2014). When to invest in carbon capture and storage technology: a mathematical model. *Energy Economics*, 42, 219-225.
- Whiriskey, Keith. (2017). CCS and Europe's Contribution to the Paris Agreement - Modelling least-cost CO₂ reduction pathways. European Zero Emission Technology and Innovation Platform. DOI: 10.13140/RG.2.2.22268.18566.