

Net-Sıfır emisiyona ulaşabilmek adına karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) faaliyetlerinin endüstride sürdürülebilir kalkınma açısından önemi

Deniz Yağmur KAYHAN¹

ÖZ

Birçok komisyon ve paneller ışığında 2050 yılına kadar sera gazı emisyonunda net sifıra ulaşmak hedeflenmektedir. Karbon yakalama, kullanım ve depolama (CCUS), endüstride net sıfır CO₂ emisyonu elde edebilmek ve enerji dönüşümüne katkıda bulunabilmek için önemli ve gerekli bir adımdır. CCUS, çok sayıda prosesin ayrılmaz bir parçası olan CO₂'nin yakalanması, projenin ölçeğine göre boru hattı, gemi, demiryolu veya kamyon ile CO₂'nin taşınması, fayda sağlayacak ürünlerde karbon geri dönüşümü yoluyla CO₂'nin kullanımı ve derin yeraltı jeolojik sahalarında CO₂ depolanmasından oluşur. Ancak, CCUS uygulamaları, endüstrideki yetersiz finansal yatırımlar ve iş modelleri, fosil yakıt sektöründe iş kaybı konusunda oluşan yanlış algı, kamuoyu ve yatırımcılar tarafından sınırlı kabul oranına sahip olması, ve yeraltı depolama sahalarındaki potansiyel sızıntı riskleri gibi çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır.

CCUS uygulamalarının biyoenerji ile karbon yakalama ve depolama (BECCS), doğrudan havadan karbon yakalama ve depolama (DACCS) gibi farklı türleri bulunmaktadır. Maalesef, bu yöntemlerden sadece çok azı faaliyet aşamasındadır. Doğal gaz işlemede bu uygulamaların olanakları nispeten daha çok sayıda ve büyük ölçektedir, ancak ağır sanayi sektörleri bu durumun gerisinde kalmaktadır. Gelecek senaryolarında, bu tesislerin sayısı artırılması, sera gazı emisyonlarını azaltma oranlarının yükseltilmesi ve CCUS faaliyetlerinde daha fazla paya sahip olması öngörülmektedir. Petrol endüstrisi, eski deneyimleri ışığında operasyonlarda diğer sektörlerle kıyasla CCUS kullanımına daha yatkındır. Büyük petrol şirketlerinden bazıları nispeten başarılı CCUS projeleri önermiştir ama ulusal ve Avrupa dışı petrol şirketlerinin çoğunluğu karbon nötr konusundaki düşük taahhüt ve yatırım oranları sebebiyle büyük şirketleri yakalayamamışlardır.

Endüstrideki CCUS uygulamaları, başta sürdürülebilir kalkınma amaçlarından (küresel amaçlar veya sustainable development goals – SDG) SDG13, SDG7, SDG12 ve SDG9 olmak üzere birçok

SDG ile bağlantılıdır. Bu makalede hangi SDG hedeflerinin bu uygulamalar ile desteklenebileceği ortaya konulmuş ve farklı ölçeklerde uygulanabilecek potansiyel senaryolardan bahsedilmiştir.

1. Giriş

1.1. Sürdürülebilir Kalkınma Açısından Önemi

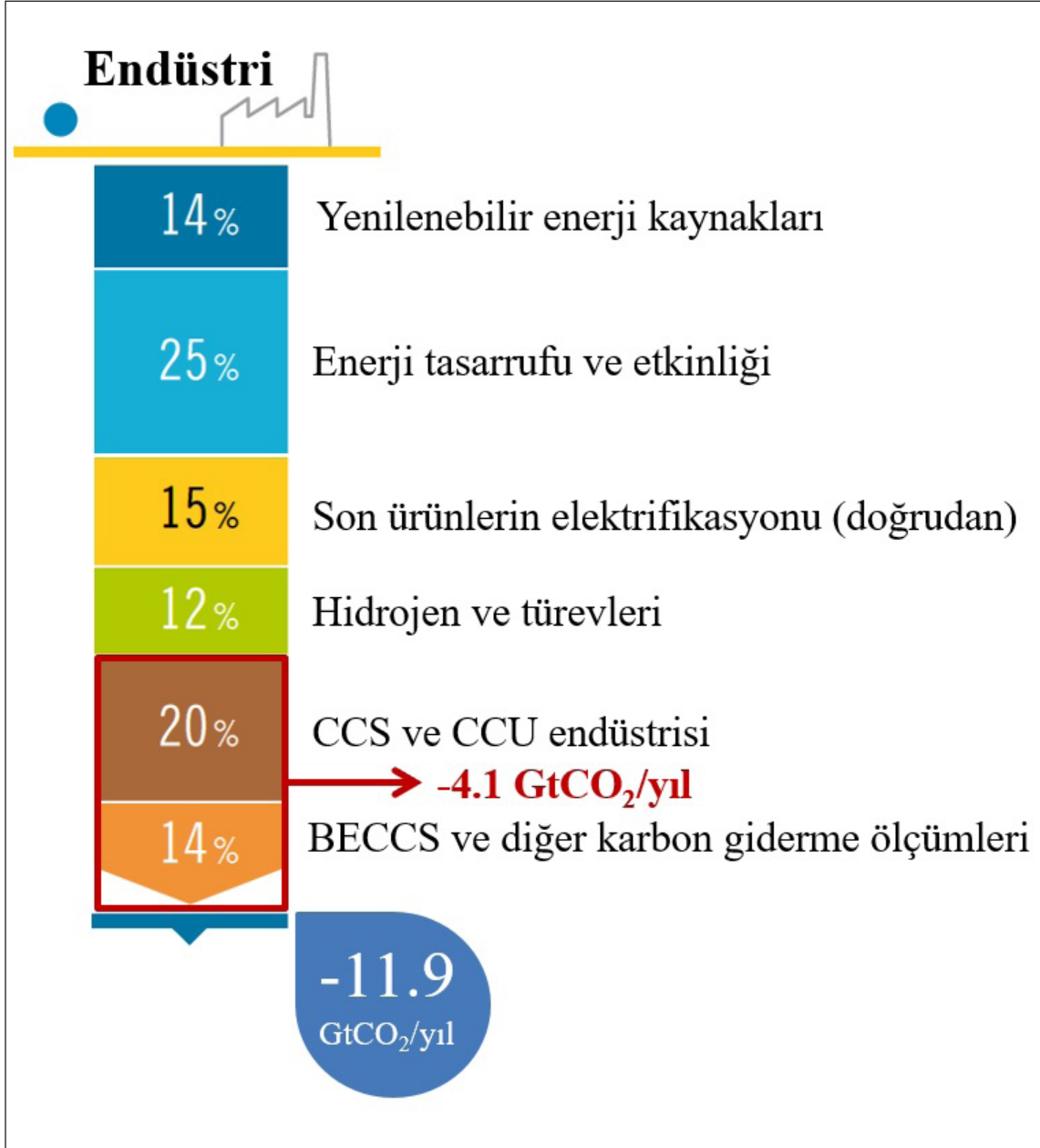
Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 1,5°C Küresel Isınma Özel Raporu (The Special Report on 1,5°C Global Warming) ve Avrupa Komisyonu'nun Yeşil Anlaşması (The Green Deal) ile 2050 yılına kadar sera gazı emisyonunda net sifıra ulaşmak hedeflenmektedir (IPCC, 2018; European Commission, t.y.). Karbon yakalama, kullanma ve depolama (Carbon capture, utilization and storage – CCUS) teknolojisi, net sıfır emisyon hedefine ulaşılmasına katkı sağladığı için sürdürülebilir kalkınma için büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, daha sürdürülebilir, temiz ve çevre dostu bir geleceğe yönelik enerji geçişlerinin temel parçaları arasında bulunmaktadır. CCUS uygulamalarının, toplamda %34 ile endüstriye yüksek oranda CO₂ azaltımı sağlayabileceği 1,5°C senaryosunda belirtilmiştir. Aynı senaryoya göre, emisyon azaltımlarında 2050 yılına kadar 4.1 GtCO₂/yıl'a ulaşılması öngörülmektedir (Şekil 1) (IRENA, 2021).

CCUS olmadan endüstri ve enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarını yönetmek zordur. Özellikle, çelik ve kimya endüstrisinde CCUS'ye sınırlı alternatifler vardır. Bu teknoloji, Şekil 2'de de belirtildiği gibi dört temel adımdan oluşmaktadır. CCUS, birçok endüstriyel prosesin ayrılmaz bir parçası olan ve baca gazı akışları için onlarca yıldır mevcut olan CO₂ yakalama ile başlar. Bu basamağın başlıca teknikleri kimyasal absorpsiyon, fiziksel ayrıştırma, membran ayrıştırma, doğrudan ayrıştırma, oksijen-yakıt ayrıştırma, kimyasal döngü ve kalsiyum döngüsüdür. İkinci adım olan CO₂'nin taşınması, büyük ölçekli projeler için boru hattı veya gemi, küçük ölçekli ve kısa mesafeli projeler için demiryolu veya kamyon ile CO₂ yakalama noktasından kullanım veya depolama sahasına doğru yapılabilir. Boru hattı taşımacılığı uzun yıllardır kullanılmaktadır ve büyük miktarda ve uzun mesafede CO₂ taşımacılığının en ekonomik yoludur.

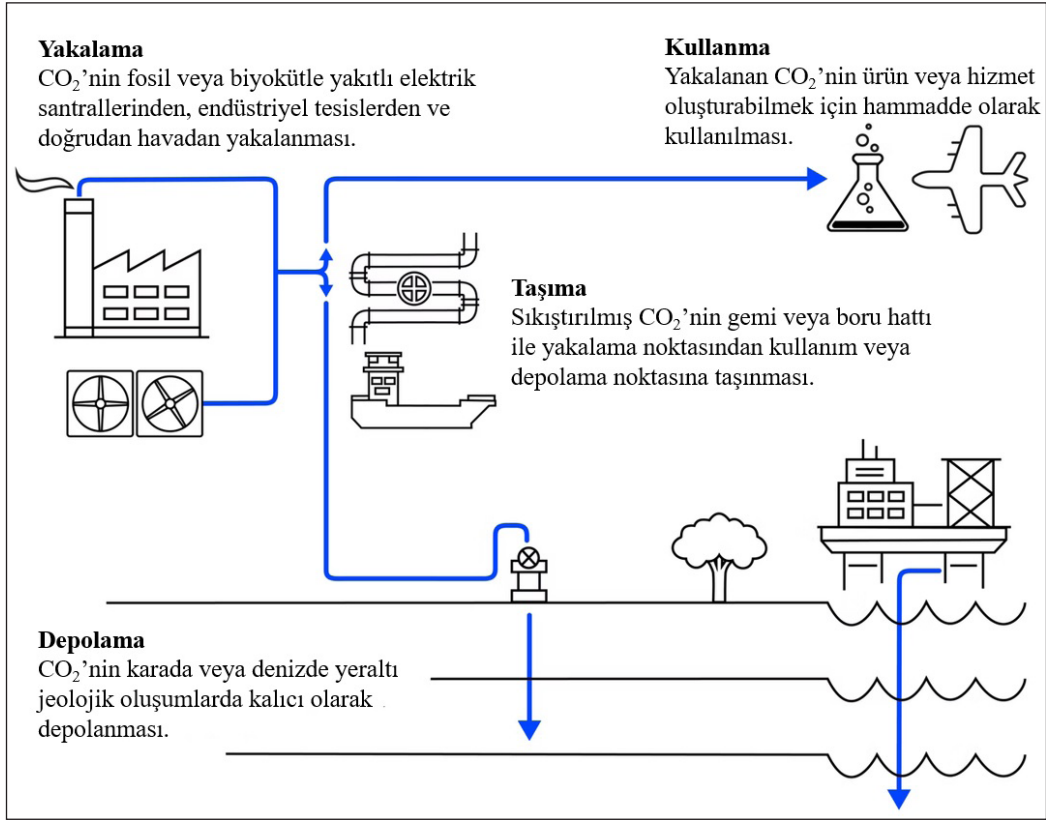
¹Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Deniz Araştırmaları Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Bu projeler için gemiyle büyük ölçekte taşıma henüz gerçekleştirilmiş olmasa da, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ve petrol (LPG) taşımacılığına benzer bir yol izlenebileceği öngörülmektedir. Üçüncü adım olarak CO₂ kullanımı, karbonun fayda sağlayabilecek ürün ve hizmet olarak geri dönüştürülmesidir. Örnek olarak, CO₂'deki karbon, fosil yakıt olarak kullanılmak üzere sentetik yakıtın hidrojenini dönüştürebilir veya inşaat sektöründe CO₂ kürü olarak adlandırılan betondaki suyun yerini alabilir.

Bu teknolojinin son adımı ise yakalanan CO₂'nin derin yeraltı jeolojik alanlarına enjeksiyonu olan CO₂ depolamasıdır (IEA, 2020). Bu sahalar, yüzeye doğru gaz sızıntısını koruyan düşük geçirgenlikli örtü kaya ile kaplanmış, yüksek gözenekliliğe ve geçirgenliğe sahip akifer ve tüketilmiş hidrokarbon rezervuarları ile düşük geçirgenlik ve uzun vadeli yeraltı stabilitesi sağlayan tuz kayalarındaki mağaralardan oluşabilir (Tarkowski vd., 2021).



Şekil 1- Endüstride 1,5°C senaryosunda CO₂ emisyonlarını azaltma seçenekleri (CCS: Karbon yakalama ve depolama, CCU: Karbon yakalama ve kullanma, BECCS: Biyoenerji ile karbon yakalama ve depolama) (IRENA, 2021'den değiştirilmiştir).



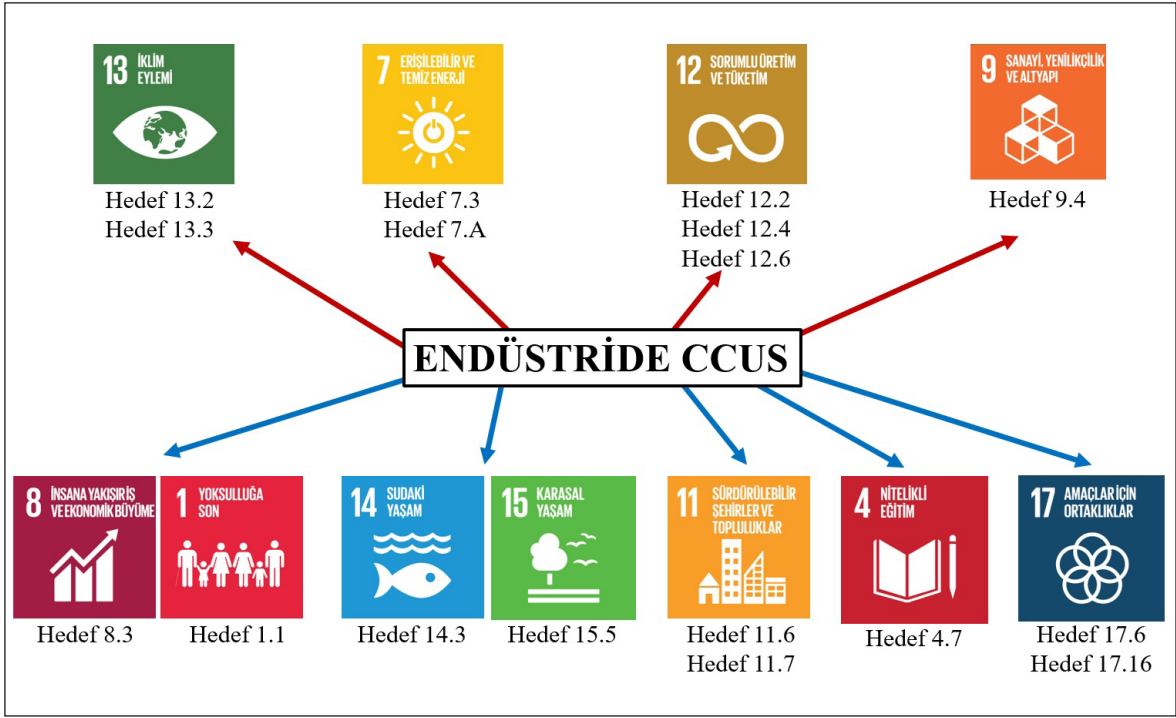
Şekil 2- CCUS sürecinin adımları (IEA, 2020'den değiştirilmiştir).

1.2. Karşılaşılan Zorluklar

CCUS'nin endüstride uygulanması çeşitli zorluklar ile karşılaşılabilmektedir. İlk olarak, CCUS kullanımı günümüzde çok düşük orana sahiptir. Mevcut dağılım oranlarıyla, CO₂ depolama kapasitesi, gerekli olan miktarın yalnızca %10'u olan 700 Mt/yıl civarındadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, CCUS projeleri için gerekli olan teknolojinin geliştirilmesi için, diğer enerji dönüşümü tekniklerine kıyasla çok az finansal yatırımlar ve iş modelleri bulunmaktadır (IRENA, 2021; Martin-Roberts vd., 2021; Wei vd., 2021). Aynı zamanda, enerji dönüşümü ile ilgili olarak yenilenemeyen enerji sektöründe birçok iş kaybına yol açacağına dair genel bir yanlış algı vardır (Greig ve Uden, 2021; Roming Jr., 2021). CCUS teknolojisinin, maliyet-kar analizleri değerlendirmelerinin sonucu ve çevresel kaygılar nedeniyle kamuoyu ve yatırımcılar tarafından kabul oranı düşük seviyede kalmaktadır (Wei vd., 2021). Operasyonun başarısına, jeolojik koşullara, mekanik, kimyasal ve termal stres seviyelerine bağlı olarak jeolojik karbon depolama alanlarından kaynaklı potansiyel sızıntı riskleri de bulunmaktadır (Lackey vd., 2019). Bu zorluklara rağmen, CCUS projelerinin endüstri kaynaklı CO₂ emisyonlarıyla mücadele etmede önemli bir rolü vardır.

1.3. İlgili SDG'ler ve Bağlantıları

Endüstrideki adımlar ile net sıfır emisyonla ulaşmaya katkı sağlayabilmek için gerçekleştirilen CCUS uygulamaları, Birleşmiş Milletler'in tanımladığı birçok sürdürülebilir kalkınma amaçları (küresel amaçlar veya sustainable development goals – SDG) ile ilgilidir (Şekil 3). İlk olarak, bu teknoloji doğası gereği SDG13, SDG7, SDG12 ve SDG9 ile bağlantılıdır. SDG13 (İklim eylemi) – Hedef 13.2 ve 13.3, CCUS projelerinin planlanmasını ve politikalarını yüksek kapasitede net sıfır emisyonla ulaşabilmek adına desteklediği için önemlidir. SDG7 (Erişilebilir ve temiz enerji) – Hedef 7.3 ve 7.A, CCUS'nin enerji verimliliği ve temiz enerji projelerine yönelik yatırımları ile ilgilidir. SDG12 (Sorumlu üretim ve tüketim) – Hedef 12.2, 12.4 ve 12.6, şirketlerin sürdürülebilir üretime ve tüketime geçmesini ve doğal kaynakları bilinçli kullanmalarını, CCUS teknolojisi ile ele almaktadır. SDG9 (Sanayi, yenilikçilik ve altyapı) – Hedef 9.4, CCUS teknolojilerini endüstriye entegre etme açısından önem arz etmektedir. Ek olarak, diğer SDG'ler de endüstrideki CCUS uygulamaları ile bağlantılıdır. Bunlar, mevcut işlerin korunması ve yeteneklerin CCUS projelerine aktarılması ile SDG8 (İnsana



Şekil 3- CCUS'nin endüstride uygulamaları ile bağlantılı SDG'ler. Kırmızı oklar birincil, mavi oklar ikincil bağlantıları işaret etmektedir (SDG ikonları UNDP, 2022'den alınmıştır).

yakışır iş ve ekonomik büyüme) – Hedef 8.3 ve SDG1 (Yoksulluğa son) – Hedef 1.1, ekolojik ve çevresel fayda sağlamak, havadaki ve sudaki CO₂'yi azaltmak ile SDG14 (Sudaki yaşam) – Hedef 14.3 ve SDG15 (Karasal yaşam) – Hedef 15.5, CCUS projeleri ile fabrikaların çevresel etkilerinin azaltılması ve daha fazla yeşil alan sağlanması ile SDG11 (Sürdürülebilir şehirler ve topluluklar) – Hedef 11.6 ve 11.7, lisansüstü eğitim düzeyinde petrolden sürdürülebilir enerji programlarına geçiş ile SDG4 (Nitelikli eğitim) – Hedef 4.7, uluslararası şirketlerin küresel projelerindeki CCUS odaklı deneyim ve bilgi paylaşımı ile SDG17 (Amaçlar için ortaklıklar) – Hedef 17.6 ve 17.16'dır.

2. CCUS İle Net-Sıfır Emisyona Ulaşabilmek için Endüstrideki Adımlar

2.1. Daha Sürdürülebilir Bir Gelecek için Çözümler

CCUS uygulamaları, CO₂ emisyonunu azaltmak açısından önem arz etmektedir. CO₂ emisyonu miktarının 1,5°C senaryosuna göre 2021 ile 2050 yılları arasında 126 GtCO₂ civarında olması beklenmektedir (IRENA, 2021). CCUS'nin başlıca biyoenerji ile karbon yakalama ve depolama (BECCS) ve doğrudan havadan karbon yakalama ve depolama (DACCS) olmak üzere farklı karbon yakalama ve depolama teknikleri vardır. BECCS, çeşitli endüstriyel araçlarda

biyokütle bazlı CO₂ uzaklaştırma yolları ve negatif sera gazı emisyonu sağlamaktadır. Bu yöntem, enerjiye dönüştürülebilirlik veya gerekli malzemeleri üretebilmek için yakıt olarak kullanılabilir yenilenebilir biyokütle içermektedir (IEA, 2011; IEA, 2020). Bu teknolojinin endüstrideki örnekleri demir ve çelik için BECCS-BF (yüksek fırın) ve BECCS-DRI-EAF (elektrik ark ocağı ile demirin doğrudan indirgenmesi); inşaat için CLT (çapraz lamine ahşap), elektrik için biyoelektrik-CCS; biyodizel için FT (Fisher Tropsch)-CCS ve FT-CCS+; biyoetanol için EtOH-CCS, CE-CCS ve CE-CCS+; toprakta karbon tutabilme için yavaş pirolizli biyokömür ve hidrojen için H-CCS ve H₂-CCS+¹'dir (Patrizio vd., 2021). BECCS günümüzde yakıt ve enerji üretim endüstrisi için işletilmektedir (IEA, 2020). Örnek olarak, demir-çelik endüstrisi için de uygulanabilecek bu teknolojinin tipik kullanımı olan iyileştirme yoluyla hammaddeden biyoürün elde edilmesi, demir-çelik yapımı aşamasında CO₂ tutulması ve CO₂'nin depolama alanından taşınması Şekil 4'te gösterilmiştir. Yang vd. (2021)'ne göre BECCS, demir-çelik, kağıt ve hidrojen endüstrilerinin negatif emisyonu ulaşması için en iyi çözümü sunarken, çimento ve kimya sektörleri için optimum çözüm olamayabilir. Öte yandan, DACCS yönteminde CO₂'yi doğrudan ortam havasından yakalamak ve ayırmak için kimyasal işlemler kullanılır (ICRLP,

2018). Aynı zamanda sentetik hidrokarbon yakıtları üretmek ve gıda işlemleri için de kullanışlıdır ve BECCS'ye kıyasla uygulama için daha küçük alan gerektirir (Akimoto vd., 2021). Ancak, endüstrideki CCUS uygulamalarının sadece %2'si olgunlaşmış düzeyde kullanılabilir. Bu uygulamaların çoğu henüz erken benimseme (%35), gösterim (%50) veya büyük prototip (%13) aşamasındadır (IEA, 2020). Bu uygulamaların net sıfır emisyon hedefine yardımcı olabilmesi için operasyonel aşamaya geçmesi gerekmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan ticari amaçlı CCS tesislerine bakıldığında, doğalgaz işleme tesisleri nispeten daha çok sayıda ve büyük ölçekte olmalarına rağmen, demir-çelik, çimento, atıktan enerjiye, hidrojen ve etanol gibi etkilerinin azaltılması zor endüstrilerin çoğu henüz benzer seviyeyi yakalayamamıştır (Loria ve Bright, 2021). Sürdürülebilir kalkınma senaryosuna göre 2020-2070 yılları arasında sanayi bazında küresel kümülatif karbon yakalama beklentisi %32 olup, yakıt dönüşümüne kıyasla (%28) daha yüksektir. Bu hedefe ulaşabilmek için ağır sanayiye yönelik CCUS projeleri hayata geçirilmelidir. Çimento, çelik ve kimya endüstrilerindeki emisyonlar hem proses hem de enerji ile ilgili faaliyetlerden toplanabilmektedir. Bu senaryoda, CO₂ emisyonu yakalamada ağır sanayi payının 2030'da 0,5 Gt olması, 2070'te ise 2,7 Gt'ye yükselmesi öngörülmektedir (IEA, 2020).

Fosil yakıt endüstrisi, gelişmiş petrol geri kazanımı (Enhanced oil recovery – EOR) teknikleri gibi önceki deneyimlerinden edindikleri tecrübeler ışığında CCUS'yi uygulamaya daha yatkındır (IEA,

2016). BP, Shell, Equinor, ENI, Total, OXY gibi bazı büyük petrol şirketleri, karbon nötr bir geleceğe adapte olabilmek adına başarılı CO₂ depolama operasyonları sunmuşlardır (Şekil 5). Ancak, ulusal ve Avrupa dışındaki petrol şirketlerinin çoğunluğu (ExxonMobil, Petrobras, Aramco, Apache, vb.) bu konuda geride kalmaktadırlar (Martin-Roberts vd., 2021).

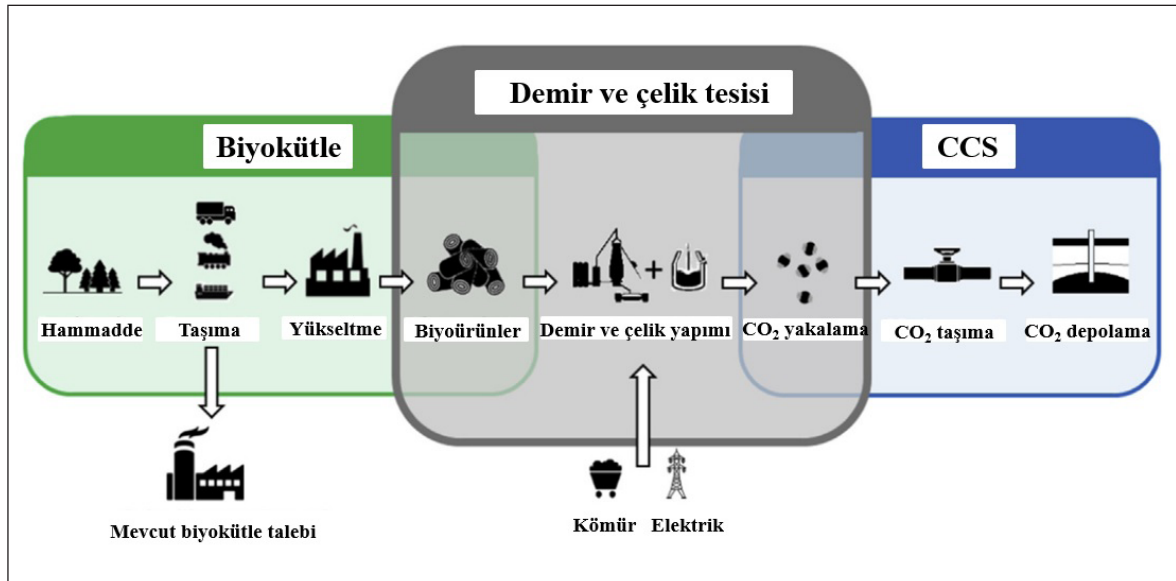
2.2. Çözümler ile SDG'lerin Desteklenmesi

CCUS bazlı çözümler aynı zamanda SDG'leri çeşitli yollarla iyileştirme fırsatları sunmaktadır. Bu SDG'ler ilgili hedefleri ve açıklamaları ile Çizelge 1'de sunulmuştur.

3. Tartışma ve Sonuçlar


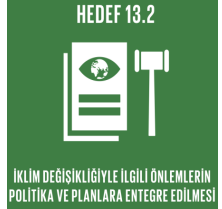


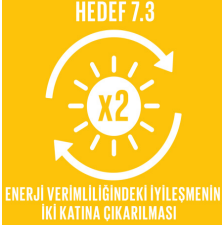



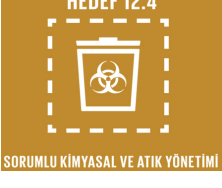
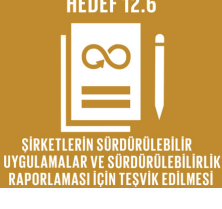
3.1. Çözümlerin Farklı Seviyelerde Potansiyel Uygulamaları

CCUS uygulamaları için tanımlanan çözümler farklı ölçeklerde uygulama imkanı sunmaktadırlar. Bu bölümde uygulamaların örnekleri özelden genele doğru incelenmektedir. İlk ölçek bir üniversite kampüsüdür ve örnek olarak da Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) kampüsü ele alınmıştır. İngiltere'deki üniversitelere benzer şekilde lisansüstü düzeyden başlayarak sürdürülebilirliğe odaklanan enerji ve yer bilimleri programları için üniversite ve sanayi işbirliği yapılabilir. Wei vd. (2021)'nin CCUS'nin yenilenebilir enerji ile birlikte kullanılmasının enerji verimliliğine katkıda bulunması fikrinden yola çıkılarak RÜZGEM (Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi) ve GÜNAM
















Şekil 4- Demir-çelik endüstrisinde biyo-CCS tedarik zinciri (Mandova vd., 2019'dan değiştirilmiştir).




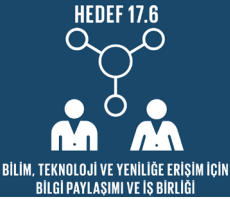

Çizelge 1- CCUS'nin SDG'leri iyileştirme fırsatları (SDG ikonları UNDP, 2022'den alınmıştır).

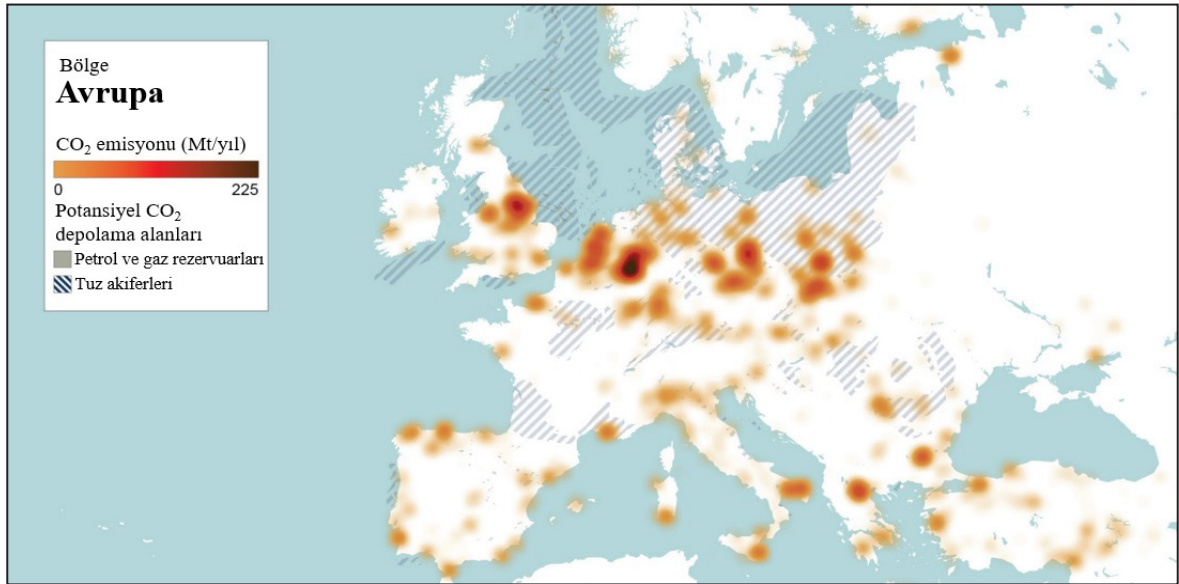
SDG'ler	Hedefler	Açıklamalar
	 	<ul style="list-style-type: none"> - CCUS projelerini hayata geçirerek CO₂ emisyonunu azaltmaya ve 1.5°C hedefine ulaşmaya katkıda bulunulması. - Endüstriyel faaliyetlerin dünya üzerindeki zararlı etkilerinin azaltılması.
	 	<ul style="list-style-type: none"> - Temiz ve sürdürülebilir teknolojiler odaklı enerji geçişinin gerekli yatırımlar ile desteklenmesi. - CCUS'nin yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte kullanılarak enerji verimliliğinin artırılması (Wei vd., 2021).
	  	<ul style="list-style-type: none"> - Yeniden kullanım ile karbon geri dönüşümünün sağlanması (IEA, 2020). - CCS'nin atık yakma için son işlem olarak kullanılabilmesi (Bisinella vd., 2021). - Şirketlerin CCUS teknolojilerini kullanmaları için teşvik edilmesi (Wei vd., 2021).

Çizelge 1- Devamı

<p>9 SANAYİ, YENİLİKÇİLİK VE ALTYAPI</p> 	<p>HEDEF 9.4</p>  <p>SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN TÖM SANAYİ KOLLARININ VE ALTYAPILARIN İYİLEŞTİRİLMESİ</p>	<p>- CCUS teknolojilerinin farklı sektörlere entegre edilmesi (demir-çelik, inşaat, elektrik, biyoyakıt, vb.) (Patrizio vd., 2021).</p>
<p>8 İNSANA YAKIŞIR İŞ VE EKONOMİK BÜYÜME</p>  <p>1 YOKSULLUĞA SON</p> 	<p>HEDEF 8.3</p>  <p>İŞ YARATMAYI VE İŞLETMELERİN BÜYÜMESİNİ DESTEKLEYEN POLİTİKALARIN ARTIRILMASI</p> <p>HEDEF 1.1</p>  <p>AŞIRI YOKSULLUĞUN SONA ERDİRİLMESİ</p>	<p>- Saha seçimi ile CO₂ depolama ve yeraltı izleme için petrol şirketlerinin deneyimi yoluyla yeteneklerin CCUS projelerine aktarılması (Tarkowski vd., 2021).</p> <p>- Yenilenemeyen enerji sektörü çalışanlarının mevcut iş imkanlarının korunması (Greig ve Uden, 2021).</p>
<p>14 SUDAKİ YAŞAM</p>  <p>15 KARASAL YAŞAM</p> 	<p>HEDEF 14.3</p>  <p>OKYANUS ASİTLENMESİNİN AZALTILMASI</p> <p>HEDEF 15.5</p>  <p>BİYOÇEŞİTLİLİĞİN VE DOĞAL HABİTATLARIN KORUNMASI</p>	<p>- CCUS yoluyla CO₂ seviyesinin azaltılması, okyanuslardaki asit oranının düşürülmesi ve ekolojik fayda sağlanması.</p>
<p>11 SÜRDÜRÜLEBİLİR ŞEHİRLER VE TOPLULUKLAR</p> 	<p>HEDEF 11.6</p>  <p>ŞEHİRLERİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN AZALTILMASI</p> <p>HEDEF 11.7</p>  <p>GÜVENLİ VE KAPSAYICI YEŞİL ALANLARA VE KAMUSAL ALANLARA ERİŞİMİN SAĞLANMASI</p>	<p>- Fabrikaların olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması ve halka daha fazla yeşil alan sağlanması.</p>

Çizelge 1- Devamı

		<p>- Birleşik Krallık'taki Imperial College London, The University of Manchester, Royal Holloway University of London gibi birçok üniversitenin petrol odaklı lisansüstü programlarını sürdürülebilir enerji ile ilgili programlara çevirerek enerji dönüşümünü desteklemesi.</p>
	 	<p>- CCUS projelerinde uluslararası işbirliği yapılması.</p> <p>- Ülkeler arası bilgi ve deneyim paylaşımı yapılması (Wei vd., 2021).</p>

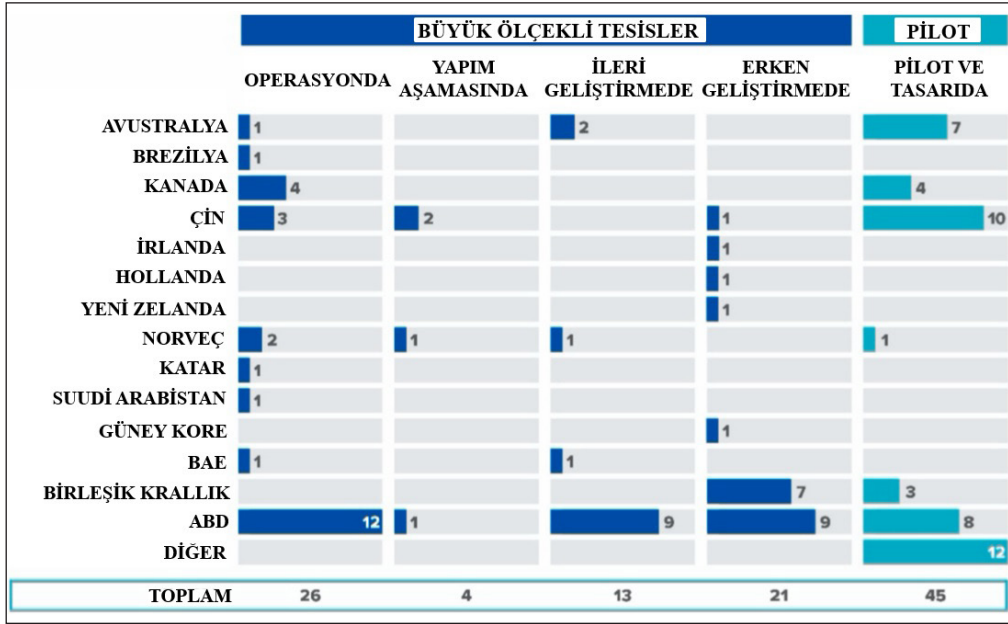
Şekil 6- Avrupa'daki potansiyel jeolojik depolama alanları ve CO₂ emisyon kaynaklarının dağılımı (IEA, 2020'den değiştirilmiştir).

bağlantılar CCUS uygulamalarının doğası ile çevre, ekoloji, ekonomi, eğitim ve toplum üzerindeki etkileri incelenerek yapılmıştır.

2. Enerji verimliliği en yüksek sonuçlar, CCUS teknolojileri enerji dönüşümü için yenilenebilir enerji kaynakları ile işbirliği içerisinde kullanıldığında elde edilebilir. Böylece rüzgar, güneş, jeotermal

ve nihai kullanımların elektrifikasyonu gibi diğer enerji kaynakları ve uygulamaları ile birleştirilerek maksimum sonuca ulaşılabilir.

3. CCUS, şirketlerin ve ülkelerin bu teknolojiye adaptasyonu için yeni alanlar yaratmak yerine daha kolay bir seçenek olan endüstrideki deneyim ve iş kollarının bu teknolojiye transferini sağlayabilir.



Şekil 7- Sayı, konum, ölçek ve gelişmişlik aşamalarına göre dünyadaki CCS tesisleri (Loria ve Bright, 2021'den değiştirilmiştir).

Ayrıca, jeoloji, jeofizik, maden ve petrol mühendisleri ile bu alanlara ait işletmelerde çalışan personelin mevcut iş imkanlarını kaybetme risklerini almak yerine bu alandaki yeteneklerini CCUS projelerine adapte etme imkanı sunabilir.

4. Yerbilimleri tabanlı şirketlerin deneyimlerinden faydalanılarak yeraltı depolama alanlarındaki sızıntı riskleri minimuma indirilebilir. Petrol şirketlerinin mevcut bilgi ve deneyimleri, potansiyel riskleri azaltacak ve maksimum verim sağlayacak jeolojik yeraltı CO₂ depolama sahası seçimi, sahanın izlenmesi ve depolama güvenliği için kullanılabilir.

5. Finansal destek ve araştırma fırsatları sunulması, CCUS projeleri için gerekli temel adımlardandır. Sanayideki CCUS uygulamalarının birçoğu, fosil yakıt için olanlar hariç olmak üzere, henüz olgunlaşma aşamasında olduğundan, bunları gerçekleştirebilmek için araştırma ve yatırıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple ülkelerin kendi desteğinin yanında CO₂ emisyonları gelecek için küresel bir sorun oluşturduğu için ülkelerin birbirlerini desteklemesi adına küresel işbirliği de gerekebilmektedir.

6. CCUS projeleri, üniversite kampüsleri, ülke ve dünya gibi birçok düzeyde uygulanabilir. Bu projeleri oluştururken her bir kademenin ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Katkı Belirtme

Sn. Doç. Dr. Şiir Kılış'a ODTÜ'deki Sürdürülebilir Kalkınma dersi kapsamında bu konunun rapor haline getirilmesine ilişkin yönlendirmeleri için teşekkür ederim.

Değinilen Belgeler

- Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Kanaboshi, H., Nakano, Y. 2021. Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO₂ capture and utilization and direct air capture. Energy and Climate Change 2, 100057. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100057>.
- Bisinella, V., Hulgaard, T., Riber, C., Damgaard, A., Christensen, T.H. 2021. Environmental assessment of carbon capture and storage (CCS) as a post-treatment technology in waste incineration. Waste Management 128, 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.046>.
- European Commission (Avrupa Komisyonu) t.y. A European Green Deal. 3 Ocak 2022'de https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en bağlantısından ulaşılmıştır.
- Greig, C., Uden, S. 2021. The value of CCUS in transitions to net-zero emissions. The Electricity Journal 34, 107004. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107004>.

ICRLP (The Institute for Carbon Removal Law and Policy) 2018. DACCS. Carbon Removal Fact Sheet.

- IEA (International Energy Agency) 2011. Combining Bioenergy with CCS: Reporting and Accounting for Negative Emissions under UNFCCC and the Kyoto Protocol. IEA Publications, 28 s.
- IEA (International Energy Agency) 2016. 20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment. IEA Publication, 111 s.
- IEA (International Energy Agency) 2020. Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage. IEA Publications, 171 s.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2018. Special Report: Global Warming of 1.5°C. 3 Ocak 2022'de https://www.ipcc.ch/sr15/bağlantısından_ulaşılımıştır.
- IRENA 2021. World Energy Transitions Outlook:1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 311s.
- Lackey, G., Vasyukivska, V., Huerta, N.J., King, S., Dilmore, R.M. 2019. Managing well leakage risks at a geologic carbon storage site with many wells. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 88, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.06.001>.
- Loria, P., Bright, M.B.H. 2021. Lessons captured from 50 years of CCS projects. *The Electricity Journal* 34, 106998.<https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106998>.
- Mandova, H., Patrizio, P., Leduc, S., Kjarstad, J., Wang, C., Wetterlund, E., Kraxner, F., Gale, W. 2019. Achieving carbon-natural iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production* 218, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.247>.
- Martin-Roberts, E., Scott, V., Flude, S., Johnson, G., Haszeldine, R.S., Gilfillan, S. 2021. Carbon capture and storage at the end of a lost decade. *One Earth* 4, 1569-1584. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.10.002>.
- Patrizio, P., Fajardy, M., Bui, M., Dowell, N.M. 2021. CO₂ mitigation or removal: The optimal uses of biomass in energy system decarbonisation. *iScience* 24, 102765. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102765>.
- Roming Jr., K.D. 2021. Workers have a stake in CCUS. *The Electricity Journal* 34, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107001>.
- Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., Tarkowski, P. 2021. Storage of hydrogen, natural gas, and carbon dioxide – Geological and legal conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 20010-20022.<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.131>.
- UNDP (United Nations Development Programme - Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı) 2022. Küresel Amaçlar. 18 Nisan 2022'de https://www.kureselamaclar.org/bağlantısından_ulaşılımıştır.
- Wei, N., Li, X., Liu, S., Lu, S., Jiao, Z. 2021. A strategic framework for commercialization of carbon capture, geological utilization, and storage technology in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 110, 103420. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103420>.
- Yang, F., Meerman, J.C., Faaji, A.P.C. 2021. Carbon capture and biomass in industry: A techno-economic analysis and comparison of negative emission options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144, 111028.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111028>.