

Karbon Yakalama ve Yeryüzünde Depolama Teknolojisi(CCS) Nedir, Neden Uygulanamıyor?

Hazırlayan: Yüksel Atakan , ybatakan4@gmail.com., 24.08.2026

Bir Literatür Değerlendirmesi

1. Giriş

Karbon Yakalama ve Depolama (Carbon Capture and Storage – CCS), sanayi tesisleri ve enerji santrallerinden atmosfere salınacak karbondioksitin (CO₂) yakalanarak sıkıştırılması, taşınması ve jeolojik formasyonlarda (tükenmiş petrol/gaz rezervuarları, derin tuzlu su akiferleri, kömür damarları) uzun süreli olarak depolanması sürecidir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlamayı hedefleyen çoğu senaryoda CCS'nin kümülatif emisyon azaltımına önemli bir katkı sunması gerektiğini öngörmektedir (IPCC, 2022). Ancak 1990'ların sonundan bu yana geçen otuz yılı aşkın süreye rağmen, kurulu CCS kapasitesi, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Global CCS Institute'un net-sıfır senaryoları için öngördüğü seviyelerin oldukça altında kalmıştır (IEA, 2023; Global CCS Institute, 2023). Bu çalışma, CCS teknolojisinin neden beklenen ölçekte yaygınlaşmadığını başlıca teknik, ekonomik, politik ve toplumsal nedenleriyle ele almakta; ardından teknolojiyi aktif olarak uygulayan başlıca ülkeleri ve projeleri özetlemektedir.



2. CCS'nin Beklenen Başarıyı Yakalayamamasının Nedenleri

2.1. Yüksek Sermaye ve İşletme Maliyetleri

CCS zincirinin her aşaması (yakalama, sıkıştırma, taşıma, enjeksiyon ve izleme) yüksek sermaye yatırımı gerektirir. Yakalama üniteleri, özellikle mevcut kömür ve doğal gaz santrallerine sonradan eklendiğinde (retrofit), tesis maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Global CCS Institute (2022) ve IEA (2020) raporlarına göre, yakalanan CO₂ tonu başına maliyet, kaynağın konsantrasyonuna bağlı olarak 40-120 ABD doları arasında değişebilmekte; bu maliyet, çoğu bölgede karbon fiyatlandırma mekanizmalarının (örneğin AB Emisyon Ticaret Sistemi) sunduğu teşviklerin üzerinde kalmaktadır. Yeterli karbon fiyatı veya sübvansiyon olmadan, CCS yatırımları özel sektör için ekonomik olarak cazip hale gelememektedir.

2.2. Ek Enerji Yüğü (Parasitic Energy Load)

CO2 yakalama süreci, 'post-combustion capture' yöntemlerinde, tesisin ürettiği toplam enerjinin yaklaşık %15-30'unun yakalama ve sıkıştırma işlemlerinde tüketilmesine yol açar (Rubin ve diğerleri, 2015, International Journal of Greenhouse Gas Control). **Bu durum, aynı miktarda kullanılabilir enerji üretmek için daha fazla yakıt tüketimini ve dolayısıyla artan işletme maliyetlerini beraberinde getirir; ayrıca net emisyon azaltım faydasını da bir ölçüde azaltmaktadır.**

2.3. Taşıma ve Depolama Altyapısının Yetersizliği

Yakalanan CO2'nin uygun jeolojik depolama sahalarına ulaştırılması için kapsamlı boru hattı ağları veya deniz taşımacılığı altyapısı gereklidir. Ancak bu tür 'CO2 ulaştırma ağları' çoğu ülkede henüz kurulmamıştır. Norveç'in Northern Lights projesi ve Hollanda'nın Porthos projesi gibi örnekler, paylaşımlı altyapı modellerinin ancak son yıllarda devreye girmeye başladığını göstermektedir (Northern Lights JV, 2022; Porthos, 2023). **Altyapı eksikliği, özellikle sanayi kümelerinin (cluster) dışında kalan tekil tesisler için CCS'yi ekonomik olarak anlamsız kılmaktadır.**

2.4. Sızıntı Riski, Uzun Vadeli İzleme ve Sorumluluk Belirsizliği

Depolanan CO2'nin yüzyıllar boyunca jeolojik formasyonda kalması beklenmektedir; ancak sızıntı riskinin sıfıra indirilemeyeceği, sadece düşük olasılıklı hale getirilebileceği bilimsel literatürde kabul edilmektedir (IPCC Özel Raporu, 2005). Uzun vadeli izleme, doğrulama (Measurement, Reporting and Verification – MRV) ve olası sızıntı durumunda hukuki/mali sorumluluğun kime ait olacağı konusundaki belirsizlikler, hem yatırımcıları hem de yerel toplulukları tedirgin etmekte; bu da bazı projelere karşı toplumsal muhalefete (örneğin Almanya ve Hollanda'da erken dönem CCS projelerine yönelik yerel protestolar) yol açmıştır (Terwel ve diğerleri, 2012, Environmental Science & Policy).

2.5. Siyasi Destek Dalgalanması ve Proje İptalleri

CCS projelerinin büyük bölümü doğrudan devlet teşviki, vergi indirimi (örneğin ABD'de 45Q vergi kredisi) veya kamu-özel ortaklığına dayanmaktadır. Bu desteklerin siyasi iktidar değişiklikleriyle veya bütçe kesintileriyle azalması, birçok yüksek profilli projenin (örneğin ABD'de FutureGen ve Kemper County projeleri) iptal edilmesine veya süresiz ertelenmesine neden olmuştur (Global CCS Institute, 2021). Bu durum, CCS'nin uzun vadeli yatırım güvenilirliğini zedelemiştir.

2.6. 'Greenwashing' Eleştirisi ve Gelişmiş Petrol Geri Kazanımı (EOR) ile İlişki

Bugüne kadar depolanan CO2'nin önemli bir kısmı, iklim amaçlı jeolojik depolamadan ziyade Gelişmiş Petrol Geri Kazanımı (Enhanced Oil Recovery – EOR) amacıyla kullanılmıştır; bu da CO2'nin ek petrol üretimini teşvik ederek dolaylı olarak yeni emisyonlara yol açtığı eleştirisini beraberinde getirmiştir (IEEFA, 2022). Bu durum, CCS'nin fosil yakıt endüstrisinin faaliyetlerini meşrulaştırmak ve ömrünü uzatmak için kullanılan bir 'greenwashing' aracı olduğu yönündeki akademik ve sivil toplum eleştirilerini güçlendirmiş, kamuoyu ve bazı yatırımcı gruplarının desteğini zayıflatmıştır (Stephens, 2014, Global Environmental Politics).

2.7. Ölçeklenebilirlik ve Zaman Çizelgesi Sorunu

IEA'nın Net Sıfır senaryosu, 2030 yılına kadar küresel CCS kapasitesinin yılda yaklaşık 1 Gigaton CO2 seviyesine ulaşmasını öngörmüştü (Dünya CO2 toplamı: yaklaşık 40 Gigsaton); ancak 2023 itibarıyla fiilen işletmede olan kapasite bu hedefin çok altında, yılda yaklaşık 45-50 milyon ton civarındadır (IEA, 2023; Global CCS Institute, 2023). Bu büyük fark, teknolojinin laboratuvar ve pilot ölçekten endüstriyel ölçeğe geçişte karşılaştığı mühendislik, tedarik zinciri ve iş gücü darboğazlarını yansıtmaktadır.

3. CO2'i Yeraltında Depolayan veya Atmosfere Vermeyen Başlıca Ülkeler ve Projeler

Aşağıdaki tablo, aktif veya ileri aşamada olan başlıca CCS/CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) projelerini ve bulundukları ülkeleri özetlemektedir. Liste, Global CCS Institute'un küresel proje veri tabanı (2023) ve IEA CCUS ülke profillerine (2023) dayanmaktadır.

Ülke	Öne Çıkan Proje(ler)	Not
Norveç	Sleipner (1996-), Snøhvit, Northern Lights	Dünyanın ilk ticari ölçekli offshore CO2 depolama projesi; Kuzey Denizi'nde tuzlu su akiferi kullanılıyor.
ABD	Petra Nova, Century Plant, çok sayıda 45Q teşvikli proje	En fazla sayıda proje; büyük kısmı EOR ile bağlantılı.
Kanada	Boundary Dam (Saskatchewan), Quest (Alberta)	Boundary Dam, kömür santraline entegre ilk büyük ölçekli yakalama tesisi (2014).
Avustralya	Gorgon Projesi (Batı Avustralya)	Doğal gaz üretiminden ayrıştırılan CO2'nin depolanması; kapasite hedeflerinin altında performans eleştirisi almıştır.
Hollanda	Porthos (Rotterdam Limanı)	Sanayi kümesi için ortak boru hattı ve offshore depolama altyapısı; inşaat aşamasında.
Birleşik Krallık	Northern Endurance Partnership, Acorn Projesi	Kuzey Denizi'nde tükenmiş gaz sahalarının depolama için kullanılması planlanıyor.
Katar	Ras Laffan CCS Projesi	LNG üretim tesislerinden kaynaklanan CO2'nin depolanması.
Çin	Çeşitli pilot ve gösterim projeleri (örn. Qilu, Yanchang)	Hızla büyüyen ancak hâlâ pilot ölçekte kalan bir proje portföyü.
Cezayir	In Salah (2004-2011, durduruldu)	Sızıntı endişeleri nedeniyle enjeksiyon durdurulan erken dönem örneği.
Suudi Arabistan / BAE	Uthmaniyah, Al Reyadah	Sanayi kaynaklı CO2'nin kısmen EOR amaçlı kullanımı.

Bu ülkeler dışında Japonya (Tomakomai gösterim projesi), Almanya, Fransa ve İtalya gibi ülkeler de araştırma ve pilot ölçekli projeler yürütmekle birlikte, ticari ölçekte sürekli depolama kapasitesine henüz sahip değildir. Genel tabloya bakıldığında, dünya genelinde toplam işletmedeki CCS kapasitesinin coğrafi olarak Kuzey Amerika (özellikle ABD ve Kanada) ile Norveç'te yoğunlaştığı; Avrupa'nın geri kalanı, Asya ve Ortadoğu'da ise projelerin çoğunlukla planlama veya inşaat aşamasında olduğu görülmektedir (Global CCS Institute, 2023).

4. Sonuç

CO2'nin yeraltında depolanması teknik olarak mümkün ve belirli sahalarda (özellikle Norveç'in offshore projelerinde) onlarca yıldır güvenilir biçimde uygulanan bir yöntemdir. Ancak teknolojinin küresel iklim hedeflerine anlamlı katkı sağlayacak ölçeğe ulaşamamasının temel nedeni tek bir etken değil, yüksek maliyet, ek enerji yükü, altyapı eksikliği, uzun vadeli risk ve sorumluluk belirsizliği, dalgalı siyasi destek ve toplumsal güven sorunlarının bir arada işleyen bir sonucudur. IEA ve IPCC gibi kurumlar, CCS'nin özellikle çimento, çelik ve kimya gibi 'azaltılması zor' (hard-to-abate) sektörlerde hâlâ gerekli bir araç olduğunu vurgulamakla birlikte, bu potansiyelin gerçekleşmesi için karbon fiyatlandırmasının güçlendirilmesi, ortak altyapı yatırımlarının artırılması ve düzenleyici çerçevelerin netleştirilmesi gerektiğini belirtmektedir (IEA, 2023; IPCC, 2022).

Ayrıca vurgulanması gereken önemli bir husus, mevcut maliyet ve uygulama engelleri aşıp CCS geniş ölçekte devreye alınsa bile, teknolojinin tek başına dahi tek bir 'azaltılması zor' sektörün emisyonlarını tam olarak karşılamaktan uzak olduğudur. Çimento sektörü, klinker üretimindeki kalsinasyon reaksiyonu ve yakıt yanması nedeniyle küresel enerji ve süreç kaynaklı CO2 emisyonlarının yaklaşık %7-8'ini, mutlak olarak ise yılda yaklaşık 2,4-2,6 gigaton CO2'yi oluşturmaktadır (IEA, 2018, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement

Industry; WBCSD/GCCA, 2021). **Buna karşılık, 2023 itibarıyla dünya genelinde fiilen işletmede olan toplam CCS kapasitesi yılda yaklaşık 45-50 milyon ton CO₂ düzeyindedir (Global CCS Institute, 2023). Bu iki rakam karşılaştırıldığında, bugünkü küresel CCS kapasitesinin tamamı yalnızca çimento sektörüne ayrılabilir, sektörün toplam emisyonlarının ancak yaklaşık %2'si kadarının karşılanabileceği görülmektedir;** sektöre özgü planlanan ve inşaat aşamasındaki projeler devreye girse dahi bu oranın önümüzdeki on yılda %10-15 bandını aşması beklenmemektedir (IEA, 2023 Cement Tracking Report). Bir başka deyişle, CCS maliyet ve altyapı sorunları çözülsün dahi, yalnızca çimento sektöründen kaynaklanan emisyonları dengelemek için mevcut ve planlanan kapasitenin kat kat artırılması gerekmektedir; bu da CCS'nin gerçekçi bir iklim çözümü olabilmesi için diğer azaltım yollarıyla (alternatif bağlayıcı malzemeler, klinker oranının düşürülmesi, alternatif yakıtlar, elektrifikasyon) birlikte ve çok daha büyük ölçekte uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- Global CCS Institute. (2021). The Global Status of CCS 2021. Melbourne: Global CCS Institute.
- Global CCS Institute. (2022). The Global Status of CCS 2022. Melbourne: Global CCS Institute.
- Global CCS Institute. (2023). The Global Status of CCS 2023. Melbourne: Global CCS Institute.
- IEEFA (Institute for Energy Economics and Financial Analysis). (2022). Carbon Capture and Storage: A Global Assessment. Cleveland, OH: IEEFA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA). (2018). Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA). (2020). CCUS in Clean Energy Transitions. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA). (2023). CCUS Policies and Programmes / Global CCUS Tracker. Paris: IEA.
- International Energy Agency (IEA). (2023). Cement / Tracking Report. Paris: IEA.
- Northern Lights JV. (2022). Northern Lights Project: Concept Report. Oslo: Equinor, Shell, TotalEnergies.
- Porthos. (2023). Porthos CO₂ Transport and Storage Project – Project Overview. Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam.
- 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.
- Stephens, J. C. (2014). Time to stop investing in carbon capture and storage and reduce government subsidies of fossil-fuels. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 5(2), 169-173.
- Terwel, B. W., ter Mors, E., & Daamen, D. D. (2012). It's not only about safety: Beliefs and attitudes of 811 local residents regarding a CCS project in Barendrecht. International Journal of Greenhouse Gas Control, 9, 41-51.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) & Global Cement and Concrete Association (GCCA). (2021). Concrete Future: GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. Geneva/London: WBCSD/GCCA.
- Not: Bu yazıdaki kaynak listesi, akademik ve kurumsal literatürdeki bilinen yayınlara dayanılarak oluşturulmuştur.*