



SERA GAZI SALIMINI AZALTMADA YENİ TEKNOLOJİ VE İNOVASYONLAR



İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/ bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.



1. GİRİŞ

Dünya yeni bir iklim rejiminin şafağındadır. Sanayi Devrimi'nden bu yana insani faaliyetler, dünyanın milyonlarca yıldır süren ekolojik dengesinde büyük tahribat yaratırken iklim değişikliğine yol açmış; insanlık, kendi eliyle kendisi için bir varoluşsal tehdit yaratmıştır. Bu tehdidin bertaraf edilmesi için yeni bir ekonomik ve toplumsal sisteme ihtiyaç vardır. Yeni sistem her şeyden önce küresel iklim değişikliğine yol açan sera gazı salımlarını durdurmak ve mümkünse var olanları azaltmak için gerekli tüm tedbirleri almalıdır.

Ancak insani faaliyetleri sürdürülebilir kılıp “iklim nötr” duruma ulaşmak; yani bilim insanlarının önerdiği gibi sera gazı salımlarını sıfırlayıp küresel ortalama sıcaklık artışını 2050 yılına kadar 1,5 derecenin altında tutabilmek oldukça zorlu bir hedeftir. Hedefe ulaşılabilmesi için toplumların ekonomik, kültürel ve toplumsal pratiklerinin yanı sıra davranış ve alışkanlıklarının pek çoğunda köklü değişiklikler yapılması gerekecektir. Değişikliklerin başında imalatta, tarımsal üretimde, elektrik üretiminde, ısınmada ve ulaşımda fosil yakıt kullanımının tümüyle terk edilmesi gelmektedir. Enerji üretiminde yeni ve etkin çözümlerin geliştirilmesi, enerji tüketiminde verimin artırılması zorunlu hâle gelmiştir. Tarımda, özellikle hayvancılıkta sera gazı salımının azaltılması için yeni yöntemler geliştirilmelidir.

Yeni yöntemlerin geliştirilmesi için ise inovasyona ihtiyaç vardır. Yeni teknoloji ve yöntemler bulunmalı, var olanlar ise geliştirilmelidir. Temiz teknolojiler, doğru kullanıldığı takdirde iklim değişikliği ile mücadelede en önemli araç olacaktır. Teknoloji, enerji ve kaynak verimliliğini

iyileştirebilir, doğal kaynakların azami verimle geri dönüşümünün sağlandığı “döngüsel ekonomiyi” kolaylaştırabilir, kaynakların daha iyi tahsis edilmesini sağlayabilir; emisyonları, biyolojik çeşitlilik kaybını ve çevresel bozulmayı azaltabilir.

Bu analizde, iklim değişikliği ile mücadelede atmosferde bulunan başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere zararlı gazların miktarını azaltabilecek güvenilir ve uygulanabilir teknolojilerin yanı sıra konuya ilişkin teknoloji ve inovasyonlar incelenecektir. Ayrıca ilgili teknolojilerin olgunluk durumu, getireceği yararlar ve uygulamaların önündeki olası engeller irdelenecektir.

2. İKLİM NÖTR HEDEFİNE ULAŞMAK İÇİN İHTİYAÇ DUYULAN İNOVASYONLAR

Birleşmiş Milletler Hükümetlerarası İklim Paneline (IPCC) göre, kötüleşen küresel iklim değişikliğine yanıt olarak, 2050 yılına kadar karbon nötrlüğünün sağlanması, gezegendeki en acil görevdir^[1]. Bu amaçla, sera gazı emisyonlarını azaltmak için mevcut üretim sistemlerinde reform yapmak son derece önemli bir zorunluluktur. Burada, yenilenebilir enerji üretmek, gıda sistemini dönüştürmek, atıkları değerlendirmek, sera gazı emisyon-suz üretim çözümlerini bulmak gerekmektedir.

21'inci yüzyıl teknolojileri pek çok alanda olduğu gibi sera gazı emisyonlarının sıfırlanmasında da yardımcı

olacak çözümler sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları hem çeşitlenmekte hem de söz konusu kaynakların verimi artmaktadır. Ulaşımında fosil yakıt yerine elektrik kullanımını hızla yaygınlaştırmaktadır. Yeni malzemeler, nesnelerin interneti, katmanlı imalat ve yapay zekâ sayesinde imalat, tarımda ve yapılar, diğer faydaları bir yana, özellikle enerji tüketimi hızla azalırken verimlilik artmaktadır.

Ne var ki gelişen teknolojiler henüz “fosil yakıtsız bir dünya” hedefine ulaşmak için yeterli olgunluğa ulaşamamıştır ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

2019 yılı sonunda patlak veren COVID-19 pandemisinin, küresel iklim değişikliği ile mücadelede hızlandırıcı bir etki yaratacağı anlaşılmaktadır. Zira küresel sera gazı emisyonlarında en büyük paya sahip olan gelişmiş ülkeler, pandemi ile mücadele tedbirlerinin, başta tedarik zincirlerindeki büyük aksamalar olmak üzere, küresel ekonomi üzerinde yarattığı olumsuzluklardan sonra, yeniden toparlanmayı sağlamak için “yeşil dönüşüm” yönelmiş görünmektedir. İklim değişikliği ile mücadele, COVID-19 pandemisinin ardından gelişmiş ekonomilerin toparlanması için hükümetlerin başvurduğu canlandırma paketlerinin ana temasını oluşturmaktadır.

Aralarında ABD, Japonya ve Güney Kore'nin de bulunduğu çok sayıda ülke yenilenebilir enerji ve elektrik altyapısı olmak üzere pek çok alanda Ar-Ge ve yatırımlar için büyük bütçeler ayırmıştır^[2]. ABD yönetiminin Mart 2021'de açıkladığı 325 milyar dolar tutarındaki “Araştırma, İnovasyon ve Pandemi Hazırlık Planı” bunlardan biridir ve ABD tarihinin savunma dışı en büyük bütçeli sivil araştırma geliştirme planıdır^[3]. Sekiz yıllık plana göre 35 milyar dolar, doğrudan “temiz teknolojilerin desteklenmesine” ayrılacaktır. Ancak planın diğer kalemlerinin de iklim değişikliği ile mücadeleye katkısı olacaktır. Örneğin bütçenin 174 milyar doları ABD'de elektrikli otomobil pazarının geliştirilmesinde kullanılacaktır. Kalan 100 milyar doların yarısı yarı iletken araştırmalarına, diğer yarısı ise bilimsel araştırmaları desteklemek üzere ABD Ulusal Bilim Vakfına ayrılacaktır.

Japonya, Ekim 2016'da duyurduğu ve 2021'de yenilediği “Yeşil Büyüme Stratejisi”^[4] ile 2050 yılına kadar karbon nötr olma, hatta ileri teknoloji sayesinde sıfırın ötesine geçme hedefini açıklamıştır. Plana göre Japonya, 2035'e kadar tüm araçları karbon emisyonuz hâle getirecek, yenilenebilir enerji ve nükleer elektrik üretimindeki payını yüzde 50-60'a çıkaracak; yeşil teknolojilere yatırımlarını 2030'a kadar 870 milyar dolara, 2050 yılına kadar ise 1,8 trilyon dolara çıkaracaktır^[5]. Japonya Hükümeti 2021 yılında, yeni nesil bataryaların, motorların ve yapay yakıtların geliştirilmesi için 17,5 milyar dolar tutarında bir “Yeşil İnovasyon Fonu” oluşturduğunu da duyurmuştur^[6].

Avrupa Birliği (AB) ise “yeşil temalı bir canlandırma paketinin” ötesine geçerek, 2020 yılı başında 2050 yılına kadar iklim nötr bir Avrupa yaratmak için ekolojik, toplumsal ve ekonomik dönüşüm öngören Avrupa Yeşil Mutabakatı'nı tanıtmıştır^[2].

İklim nötr hedefe ulaşmak için yeni teknoloji ve inovasyonlara ihtiyaç duyulduğu, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda sıkça vurgulanmaktadır. Belgede, “Dijital

teknolojiler, Yeşil Mutabakat'ın, birçok farklı sektörde, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması için kritik bir rol üstlenmektedir”^[7] denilmektedir. Metinde ayrıca, “Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın hedeflerine ulaşmak için, (...) AB aynı zamanda gerekli dijital dönüşümü ve araçları teşvik etmeli ve yatırımlar yapmalıdır” ifadesi yer almıştır.

Mutabakatta teknoloji ve inovasyona ilişkin hedeflerden bazıları şöyle sıralanmaktadır:

- AB'nin enerji arzının, tüketiciler ve işletmeler için güvenilir ve uygun maliyetli olması için, Avrupa enerji pazarı birbirine bağlı hâle getirilecek ve dijitalleştirilecektir.
- Avrupa, Yeşil Mutabakat hedeflerine ulaşmaya imkân sağlayan dijital dönüşüm potansiyelini sonuna kadar kullanacaktır.
- AB; yapay zekâ, 5G, bulut bilişim ve (verileri kaynağa yakınlıştırarak işlem gücünü güçlendiren) edge bilişim, nesnelerin interneti gibi dijital teknolojilerin; iklim değişikliğiyle başa çıkmak ve çevreyi korumak için politikaların etkisini hızlandırmasını ve en üst düzeye çıkarmasını sağlayacak önlemleri araştıracaktır.
- Yeni ve yenilenmiş binaların tasarımının her aşaması dögüsel ekonominin ihtiyaçlarıyla uyumlu olacak ve dijitalleşme artırılacaktır.
- Ulaşımında akıllı sistemler geliştirilecektir.
- AB, doğal felaketler ve iklim değişikliğini izleme, tahmin etme ve yönetme yeteneğini artırmak için Dünya'nın hassas bir dijital ikizinin geliştirilmesinde öncü olacaktır.
- Akıllı şebekeler, hidrojen ağları veya karbon yakalama, karbon depolama ve karbondan dögüsel amaçlarla yararlanma, enerji depolama gibi yenilikçi teknolojilerin ve altyapıların kullanılması teşvik edilecektir.
- Gıda üretim zincirindeki bütün oyuncular için yeni teknolojiler ve bilimsel keşiflerle fayda sağlanacaktır.
- Tarımda mahsulü haşere ve hastalıktan korumak için, yenilikçi yollar geliştirilecektir.
- Dijital araçlar kullanılarak, tüketicilere gıdanın nereden geldiği, besin değerleri ve gıdanın ekolojik ayak izi gibi detaylı bilgileri ulaştırmanın yeni yolları araştırılacaktır.

Dünya genelinde iklim değişikliği ile mücadeleye ilişkin plan ve belgelerde, teknolojilerden özellikle beş alanda çözümler geliştirmesi beklendiği anlaşılmaktadır: Temiz elektrik, temiz ulaşım, enerji verimli (hatta enerji üretilen depolayabilen) yapılar, temiz sanayi üretimi ve sera gazı üretmeyen bir tarım. Söz konusu sektörler pek çok ülkede sera gazı emisyonlarının hemen tamamının sorumlusudur^[8]. Ancak sektörlerin sera gazı emisyonları incelendiğinde, ülkeden ülkeye fark etmekle birlikte emisyonların yüzde 80-90'ının fosil yakıtların kullanılmasından kaynaklandığı görülmektedir.

Dünyada fosil yakıtların yerine alternatifler geliştirilmesi konusunda önemli ilerleme kaydedilmekle birlikte

bazı sektörlerde sorunlar sürmektedir. Demir-çelik, çimento, cam ve gübre gibi enerji yoğun üretimlerde, fosil yakıtların ikamesi olabilecek bir yenilenebilir alternatif henüz tam olarak geliştirilmemiştir. Dolayısıyla söz konusu sektörlerde, fosil yakıt kullanımının sıfırlanmasının yerine, karbon yakalama teknolojisine başvurulması seçeneği daha olası görünmektedir^[9].

McKinsey'in AB özelinde yaptığı bir araştırmaya göre, AB'nin 2050 yılına kadar iklim nötr hâle gelme hedefine ulaşması için gereken teknolojilerin yüzde 60'ı uygunluk seviyesine ulaşmış, yüzde 25-30'u teknoloji gösterim aşamasına ulaşmış, yüzde 10-15'i ise henüz Ar-Ge aşamasını tamamlamamıştır^[10]. McKinsey'in tahminlerine göre, dünyada iklim nötr hedefine ulaşabilmek için yeşil teknolojilere 2025 yılından itibaren her yıl yaklaşık 1,5-2 trilyon dolar yatırım yapılmasına ihtiyaç vardır^[10].

McKinsey, iklim nötr politikaların başarıya ulaşabilmesi için ortaya atılan planlardan yola çıkarak, geliştirilmesi gereken teknoloji alanlarını beş kategori altında toplamıştır:

- Ulaşım, yapılar ve sanayide fosil yakıtların yerine elektrik kullanmak,
- Elektrik şebekesini temiz elektrik elde edilecek şekilde yeniden kurmak,
- Hidrojenin potansiyelini kullanmak,
- Karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisini geliştirmek,
- Tarımda yeşil teknolojilere geçişi sağlamak.

Sera gazı azaltmada geliştirilen veya araştırmaları süren teknoloji ve inovasyonlar sonraki bölümlerde yukarıda bahsi geçen araştırmanın sınıflandırmasından ilham alınarak incelenecektir.

3. ULAŞIM, YAPILAR VE SANAYİNİN ELEKTRİFİKASYONU

Kömür, petrol ve doğalgaz, 20'nci yüzyılın başından itibaren yapıların, sanayinin ve ulaşım araçlarının başlıca enerji kaynağı olmuştur. Sera gazı emisyonlarının sıfırlanması için hâlen fosil yakıtlara bağlı olan makine, teçhizat ve süreçlerin yerini, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrikle çalışan sistemlere bırakması bir zorluluktur. Söz konusu köklü dönüşüm için çözümlerin bir kısmı çoktan geliştirilmekle birlikte daha fazla çaba sarf edilmesi gerekmektedir. Üzerinde durulan çözümlerden bazıları bu bölümde incelenecektir.

3.1 Güneş Enerjisinde Daha Yüksek Verimli Malzemeler

Dünyada rüzgâr, güneş, dalga ve diğer yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin toplam enerji tüketiminde payı artmakla birlikte, henüz elektriğin büyük bölümü fosil kaynaklardan elde edilmektedir. İklim nötr hâle gelmek için elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının yüzde 100'e ulaşması gerekmektedir.

Ancak aşılması gereken sorunlar bulunmaktadır. Bir çözüm, yenilenebilir enerji santrallerini ve bunların verimliliğini artırmaktır. Verimliliğin artırılması için yeni malzemeler geliştirilmiş ve geliştirilmektedir.

Silikon, galyum arsenit, bakır indiyum, galyum selenit ve kadmiyum tellür gibi inorganik yarı iletkenler kullanılan geleneksel ince film güneş hücreleri, yüksek güç dönüştürme verimliliklerine ve göze çarpan operasyonel istikrara sahip oldukları için büyük ölçekte üretilmişlerdir. Güneş panellerinin veriminin artırılması için organik malzemeler de geliştirilmektedir:

- **Perovskite güneş pilleri:** Perovskite, uzay çalışmalarında kullanılan galyum arsenitten sonra (yüzde 40), güneş panellerinde kullanılacak en verimli malzemedir (yüzde 25) ve ondan çok daha ucuzdur. Perovskite malzemeler, mükemmel ışık emilimine, yük taşıma kabiliyetine ve uzun kullanım ömrüne sahiptir. Tüm bu özellikleri ile düşük maliyetli, endüstriyel uyumluluk ve yüksek verimlilik sağlarlar^[11].
- **Kuantum nokta güneş pilleri:** Geleneksel güneş hücrelerine alternatif olarak geliştirilen kuantum noktalı güneş hücreleri hem üretim maliyetleri hem de verimlilikleri bakımından rakiplerine göre üstün durumdadırlar. Yapay atomlar olan kuantum noktalar, neredeyse bütün yarı iletken metal birleşiklerinden elde edilebilmektedir. Kuantum noktalı güneş hücrelerinin verimini yüzde 66'ya kadar çıkarma potansiyeline sahiptirler^[12]. Birkaç şirket kuantum nokta güneş pilleri üretmeye başlamıştır^[13] ve çeşitli ülkelerdeki araştırma laboratuvarlarında çalışmalar sürmektedir^[14]. Ne var ki henüz büyük ölçekte üretim başlamamıştır.

3.2 Daha Gelişmiş ve Ağıraksız Bataryalar

Elektrik bataryalarının ulaşım araçlarında kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. 2021 yılında küresel elektrikli araç satışlarının, bir önceki yıla kıyasla yüzde 108 artışla 6,75 milyona ulaştığı tahmin edilmektedir^[15]. Elektrik bataryalı helikopterler^[16], ticari kargo gemileri^[17] ve tren lokomotifleri^[18] seferlere başlamıştır.

Gelişmelere rağmen McKinsey, elektrikli araçlar tedarik zincirinin tam anlamıyla işler hâle gelmesi gerekeceği için, ulaşım alanında iklim nötr duruma geçişin 2045 yılını bulabileceğini öngörmektedir^[10].

Kara araçlarının yüzde 100 elektrikli hâle gelmesi diğer ulaşım türlerine göre daha kısa vadede erişilebilir bir hedef olabilir. Büyük otomotiv üreticilerinin hemen hepsi ve aralarında Türkiye'den TOGG'un da bulunduğu yeni oyuncular, elektrikli araçları pazara sürmekte veya sürmeye hazırlanmaktadır. Çoğunluğu lityum iyon bataryalara sahip araçlar kısa mesafeli ulaşımında hız ve menzil açısından tatmin edici düzeylere ulaşmıştır. Ancak uzun mesafeli ulaşım açısından menzil sorunu sürmektedir. Otomotiv üreticileri, batarya üreticileri ile işbirlikleri kurarak daha uzun menzil sağlayan bataryalar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Örneğin lityum metal bataryalar ve katı hâl bataryaları üzerinde ABD ve Güney Kore'de yapılan Ar-Ge çalışmalarında yaklaşık 800 km menzil sunan

bataryalar geliştirildiği belirtilmektedir^[19]. Ne var ki yapılan bilimsel araştırmalar, söz konusu yeni nesil elektrikli araç bataryalarının güvenlik sorunları bulunduğunu ortaya çıkarmıştır^[20]. Elektrikli araçların menzil ve gücünün güvenli biçimde artırılması için ya daha yüksek kapasiteli batarya kullanmak ya araçları daha hızlı şarj etmenin yolunu bularak büyük bataryalara gereksinimi azaltmak ya da araçların ağırlığını düşürerek daha az enerjiye ihtiyaç duyulması gerekmektedir.

Olası seçeneklerden üçüne de yanıt verecek bir gelişme yaşanmaktadır. ABD ve Avrupa'da bazı şirketler ve araştırma laboratuvarları "yapısal batarya" (structural battery) alanında önemli ilerleme kaydetmiştir. Yapısal bataryalar, adının işaret ettiği gibi hem üzerinde bulunduğu araçların yapısal unsuru (örneğin otomobilin şasisi veya kaportası) hem de bataryasıdır. Yapısal bataryalar aslında araçların taşıyıcı unsuru hâline geldikleri için "ağırlıksız batarya" olarak da anılmaktadır^[21].

Tanım itibarıyla "yapısal bataryaların" hem sağlam hem de esnek olması gereklidir. İsveç'in Chalmers Teknik Üniversitesi uzmanları, her iki temel özelliğe sahip bir yapısal batarya geliştirmek için karbon fiberden yararlanmıştır. Söz konusu bataryada negatif elektrot karbon fiberden, pozitif elektrot ise lityum demir fosfat kaplı alüminyum folyodan yapılmış ve iki elektrot fiberglas ile ayrılmıştır. Karbon fiber, hem elektrot hem iletken hem de yük taşıyıcı görev üstlenmektedir. Karbon fiber yapısal batarya hâlen elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların ürettiğinin beşte biri kadar elektrik üretmekte ancak "ağırlıksız" olduğu için aracın elektrik ihtiyacı oldukça azalmaktadır^[21].

ABD ve Avrupa'da bazı otomotiv üreticileri, yapısal bataryalar üzerinde çalıştıklarını açıklamıştır^[22]. Yapısal bataryaların asıl büyük etkiyi ise, küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 2,5'inden^[23] sorumlu olan havacılıkta göstereceği tahmin edilmektedir. Airbus^[24] gibi uçak üreticileri, uçakların elektrikli hâle getirilmesi için uzun süredir çalışmalar yürütmektedir. Ancak lityum iyon bataryalar ile yapılan denemelerde, söz konusu bataryalar hem ağır oldukları hem de havada güvenlik zafiyetleri gösterdikleri için, somut ilerleme sağlanamamıştır. Yine de gövde ve kanatlarda kullanılabilecek karbon fiber yapısal bataryaları hem uçakların ağırlığının azaltılması (ve dolayısıyla yakıt ihtiyacının azaltılması) hem de yeterli seviyede tahrik gücü elde edilmesi için en etkili çözüm olabilir^[22]. AB, katı hâl bataryaları, enerji depolama sistemleri ve yapısal bataryaların geliştirilmesi amacıyla üç projeye destek vermektedir. Söz konusu projelerde ilk etapta 50 yolcu kapasitesine kadar küçük bölgesel yolcu uçaklarının tümüyle elektrikli hâle getirilmesinin mümkün olabileceği belirtilmektedir^[25].

3.3 Daha Verimli Enerji Sistemleri

Dünyadaki yapılar, dünyada üretilen enerjinin yüzde 32'sini tüketmektedir ve elektrik üretiminden kaynaklananlar dahil olmak üzere enerji bağlantılı sera gazı emisyonlarının yüzde 19'undan sorumludur. Söz konusu oranın gelişmekte olan ülkelerde milyonlarca insanın uygun barınma koşullarına erişmesiyle birlikte ikiye, hatta üçe

katlanabileceği ifade edilmektedir^[26]. Emisyonların azaltılması ve hatta sıfırlanması için sadece enerji üretiminin emisyonsuz hâle getirilmesi değil, binaların da daha fazla enerji verimli hâle getirilmesi gereklidir.

Yapıların enerji veriminin artırılması için başvurulan yöntemlerin başında izolasyonun artırılması gelmektedir. Türkiye'de "mantolama" olarak bilinen ve yaygın olarak uygulanan bina dış cephesi izolasyonu, önemli oranda enerji tasarrufu sağlamakla birlikte, iklim nötr hedefe ulaşılması için yeterli değildir. Hedefe ulaşmak için akıllı enerji kontrol sistemleri, akıllı sayaçlar, LED aydınlatma, ısı pompalarının yanı sıra yüksek verimli ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinden de daha fazla yararlanılması gereklidir. Bir sonraki aşamada binaların enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrikle karşılanması, hatta enerji konusunda binaların pasif konumdan çıkartılıp elektrik üretir ve şebekeye besler hâle getirilmesi hedeflenmelidir.

Son yıllarda yapıların enerji verimliliğini artıracak ve hatta elektrik üreterek yapı sahipleri veya paydaşlarının ek gelir elde etmelerini sağlayacak cihaz ve malzemeler geliştirilmiştir.

3.3.1 Daha Verimli Isı Pompaları

Yapıların ısınma, soğutma ve sıcak su ihtiyaçlarını karşılayan iklimlendirme cihazları olan ısı pompalarının kullanımını, yüksek enerji tasarrufu sağlamaları nedeniyle dünya genelinde teşvik edilmektedir. Avantajlarından ötürü ısı pompaları dünyada giderek yaygınlık kazanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) verilerine göre dünya genelinde kurulu ısı pompası sayısı 2015-2020 döneminde her yıl ortalama yüzde 10 artışla 180 milyona ulaşmıştır. Bu artışa rağmen ısı pompaları, yapıların enerji ihtiyacının sadece yüzde 7'sini karşılamakla birlikte, bu oranın 2050 yılına kadar yüzde 90'a ulaşma potansiyeli bulunmaktadır^[27]. Ancak pompaların çalışması için elektrik gerektiğinden çevre üzerinde bir miktar etkisi vardır. Elektrik dışında alternatifler üzerinde araştırmalar sürerken UEA, ısı pompası kullanan yapılarda elektriğin yapı çatılarına kurulacak güneş enerjisi panelleriyle sağlanmasının teşvikini önermektedir^[27].

3.3.2 Enerji Tasarruflu ve Elektrik Üreten Pencereler

Yapılarda elektrik üretme seçeneği güneş enerjisi panelleriyle sınırlı değildir. Güneş enerjisi panellerinin veriminin artmasında devrim yaratan perovskit adlı kristal malzeme, pencerelerden de elektrik üretilmesine imkân tanımaktadır. Perovskit filmle kaplı yapı pencereleri hem enerji kaybını azaltmakta hem de elektrik üretebilmektedir. Söz konusu malzemeyle kaplı pencereler, soğuk günlerde şeffaflaşarak güneş enerjisinin yapı içine daha fazla girmesine imkân tanıyıp enerji sarfiyatının azalmasına katkı sağlamaktadır. Dış ortam sıcaklığının arttığı günlerde ise camlar koyulaşarak mekânın aşırı ısınmasını engellemekte ve böylece soğutucu/klima kullanımını azaltabilmektedir. Ayrıca ısınan perovskit, enerjisinin yüzde 11,3'ü kadarını elektriğe çevirebilmektedir^[28]. Ancak uygulamadaki nadir "güneş

penceresi” örnekleri, sadece bir akıllı telefonu günde birkaç kez şarj etmeye yetecek, standart ev elektriğini karşılamaktan uzak miktarda elektrik üretmektedirler^[29]. Ayrıca perovskit pencere camlarının ömrü henüz yeterli değildir. Söz konusu malzemenin ömrünün uzatılması ve veriminin artırılması için Ar-Ge çalışmaları sürmektedir^[28]. Aynı şekilde başta kuantum nokta teknolojisinin kullanıldığı pencerelerin geliştirilmesi için de çalışmalar sürmektedir^[29].

3.3.3 Elektrik Üreten Jaluzi

Güneş panellerinin küçük birer modeli gibi olan jaluzilerin geliştirilmesi için de çalışmalar sürmektedir. Pencerelerin içine veya dışına yerleştirilebilecek söz konusu jaluziler, güneş enerjisi paneli malzemelerinden geliştirilmektedir ve güneşin açısına göre eğimini değiştirebilmektedir. Güneş jaluzilerinin ürettiği elektrikle, yapıların elektrik harcamalarının yüzde 30 oranında azalacağı ileri sürülmektedir^[30].

3.4 Sanayi Üretimini ve Tedarik Süreçlerinin Tümüyle Elektrikli Hâle Getirilmesi

Sanayi, enerjide büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlı olmasından dolayı önemli bir sera gazı emisyonu kaynağıdır. Küresel sanayi, sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 30’undan sorumlu olup, söz konusu oranın yüzde 24,2’si enerji kullanımından kaynaklanmaktadır^[8].

Bahse konu yüksek oranın düşmesi büyük ölçüde sanayinin daha elektrikli hâle gelmesine bağlıdır. Yenilenebilir enerji fiyatları ve elektrikli ekipmanların fiyatları düşer, sanayide üretim ve tedarik zinciri operasyonlarının tamamı elektrikli hâle getirilirse, iklim nötr bir sanayiden bahsetmek mümkün olabilir. McKinsey’e göre 2050’de iklim nötr hedefine ancak endüstrinin dönüşümü tamamlandığında ulaşılabilir^[10]. Ancak söz konusu dönüşüm zorlu ve yüksek maliyetli bir süreçtir. Ayrıca böylesi bir dönüşüm, yeniden vasıflandırma süreçleriyle desteklenmediği takdirde yaygın işsizlik gibi toplumsal ve ekonomik sorunlara yol açabilir.

Sanayinin tümüyle elektrikli hâle gelmesi için yeni teknolojiler devrededir. Yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemleri fabrikaların tüketiminde önemli tasarruf sağlamaktadır. Söz konusu sistemler tesislere yerleştirilebilecek güneş enerjisi panelleri, rüzgâr ağaçları, ısı pompaları, kojenerasyon veya trijenerasyon sistemleri ve diğer elektrik üretebilecek sistemleri de yöneterek optimum enerji verimliliğini ve asgari enerji maliyetlerini sunabilir^[31]. Söz konusu yönetim sistemleri genellikle “akıllı fabrika” olarak anılmaktadır ve sadece enerji değil tüm üretim süreçlerini kapsayabilmektedir. Akıllı fabrikalar dünyada giderek yaygınlık kazanmaktadır. Söz konusu fabrikalar sayısız yarar sağlamaktadır. Örneğin Ericsson’ın, ABD’nin Teksas eyaletindeki 5G ekipmanları üreten akıllı fabrikasının enerji açısından yüzde 25 daha verimli olduğu, güneş panelleri aracılığıyla gerekli elektriğin yüzde 17’sini üretebildiği, 150.000 litrelik tanklarla yağmur suyunu toplayıp yeniden kullandığı ve nakliye mesafesini beş kata kadar kısalttığı belirtilmektedir^[32]. Gelecekte akıllı fabrikalarda süreçlerin tümüyle

otomatikleşeceği ve insan müdahalesi olmadan “karanlıkta” üretim yapılacağı, dolayısıyla aydınlatma, ısıtma, soğutma, havalandırma gibi sistemlere de gerek kalmayacağı kaydedilmektedir^[33].

Ancak her türlü sanayi üretimini akıllı hâle getirmek mümkün olmayabilir. Dolayısıyla özellikle enerji yoğun ağır sanayide fosil yakıtlara alternatifler geliştirilmesi gerekecektir. Üzerinde en çok durulan çözüm hidrojen enerjisidir.

4. DAHA UCUZ VE DAHA VERİMLİ HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen kainatta en çok bulunan elementtir. Saf hidrojenin pek çok uygulama alanında yakıt olarak veya sürdürülebilir enerji kaynaklarıyla üretilen elektriğin depolanması ve taşınmasında (Bkz. Bölüm 5.1) kullanılması iklim nötr hedefine ulaşmada en etkili yollardan biridir. Tahminlere göre hidrojen, küresel enerji talebinin yüzde 15-20’sini karşılayabilir ve sera gazı emisyonlarının yüzde 30 azalmasını sağlayabilir^[10].

Ancak hidrojen doğada serbest hâlde bulunmamaktadır. Saf hidrojenin elde edilmesi için başta suyun elektrolize edilmesi veya doğalgazın yakılarak bileşenlerine ayrılması gerekmektedir. Elektroliz sera gazı salımı olmamasından dolayı en uygun çözümdür ancak şimdiye dek maliyetinin düşürülmesinde yeterince ilerleme sağlanamaması nedeniyle en az başvurulan yöntemdir. UEA’ya göre dünyada üretilen hidrojenin sadece binde biri elektroliz ile elde edilmektedir^[34].

Hidrojenin elde edilmesi için yeni yöntem ve teknolojiler geliştirilmektedir. Bu bölümde hidrojen konusundaki teknoloji ve inovasyonlar ile hidrojenin kullanım alanlarındaki gelişmelere göz atılacaktır.

4.1 Düşük Maliyetli Hidrojen Üretimi

Hidrojen araştırmaları 2000’li yıllarda büyük ivme kazandıktan sonra duraklama dönemine girmiş ancak COVID-19 pandemisiyle yeşil dönüşüm politikaları ön plana çıkınca yeniden gözde hâle gelmiştir. Uluslararası sivil toplum örgütü The Hydrogen Council, sadece 2021 yılının ilk yarısında büyük ölçekli 131 adet hidrojen projesi açıklandığını^[35] ve toplam hidrojen projesi sayısının 359’a yükseldiğini bildirmiştir. Söz konusu projeler hayata geçtiğinde yılda 11 milyon ton hidrojen üretilmesi mümkün olabilecektir. Hidrojen projelerine yatırım miktarı ise 130 milyar doları aşmıştır^[35].

Ancak hidrojen tam potansiyelinin kullanılması için söz konusu projelerin tam kapasite faaliyete geçeceği 2030 yılını ve sonrasını beklemek gerekecektir. Ayrıca hidrojen üretiminde maliyetlerin düşürülmesi için yeni teknoloji ve inovasyonlara ihtiyaç vardır.

4.1.1 Mevcut Hidrojen Üretiminde İyileştirmeler ve Turkuaz Hidrojen Seçeneği

Öncelikle hidrojen üretimini enerji yoğun olmaktan çıkması gereklidir. Günümüzde hidrojen üç yöntemle üretilmektedir:

- **Mavi Hidrojen:** Hidrojenin neredeyse tamamı (%95)^[36] doğalgaz gibi fosil kaynaklardan elde edilen enerji ile, “buhar metan reformasyonu” denilen bir yöntem uygulanarak, metandan hidrojenin ayrıştırılması yoluyla elde edilmektedir. Yöntemde önemli miktarda CO₂ emisyonu ortaya çıkmaktadır. Söz konusu tesisler karbon yakalama ve depolama teknolojisi ile CO₂ emisyonlarını yüzde 50 ila 90 arasında düşürebilmektedir. Emisyonu azaltılmış yöntemle elde edilen hidrojene ise “mavi hidrojen” denilmektedir.
- **Yeşil Hidrojen:** Bu yöntemde genellikle su hidrolize edilerek oksijen ve hidrojen atomlarına ayrıştırılmaktadır. Elektroliz için gereken enerji ise rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilmektedir. Ne var ki yöntem, çok daha pahalıya mal olduğu için büyük ölçekte üretime uygun görünmemektedir. UEA’ya göre hidrojenin sadece binde biri elektroliz ile elde edilmektedir^[34]. McKinsey’e göre hidrojen, 2030 yılına kadar kg başına bir dolardan daha düşük bir fiyata üretilebilirse, ekonomik hâle gelecektir^[10]. Tahminler, elektrolizör maliyetlerinin önümüzdeki 10 yılda yüzde 60 ila 80 oranında düşebileceğini göstermektedir^[37].
- **Turkuaz Hidrojen:** Hidrojen üretiminde hibrid bir çözüm de geliştirilmiştir: “yeşil” ve “mavi” hidrojen yöntemlerini birleştiren “turkuaz hidrojen”. Bu yöntemde, yine doğalgaz başta olmak üzere fosil yakıtların bileşiminde bulunan hidrojen, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrikle ısıtılarak ayrıştırılmaktadır. Doğalgazdaki metan, hidrojen ve katı karbona dönüştürülmektedir. Yöntemin birçok faydası vardır ve hidrojen üretiminde daha az CO₂’nin doğaya salınması bunların başında gelmektedir. Elde edilen siyah karbon ise, otomobil lastiklerinden kaplama malzemelerine ve plastik yapımına kadar pek çok sanayi alanında temel girdi olarak kullanılabilir. Günümüzde “Turkuaz hidrojen” üretimi tesisleri kurulmaya başlanmıştır. Avustralya’nın Yeni Güney Galler eyaletindeki Tallawarra B elektrik santralinde hem doğalgaz hem de hidrojen yakarak elektrik üreten türbinler kullanılmaktadır^[38]. Söz konusu türbinler, elektrik tüketiminin zirveye ulaştığı zamanlarda aynı anda devreye girerek talebi karşılamaktadır.

4.2 Nükleer Hidrojen

Gelecekte ise başlıca hidrojen kaynağı nükleer santraller olabilir. Mevcut nükleer santraller, doğalgaz kazanlarından daha düşük maliyetlerle yüksek kaliteli buhar üretebilir ve “buhar reformasyonu” dahil birçok endüstriyel işlemde kullanılabilir^[39]. Ancak yüksek kaliteli buhar elektrolize edildiğinde ve saf hidrojen ile oksijene ayrıştırıldığında yüksek verimde hidrojen elde etmek mümkün olabilmektedir. Hesaplamalara göre 1.000 MW’lık bir nükleer reaktörden yılda 150.000 ton hidrojen üretmesi mümkündür^[40]. ABD Hükümeti potansiyelin değerlendirilmesi için bir araştırma programı başlatmıştır^[41].

4.3 Ulaşımında Hidrojen Kullanımını Artıracak Çözümler

4.3.1 Kara Araçlarında Yakıt Olarak Hidrojen

Hidrojenin enerji yoğunluğu yüksektir. Elektrikli taşıtlar için verimli bir yakıt alternatifi olabilir. Hidrojenli yakıt pilleri sayesinde elektrikli araçlar güçlü tork ve daha uzun menzil elde edebilirler. Yakıt pilleri üzerinde çalışmalar uzun süre almakta ve bugün başta Hyundai ve Toyota olmak üzere birkaç büyük küresel otomotiv üreticisi yakıt pilli modellerini piyasaya sürmektedir.

Hidrojen yakıtlı araçlar bir dizi avantaj sunmaktadır^[42]:

- Sera gazı salımı yoktur, tek atığı sudur.
- Fosil yakıtlı araçlar kadar kısa sürede doldurulabilmektedir (azami 5 dakika).
- Elektrikli bataryalar kadar hacimli ve ağır değildir.
- Teknolojisi kanıtlanmıştır ve mekanik olarak basittirler.

Söz konusu avantajlarının yanı sıra hidrojen yakıt pilleri ölçeklenebilmekte ve uzun mesafe kamyonları için de elektrikli bataryalara göre çok daha makul bir çözüm sunabilmektedir^[43]. Nitekim hidrojen yakıtlı kamyonların seri üretimi de başlamıştır^[44].

Ancak hidrojenli yakıt pillerinin sunduğu avantajlar yanında zayıf yönleri de bulunmaktadır:

- Yakıt istasyonları sayısı çok azdır.
- Teknolojisi hâlâ çok pahalıdır ve elektrikli otomobillerden daha pahalıdır.
- Temiz araç olup olmadığı hidrojenin nasıl üretildiğine bağlıdır.

Karayolunda hidrojen yakıt pillerinin yaygınlaşması, uç alanda gelişmeye bağlı görünmektedir:

- Temiz hidrojen üretiminin artması,
- Hidrojen dolum istasyonlarının yaygın hâle gelmesi,
- Hidrojenli araç üretiminde ölçek ekonomisinin yakalanması.

4.3.2 Denizyolunda Hidrojen ve Amonyakın Yükselişi

Küresel denizcilik sektörüne yön veren Birleşmiş Milletler Uluslararası Denizcilik Örgütüne (IMO) göre, küresel denizcilik sektörü, sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 3’üne sebep olmaktadır^[45]. Küresel iklim değişikliği ile mücadele taleplerinin yanı sıra fosil yakıtların yüksek fiyatları, sektörü alternatif enerji çözümlerine yöneltmiştir. Sektörde alternatif olarak LNG, metanol, biyoyakıtlar ve etanol, üzerinde düşünülen enerji kaynaklarından bazılarıdır^[46]. Söz konusu yeni çözümlerden hidrojen, ürettiği güç ve karbon salımı olmaması nedeniyle en uygun çözüm olarak görünmekle birlikte; hidrojenin gemilerde sıvı olarak taşınması önemli bir güçlük yaratmaktadır. Hidrojen ancak önemli miktarda enerji sarf edilerek -253 santigrat derecede sıvı hâle getirilebilmektedir^[47]. Ayrıca

sıvı hidrojen, uzun mesafeli deniz taşımalarında güvenlik sorunları da yaratmaktadır. Sorunlar nedeniyle denizcilik örgütleri, yandığı zaman CO₂ üretmeyen renksiz bir yakıt olan amonyak üzerinde durmaktadır. Amonyak, yenilenebilir enerji, hidrojen, su veya havadan elde edilebilir ve üretimi dünya genelinde yapılabilir. Ayrıca amonyak hem yakıt pillerinde hem de içten yanmalı motorlarda kullanılabilir ve dolayısıyla gemilerde yakıt dönüşümü daha kolay ve daha az maliyetli olabilir.

Amonyakın iki önemli avantajı daha bulunmaktadır: Hidrojenin aksine çok düşük ısılarla soğutulmasına gerek yoktur ve lityum iyon bataryalara göre 10 kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir^[48]. Avantajlarına rağmen amonyak henüz deniz yolu taşımacılığının başlıca yakıtı hâline gelememiştir. Bunun başlıca iki nedeni, mevcut amonyak üretiminin ağırlıklı olarak fosil yakıt kullanılarak yapılması ve büyük ölçüde gübre üretiminde kullanılmasıdır. Yeşil hidrojen kullanarak uygun maliyet ve miktarda “Temiz Amonyak” üretmek mümkündür. Ancak daha önce yeşil hidrojen üretiminin yaygınlaşması gereklidir. Temiz amonyak üretiminin artması için talep vardır. Denizcilik sektörünün amonyağa ilgisi büyüktür ve önümüzdeki 10 yılda amonyak üretiminde önemli ölçüde artışlar beklenmelidir. Örneğin Amerikan Denizcilik Örgütü tahminlerine göre, 2050 yılında ticari gemilerin yüzde 30’undan fazlası amonyak yakıt hücreli tahrik sistemlerine sahip olacaktır^[48].

4.3.3 Havacılıkta Hidrojen ve E-Yakıt Seçenekleri

Ulaştırma iklim nötr hedefe ulaşılması için yeni teknoloji ve inovasyona ihtiyacı olan bir diğer sektör havacılıktır. Küresel havacılık sektörünün, COVID-19 pandemisinden önemli ölçüde olumsuz etkilenmeden önce, küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 2,5-3,5’inden sorumlu olduğu tahmin edilmiştir^[49]. Havacılıkta, jet motorlarında kullanılacak yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Son 30 yılda uçak tasarımlarındaki değişikliklerle jet yakıtı tüketimi yüzde 50’ye varan oranda düşürülmüştür^[50]. Ne var ki maliyetlerin düşmesi havayolu seyahatlerinin iki kat artmasına neden olmuştur. Tahminlere göre artış trendi sürecek ve 2050 yılında 10 milyar yolcu sayısına ulaşacaktır^[50]. Dolayısıyla iklim nötr hedefe ulaşılması için sera gazı düşük yakıtların havacılıkta da kullanılması önem arz etmektedir. Diğer taşıma türlerinde olduğu gibi biyoyakıtlar, lityum iyon batarya gibi seçenekler değerlendirilmektedir. Hidrojenli yakıt pilleri konusunda ciddi Ar-Ge çalışmaları yürütülmektedir ve hatta Airbus çeşitli yolcu kapasitelerinde üç hidrojen yakıt pilli uçak prototipi geliştirmiştir^[51]. Hidrojenli yakıt bataryaları kütle başına jet yakıtlarından üç kat^[52], lityum iyon bataryalara göre ise 100 kattan daha fazla^[53] enerji sağlamaktadır. Ancak hidrojenin -253 santigrat derecede soğutulup sıvılaştırılarak kullanılmak zorunda olması havacılık için de büyük bir sorundur. Hidrojen kütle başına jet yakıtlarına göre daha fazla enerji sağlamaktadır ancak hacim açısından dört kat daha fazla yere sahip olması gereklidir^[54]. Sorunun çözümü için uçaklarda ya yolcu sayısını azaltıp hidrojen tanklarına daha fazla yer

ayrılmalı veya daha büyük uçaklar tasarlanmalıdır. Ayrıca havaalanlarında hidrojen depolanması için daha geniş alanlar bırakılmalıdır.

Nitekim sektörde daha düşük CO₂ emisyonlu, (büyük ihtimalle biyoyakıtlardan elde edilecek) sürdürülebilir hava yakıtlarının geliştirilmesi de desteklenmektedir. Benzer yakıtlar, kimyasal olarak jet yakıtları ile aynı olacakları için uçakların tasarımlarında değişikliğe ve havaalanlarında büyük depolama alanlarına ihtiyaç bırakmayacaktır.

Bir diğer seçenek ise “e-yakıt” (e-fuel) olarak adlandırılan hidrojen ile CO₂’nin tepkimesinden ortaya çıkan “sentetik gaz” (syngas) kullanımınıdır. Sentetik gaz daha sonra Fischer-Tropsch süreci denilen işlemle önce ham petrole ve ardından ham petrolün rafine edilmesiyle jet yakıtına dönüştürülebilmektedir^[55]. Dünyanın ilk “e-yakıt” fabrikası Norveç’te 2023’te faaliyete geçecektir^[56]. Tesiste İsviçreli firma Climeworks’un doğrudan hava yakalama teknolojisiyle ürettiği CO₂ ile yeşil hidrojen, yani yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen hidrojen kullanılmaktadır ve yılda 100 milyon litre e-yakıt üretililecektir.

Hidrojenin veya e-yakıtın havayolu taşımacılığında ciddi alternatifler hâline gelebilmeleri için, maliyetlerinin (her ikisi de halen jet yakıtından en az dört kat daha yüksek maliyetle üretilmektedir), üretimde ölçek ekonomisi yakalanmak suretiyle düşürülmesi gerekmektedir.

4.4 Sanayide Hidrojen Enerjisinin Kullanımı ve Hidrojen Boru Hatları Önerisi

Hidrojen, son 20 yıldır endüstriyel kullanım için bir gereklilik olmuştur. 2021 sonu itibarıyla 80 milyon tondan fazla olan hidrojene olan talep, artmaya devam etmektedir^[57]. Küresel hidrojen üretiminin yüzde 90’ı sanayide, kalanı ise ulaşım ve yapılarda kullanılmaktadır. Hidrojen yüzde 55 ile en çok amonyak üretiminde kullanılmaktadır. Ardından yüzde 25 ile petrol artma faaliyetleri ve yüzde 10 ile metanol üretimi gelmektedir^[58]. Hidrojen, sanayide ihtiyaç duyulan elektrik üretiminde de kullanılmaktadır. Walmart, Whole Foods, Coca-Cola ve FedEx tesislerinde ihtiyaç duydukları elektriğin bir kısmını hidrojen yakıt pillerinden elde etmektedir^[59].

Yeşil hidrojen, fosil kaynaklardan elde edilen enerjinin yoğun olarak kullanıldığı demir-çelik, çimento, cam, metal eşya sanayii ve gübre gibi sektörlerde iklim nötr duruma ulaşma yolunda önemli bir kilometre taşı olabilir. Sadece demir-çelik sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 7,2’sinden sorumludur ve en yüksek emisyon oranına sahiptir^[8]. Çelik üretimi için geleneksel yüksek fırın teknolojisi bir ton çelik başına yaklaşık 1,8 ton CO₂ salımı yapmaktadır. İklim nötr hedefte geleneksel yöntem yerine yeşil hidrojenden faydalanılması öngörülmektedir. Nitekim Avrupalı çelik üreticileri hidrojenli çelik üretimi için pilot projeler başlatmıştır^[60].

Sanayide yeşil hidrojen kullanımının artması UEA tarafından da desteklenmektedir. Ajansın G-20 ülkeleri için hazırladığı bir rapora göre, sanayide hidrojen kullanımının artması için öncelikle yeşil hidrojen üretiminin artırılması gereklidir. Söz konusu artış için ise teşviklerin artırılması önerilmektedir. Ayrıca özellikle sanayi tesisleri ve

limanlara doğalgaz boru hatları gibi hidrojen boru hatları inşa edilmesi de tavsiye edilmektedir. Ajansa göre böylece hidrojen kullanımı artırılarak genel hidrojen fiyatlarının düşmesi ve hidrojenin ciddi ve temiz bir alternatif hâline gelmesi mümkün olabilecektir^[34].

5. DAHA GÜÇLÜ VE VERİMLİ ELEKTRİK ŞEBEKELERİ

Dünyanın büyük bölümünde elektrik şebekeleri eski, verimsiz ve karbon yoğundur. UEA tahminlerine göre 2050'de neredeyse iki katına çıkacak olan elektrik talebini karşılamaktan çok uzaktır^[61]. Elektrik şebekelerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik verilerek en kısa sürede yenilenmesi gereklidir. Ne var ki çoğu yenilenebilir kaynaktan elektrik üretimi istikrarlı değildir; bu da yenilenebilir enerjilerin yaygın olarak uygulanmasını engeller. Dolayısıyla enerji depolama teknolojisini geliştirmek, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin güvenilirliğini ve istikrarını sağlamak açısından çok önemlidir. Enerji depolama kapasitesi geliştirilmesinin yanı sıra iletim ve dağıtım hatlarının kayıp ve kaçakları en aza indirecek şekilde yenilenmesi gereklidir. Dünya genelinde yenileme çabaları artmaktadır ve muhtemelen iklim nötr hedefine en hızlı ulaşacak sektörlerden biri elektrik üretimi, iletimi ve dağıtım sektörü olacaktır. Yine de geliştirilmesi gereken alanlar bulunmaktadır.

5.1 Daha Uzun Süreli ve Daha Yüksek Kapasiteli Elektrik Depolaması

Uzun yıllardır yapılan yatırımlar sonucu dünyada rüzgâr ve güneş enerjisinde maliyetler azalmaktadır^[62]. Ancak her iki yenilenebilir enerji kaynağının doğal nedenlerden (rüzgâr kesilmesi, güneşin batması vb.) ötürü üretimlerine zaman zaman ara vermek zorunda kalınmaktadır. Aralıksız üretimin mümkün olmaması, elektrikte tümüyle yenilenebilir kaynaklara dönülmesini engellemektedir. Elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımına son verilmesi için yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin verimli biçimde depolanıp ihtiyaç hâlinde şebekeye aktarılmasının sağlanması gereklidir.

Dünyada elektrik depolama konusunda son yıllarda hızlı bir ilerleme kaydedilmiş ve pek çok yöntem geliştirilmiştir. Çeşitli kimyasal tepkimeler üzerine (lityum iyon, sodyum iyon, nikel kadmiyum, kurşun asit) bataryalar ve hidrojenli yakıt hücreleri ilk akla gelenlerdir^[63]. Aralarında en yaygın olarak kullanılanı lityum iyon bataryalardır ancak yüksek kapasiteli elektrik depolamaya uygun değildir. Lityum iyon bataryalar yerine yüzde 40 daha yüksek kapasiteyle çalışmayı vadeden lityum sülfür batarya teknolojisinin yakın gelecekte kullanıma sunulması beklenmektedir. Söz konusu bataryalar üzerinde yapılan deneyler, çabuk tükendikleri ve yeniden şarj süreleri uzun olduğu için henüz sanayide kullanıma uygun olmadıklarını göstermiştir^[64].

Öte yandan nanoteknoloji günümüzde yeni elektrik enerjisi depolama teknolojilerinin önünü açmaktadır. Grafen süperkapasitörler bunlardan biridir. Mevcut

karbon süperkapasitörler yerine grafen kullanılması hâlinde, bataryalar çok daha verimli biçimde şarj edilebilecek ve enerji depolama kapasiteleri de artabilecektir^[65]. Enerji depolama için kimyasal tepkimelerin dışında çözümler de geliştirilmektedir. Örneğin Hollanda, oksijensiz ortamda yaşayabilen bakteriler (anaerobik bakteriler) kullanılarak güneş enerjisi panellerinden elde edilecek elektriği depolamak üzere araştırmalar yapmaktadır. Söz konusu bakteriler sürekli olarak kendini yenilediğinden, üretilecek bataryaların ömürleri de sonsuz olabilecektir.

Ayrıca bir ülkenin tamamı veya bir kısmının elektrik ihtiyacını karşılamak için çok daha büyük kapasiteli elektrik depolama sistemlerine ihtiyaç vardır. Örneğin teknoloji girişimcisi Elon Musk'un Neoen şirketi Avustralya'da kurduğu, büyük lityum iyon bataryalarından oluşan bir futbol sahası büyüklüğündeki elektrik depolama tesisi, 100 MW gücündedir ancak bir kesinti hâlinde 20.000 konutun elektrik ihtiyacını sadece birkaç saat sağlayabilecek güçtedir^[66]. Yine de bölgenin nüfus yoğunluğunu göz önüne alan ve uygun enerji çözümünün başta rüzgâr olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları olduğuna kanaat getiren Avustralya Hükümeti, yatırımı uygun bulmuştur. Daha sonra Avustralya'nın nüfus yoğunluğu nispeten yüksek Victoria eyalet yönetimi de, 300 MW'lık bir depolama alanı kurulması için Neoen ile anlaşmaya varılmıştır^[67].

Daha yüksek kapasiteli elektrik depolama için üzerinde durulan bir yöntem, "hidrojen depolaması" veya "hidrojen nakli" olabilir. Hidrojen depolaması, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin fazlasının yeşil hidrojen veya metan gazı elde edilmesinde kullanılması ve ardından gerektiğinde elektrik üretimine aktarılması yöntemidir. Bu yöntemle gaz hâline getirilen elektrik taşınabilir hâle getirilebilir, aylarca depolanabilir ve uzun mesafe ulaşım araçlarının ya da elektrik santrallerinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlayabilir^[68].

Yapılan yatırımlarla elektrik tüketiminin beşte birinden biraz fazlasını^[69] yenilenebilir kaynaklardan elde eden AB için söz konusu yöntem oldukça cazip görünmekte ve Ar-Ge çalışmaları desteklenmektedir^[70]. "Hidrojen depolama" sistemlerine ilişkin olarak büyük bölümü Almanya'da olmak üzere 60'tan fazla proje yürütülmektedir. Almanya'yı Danimarka, İngiltere, Fransa, ABD, İsviçre, İspanya, Kanada ve Japonya izlemektedir^[68].

Yakın gelecekte yaygınlık kazanması beklenen bir diğer elektrik depolama yöntemi ise "akış bataryaları" (flow batteries)^[71]. Akış bataryalarında elektrik, iki büyük tanka konulan yanıcı olmayan elektrolit sıvılar arasında elektron akışı sağlanarak depolanmaktadır. "Redox Akış bataryaları" olarak da anılan bataryalar, kimyasal enerjiyi elektriğe, elektriği de kimyasal enerjiye çevirebilmektedir. Böylelikle bu bataryalar, fazla bakım gerektirmeden neredeyse sonsuza kadar elektrik depolayıp boşaltabilmekte ve yeniden dolmaktadır. Uzun süre hiç kullanılmasa bile elektrik depolama kapasitesinde kayıp yaşamamaktadır. Üstelik -40 ila +50 santigrat dereceleri arasında sorunsuz çalışabilmektedir. Ölçeklendirilemediği için ulaştırma araçlarında kullanılması mümkün



görülmemekle birlikte, akış bataryaları özellikle yapılar ve endüstriyel tesisler için hayli ekonomik bir elektrik depolama alternatifi olarak belirlemektedir. Hâlen kurulu olan en büyük akış bataryası ABD'nin Seattle kentindedir ve sadece 8 MW gücündedir^[72]. Ancak daha büyük kapasiteli akış bataryaları geliştirmek üzere çalışmalar sürmektedir. Çin'in Dailan kentinde inşa edilen bir vanadyum akış bataryasının 800 MW gücünde olacağı kaydedilmektedir^[73].

Vanadyum akışlı pillerden farklı olarak çinko bazlı akış pilleri, düşük maliyet ve yüksek enerji yoğunluğu avantajları nedeniyle enerji depolamada büyük ilgi görmüştür. Bazı çinko bazlı akış pilleri şu anda geliştirme aşamasındadır. Vanadyum akış bataryalarına ve çinko bazlı akış bataryalarına ek olarak, yeni akış pil sistemlerine, özellikle yeni organik veya inorganik redoks çiftleri üzerine araştırmalara artan bir ilgi ortaya çıkmıştır. Birçok araştırma makalesi yayınlanmış olması enerji depolama uygulamaları için umut vermekle birlikte, söz konusu akış bataryaları hâlen geliştirme safhasındadır^[57].

5.2 Elektrikli Araç-Akıllı Şebeke Entegrasyonu

Dünya genelinde elektrikli araç kullanımı pazar payı yüzde dokuz seviyesindedir ve 2030 yılında yüzde 50'ye ulaşması beklenmektedir^[74]. 2021 yılında 16 milyon üzerine çıkan elektrikli araçların sayısı daha da artarsa şarj için yeni çözümler bulunması gerekecektir. Belki de çözüm araçları kendisi olacaktır zira söz konusu araçlar önemli miktarda elektrik depolama kapasitesi sunmaktadır. Piyasaya sürülen elektrikli araçlar 60-90 kilovat gücündedir. Dolayısıyla mevcut 16 milyon elektrikli araçla teorik olarak 960-1440 GB (1 GB= 1.000.0000 kilovat) elektrik depolamak mümkündür.

Elektrikli araçların taşıdığı potansiyel, araçtan-şebekeye (vehicle-to-grid -V2G) teknolojisinin gelişiminin önünü

açmıştır. Bir yandan akıllı şebekelerle elektrikli araçların entegrasyonunu sağlayan dijital platformlar^[75], diğer yandan ise akıllı şebekelerle iki yönlü elektrik akışı sağlayabilen elektrikli araçlar^[76] geliştirilmektedir. Çabalar başarıya ulaştığı takdirde, elektrikli araçlar hem şebekeden kolaylıkla yararlanabilecek hem de olası elektrik kesintilerinde bir veya birkaç konutun temel elektrik ihtiyacını karşılayabilecektir. Üzerinde durulan alternatifler arasında elektrik aydınlatma direklerinin aynı zamanda elektrik şarj üniteleri hâline getirilmesi^[77], araçların durmadan yoldan alacağı elektrikle bataryasını doldurması^[78], konut çatılarının güneş enerjisi panelleriyle donatılıp yapı duvarlarının elektrikli araçların da yararlanabileceği elektrik depolama alanları hâline getirilmesi^[79] bulunmaktadır. Örneğin Nissan Leaf marka elektrikli araçlar, gerektiğinde bir konuta veya şebekeye elektrik aktarabilecek donanıma sahiptir. Nitekim Nissan, 2011'deki büyük deprem sonrası şebeke normale dönene kadar kendi elektrik ihtiyacını 66 adet Leaf marka araçla sağlamıştır^[76]. Ancak elektrikli araçlarla şehir şebekelerinin tamamen entegre hâle gelmesi için öncelikle akıllı şebeke uygulamalarının, ardından da akıllı şehir uygulamalarının yaygınlık kazanması gerekecektir.

5.3 Yeni Nesil, “Cep Herkülü” Nükleer Enerji Reaktörleri

Çernobil ve Fukuşima kazalarının ardından dünyada gözden düşen nükleer enerji, iklim değişikliği ile mücadelede “istikrarlı temiz enerji” arayışında yeniden dikkatleri üzerine toplamıştır. Uluslararası Enerji Ajansının 2018 verilerine göre dünya genelindeki nükleer santraller temiz elektriğin yaklaşık yüzde 28'ini üretiyor. Söz konusu üretim nükleer füzyon yöntemiyle gerçekleşmektedir. Nükleer füzyonun bir dizi sorunu bulunmaktadır: Yüksek yatırım ve üretim maliyetleri, nükleer yakıt teminindeki güçlükler ve radyoaktif maddelerin bertarafı büyük

sıkıntı yaratmakta, tesislerin güvenliği giderek daha önemli hâle gelmektedir^[57].

Temiz ve güvenli olan nükleer füzyon teknolojisi ise, 30 yılı aşkın bir süredir devam eden geliştirme çalışmalarına rağmen henüz olgunluktan uzaktır. Benzeri nadir görülen uluslararası işbirliğine ve harcanan 30 milyar dolara rağmen, projenin en az 10 yıl daha hayata geçmesinin güç olduğu belirtilmektedir^[80].

Füzyon yöntemi olgunlaşana kadar mevcut füzyon santrallerinin helyum, tuz eriyikleri veya sodyumlu soğutma gibi tekniklerle verimli, güvenli ve uzun ömürlü hâle getirilmesi seçeneği ön plana çıkmaktadır^[57].

Bir diğer çözüm ise küçük ve modüler nükleer reaktörlerin geliştirilmesi ve bunların, uzun mesafe deniz yolu taşımacılığı, havayolu taşımacılığı ve enerji yoğun endüstriyel tesislerde kullanılarak iklim nötr hâle gelmelerine katkıda bulunmaktır. Uluslararası Atom Enerjisi Kurumuna göre hâlen dünyada 50 kadar küçük nükleer reaktör tasarım çalışması bulunmaktadır. Arjantin, Çin ve Rusya'daki çalışmalar olgunluk seviyesine ulaşmıştır^[81]. Küçük nükleer reaktörlerin, sağladıkları esneklik nedeniyle iklim nötrlüğü arayan dünyada ciddi bir seçenek olacağı açıktır. Ancak yüksek maliyetleri önemli bir sorun olabilir^[82]. Üretim ve talepte anlamlı artışlar olmadığı takdirde yüz milyonlarca doları bulan maliyet, küçük ve modüler nükleer santrallerinin cazip hâle gelmesinin önündeki en önemli engel olacak gibi görünmektedir.

6. SANAYİ VE YAPI SEKTÖRÜNDE İKLİM NÖTR MALZEMELER

Küresel sera gazı emisyonu sadece fosil yakıtların kullanılmasından değil, karbon ayak izi yüksek malzemelerin üretim ve kullanımından da kaynaklanmaktadır. Bu nedenle karbon ayak izi yüksek malzemeler yerine iklim nötr malzemelerin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda malzeme bilimi, çevreye zararı olmayan çok sayıda malzeme geliştirmiştir.

6.1 Sanayide İklim Nötr Malzemeler

6.1.1 Yeşil Poliüretan

Koltuklardan ayakkabılara kadar hayatın pek çok alanında esneklik, sağlamlık, yumuşaklık ve sıcaklık sağlanması amacıyla yaygın biçimde kullanılan poliüretan, günümüzde yılda yaklaşık 16 milyon ton üretilmektedir. Ancak poliüretan, içerdiği zehirli kimyasal maddeler nedeniyle cilt, göz ve boğaz tahrişi, astım ve diğer ciddi akciğer sorunları gibi bir dizi olumsuz sağlık etkisine yol açabilir. Ayrıca petrol ürünleriyle üretilmektedir ve karbon ayak izi çok yüksektir. Bu nedenle poliüretan üretiminde alternatif yöntemler arayışı uzun yıllardır sürmektedir. Son yıllarda çeşitli çözümler gündeme gelmiştir. Örneğin ABD'li uzmanlar söz konusu malzeme yerine keten tohumu yağı, atık yemeklik yağ ve algler gibi organik malzemelerden "yeşil poliüretan" geliştirdiklerini duyurmuşlardır^[83]. Bu yöntemle üretilen yeşil poliüretanın ürünlerde aranılan niteliklere göre ayarlanabilir olduğu belirtilmektedir. Bir

başka deyişle, yeşil poliüretan ile esnek ve sağlam ayakkabı tabanları ya da yarı sert ve deforme olmaz koltuk süngerleri üretilebilecektir. Yeni yöntemin mevcut poliüretan üretim tesislerinde de kullanılabilmesi için çalışmalar sürmektedir.

6.1.2 Grafen

Grafen, saf karbondan elde edilen bir malzemedir. Grafende karbon, tek atomlu kalın bir tabakada petek şeklinde düzenlenmiştir. İnce, güçlü ve esnek bir malzeme olan grafen, elektriği ilettiği ve neredeyse şeffaf olduğu için "mucize malzeme" olarak adlandırılmaktadır^[65]. Potansiyel uygulama alanları sonsuzdur. Güneş pilleri, dokunmatik ekranlar, sıvı kristal ekranlar, tuzdan arındırma teknolojisi, havacılık malzemeleri, daha verimli transistörler, daha güçlü ama hafif zırhlar ve daha pek çok alanda kullanılabilir, karbon ayak izinin azaltılmasında büyük ölçüde etkili olabilirler.

6.1.3 Aerografit

Elektrikli araçların en önemli zafiyetlerinden biri bataryaların çok hacimli ve ağır olmasıdır. Aerografit bu sorunu çözebilecek bir malzemedir. 2012'de Almanya'nın Hamburg Üniversitesi uzmanları tarafından geliştirilen aerografit, çok hafif bir malzemedir. Öyle ki strafordan 75 kat daha hafiftir^[84]. Boş tüp ağlarından yapıldığı için küçük bir titreşim veya dokunuşta harekete geçebilmektedir. Siyahtır ve güneş ışığını tümüyle emmektedir. Malzeme güçlüdür, yüzde 95'e kadar sıkıştırılabilir ama deforme olmaz. Aynı zamanda elektriği iletebilmektedir. Sıra dışı özelliklerinden ötürü elektrikli araçların yanı sıra elektrikli bisikletler, uçaklar ve uydularda kullanılabilir.

6.1.4 Lignin Yapıştırıcı

Selülozdan sonra yeryüzünde en fazla bulunan doğal polimerdir. Özellikle kâğıt üretiminde ortaya çıkmaktadır ancak çoğunlukla kâğıt endüstrisi tarafından tesislerin ısıtılması için yakılarak imha edilmektedir. Oysa son derece doğal bir yapıştırıcıdır. Dolayısıyla çevreye zararlı pek çok kimyasal yerine kullanılabilir^[85].

6.1.5 Biyoplastikler

Özellikle okyanuslarda ve içme sularında mikroplastik varlığı büyük bir sorun olduğu için ambalaj ve kaplama malzemesi olarak plastiğin yerini alacak, doğada çözülebilen, biyolojik malzemeli plastik üretimi gittikçe artmaktadır. Bilim insanları güneşin morötesi ışınlarına maruz kaldığında sadece üç dört saatte çözülebilen meyve fruktozundan plastik dahi üretmişlerdir^[86].

6.1.6 Biyokarbon Fiber

Karbon fiber (Karbon elyaf) 1950'lerden beri katran, naylon ve orlondan oluşan; çelikten dört buçuk kat daha hafif ama üç kat daha dayanıklı olması^[87] nedeniyle kullanım alanları hızla yaygınlaşan bir malzemedir. Ancak yapımında petrol ürünlerinin kullanılması karbon ayak izine yol açmaktadır. Bilim insanları karbon fiber yapımında petrol ürünleri yerine doğada çözünebilen biyolojik malzeme kullanılması için uzun süredir araştırmalar

yürütmektedir. Karbon fiber yapımında selüloz ve lignin kullanımı konusunda ilerlemeler kaydedilmiştir. Söz konusu biyolojik malzemelerle üretilen karbon fiberin; otomotiv, metal eşya endüstrileri yanında yapılar da çelik ve beton yerine geçebilecek, hafif ancak güçlü bir malzeme olarak kullanılabilceği belirtilmektedir^[88].

6.2 Yeşil Yapı Malzemeleri

6.2.1 Yeşil Çimento

COVID-19 pandemisi öncesi yılda yaklaşık 3,6 milyar ton üreten küresel çimento endüstrisi tek başına küresel sera gazı emisyonunun yüzde 3'ünden sorumludur^[8]. Çünkü çimento üretmek için kireç taşının 2.700 dereceye kadar ısıtılıp kimyasal reaksiyona girmesi gereklidir. Dolayısıyla çimento üretiminde muazzam miktarda enerji harcanmaktadır. Çimento üretiminde enerji kullanımını azaltmak için bilim insanları, yaptıkları araştırmalar sonucunda düşük enerji kullanılarak geleneksel çimento ile benzer fiziki özelliklere sahip çimentolar geliştirmişlerdir. “Yeşil çimento” olarak anılan çimentoların bazılarının ticari üretimleri de başlamıştır. Örneğin ABD’li Solidia firmasının çimentosunun katılması için CO₂ gazı kullanılmaktadır. Şirkete göre Solidia, yaygınlık kazanırsa inşaat sektörünün karbon salımı yüzde 70 oranında azalabilir^[89]. Yine ABD’den Cerasec firması ise, çimento ve cam üretiminde ortaya çıkan uçucu kül ve yenilenebilir sıvılarla ürettiği ve Ekkomaxx adını verdiği bir yeşil çimento ürettiğini duyurmuştur. Ekkomaxx üretim yönteminin, karbon ayak izinin sıfır olduğunu, doğal kaynak kullanımını yüzde 95, su kullanımını ise yüzde 50 azalttığını belirtmektedir^[90]. Genellikle çelik ve cam gibi diğer sera gazı salımı yüksek endüstrilerin atıklarından düşük enerji kullanılarak elde edilen yeşil çimento türleri de küresel piyasalara sunulmuştur. Yeşil çimentonun 2020 yılında pazar büyüklüğü 20,962 milyar dolara çıkarken^[91], 313,60 milyar dolarlık küresel çimento pazarının da yaklaşık yüzde 7’sini oluşturmuştur^[92].

Yakın gelecekte Türkiye de yeşil çimento pazarına yeni ürünler sunacaktır. Limak Çimento ve Denizli Çimento “borlu çimento” geliştirmiş ve pazara sunmaya hazırlanmaktadır. Borlu çimento hem üretim esnasında daha az enerji kullanımına ihtiyaç duymakta hem de üretim sürecinde daha az kireçtaşı kullanılmasını sağlayarak karbon salımının düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Üstelik borlu çimento, geleneksel çimentolara kıyasla yüzde 40’a kadar daha iyi izolasyon sağlayan gelişmiş bir malzemedir.

6.2.2 Sentetik Kireç Taşı

Sadece çimentonun değil çimentonun yapımında kullanılan; madenden çıkarılması, taşınması ve işlenmesi sırasında sera gazı emisyonu yaratan malzemelerin de iklim nötr hâle getirilmesi gerekmektedir. Çimentonun ana bileşeni olan kireç taşının iklim nötr biçimde elde edilmesi için de çalışmalar sürmektedir. ABD’li start-up Blue Planet System, çimento yapımında karbon emisyonunu azaltmak için, daha düşük enerji kullanılarak elde edilen “sentetik kireç taşı” üzerinde çalışmaktadır^[93]. Aslında karbon yakalama teknolojisi üzerinde çalışan

şirket, doğadan ilham alan “karbon mineralleştirme” tekniği ile havadaki CO₂’yi alarak kayaç hâline getirmekte ve hapsedmektedir. Söz konusu yöntemle elde edilen kayaçların (sentetik kireç taşı), doğal kireç taşı kadar güçlü, yüksek performanslı ve düşük maliyetli olduğu kaydedilmektedir^[93].

6.2.3 Yeşil Tuğla

Yapı inşaatlarında kullanılan tuğlaların üretiminde de önemli miktarda enerji harcanmakta ve sera gazı emisyonu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tuğla yapımında kullanılan çimento gibi malzemelerin karbon ayak izi de yüksektir. Tuğla yapımında daha az enerji ve iklim nötr malzemelerin kullanılması için çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin Avustralyalı bir şirket, maden atıkları gibi endüstriyel atıklara CO₂ enjekte ederek tuğlada çimento yerine kullanılabilcek bir malzeme geliştirmiştir. Üstelik bu yöntemde CO₂ de doğal bir süreçle elde edilmektedir^[94].

6.2.4 Kendi Kendini Onaran Beton

İklim nötr hedefler arasında mevcut yapıların yenilenmesi de önemli bir yer tutmaktadır. Ulaşılması istenilen bir hedef, üretilen betonun yeşil olması kadar uzun ömürlü de olmasıdır. Özellikle açık havaya maruz kalan betonda, hava değişimleriyle birlikte çatlaklar oluşmakta ve zamanla beton dağılabilmektedir. Hollandalı bilim insanları bir bakterinin genlerini kullanarak betonların ömrünü uzatmanın yolunu bulduklarını duyurmuşlardır^[95]. Söz konusu bakteriler suya maruz kaldıklarında kireç taşının iki ana bileşeninden biri olan kalsit üretilen betondaki mikro çatlakların içine dolarak betonun ömrünü uzatmaktadır.

6.2.5 Şeffaf Ahşap

Yapılar, motorlu taşıtlar ve mutfak eşyaları gibi pek çok alanda kullanılan camın üretiminde de yüksek miktarda enerji kullanılmaktadır. Camın da sürdürülebilir malzemelerle düşük enerjiyle üretilmesi için çareler aranmaktadır. ABD^[96] ve Avrupa’da^[97] yapılan araştırmalar ağaçlardan elde edilen selüloz ve lignin maddeleriyle ışığı yüzde 85 oranında geçirebilen^[98] şeffaf ahşap elde edilebileceğini göstermiştir. Söz konusu yöntemle geliştirilen ahşap camın su geçirmez, yanmaya dayanıklı ve güçlü olduğu da belirtilmektedir. Şeffaf ahşabın, yapılar da ve otomotiv endüstrisinde kullanılabilceği belirtilmektedir. Hatta şeffaf ahşabın camları “dokunmaya hassas” hâle getirilebileceği ve “dokunmatik ekran” olarak taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılabilceği belirtilmektedir^[97].

6.2.6 Aerojel

Aerojel, nanoteknoloji sayesinde jel bir maddenin içerisindeki sıvı ögenin hava ile değiştirildiği katı bir maddedir. Duman gibi görüntü verdikleri için “Donmuş duman” veya “mavi duman” diye de adlandırılmaktadır. Yüzde 99,98’i havadan oluşur^[99]. En önemli özellikleri çok hafif ve çok yalıtkan olmasıdır. Dolayısıyla yapıların izolasyonunda kullanılabilceği ve yapıların enerji verimliliğini arttırabileceği belirtilmektedir.

6.2.6 Çelik Sünger

Almanya’da araştırmacılar üç boyutlu lazer litografi tekniği ile “sudan daha hafif, çelikten daha güçlü” bir nanoteknoloji ürünü malzeme geliştirdiklerini duyurmuşlardır. Polimer ve alüminyum bileşiklerinden yapılan söz konusu malzeme sünger görünüşlü, hafif ve esnektir ancak çelikten daha güçlüdür^[100]. Yeni malzemenin, karbon ayak izi yüksek çelik veya beton yerine yapıların inşasında kullanılabileceği belirtilmektedir.

6.2.7 Mantardan Yalıtım Malzemesi

Mantarların köklerinde bulunan miselyum yapı yalıtımında doğal bir çözüm hâline gelebilir. İngiltere başta olmak üzere birkaç ülkede kurulan yeni şirketler, miselyumu kullanarak ayda en az 16 ton CO₂ temizleyebilen bir yalıtım malzemesi hâline getirmek üzere çalışmalar yürütmektedir^[101]. Miselyum elde edilebilen mantarlar, bitkisel gıda atıkları üzerinde yetiştirebilme, dolayısıyla önemli miktarda CO₂ depolamakta ve hızla büyümektedir. Ayrıca kalıplar içinde büyütülebilmekte ve istenilen şekil verilebilmektedir. Miselyum, ısıya karşı son derece dayanıklıdır ve su geçirmez olduğu için miselyum yalıtım malzemeleri binaların güvenliğini de artırabilmektedir. Ayrıca kolaylıkla şekil verilebildiği için miselyum kullanılarak ev eşyaları üretilebilir. Hatta deriye alternatif olarak kullanılabileceği ve kıyafet, çanta ve aksesuar üretilebileceği belirtilmektedir^[102].

7. TARIM İÇİN YEŞİL TEKNOLOJİLER

Tarım sektörü küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 19’undan sorumludur^[6]. Tarımdan ortaya çıkan sera gazları arasında en önemlisi metandır ve CO₂’ten katbekat daha fazla ısınmaya yol açmaktadır. Tarımda metan emisyonlarını azaltmak için tarım tekniklerinin değişmesi, toplumun beslenme alışkanlıklarının değişmesi, gıda israfı ve çöp yönetiminin daha verimli hâle getirilmesi, orman ve çayırların restorasyonu gereklidir. Tarımda iklim nötr hedefe yönelik yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Bu bölümde söz konusu teknolojiler incelenecektir.

7.1 Sıfır Emisyonlu Tarım Ekipmanları

Tarımdan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması için en kestirme yol, tarımda kullanılan araç ve ekipmanlarda fosil yakıtların kullanılmasına son verilmesi ve elektrikli araç ve ekipmanların kullanılmasıdır. Dünya genelinde pek çok tarım makineleri üreticisi, çeşitli tip ve güçte elektrikli traktörler ve tarım makineleri geliştirilmiştir^[103]. Hatta ABD’de bir firma, şebeke entegrasyonlu bir traktör de tanıtmıştır. Gridractor adı verilen bir elektrikli traktör, bataryasında elektrik depolayabilmektedir. Çiftçiler gerektiğinde söz konusu traktörün depoladığı elektrikle sulama ve diğer ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir^[104].

Ancak tarım ekipmanlarının elektrikli hâle getirilmesi, diğer ulaşım araçlarının elektrikli hâle getirilmesinden daha zorlu bir görevdir. Nüfusun yoğun olmadığı geniş

arazilerde elektrikli şarj istasyonlarının sayısı yeterli olmayabilir ve daha da önemlisi elektrikli araçların bataryaları tarım iş makinelerinin ihtiyacı olan yüksek gücü üretemeyebilir. Tarım ekipmanları için de hidrojen yakıt pili ve biyoyakıt seçenekleri üzerinde daha fazla durulmaktadır ve alternatif yakıtları kullanan tarım makineleri geliştirilmiştir^[105].

7.2 Metan Önleyiciler (Metane Inhibitors)

Bazı şirketler büyükbaş hayvanların sindirim süreçlerini değiştirerek metan üretmelerini önleyecek yem katkı maddeleri (feed supplements) ve yem ikameleri (feed substitutes) geliştirmektedir. Deneyle geliştirilen ikamelerin metan üretimini yüzde 30-50 arasında azaltabileceğini göstermektedir. Ancak bunların gerek hayvanların gelişiminde gerekse süt ve et kalitesinde bazı sakıncalara yol açabileceği de kaydedilmektedir^[106].

7.3 Yeşil Amonyaktan Yeşil Gübre

Suni gübre hem üretiminde hem de kullanımında sera gazı emisyonlarına yol açmaktadır. Suni gübre kullanmadan mahsulde verim artışı elde edebilmek için araştırmalar sürmektedir. Üzerinde durulan yöntemlerden biri, önceki bölümlerde aktarıldığı üzere, yeşil hidrojen ile üretilen yeşil amonyak kullanılarak gübre üretilmesidir. Yeşil amonyak gübrenin dışında tarım makinelerinde yakıt olarak kullanılabilir^[107]. Ne var ki amonyaklı gübre yüzey ve yeraltı sularına karıştığında ekolojiye büyük zararlar verebilmekte, solunduğunda insan sağlığını da olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla yaygın kullanımı öncesi güvenlik önlemlerinin artırılması gereklidir^[108].

7.4 Mikrobik Canlılarla Hayvan Gübresi Yönetimi (Aneorobik Manure Processing)

Çiftlik gübresi önemli miktarda metan gazı üretmektedir. Metan gazı salımına son vermek için yapılan araştırmalarda geliştirilen yöntemlerden “Aneorobik Sindirim” iklim nötr olması nedeniyle umut vermektedir. Anaerobik sindirim, oksijensiz ortamda yaşayabilen özel bakterilerin organik bileşiklerini parçalayarak metan gazı üretmesi sürecidir. Biyomühendislik yoluyla çoğaltılan bakteriler hayvan gübresinin yanı sıra organik madde içeren atık suları ve gıda atıklarını parçalayıp sindirebilmektedir. Söz konusu yöntemde hayvan gübresi veya diğer atıklar “reaktör” adı verilen ve içinde oksijensiz ortamda yaşayabilen bakteriler bulunan havadan yalıtılmış bir kaba konur. Bakteriler gübreyi parçalarken ortaya çıkan metan gazı “biyogaz” olarak depolanır. Aynı işlem mahsul bitki ve gıda artıklarıyla da yapılabilmektedir. Gaz üretiminin ardından bitki ve gıda atıkları doğal gübre olarak kullanılabilir^[109].

7.5 Biyomühendislik

Genetik biliminde gen düzenleme tekniği (CRISP-CAS9) gibi gelişmeler, bitki ve hayvan genleri üzerinde değişiklikler yaparak istenilen niteliklerin (hastalıklara karşı direnç, düşük metan emisyonu, kuraklığa dayanıklılık vb.) kazandırılmasına imkân tanımaktadır. Biyomühendislik uygulamaları tarımda verimi artırırken sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azaltılmasına yardımcı olabilmektedir.

Biyomühendislik alanında faaliyet gösteren startup'lar, sentetik biyoloji ile sadece daha az kaynak kullanarak daha çok verim elde edebilmekte ve ürünler genellikle daha sağlıklı olmaktadır. Örneğin ABD-Almanya ortaklığı olan Joyn Bio adlı şirket, ekinler üzerinde gen değişikliği yaparak ihtiyacı olan azotu gübreden değil topraktan alması için ekinleri "eğitebileceğini" belirtmektedir^[110]. Türkiye'de ise Ankara Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinde nükleer ışınlama tekniğini kullanarak normalde on yıllar alabilecek melezleme süreçlerini birkaç yıla indirerek, istenilen nitelikte bitki (kısa sürede pişen nohut, tadını kaybetmeden uzun süre bozulmayan domates vb.) tohumları geliştirilmektedir^[111].

Biyoteknoloji geleneksel yöntemde karbon ayak izi yüksek, zehirli veya kıt kaynakların yerine doğa dostu biyolojik çözümler de geliştirmektedir. ABD'de "Huee" adlı bir biyomühendislik firması tekstil endüstrisi için, kimyasallar ve petrol türevlerinden ziyade şeker tüketen mikroplar tarafından yapılan boyalar üretmektedir^[112]. Çok sayıda madencilik şirketi doğaya zararlı kimyasallar yerine biyomühendislik ürünü bakteriler kullanmaya başlamıştır^[113]. Modern Meadow firması ise biyolojik malzeme kullanarak giyim ve aksesuar sektöründe kullanılacak biyosentetik deri geliştirmiştir^[114].

8. KARBON YAKALAMA, KULLANMA VE DEPOLAMA

İklim nötrlüğü sağlayarak küresel ısınmanın 1,5 derecenin altında tutulması hedefine ulaşmak için sadece daha fazla emisyonun önüne geçmek yetmemekte, atmosferde mevcut olan başta CO₂ olmak üzere sera gazlarının miktarını da azaltmak gerekmektedir. Üzerinde durulan çözümlerden arasında en tartışılmalı Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (KYKD) yöntemleridir.

KYKD, ağır sanayi tesisleri ve enerji santrallerinin faaliyetlerinden ortaya çıkan CO₂'nin atmosfere ulaşmasını engellemek ve atmosferdeki CO₂'yi yakalayıp hapsedmek üzere geliştirilen bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. KYKD teknolojilerinin geliştirilmesi gerektiğini savunan kurumların başında gelen UEA'ya göre, 2050 yılına kadar iklim nötr hâle gelebilmek için küresel sera gazı emisyonları sadece enerji kullanım verimliliğini artırarak ve enerji altyapısını yenileyerek değil; aynı zamanda atmosferdeki CO₂'nin yüzde 19'unu azaltarak mümkün olabilecektir. Söz konusu hedefe ulaşmak ancak KYKD ile mümkün olabilir çünkü bu yöntem kullanılmazsa CO₂'yi azaltmanın maliyeti yüzde 70 daha yüksek olacaktır^[115]. Dolayısıyla KYKD teknolojisindeki son durum ve önündeki engeller yakından incelemeyi gerektirmektedir.

8.1 KYKD Yöntem ve Teknolojileri

CO₂ yakalama, kullanma ve depolama (KYKD) teknolojisi dört farklı süreçten oluşur:

- CO₂'nin emisyon kaynaklarından ayrılması,
- CO₂ dönüşümü ve kullanımı,

- CO₂ nakliyesi,
- CO₂'nin atmosferden uzun vadeli izolasyonun sağlanarak yeraltında depolanması.

Sanayi ve fosil yakıtlı elektrik santrallerinde karbon yakalama, üretim sırasında ortaya çıkan atık gazlardan CO₂'yi ayırma amacını taşır. Farklı kimyasal reaksiyonlardan yararlanılarak yapılan CO₂ ayırma işlemi fosil yakıtların yakılmasından sonra gerçekleştirilir. Genellikle başvurulan en gelişmiş iki işlem, sıvı çözücü ve katı emicilerdir. CO₂ sıvı çözücünün içinde çözünür ya da katı emicinin yüzeyine yapışır.

"Doğrudan Karbon Yakalama" (DKY) olarak anılan atmosferdeki CO₂'nin yakalanması ise tamamen bağımsız tesisler aracılığıyla yapılmaktadır. Özel tesislerde güçlü makineler havayı içine çekmekte ve yine farklı sıvı çözücü veya katı emicilerin kimyasal reaksiyonu ile CO₂ emilmektedir.

KYKD yöntemleri ile elde edilen CO₂'nin depolanması ise ayrı bir meseledir. CO₂ sanayinin yoğun olarak kullandığı bir malzeme değildir. Genellikle yeraltındaki mağaralarda saklanması ve yeryüzüne çıkmasının engellenmesi gereklidir.

8.2 KYKD Yöntemlerinin Sorunları

KYKD, 2000'li yıllardan bu yana sanayi tesislerine önerilmesine rağmen ilk tesislerin açılması 2017'yi bulmuştur. UEA'ya göre dünyada sadece 30 kadar tesiste KYKD yapılmaktadır^[116]. UEA, 2021 yılında yaklaşık 100 yeni projenin duyurulduğunu^[117] aktarmaktadır. 2022 yılı başı itibarıyla DKY tesisi sayısı ise 19'dur^[118]. Sayılar ihtiyacın çok altında kalmaktadır. KYKD yatırım miktarı, toplam temiz enerji yatırımlarının sadece binde 5'ini oluşturmaktadır^[119]. İlginin düşük olmasında projelerin yüksek maliyeti, yasal düzenlemelerdeki belirsizlik, AB'de halkın karbonun sınırlar içinde depolanmasına karşı verdiği tepkiler gibi sorunlar etkili olmaktadır^[120]. Bugün bir ton CO₂'yi yakalamanın birim maliyeti hâlâ çok yüksektir (100-1000 dolar). Bazı araştırmalar maliyetin 94-234 dolar bandına düşürebileceğini göstermektedir^[118]. DKY teknolojisinin asıl sorunu ise yüksek enerji tüketimidir. Yapılan bir araştırmaya göre havadaki CO₂'yi iklim nötr hedefleri karşılayacak şekilde azaltmaya yetecek kadar DKY tesisi inşa edilirse, 2100 yılında dünyada harcanan enerjinin dörtte biri DKY tesislerinde kullanılmak zorunda kalacaktır^[121].

KYKD'nin bir diğer sorunu da üretim tesislerinden veya havadan alınan CO₂'nin nasıl taşınacağı ve nasıl depolanacağıdır. UEA'ya göre, sanayi üretiminde hammadde olarak kullanmak üzere yıllık küresel CO₂ talebi 230 milyon ton civarındadır^[122]. UEA, bu miktarın dünya genelinde salınan CO₂ gazının sadece yüzde 1'ine karşılık geldiğini belirtmektedir. Dolayısıyla CO₂'nin yüzde 99'a yakın bir kısmının depolanması gerekecektir.

CO₂'nin taşınabilmesi için ya kilometrelerce boru hattı kurulması ya da çok düşük sıcaklıklarda soğutulup sıvı hâle getirilip tankerlerle depolama alanlarına taşınması gerekecektir. CO₂'nin depolanması için ise yeraltı tuz

mağaraları bugüne kadar başvuru en yaygın seçenek olmaktadır. Ancak yeraltında depolama biçiminin ne kadar güvenli olduğu tartışmalıdır. Eğer karbonun depolanacağı jeolojik lokasyonlar stratejik ve başarılı bir şekilde seçilebilirse, teknik olarak yakalanan CO₂'yi milyonlarca yıl boyunca yeraltında tutmak mümkün olabilir ancak bir miktar CO₂ bir şekilde yüzeye sızacak ve atmosfere ulaşacaktır.

Depolama seçeneğinde en temel risklerden biri, bugüne kadar görülmemiş miktar ve ölçekte CO₂ ile başa çıkmayı gerektirmesidir. CO₂ depolamasında teknolojik deneyim noksanlığı, öngörülemeyecek düzeyde problemi de beraberinde getirebilir. Bir çelik tesisi veya bir kömür santralinin yakalayacağı on binlerce tonluk CO₂'yi depolayacak yeraltı mağarası bulmak kolay olmayacaktır. Ayrıca söz konusu gazların taşınması sırasında boru hatlarında sızıntı olabilir, gemi ve tankerler kazaya uğrayabilir. Böyle bir durumda birkaç dakika içinde tonlarca CO₂'nin tekrar atmosfere karışmasına neden olabilir.

8.3 KYKD'de Yeni Teknolojiler

Karbon yakalama, kullanma ve depolanmasına ilişkin teknolojilerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürmektedir. Araştırmalar, KYKD süreçlerinin düşük enerjili ve yüksek verimli getirilmesinin yanı sıra yakalanan CO₂'nin farklı alanlarda, iklim değişikliği ile mücadeleye daha fazla katkı verecek şekilde kullanılmasına odaklanmaktadır.

Düşük enerji sarfiyatlı KYKD yöntemleri geliştirme çabaları devletler kadar özel şirketler tarafından da desteklenmektedir. Örneğin 2020 yılında Amazon ve Microsoft, KYKD tekniği ile elde edilen CO₂'yi çimentoya katarak daha dayanıklı ve yeşil bir çimento elde etmek üzere kurulan CarbonCure adlı firmaya yatırım yaptıklarını açıklamışlardır^[123]. Microsoft ayrıca İsviçre'deki DKY tesisleri ile dikkatleri üzerine çeken Climeworks'ün^[124] de ortaklarından biridir. Climeworks, İzlandalı Carbfix firmasıyla birlikte CO₂'yi yeraltında minerallere enjekte ederek kayalaştırılarak depolanması için çalışma yürütmektedir^[125].

Biyomühendislik KYKD için de devrededir. CO₂ yakalamak için bakterilerden yararlanma çalışmaları yürütülmektedir. Örneğin; LanzaTech firması, anaerobik

(oksijensiz ortamda yaşayabilen) bakterileri kullanarak bir "biyoreaktör" geliştirmiştir. Biyoreaktör, karbon ayak izi yüksek üretim tesislerine entegre edildiğinde reaktördeki bakteriler atık CO₂'yi sindirerek sentetik ip ve plastik üretiminde kullanılan etanolun ortaya çıkmasını sağlamaktadır^[126].

KYKD için devasa tesisler veya pahalı ekipmanlara güvenmek yerine daha pratik çözümler üzerinde durulmaktadır. Örneğin ABD'de, Arizona Üniversitesi uzmanları havadan CO₂ toplayabilen "mekanik ağaçlar" geliştirmiştir. Ağaçtan çok dik yerleştirilmiş büyük tüplere benzeyen cihazlar, rüzgârın taşıdığı havadaki CO₂'yi ayırarak depolamaktadır. Üniversitenin özel şirketlerle işbirliğine gidip kurduğu Carbon Collect Ltd. şirketiyle piyasaya sürdüğü ağaçlar 10 m yüksekliğe kadar çeşitli modellerde üretilebilmektedir^[127]. Almanya'da "made of air" adındaki bir firma ise karbon toplayabilen yapı dış kaplama malzemesi geliştirmiştir.

9. SONUÇ

Bilim, teknoloji ve mühendislik dünyası, insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük sorun, hatta varoluşsal bir tehdit olan iklim değişikliği ile mücadelede doğa dostu çözümler bulmak için seferber olmuştur. Bu çok zorlu bir görevdir çünkü getirilen çözümlerin bir yandan makul, erişilebilir ve pratik olması; bir yandan da başta işsizlik, verim kaybı veya büyük sermaye yatırımlarının toptan çöpe atılması gibi ekonomik ve toplumsal sorunlar yaratmaması gereklidir.

Üzerinde durulan yöntemlerin önemli bir bölümü sürdürülebilir çözümlerden oluşmaktadır. Ancak her yeni dönüşümde olduğu gibi geliştirilen yöntemlerin uygulanması şimdilik oldukça yüksek maliyetlidir. Maliyetlerin düşürülmesi için bir yandan daha fazla Ar-Ge yapılması ve girişimlerin mali ve hukuki açıdan desteklenerek ölçek ekonomisini yakalaması gereklidir. Atılacak adımların toplumlara ve ekonomilere yeni bir dinamizm getireceği ve büyüme potansiyeli sunacağı unutulmamalıdır. Ayrıca iklim değişikliği ile mücadelede artık tereddüde yer kalmamıştır. Yaratıcılığı, sermayeyi ve inancı bu meselenin çözümüne adama zamanı gelmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] UN, "Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts", <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/>
- [2] STM ThinkTech, (2021), "Yeni İklim Rejimine Doğru: Avrupa Yeşil Mutabakatı Ve Türkiye'ye Etkileri Üzerine Bir İnceleme", (22 Aralık 2021), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/yeni-iklim-rejimine-dogru-avrupa-yesil-mutabakati-ve-turkiyeye-etkileri-uzerine-bir-inceleme>
- [3] Kelly, Éanna; McCabe, John; (2021), "Biden unveils historic \$325B research and innovation plan", *Science Business*, (1 Nisan 2021), <https://sciencebusiness.net/news/biden-unveils-historic-325b-research-and-innovation-plan>
- [4] *Nuclear Engineering International*, (2021), "Japan revises its green growth strategy", (29 Haziran 2021), <https://www.neimagazine.com/news/news-japan-revises-its-green-growth-strategy-8855823>
- [5] *Politico*, (2020), "Japan adopts green growth plan to go carbon free by 2050", (25 Aralık 2020), <https://www.politico.com/news/2020/12/25/japan-carbon-free-climate-change-450447>
- [6] OKUTSU, AKANE; (2021), "Japan pledges extra \$10bn of overseas climate financing", *Nikkei Asia*, (2 Kasım 2021), <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Climate-Change/COP26/Japan-pledges-extra-10bn-of-overseas-climate-financing>
- [7] *European Commission*, (2019), "COMMUNICATION FROM THE COMMISSION The European Green Deal", (11 Aralık 2019), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>
- [8] Ritchie, Hannah; (2020), "Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?", *Our World in Data*, (18 Eylül 2020), <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [9] *MIT Climate Portal*, (2020), "Do we have the technology to go carbon neutral today?", (28 Eylül 2020), <https://climate.mit.edu/ask-mit/do-we-have-technology-go-carbon-neutral-today>
- [10] *McKinsey*, (2021), "Innovating to net zero: An executive's guide to climate technology", (28 Ekim 2021), <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/innovating-to-net-zero-an-executives-guide-to-climate-technology>
- [11] Leblebicioğlu, Emre; (2021), "Güneş Panellerinin Geleceği: Perovskite Güneş Hücreleri", *Mühendistan*, (6 Nisan 2021), <https://muhendistan.com/gunes-panellerinin-gelecegi-perovskite-gunes-hucreleri/>
- [12] Öksel, Cem; Koç, Yıldız; Yağlı, Hüseyin; Koç, Ali; (2018), "Kuantum Noktalı Güneş Hücreleri", *Dergipark*, (30 Aralık 2018), <https://dergipark.org.tr/tr/pub/nevbittek/issue/41534/372448>
- [13] *Quantum Materials*, <https://www.quantummaterials.com/>
- [14] *NREL*, (2013), "Quantum Dots Promise to Significantly Boost Solar Cell Efficiencies", (Ağustos 2013), <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/59015.pdf>
- [15] Irlé, Roland; "Global EV Sales for 2021", *EV Volumes*, <https://www.ev-volumes.com/#:~:text=Global%20EV%20sales%20reached%206,4%2C2%20%25%20in%202020>
- [16] Fehrenbacher, Katie; (2016), "Watch the World's First Manned Battery-Powered Helicopter Fly", *Fortune*, (31 Ekim 2016), <https://fortune.com/2016/10/31/electric-helicopter-test-flight/>
- [17] Lewis, Michelle; (2021), "Meet the world's first electric autonomous container ship", *electrec*, (8 Haziran 2016), <https://electrek.co/2021/06/08/meet-the-worlds-first-electric-autonomous-container-ship/>
- [18] *Wired*, (2022), "Battery-Powered Trains Are Picking Up Speed", (4 Şubat 2022), <https://www.wired.com/story/battery-powered-trains-gather-speed/>
- [19] *Green Cars*, (2021), "Next Gen EV Batteries Will Deliver 500-Mile Range", (18 Kasım 2021), <https://www.greencars.com/post/next-gen-ev-batteries-will-deliver-500-mile-range#:~:text=The%20company%20hopes%20to%20complete,packs%20for%20the%20VW%20ID>
- [20] *Science Daily*, (2021), "Next-gen electric vehicle batteries: These are the questions we still need to answer", (28 Mayıs 2021), <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/05/210528085324.htm>
- [21] *SciTechDaily*, (2021), "Big Breakthrough for "Massless" Energy Storage: Structural Battery That Performs 10x Better Than All Previous Versions", (24 Mart 2021), <https://scitechdaily.com/big-breakthrough-for-massless-energy-storage-structural-battery-that-performs-10x-better-than-all-previous-versions/>
- [22] *Wired*, (2020), "The Batteries of the Future Are Weightless and Invisible", (6 Kasım 2020), <https://www.wired.com/story/the-batteries-of-the-future-are-weightless-and-invisible/>
- [23] *European Environment Agency*, (2019), "emep", <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation>
- [24] *Airbus*, (2019), "New Airbus battery lab to push battery technology in Shenzhen", (20 Eylül 2019), <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2019-09-new-airbus-battery-lab-to-push-battery-technology-in-shenzhen>
- [25] Suntinger, Hildegard; (2021), "How researchers plan to integrate the structural battery into aircraft components", *Innovation Origins*, (10 Nisan 2021), <https://innovationorigins.com/en/how-researchers-plan-to-integrate-the-structural-battery-into-aircraft-components/>
- [26] Lucon, Oswaldo; Ürgü-Vorsatz, Diana; (2018), "Buildings", *IPCC*, (Şubat 2018), https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf
- [27] *International Energy Agency*, (2021), "Heat Pumps", (Kasım 2021), <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>
- [28] F. Service, Robert; (2018), "New smart windows darken in the sun—and generate electricity at the same time", *Science*, (22 Ocak 2018), <https://www.science.org/content/article/new-smart-windows-darken-sun-and-generate-electricity-same-time>
- [29] Marsh, Jacob; (2021), "Solar windows: can you turn your windows into solar glass?", *Energysage*, (1 Temmuz 2021), <https://news.energysage.com/solar-panel-windows-solar-blinds/>
- [30] Vourvoulas, Aris; (2021), "Solar Blinds: The Next Big Trend in the UK", *GreenMatch*, (9 Haziran 2021), <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/solar-panels/blinds>
- [31] Porter, Stanley; (2021), "Smart energy management for industrials", *Deloitte*, (24 Mayıs 2021), <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/power-and-utilities/smart-energy-management.html>
- [32] *TECKNEXUS*, "ERICSSON SMART FACTORY: SUSTAINABLE AND ENERGY-EFFICIENT", <https://tecknexus.com/5gusecase/ericsson-smart-factory-sustainable-and-energy-efficient/>
- [33] *STM ThinkTech*, (2019), "Fabrikaların Geleceği 'Karanlık'", (25 Ocak 2019), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/fabrikalarin-gelecegi-karanlik>
- [34] *International Energy Agency*, (2019), "The Future of Hydrogen", (Haziran 2019), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [35] *Hydrogen Council*, (2021), "Hydrogen Insights", (Temmuz 2021), <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/07/Hydrogen-Insights-July-2021-Executive-summary.pdf>
- [36] *Florange School Of Regulation*, (2021), "Between Green and Blue: a debate on Turquoise Hydrogen", (18 Mart 2021), <https://fsr.eui.eu/between-green-and-blue-a-debate-on-turquoise-hydrogen/>
- [37] *IRENA*, (2020), "GREEN HYDROGEN COST REDUCTION", (Aralık 2020), https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- [38] *GE*, "GE innovates Australia's first hydrogen-blend power plant", <https://www.ge.com/gas-power/resources/case-studies/australias-first-dual-fuel-hydrogen-plant>
- [39] Aktı, Samet; (2019), "LİFE FÜZYON REAKTÖRÜNÜN HİDROJEN ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ", *Gazi Üniversitesi*, (Şubat 2019), <https://dspace.gazi.edu.tr/bitstream/handle/20.500.12602/150968/e0cb5fdb924fe9889cf887e998f43262.pdf;jsessionid=304B62461FF0259A-C9181EF9209DCE36?sequence=1>
- [40] *United States Energy Department*, (2020), "Could Hydrogen Help Save Nuclear?", (24 Haziran 2020), <https://www.energy.gov/ne/articles/could-hydrogen-help-save-nuclear>
- [41] *Fuel Cell Hydrogen Association*, (2020), "Using Nuclear Power to Produce Green Hydrogen", (11 Mayıs 2020), <https://www.fchea.org/in-transition/2020/5/11/using-nuclear-power-to-produce-green-hydrogen>
- [42] Pollard, Tim; (2022), "Are hydrogen fuel-cell cars the future?", *Car Magazine*, (22 Ocak 2022), <https://www.carmagazine.co.uk/electric/are-hydrogen-fuel-cell-cars-the-future/>
- [43] Wilkinson, Shane; (2022), "Hydrogen fuel cells: do hydrogen cars have a future?", *Auto Express*, (31 Ocak 2022), <https://www.autoexpress.co.uk/electric-cars/93180/hydrogen-fuel-cells-do-hydrogen-cars-have-future>
- [44] MUÑOZ, JOSÉ; (2021), "Don't forget about hydrogen fuel in your excitement over electric vehicles", *Fortune*, (16 Ağustos 2021), <https://fortune.com/2021/08/16/hydrogen-fuel-cell-technology-electric-cars/#:~:>

- text=Unlike%20batteries%2C%20fuel%20cell%20technology,even%20fuel%20urban%20air%20mobility.&text=We%20and%20our%20suppliers%20plan,create%20more%20than%2050%2C000%20jobs
- [45] Saul, Jonathan; (2020), "Shipping's share of global carbon emissions increases", *Reuters*, (4 Ağustos 2020), <https://www.reuters.com/article/us-shipping-environment-imo/shippings-share-of-global-carbon-emissions-increases-idUSKCN2502AY>
- [46] ABS, "Alternative Fuel Options", <https://www2.eagle.org/en/Products-and-Services/sustainability/alternative-fuel-options.html>
- [47] Aziz, Muhammad; (2021), "Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety", *MDPI*, (17 Eylül 2021), [https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5917/pdf#:~:text=At%20ambient%20pressure%20\(1%20atm,C%20and%201.3%20MPa%2C%20respectively](https://www.mdpi.com/1996-1073/14/18/5917/pdf#:~:text=At%20ambient%20pressure%20(1%20atm,C%20and%201.3%20MPa%2C%20respectively)
- [48] GALLUCCI, MARIA; (2021), "WHY THE SHIPPING INDUSTRY IS BETTING BIG ON AMMONIA", *IEEE Spectrum*, (23 Şubat 2021), <https://spectrum.ieee.org/why-the-shipping-industry-is-betting-big-on-ammonia>
- [49] Ritchie, Hannah; (2020), "Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?", *Our World in Data*, (22 Ekim 2020), <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>
- [50] *Aviation Benefits*, "Waypoint 2050", <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>
- [51] *Hospitality-on*, (2020), "Airbus presents three hydrogen-powered aircraft concepts", <https://hospitality-on.com/en/transport/airbus-presents-three-hydrogen-powered-aircraft-concepts>
- [52] *Airbus*, "Hydrogen in aviation: how close is it?", <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-10-hydrogen-in-aviation-how-close-is-it>
- [53] Gangoli Rao, Arvind; Yin, Feijia; van Buijtenen, Jos P.; (2014), "A hybrid engine concept for multi-fuel blended wing body", *emerald Insight*, (30 Eylül 2014), <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/AEAT-04-2014-0054/full/html>
- [54] *United States Energy Department*, (2014), "Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Course Manual", (7 Mart 2014), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/hydrogen-fuel-cell-engines-and-related-technologies-course-manual>
- [55] *sunfire*, "E-FUEL", <https://www.sunfire.de/en/e-fuel#:~:text=In%20a%20Fischer%2DTropsch%20synthesis,gasoline%20and%20other%20hydrocarbon%20fuels>
- [56] *Norsk e-fuel*, <https://www.norsk-e-fuel.com/en/>
- [57] Wang, Fang; (2021), "Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality", *ScienceDirect*, (28 Kasım 2021), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675821001053>
- [58] *WHA International*, "HYDROGEN INDUSTRY APPLICATIONS: PAST, PRESENT, AND FUTURE.", <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>
- [59] Fan, Lixin; (2021), "Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review", *ScienceDirect*, (Kasım 2021), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721006053>
- [60] Guevara Opinska, Liliana; (2021), "Moving towards Zero-Emission Steel", *European Parliament*, (Aralık 2021), [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695484/IPOL_STU\(2021\)695484_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695484/IPOL_STU(2021)695484_EN.pdf)
- [61] *International Energy Agency*, "World Energy Outlook 2021 World Energy Outlook 2021", <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>
- [62] *International Energy Agency*, "Renewables 2021", <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d-1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>
- [63] *STM ThinkTech*, (2022), "ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNDEKİ SON GELİŞMELER", (Ocak 2022), https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1641371425_stmenerjidepolamateknolojileri.pdf
- [64] Merrifield, Rex; (2020), "Cheaper, lighter and more energy-dense: The promise of lithium-sulphur batteries", *Horizon*, (5 Haziran 2020), <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/cheaper-lighter-and-more-energy-dense-promise-lithium-sulphur-batteries#:~:text=The%20main%20problem%20is%20that,cell%20and%20shorten%20its%20lifespans>
- [65] *STM ThinkTech*, (2019), "Grafen Teknolojisi ve Savunma Sanayiinde Kullanımı", (9 Eylül 2019), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/grafen-teknolojisi-ve-savunma-sanayiinde-kullanimi>
- [66] Liebman, Ariel; R. Khalilpour, Kaveh; (2017), "Explainer: what can Tesla's giant South Australian battery achieve?", *Conversation*, (11 Temmuz 2017), <https://theconversation.com/explainer-what-can-teslas-giant-south-australian-battery-achieve-80738>
- [67] DELBERT, CAROLINE; (2020), "Elon Musk's Battery Farm Has Been a Total Triumph. Here Comes the Sequel.", *Popular Mechanics*, (6 Kasım 2020), <https://www.popularmechanics.com/science/green-tech/a34598095/elon-musk-battery-farm-sequel-australia-tesla-powerpack/#:~:text=Elon%20Musk%20and%20Neoen%20are,times%20of%20day%20and%20conditiontimes%20of%20day%20and%20conditions>
- [68] Patel, Sonal; (2019), "Why Power-to-Gas May Flourish in a Renewables-Heavy World", *Power Mag*, (2 Aralık 2019), <https://www.powermag.com/why-power-to-gas-may-flourish-in-a-renewables-heavy-world/>
- [69] *Eurostat*, "Renewable energy statistics", https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics#:~:text=The%20share%20of%20renewables%20in,compared%20with%209.6%20%25%20in%202004
- [70] *CORDIS*, "Power-to-gas system enables massive storage of renewable energy", <https://cordis.europa.eu/article/id/413313-power-to-gas-system-enables-massive-storage-of-renewable-energy>
- [71] *International Energy Agency*, (2020), "Tracking Energy Storage 2020", (Haziran 2020), <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-storage-2020>
- [72] Conca, James; (2016), "Vanadium-Flow Batteries: The Energy Storage Breakthrough We've Needed", *Forbes*, (13 Aralık 2016), <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/12/13/vanadium-flow-batteries-the-energy-storage-breakthrough-weve-needed/?sh=5c4c9f8c5bde>
- [73] Fitzgerald Weaver, John; (2017), "World's largest battery: 200MW/800MWh vanadium flow battery – site work ongoing", *electrek*, (21 Aralık 2017), <https://electrek.co/2017/12/21/worlds-largest-battery-200mw-800mwh-vanadium-flow-battery-rongke-power/>
- [74] Lambert, Fred; (2022), "Global market share of electric cars more than doubled in 2021 as the EV revolution gains steam", *electrek*, <https://electrek.co/2022/02/02/global-market-share-of-electric-cars-more-than-doubled-2021/>
- [75] Shell, Cassidy; (2021), "Vehicle Grid Integration: Can EV Users and the Grid be Reconciled?", *Cleantech*, (15 Haziran 2021), <https://www.cleantech.com/vehicle-grid-integration-can-ev-users-and-the-grid-be-reconciled/>
- [76] *IEEE Innovation at Work*, "Vehicle to Grid (V2G) Technology", <https://innovationatwork.ieee.org/vehicle-to-grid-v2g-technology/#:~:text=Vehicle%20to%2Dgrid%20technology%20involves,supply%20electricity%20during%20peak%20hours.&text=This%20type%20of%20technology%20can,zero%2Dcarbon%20emission%20by%202045>
- [77] *World Resources Institute*, "Electric Vehicle-Grid Integration", <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2An6Yb9ehSEJ:https://www.wri.org/initiatives/electric-vehicle-grid-integration+&cd=11&hl=tr&ct=clnk&gl=tr>
- [78] *NREL*, "EVI-InMotion: Electric Vehicle Infrastructure – In Motion Tool", <https://www.nrel.gov/transportation/electric-vehicle-infrastructure-in-motion-tool.html>
- [79] *alltimepower*, "Can you really run your entire house on a home battery?", <https://www.alltimepower.com/learn-more/can-you-run-your-entire-house-on-home-battery/>
- [80] *VOA*, "Evrenin Enerjisi Füzyon Enerji İhtiyacına Çözüm Olacak", <https://www.amerikaninsesi.com/a/evrenin-enerjisi-fuzyon-enerji-ihhtiyacina-cozum-olacak/5131382.html>
- [81] *International Atomic Energy Agency*, "Small modular reactors", <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- [82] Levitan, Dave; (2020), "First U.S. Small Nuclear Reactor Design Is Approved", *Scientific American*, (9 Eylül 2020), <https://www.scientificamerican.com/article/first-u-s-small-nuclear-reactor-design-is-approved/>
- [83] *BIOMASS*, (2020), "Scientists develop formula for greener polyurethane", (30 Eylül 2020), <http://biomassmagazine.com/articles/17410/scientists-develop-formula-for-greener-polyurethane>
- [84] Welsh, Jennifer; (2012), "New Graphite Material Is 75 Times Lighter Than Styrofoam", *Business Insider*, (18 Temmuz 2012), https://www.businessinsider.com/new-material-is-lightest-in-the-world-2012-7?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com
- [85] V., Hemmilä; J., Trischler; D. Sandberg; (2013), "LIGNIN – AN ADHESIVE RAW MATERIAL OF THE FUTURE OR WASTE OF RESEARCH ENERGY?", <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1004499/FULLTEXT01.pdf>
- [86] LIM, XIAOZHİ; (2014), "A plastic that recycles itself", *Science*, (19 Kasım 2014), <https://www.science.org/content/article/plastic-recycles-itself>
- [87] Kalender, Murat; (2018), "Karbon Fiber Nedir? Nerelerde Kullanılır?", *Malzeme Bilimi.Net*, <https://malzemebilimi.net/karbon-fiber-nedir-nerelerde-kullanilir.html>

- [88] Fairs, Marcus; (2021), "Scientists developing bio-based carbon fibres being "showered with requests" for sustainable version of the wonder material", *dezeen*, (26 Temmuz 2021), <https://www.dezeen.com/2021/07/26/carbon-bio-based-carbon-fibres/>
- [89] *Solidia*, <https://www.solidiatech.com/solutions.html>
- [90] *Global Cement*, (2014), "CeraTech establishes new standard for sustainable cement", (20 Şubat 2014), <https://www.globalcement.com/news/temlist/tag/Ceratech>
- [91] *Knowledge Sourcing Intelligence*, (2021), "Global Green Cement Market Size, Share, Opportunities, COVID-19 Impact, And Trends By Product (Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash Based, Recycled Aggregates, Others), By Application (Commercial, Residential, Industrial), And By Geography - Forecasts From 2021 To 2026", (Haziran 2021), <https://www.knowledge-sourcing.com/report/global-green-cement-market#:~:text=The%20global%20green%20cement%20market,during%20the%20time%20of%20manufacturing>
- [92] *Fortune Business Insights*, "The global cement market is projected to grow from \$326.80 billion in 2021 to \$458.64 billion in 2028 at a CAGR of 5.1% during forecast period, 2021-2028", <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/cement-market-101825#:~:text=The%20global%20cement%20market%20size%20was%20USD%20313.60,demand%20shock%20across%20all%20regions%20amid%20the%20pandemic>
- [93] Pilkington, Ben; (2021), "Biomimetic Carbon Capture: Using CO2 to Create a Limestone Rock Substitute", *AZO CLEANTECH*, (11 Mayıs 2021), <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1232>
- [94] *Decarbonizing Global Industry*, <https://www.mineralcarbonation.com/>
- [95] M.Jonkers, Henk; (2010), "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete", *ScienceDirect*, (Şubat 2010), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857409000202>
- [96] *U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE*, (2021), "Transparent Wood Could Be the Window of the Future", (29 Temmuz 2021), <https://www.usda.gov/media/blog/2020/10/01/transparent-wood-could-be-window-future>
- [97] Wild, Sarah; (2019), "Transparent wood: the building material of the future?", *European Commission*, (26 Kasım 2019), <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/transparent-wood-building-material-future>
- [98] *Arkitera*, "İsveçli Bilim Adamı Şeffaf Ahşap Üretti", <https://www.arkitera.com/haber/isvecli-bilim-adami-seffaf-ahsap-uretti/>
- [99] *Aerogel*, <http://www.aerogel.org/>
- [100] Bauer, Jens; (2014), "High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture", *PNAS*, (3 Şubat 2014), <http://www.pnas.org/content/111/7/2453.full>
- [101] Fairs, Marcus; (2021), "Ten materials that store carbon and help reduce greenhouse gas emissions", *Deezen*, (27 Haziran 2021), <https://www.dezeen.com/2021/06/27/carbon-negative-carbon-neutral-materials-roundup/>
- [102] Hahn, Jennifer; (2020), "Major fashion houses will sell products made from mushroom leather by next year", *dezeen*, (8 Ekim 2020), <https://www.dezeen.com/2020/10/08/mylo-consortium-adidas-stella-mccartney-lululemon-kering-mycelium/>
- [103] Gaines, Tharran; (2021), "AN ELECTRIC TRACTOR MAY BE IN YOUR FUTURE", *Agriculture*, (28 Kasım 2021), <https://www.agriculture.com/machinery/tractors/an-electric-tractor-may-be-in-your-future>
- [104] *electrek*, (2021), "Gridtractor launches infrastructure tool for zero-emission farming, electric tractors", (1 Kasım 2021), <https://electrek.co/2021/11/01/gridtractor-launches-infrastructure-tool-for-zero-emission-farming-electric-tractors/>
- [105] McCullough, Chris; (2021), "New Alternative Fuels for Farm Machinery", *E-Magazine*, (17 Kasım 2021), <https://emag.directindustry.com/new-alternative-fuels-for-farm-machinery-tractor-hydrogen-biomethane/>
- [106] Department of Primary Industries and Regional Development, (2022), "Carbon farming: reducing methane emissions from cattle using feed additives", (1 Şubat 2022), <https://www.agric.wa.gov.au/climate-change/carbon-farming-reducing-methane-emissions-cattle-using-feed-additives>
- [107] Jones, Nicola; (2022), "From Fertilizer to Fuel: Can 'Green' Ammonia Be a Climate Fix?", *Yale Environment360*, (20 Ocak 2022), <https://e360.yale.edu/features/from-fertilizer-to-fuel-can-green-ammonia-be-a-climate-fix#:~:text=The%20university's%20studies%20have%20shown,That's%20transformative%20C%E2%80%9D%20Reese%20says>
- [108] Ornes, Stephen; (2021), "Green ammonia could produce climate-friendly ways to store energy and fertilize farms", *PNAS*, (1 Aralık 2021), <https://www.pnas.org/content/118/49/e2119584118>
- [109] *United States Environmental Program*, "How Does Anaerobic Digestion Work?", <https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work#:~:text=Anaerobic%20digestion%20is%20a%20process,in%20the%20absence%20of%20oxygen.&text=Multiple%20organic%20materials%20can%20be,a%20practice%20called%20co%2Ddigestion>
- [110] CISION PR Newswire, (2018), "Bayer and Ginkgo Bioworks Unveil Joint Venture, Joyn Bio, and Establish Operations in Boston and West Sacramento", (20 Mart 2018), <https://www.prnewswire.com/news-releases/bayer-and-ginkgo-bioworks-unveil-joint-venture-joyn-bio-and-establish-operations-in-boston-and-west-sacramento-300616544.html>
- [111] Sağel, Zafer; Peşkirioğlu, Hayrettin; TUTLUER, M. İhsan; (2015), "NÜKLEER TEKNİKLERİN BİTKİ İSLAHINDA KULLANILMASI", *Kır Çocukları*, (Temmuz 2015), <https://kircocuklari.files.wordpress.com/2015/07/nukleer-tekniklerbitkiislahi.pdf>
- [112] Totoki, Sherrie; (2021), "5 circular economy startups we've got our eyes on", *GreenBiz*, (3 Haziran 2021), <https://www.greenbiz.com/article/5-circular-economy-startups-weve-got-our-eyes>
- [113] *American Geosciences Institute*, "What is biomining?", (20 Ağustos 2018), <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-biomining>
- [114] *Leather Mag*, (2018), "Modern Meadow's first bioleather - Zoa", (20 Ağustos 2018), <https://www.leathermag.com/features/featurematerial-gains-6713680/>
- [115] *International Energy Agency*, (2013), "Technology Roadmap - Carbon Capture and Storage 2013", (Temmuz 2013), <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2013>
- [116] Fajardy, Mathilde; (2021), "CCUS in Industry and Transformation", *International Energy Agency*, (Kasım 2021), <https://www.iea.org/reports/ccus-in-industry-and-transformation>
- [117] *International Energy Agency*, "Carbon capture, utilisation and storage", <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- [118] *International Energy Agency*, (2021), "Direct Air Capture", (Kasım 2021), <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- [119] *International Energy Agency*, "Report extract A new era for CCUS", <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus>
- [120] Chalmin, Anja; (2020), "CAN CAPTURED CARBON BE PUT TO USE?", *Geoengineering Monitor*, (15 Temmuz 2020), <https://www.geoengineeringmonitor.org/2020/07/can-captured-carbon-be-put-to-use/>
- [121] Evans, Simon; (2019), "Direct CO2 capture machines could use 'a quarter of global energy' in 2100", *CarbonBrief*, (22 Temmuz 2019), <https://www.carbonbrief.org/direct-co2-capture-machines-could-use-quarter-global-energy-in-2100>
- [122] *International Energy Agency*, (2019), "Putting CO2 to Use", (Eylül 2019), <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>
- [123] Moss, Sebastian; (2020), "Amazon and Microsoft invest in company injecting CO2 into concrete", *Data Center Dynamics*, (18 Eylül 2020), <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/amazon-and-microsoft-invest-company-injecting-co2-concrete#:~:text=Amazon%20and%20Microsoft%20invest%20in%20company%20injecting%20CO2%20into%20concrete,-CarbonCure%20is%20currently&text=Amazon%20and%20Microsoft%20have%20invested,the%20concrete%20industry%20by%202030>
- [124] *Climeworks*, <https://climeworks.com/>
- [125] *Climeworks*, "CO2 storage: a solution to reverse climate change", <https://climeworks.com/co2-storage-solutions>
- [126] Solomon, Erik Kobayashi; (2021), "LanzaTech: Engineering The Future", *Forbes*, (30 Eylül 2021), [https://www.forbes.com/sites/erikkobayashisolomon/2021/09/30/lanzatech-engineering-the-future#:~:text=LanzaTech%20has%20invented%20a%20commercial,CH3%2DCH2%2DOH\).&text=Building%20the%20bioreactor%20was%20an%20enormous%20engineering%20challenge](https://www.forbes.com/sites/erikkobayashisolomon/2021/09/30/lanzatech-engineering-the-future#:~:text=LanzaTech%20has%20invented%20a%20commercial,CH3%2DCH2%2DOH).&text=Building%20the%20bioreactor%20was%20an%20enormous%20engineering%20challenge)
- [127] *Mechanical Trees*, <https://mechanicaltrees.com/mechanicaltrees/>



thinktech
STM Teknolojik Düşünce Merkezi
<http://thinktech.stm.com.tr>

