



ENERJİ KRİZİNİN ÇÖZÜMÜNDE YEŞİL HİDROJEN DEVRİMİ I: Sürdürülebilir Gelecekte Yeşil Hidrojenin Yeri



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.

 STM ThinkTech

1. GİRİŞ

Dünya, sonuçlarını artık daha şiddetle yaşadığı küresel iklim değişikliğinin tedirginliğini yaşarken, 2022'nin Şubat ayında başlayan Rusya Ukrayna Savaşı ile kendini büyük bir enerji krizi içinde bulmuştur. Avrupa Birliği'nin (AB) petrol ve gaza erişiminin Rusya tarafından engellenmesi, kıtanın enerji güvenliğini sekteye uğratmış, enerji fiyatlarında keskin bir yükselişi tetiklemiştir.

Savaş aynı zamanda, uzun zamandır devam eden yenilenebilir kaynakların enerji pastasındaki payını artırma girişimlerini de hızlandırmıştır. Bu çerçevede, rüzgâr ve güneş gibi kaynakların arasına son dönemde sürdürülebilir ve geleceğin yıldızı olarak parlamaya aday yeni bir alternatif katılmaktadır: Yeşil hidrojen.

Kullanımı esnasında sera gazı salımı yapmayan temiz bir enerji kaynağı olsa da, doğada saf hâlde bulunmadığı için günümüzde hidrojenin yüzde 95'i iklim krizine katkıda bulunan fosil yakıtlar kullanılarak üretilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen ve bu nedenle karbon salımı oluşturmayan hidrojen, yeşil hidrojen olarak adlandırılmaktadır. Projeksiyonlar, hidrojenin büyük çoğunluğunun kömür, doğalgaz gibi kirli fosil yakıtlar yerine, yenilenebilir kaynaklarla üretilmesi hâlinde yaratacağı dönüşümün ezber bozucu nitelikte olacağına işaret etmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansına göre (International Renewable Energy Agency -IRENA), günümüzde yıllık olarak sadece 0,7 milyon ton düzeyinde gerçekleşen temiz hidrojen üretiminin, 2030 yılında 20 milyon tonu, 2050'de ise 500 milyon tonu geçeceği öngörülmektedir^[1]. Kurumun tahminlerine göre 2050 yılında hidrojenin yüzde 94'ü yenilenebilir

kaynaklarla üretilecektir. Yeşil hidrojenin yaygınlaşması enerjide kaynak çeşitliliğini artıracak gibi, 2050 yılına kadar küresel ortalama sıcaklıkları 1,5 derecenin altında tutma küresel hedefine de ciddi katkı sağlayacaktır. Tahminlere göre hidrojen, küresel enerji talebinin yüzde 15-20'sini karşılayabilir ve sera gazı emisyonlarının yüzde 30 azalmasını sağlayabilir^[2].

Çok sayıda sektörde hammadde ya da enerji kaynağı olarak kullanılan yeşil hidrojenin bu dikkat çekici potansiyeli, Amerika Birleşik Devletleri'nden (ABD) AB'ye, Çin'den Avustralya'ya kadar tüm dünyada enerji alanında yeni bir gelecek inşa etmek için heyecan yaratmaktadır. 2017'de dünyada sadece Japonya'nın bir hidrojen stratejisi varken, Ekim 2022 itibarıyla 60'tan fazla ülke yeşil hidrojen stratejisi geliştirmiş ya da hazırlamaktadır^[3]. Avrupa Komisyonu 2023'ün Ocak ayında, 2030 yılına kadar 10 milyon ton yeşil hidrojen üretme ve bunun yanında 10 milyon ton ithal etme hedefini açıklamıştır. ABD ise yakın bir tarihte ilan ettiği Enflasyonu Önleme Yasası (Inflation Reduction Act) çerçevesinde temiz hidrojen üretimine çok ciddi teşvikler açıklamıştır. Türkiye de 2023'ün Ocak ayında, "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" belgesini^[4] yayınlayarak bu ülkeler arasındaki yerini almıştır.

Dünya çapında enerji dönüşümünü hızlandırmak için umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkan yeşil hidrojen teknolojisini inceleyeceğimiz Araştırma Raporumuzun ilk bölümünde, yeşil hidrojen üretim yöntemleri, bu teknolojinin mevcut durumu ve küresel enerji dönüşümü içindeki yeri değerlendirilecektir.

2. BİR ENERJİ KAYNAĞI OLARAK HİDROJEN

Bir proton ve bir elektrondan oluşan hidrojen, kararsız bir yapıya sahip olduğundan dünya üzerinde serbest formda bulunmamakta, farklı bileşiklerin içinde yer almaktadır. Örneğin, su molekülü iki hidrojen ve bir oksijen atomundan oluşmaktadır. Hidrokarbon olarak bilinen kömür, petrol ve gaz türevi organik bileşiklerin içerisinde de farklı sayılarda hidrojen atomları bulunmaktadır^[5].

“Suyun (hidro) yaratıcısı (gen)” anlamına gelen hidrojen elementi, 1766’da Henry Cavendish tarafından keşfedilmiştir. Hidrojen; su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilerek bir enerji taşıyıcısı olarak depolanabilmekte ve böylelikle elektrik ve ısı üretmek için yakıt hücrelerinde kullanılabilir^[5]. Artan enerji ve yakıt ihtiyacının karşılanabilmesi için yapılan çeşitli araştırmalar arasında gelecekte dünyanın enerji ihtiyacını karşılayabilme potansiyeli en yüksek olan yakıt hidrojendir. Çünkü hidrojen ile çalışan yakıt pili hücrelerinde, içten yanmalı motorların aksine doğaya herhangi bir karbon, nitrojen veya sülfür oksit salınmamaktadır. Hidrojen, bir yakıt hücresinde tüketildiğinde yalnızca su, elektrik ve ısı üreten temiz bir yakıt olarak öne çıkmaktadır. Bu durum hidrojeni geleceğin yakıtı olarak öne çıkarmaktadır^[6]. Hidrojen ve yakıt hücreleri; ulaşım, sanayi ve konut başta olmak üzere neredeyse tüm sektörlerde geniş kullanım potansiyeliyle enerji üretimi alanında önemli bir role sahiptir^[5].

Uluslararası Enerji Ajansının (International Energy Agency -IEA) verilerine göre, 1975’ten bu yana üç kat artan küresel hidrojen talebi, 2021’de 94 milyon tona ulaşmıştır. Hidrojen talebinin 2030 yılında 130 milyon tona^[7], 2050’ye kadar ise 500-680 milyon tona çıkması beklenmektedir. 2021’de 130 milyar dolar olan hidrojen üretim pazarının ise 2030’a kadar yılda yüzde 9,2 büyüme tahmin edilmektedir^[8].

Vadettiği tüm potansiyele karşın hidrojen enerjisinin bugüne kadar alternatiflerine kıyasla yaygınlaşmamasının temel nedeni, depolama zorlukları ve taşıma maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı endüstride henüz yeterli düzeyde yer edinmemesidir. Hidrojen talebindeki artış, küresel iklim değişikliği hedeflerine, sektöre özgü faaliyetlerin geliştirilmesine, enerji verimliliği önlemlerine, doğrudan elektrifikasyona ve karbon yakalama teknolojilerinin kullanımına bağlı olarak değişecektir^[9].

Ayrıca hidrojenle ilgili temel bir sorun vardır; o da neredeyse tamamına yakınının fosil yakıtlar kullanılarak üretilmesidir. Küresel olarak doğalgazın yüzde 6’sı ve kömürün yüzde 2’si hidrojen üretiminde kullanılabilir^[8]. Hidrojen üretimi küresel olarak, toplam emisyonlara yaklaşık yüzde 2 katkıda bulunmaktadır^[10]. Dolayısıyla küresel iklim değişikliğiyle mücadele tedbirleri kapsamında, hidrojen üretiminin daha çevre dostu hâle getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla hidrojenin elde edilmesi için yeni yöntem ve teknolojiler geliştirilmektedir. Ayrıca hidrojen üretiminde maliyetlerin düşürülmesi için yeni teknoloji ve inovasyonlara da ihtiyaç vardır^[2].

2.1 Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen birçok özelliği olan kimyasal bir elementtir. Dünyada neredeyse saf hâliyle pek bulunmadığı için, başka elementlerle birlikte oluşturduğu bileşiklerden arındırılarak elde edilmesi gerekmektedir. Fakat bu oldukça yoğun enerji gerektiren bir süreçtir. Şu anda, hidrojenin önemli bir kısmı metandan buhar metan reformu (SMR) işlemi yoluyla üretilmektedir. Hidrojen çeşitli ikincil ürünlere dönüştürülerek işlenebilmektedir. Bunlar arasında metanol, amonyak, sentetik metan ve sentetik yakıtlar (örn. e-yakıtlar) gibi hidrojen bazlı enerji kaynakları ve temel kimyasallar bulunmaktadır^[11].

Hidrojenin elde edilme yöntemleri çoğu kaynakta “hidrojen gökkuşağı” olarak isimlendirilen bir renk skalasıyla kategorize edilmektedir. Bu kategoriler aşağıda tarif edilmiştir.

- **Kahverengi Hidrojen:** Gazlaştırma yöntemiyle linyit kömüründen üretilir. Her bir ton kahverengi hidrojen üretiminde 18 ila 20 ton karbondioksit (CO₂) açığa çıkmaktadır^[12].
- **Siyah Hidrojen:** Gazlaştırma yöntemiyle bitümlü (siyah) kömürden üretilir ve üretim sürecinde atmosfere CO₂ salınır.
- **Gri Hidrojen:** Hidrojenin neredeyse tamamı doğalgaz gibi fosil kaynaklardan elde edilen enerji ile, “buhar metan reformasyonu” adı verilen bir yöntem uygulanarak, metan ve hidrojenin ayrıştırılması yoluyla elde edilmektedir. Her bir ton gri hidrojen üretiminde 10 ila 12 ton CO₂ açığa çıkmaktadır^[12]. Ayrıca fosil gazı kullanımı, güçlü bir sera gazı olan metan sızıntısı riskini de beraberinde getirmektedir^[2]. Hidrojenin günümüzde en fazla emisyonu sahip olan türevi gri hidrojendir. Gri hidrojen aynı zamanda ABD’de bu yakıtın en yaygın biçimidir ve evsel kullanımın yüzde 95’ini oluşturmaktadır^[10].
- **Mavi Hidrojen:** Mavi hidrojen üretimi, hidrojen metandan (veya kömürden) ayrıldığında üretilen CO₂’yi yakalamak ve uzun süre depolamak için gerekli ek teknolojiler kullanılarak gri hidrojen ile aynı süreci izlemektedir. Bu yöntemde ana nokta, CO₂’nin büyük bir bölümünün yakalanarak, hidrojen üretiminin iklim üzerindeki etkisinin önemli ölçüde azaltılabilmesidir^[13]. Hidrojen üretim tesisleri, karbon yakalama ve depolama teknolojisi ile CO₂ emisyonlarını yüzde 50 ila 90 arasında düşürebilmektedir^[2].

Mavi hidrojen üretiminde CO₂ hemen atmosfere ulaşmayıp yeraltında depolandığı için iklim nötr olarak kabul edilir. Ancak bu konu tartışmalıdır, zira üretilen CO₂’nin tamamı yakalanmadığından ve depolama da tam bir çözüm olmadığından karbonsuz bir üretim yöntemi değildir. Hidrojen ancak metan sızıntıları sifira yakınsa, karbon tutma oranları yüksekse ve yakalanan karbon, atmosfere salınmasını önlemek için kalıcı olarak yeraltında depolanıyorsa “temiz” olarak etiketlenebilir^[14].

Sorun doğalgazın ana bileşeninin metan olmasıdır. Metan atmosfere ulaştığında 100 yıldan daha uzun süre

boyunca, iklime CO₂'den 28 kat daha fazla zarar verir; hatta 20 yıl boyunca CO₂'ye nazaran 84 kat daha güçlü bir etki gösterir. Bu yüzden birçok çevre örgütü mavi hidrojene eleştirel bir tutumla yaklaşmaktadır. Pek çok uzman ve sektörün önemli bir bölümü ise, yeterince yeşil hidrojen elde edilinceye kadar geçiş çözümü olarak mavi hidrojene ihtiyaç duyulduğunu öne sürmektedir^[11]. Karbon yakalama ve depolama teknolojisi kullanılmadan, fosil bazlı hidrojeni yakmak aslında doğalgazın kendi başına kullanılmasından daha fazla kirliticidir^[15].

2022'de 18,8 milyar dolar olan küresel mavi hidrojen pazarının önümüzdeki sekiz yıl içinde büyümesi beklenmektedir^[10].

- **Yeşil Hidrojen:** Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, karbon salımına yol açmayan hidrojene yeşil hidrojen adı verilmektedir. Ancak diğer hidrojen üretme yöntemlerine göre çok daha pahalıya mal olduğu için yeşil hidrojen günümüzde büyük ölçekte üretilememektedir. McKinsey'e göre hidrojen, 2030 yılına kadar kilogram (kg) başına bir dolardan daha düşük bir fiyata üretilebilirse, ekonomik hâle gelecektir.
- **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. Dünyada turkuaz hidrojen üretimi tesisleri kurulmaya başlanmıştır.

Avustralya'nın Yeni Güney Galler eyaletindeki Talawarra B elektrik santralinde hem doğalgaz hem de hidrojen yakarak elektrik üreten türbinler kullanılmaktadır. Söz konusu türbinler, elektrik tüketiminin zirveye ulaştığı zamanlarda aynı anda devreye girerek talebi karşılamaktadır^[2].

- **Pembe Hidrojen:** Elektrolize güç vermek için nükleer fizyon kullanıldığında elde edilen, daha da az gelişmiş bir tür olan pembe hidrojen üretim sistemleri, hâlâ temellerinin atılması aşamasındadır, ancak Uniper ve Fortum'un sahibi olduğu önde gelen İsveç nükleer santrali OKG, yakın zaman önce endüstriyel gaz şirketi Linde'ye pembe hidrojen satma niyetini açıklamıştır. Tesis aslında 1990'ların başından bu yana nükleer reaktör soğutucusu olarak pembe hidrojen üretmektedir. Bu özel durum, yeşil geçişte altyapıyı yeniden tasarlamak için bir plan görevi görmektedir^[10].

Hidrojen üretiminde kullanılabilecek bir başka yöntem de nükleer santraller olabilir. Mevcut nükleer santraller, doğalgaz kazanlarından daha düşük maliyetlerle yüksek kaliteli buhar üretebilir ve "buhar reformasyonu" dahil birçok endüstriyel işlemde kullanılabilir. 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^[17].

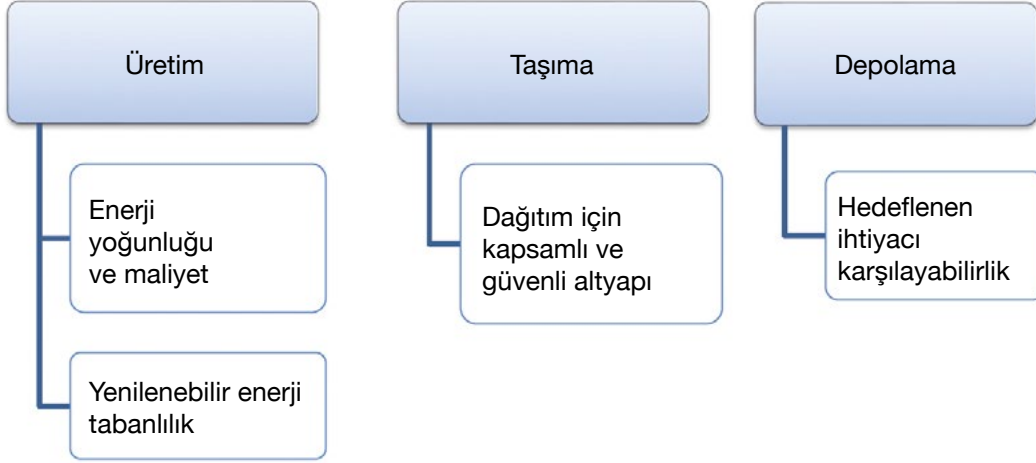
2.2 Hidrojenin Taşınması ve Depolanması

Hidrojen, petrol gibi bir enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin üretildikten sonra, son kullanıcıya veya dağıtım tesisine taşınması ve daha sonra kullanılmak üzere depolanması gerekmektedir. Bu üç aşama -hidrojenin üretimi, taşınması ve depolanması- hep birlikte hidrojen ekonomisi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2)^[6].



Not: Turkuaz hidrojen gelişmekte olan bir dekarbonizasyon seçeneğidir.

Şekil 1: Hidrojenin en yaygın kullanılan üretim biçimleri. Üretim yöntemlerine bağlı olarak hidrojen gri, mavi, turkuaz, yeşil gibi renk isimleriyle adlandırılmaktadır^{[13], [16]}.



Şekil 2: Hidrojen ekonomisi^[6].

Hidrojenin ucuz ve güvenli şekilde depolanması günümüzün önemli bir sorunudur. Özellikle yakıt pili ile çalışan elektrikli araçlarda hidrojenin depolanması oldukça zordur. Hidrojenin hafif bir element olması ve 1 gram (gr) hidrojen gazının normal atmosfer basıncında yaklaşık 11 litrelik bir hacim kaplaması hidrojen depolamayı zorlaştıran bir unsurdur. Günümüzde yüksek miktarlarda hidrojen depolamak için hâlâ uygun bir yöntem bulunamamış olması, hidrojen depolama çalışmalarının önemini artırmaktadır^[6].

Hidrojen depolama teknolojileri, sıkıştırılmış gaz hâlinde hidrojen depolama, sıvılaştırılmış hidrojen depolama, katı hâl hidrojen depolama ve kimyasal hidrojen depolama olarak gruplandırılmaktadır.

- **Hidrojenin sıkıştırılmış gaz hâlinde depolanması** en efektif teknolojidir^[6]. Gazlaştırılan elektrik taşınabilir hâle getirilebilir, aylarca depolanabilir ve uzun mesafe ulaşım araçlarının ya da elektrik santrallerinin ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlayabilir^[5]. Çok büyük hacimler gerektirmektedir. Hidrojen çok hafif olduğundan hacimsel enerji yoğunluğu oldukça düşüktür, ayrıca yüksek basınç nedeniyle depolama tankları çok ağırdır. Bu durum hidrojenin taşınmasını olumsuz etkilediği gibi hidrojenin alınacak olan verimi de düşürmektedir. Depolanan hidrojen enerjisinin yüzde 15'lik kısmı sıkıştırma için harcanır. Ayrıca kullanılmakta olan yüksek basınçlı depolama tankları yüksek maliyetli dokuma karbon nanoliflerden imal edilmektedir. Bu da hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının düşünülmesi için cihaz ve taşıtların boyutlarının büyümesine yol açmaktadır^[6].
- **Sıvılaştırılmış hidrojen depolama** hem çok yüksek basınç gerektirmekte hem de yüksek maliyet ortaya çıkarmaktadır. Depolanan hidrojen enerjisinin yüzde 30'u sıvılaştırma için harcanır. Hidrojeni sıvı hâle getirip depolayabilmek için -253 °C'ye soğutmak gerekir. Mevcut teknolojiyle bu işlem oldukça maliyetli ve uzun zaman alan bir süreçtir. Sıvı hidrojen

günümüzde uzay teknolojisi ve yüksek enerjili nükleer fizik uygulamalarında kullanılmaktadır.

- **Katı hâl hidrojen depolama** yöntemlerinin hidrojen depolama kapasitesi diğer depolama yöntemlerine kıyasla göreceli olarak düşük kalmaktadır.
- **Hibrid hidrojen depolama** ise diğer tüm yöntemlere oranla en verimli yöntem olarak görülmektedir. ABD Enerji Bakanlığının 2020 hedeflerine en yakın hidrojen depolama teknolojisi hibrid hidrojen depolama yöntemidir. Her bir yöntemin eksikliklerinin ayrı ayrı üstesinden gelmek üzere tasarlanmakta olan hibrid hidrojen depolama teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda daha da gelişmesi beklenmektedir^[6].

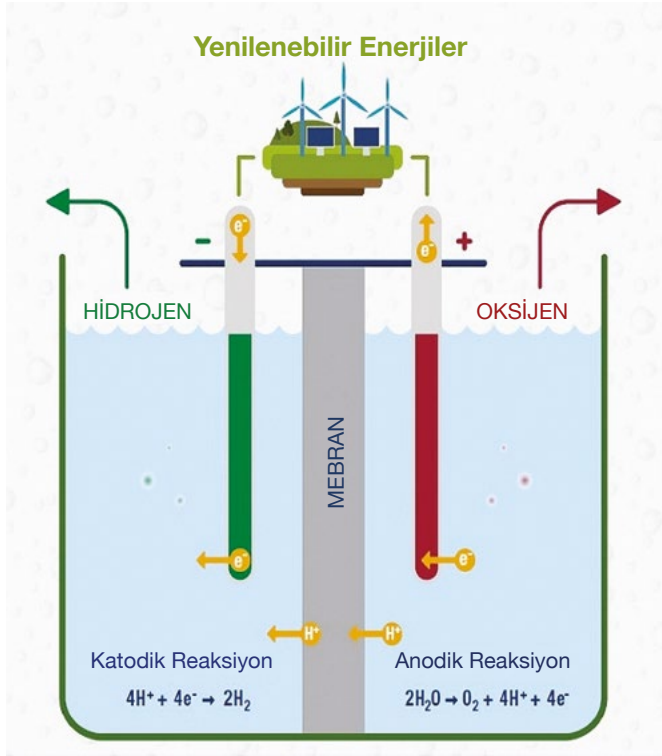
İlerleyen yıllarda artacak hidrojen ihtiyacından ötürü, hidrojenin mevcut doğalgaz boru hatları vasıtasıyla da taşınması mümkündür. Zira, özellikle ülkeler arası boru hatlarının kapasiteleri hidrojenin taşınmasına yetecek durumdadır^[5].

3. YEŞİL HİDROJEN NASIL ÜRETİLİR?

Yenilenebilir enerji kullanılarak elektrolizörler aracılığıyla üretilen hidrojene yeşil hidrojen adı verilmektedir. Girdi yenilenebilir kaynaklı olduğu sürece, yeşil hidrojenin üretimi ve kullanımı neredeyse hiç karbon içermez^[10]. Yeşil hidrojeni gri ve mavi hidrojenin ayıran ve tercih edilir kılan da bu çevre dostu niteliğidir.

3.1 Elektroliz Yöntemi

Yeşil hidrojen üretiminin en yaygın kullanılan yöntemi suyun elektrolizi işlemidir. Suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijene ayrılması işlemine elektroliz denilmektedir. İlk endüstriyel su elektrolizörü 1888'de geliştirilmiştir^[16]. Hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. İlke olarak, bir elektroliz hücresi içinde, genel olarak düzlem bir metal veya karbon plakalar, iki



Şekil 3: Elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretimi^[19].

elektrot ve bunların içine daldırıldığı elektrolit denilen iletken bir sıvı bulunmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım, iletken sıvı içinde pozitif elektrottan negatif elektroda doğru akmaktadır. Bunun sonucu olarak da, elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrılmaktadır (Şekil 3) ^[18].

Elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretimi net sıfır hedefi ile tutarlı, sektör içi sinerjilerin kullanılmasına izin veren, böylece teknoloji maliyetlerini düşüren ve elektrik sistemine esneklik sağlayan bir yöntemdir. Yüksek maliyeti nedeniyle günümüzde hidrojenin sadece binde biri elektroliz yoluyla elde edilmektedir^[20]. Ancak değişken yenilenebilir enerji maliyetlerinin düşmesi ve hızlanan teknolojik gelişme, yeşil hidrojen üretim maliyetini giderek düşürmektedir^[16].

3.1.1 Deniz Suyundan Yeşil Hidrojen Üretimi

Yeşil hidrojen üretmek için en fazla kurulmuş teknoloji seçeneği, yenilenebilir elektrik kullanan su elektrolizidir^[16]. Ancak araştırmalara göre elektroliz işleminde, elde edilecek 1 kg hidrojen için 9 litre saf su gerekmektedir. Temiz enerji için bir taraftan hidrojen elde etmeye çalışırken, bir taraftan da zaten kıt olan su kaynaklarını tüketme çelişkisi, bilim dünyasını yeni arayışlara itmektedir. Bu arayışların başında ise gezegenin çoğunu kaplayan bol miktardaki deniz suyundan yeşil hidrojen üretmek için yürütülen çabalar gelmektedir^[21].

Suudi Arabistan'daki Kral Abdullah Bilim ve Teknoloji Üniversitesinden (King Abdullah University of Science and Technology -KAUST) bir grup araştırmacı, deniz suyundan ucuz bir şekilde lityum çıkarabilen, aynı zamanda deniz suyundaki tuzu gidererek ciddi miktarda

hidrojen ve klor gazı üreten bir cihazı deneysel olarak doğrulamayı başarmıştır. Söz konusu işlem, lityum lantan titanyum oksitten (LLTO) yapılmış özel bir seramik membran içeren bir elektrokimyasal hücreye dayanmaktadır. Membranlar, daha büyük metal iyonlarını bloke ederken lityum iyonlarının geçmesine izin verecek kadar geniştir. Lityum, bir akım uygulandığında LLTO membranından katoda doğru çekilirken, aynı zamanda hidrojen ve klor gazı üretilmektedir. Diğer bir avantaj ise, bu sürecin sadece bir aşamasından geçen deniz suyunun, milyonda 500 parçanın altında toplam tuz konsantrasyonu ile çıkmasıdır. Araştırmacılara göre bu işlem "lityum hasadından sonra kalan suyun tatlı su olarak arıtılabileceği" anlamına gelmektedir^[22].

Deniz suyundan hidrojen üretimindeki temel sorunlardan biri, bu işlem için sarf edilen enerjinin çoğunun tuzdan arındırma sürecinde kaybolması ve bu nedenle üretilen hidrojenin fiyatını yükseltmesidir. Ayrıca deniz suyu elektroliz makinelerinin çoğu ticari olarak kullanılmayacak kadar kısa sürede bozulmaktadır. Bunun nedeni, okyanus suyunda bulunan korit iyonlarının anotta oldukça aşındırıcı olan klor gazına dönüşüp, elektrotları ve katalizörleri bozarak makinenin çalışmasını durdurmasıdır^[22].

2022'nin Aralık ayında Çin'in Nanjing Tech Üniversitesinden araştırmacılar, bu sorunu aşmanın bir yolunu bulduklarını duyurmuştur. Nanjing ekibi, *Nature*'da yayınladıkları çalışmaları ile, deniz suyundan saf suyu kendiliğinden buharlaştırmak için su buharı basıncı farklarını kullanan ve ardından bunu elektrolize eden cihazlarının 3.200 saatten (133 gün) fazla arıza yapmadan çalıştığını, verimli ve ölçeklenebilir olduğunu belirtmiştir^[23].

Avustralya'nın RMIT Üniversitesinden bilim insanları ise, yakın bir tarihte deniz suyundan hidrojen elde etmek için yeni bir yöntem geliştirdiklerini duyurmuştur. Deniz suyunda bulunan korozyon ve mikroorganizmalar nedeniyle, hidrojen üretiminde ciddi zorluklar bulunmaktadır. Ayrıca deniz suyundan hidrojen elde edildiğinde zehirli klorür açığa çıkmaktadır. RMIT ekibi, yaptığı deneyler sonucunda hidrojen ve oksijen moleküllerinden oluşan hidroksil anyonları anodik potansiyele sahip oksijen moleküllerine oksitlenmiş ve süreç büyük miktarlarda hidroksil ürettiği için klor miktarını azaltmıştır^[24].

Deneyin baş araştırmacısı Dr. Nasir Mahmood, çalışmalarının niteliğini, "Klor sorununu çözmeden dünyanın hidrojen ihtiyacını deniz suyunu kullanarak karşılayacak olsaydık, her yıl ortalama 240 milyon ton klor açığa çıkarıldı. Bu da dünyanın klor ihtiyacının üç, dört katıdır. Fosil yakıtlardan üretilen hidrojeni, çevremize farklı bir şekilde zarar verebilecek hidrojen üretimiyle değiştirmenin bir anlamı yok. Prosesimiz sadece CO₂'yi dışlamakla kalmıyor, aynı zamanda klor üretimi de yapmıyor" şeklinde tarif etmektedir. Ekip hâlihazırda ölçeği büyütme için araştırmalarını sürdürmektedir. Mahmood, yeni katalizörlerin çok az enerji gerektirdiğini ve oda sıcaklığında kullanılabilirliğini belirterek, "Bu yöntemin sürdürülebilir olması için, kullandığımız hidrojen, tüm üretim yaşam döngüsü boyunca yüzde 100 karbonsuz olmalı ve dünyanın değerli tatlı su rezervlerine zarar vermemelidir" diyerek, geliştirdikleri yöntemin basit, ölçeklenebilir ve şu anda

piyasada bulunan benzer diğer yöntemlerin tamamından çok daha uygun maliyetli olduğunu belirtmektedir^[25].

3.2 Yeşil Hidrojenin Kullanım Alanları

Yeşil hidrojenin çeşitli uygulamaları, onu net sifıra geçiş hedefinde kritik bir dayanak hâline getirmiştir. Hidrojen; petrol, kimya, çelik gibi karbondan arındırılması güç olan sektörlerin karbonsuzlaştırılmasına yardımcı olmak için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Yeşil hidrojen, gelecekte rafinerilerde yakıt artırımında (hidrojenasyon) veya birçok farklı endüstride (enerjiden kimyasala, enerjiden plastiğe) temel bir kimyasal olarak kullanılabilir. Ayrıca depolanan hidrojen, gerektiğinde yakıt hücreleri aracılığıyla tekrar elektrığe dönüştürülebilir (enerjiden-enerjiye)^[26].

Küresel hidrojen üretiminin yüzde 90'ı sanayide, kalanı ise ulaşım ve yapılarda kullanılmaktadır. Hidrojen yüzde 55 ile en çok amonyak üretiminde kullanılırken, ikinci sırada yüzde 25 ile petrol arıtma faaliyetleri ve ardından yüzde 10 ile metanol üretimi gelmektedir. Hidrojenin bir diğer kullanım alanı ise sanayide elektrik üretimidir. Walmart, Whole Foods, Coca-Cola, FedEx gibi çok sayıda şirket, tesislerinde ihtiyaç duydukları elektrığın bir kısmını hidrojen yakıt pillerinden elde etmektedir^[2].

Hidrojenin çeşitli kullanım alanları aşağıda kategorize edilmiştir:

3.2.1 Rafineri ve Petrokimya

Rafinerilerde işlenen hammaddeler ağırlaştıkça, hafif ürünlerin elde edilmesi için hidrojene olan gereksinim artmaktadır. Özellikle çevre yönetmelikleri gereğince bazı petrol ürünlerinde aromatiklerin ve sülfür bileşiklerin sınırlandırılması da hidrojen tüketiminin artmasına neden olan faktörlerdir^[27].

3.2.2 Kimya Endüstrisi

Kimya endüstrisinde hidrojen ağırlıklı olarak amonyak, metanol ve gübre üretmek için kullanılmaktadır. Hidrojen zaten bu kimyasalların önemli bir bileşeni olduğundan, yeşil hidrojenin entegrasyonu, sınırlı bir modifikasyon gerektirmektedir^[28].

3.2.3 Çelik Endüstrisi

Hidrojen metalurjide çelik elde etmek için hammadde olarak kullanılmaktadır. 2020'de çelik üretimi 1,878 milyar tona ulaşmıştır. Geniş uygulama yelpazesi ve çok yönlülüğü sayesinde çelik, çok sayıda endüstrinin temelidir. 2019 yılında çeliğin yüzde 52'si binalarda ve altyapıda, yüzde 17'si ise ulaşım uygulamalarında kullanılmıştır^[28].

3.2.4 Enerji Depolaması İçin Yeşil Hidrojen

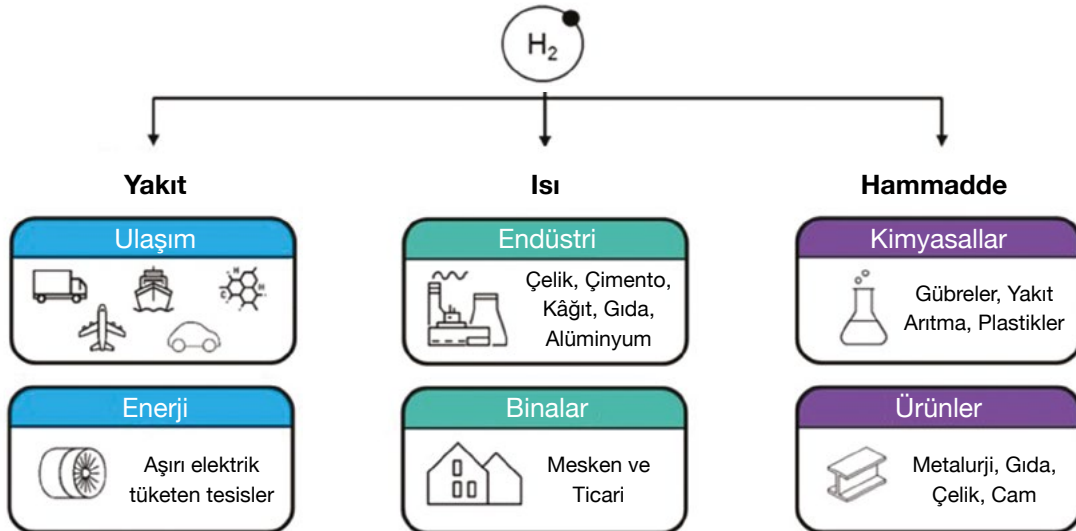
Yeşil hidrojen, hâlihazırdaki stratejik petrol veya doğal gaz rezervlerinin kullanılmasına benzer şekilde, büyük hacmi ve uzun ömrü sayesinde bir enerji depolama sistemi olarak hizmet edebilir^[29].

3.2.5 Temiz Bir Yakıt Olarak Yeşil Hidrojen

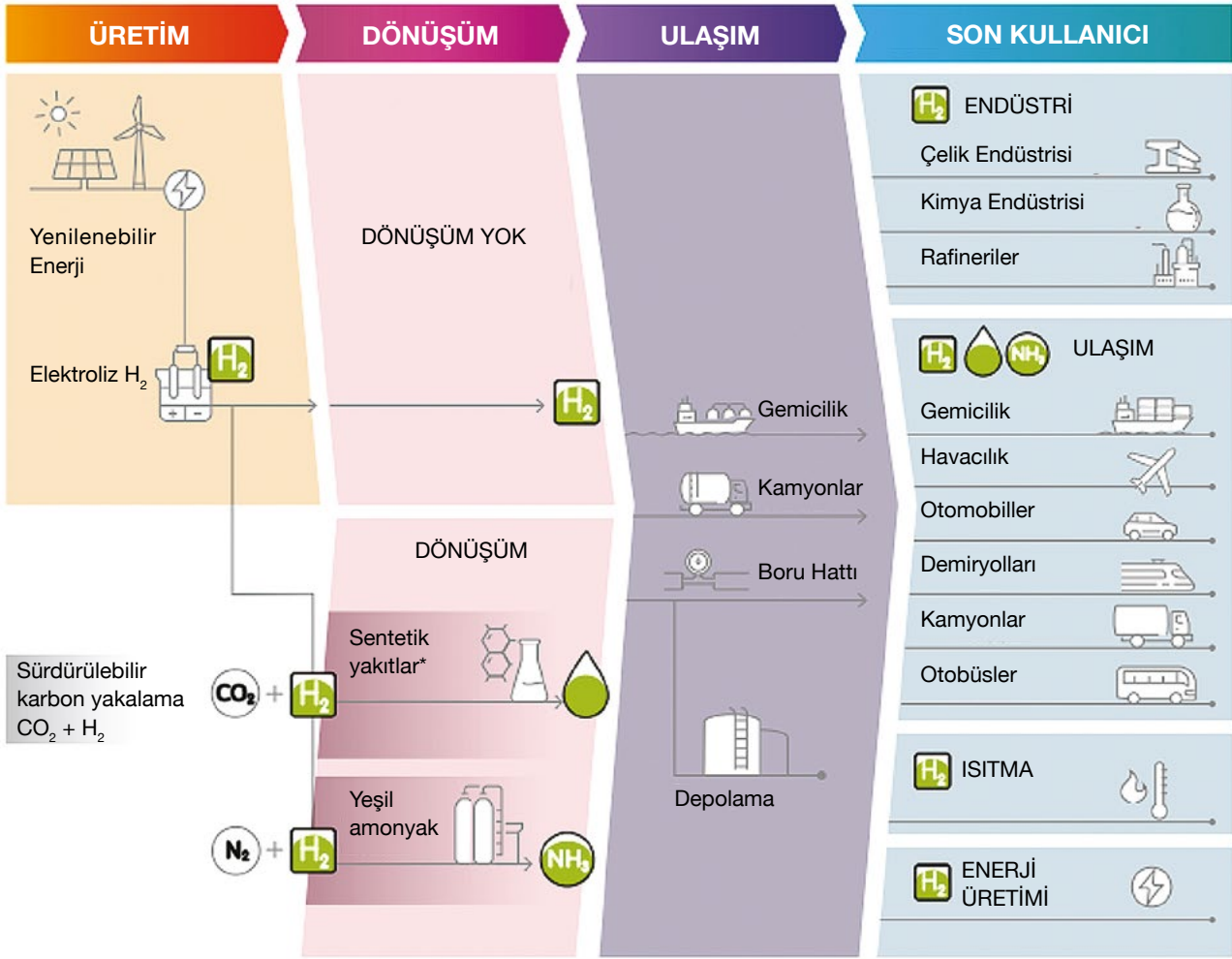
Elektrikli araçlar için yakıt hücrelerinde kullanılan hidrojen; deniz taşımacılığı, uzun mesafeli karayolu taşımacılığı ve havacılık dahil olmak üzere tüm ulaşım sektöründe oyun değiştirici bir niteliğe sahiptir. Yeşil hidrojen, havacılık sektöründeki emisyonları radikal bir şekilde azaltan sentetik yakıtların temeli olabilir. Deniz taşımacılığında genellikle çok ucuz ama oldukça kirlenici yakıtlar kullanıldığından yeşil hidrojen, uzun mesafeli gemiler için yepyeni bir alternatif sunmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından filo sahiplerine ve operatörlere uygulanan sıkı düzenleyici kısıtlamalar karşısında emisyonlarını azaltmak isteyen nakliye sektöründe, bazı stratejik ortaklıklar kurarak yer alan küresel oyuncular temiz hidrojene büyük ilgi göstermektedir. Şu anda, nakliye yakıtı olarak hidrojen veya türevlerini kullanan 100'den fazla pilot proje devam etmektedir^{[8], [14]}.

3.2.6 Evsel Kullanımda Yeşil Hidrojen

Yeşil hidrojen, diğer temiz yöntemlerle elde edilmesi zor olan sıcaklıklara ulaşabilir. Bu nedenle, evlerde elektrik ve ısıtmada kullanılması, yeşil hidrojenin en umut verici uygulamalarından biridir^[29].



Şekil 4: Yeşil hidrojenin kullanım alanları^[6].



* Sentetik yakıtlar terimi, bir karbon kaynağı (kobalt ve emisyon akışlarından, biyogenik kaynaklardan veya doğrudan havadan yakalanan CO₂) ile kimyasal işlemler yoluyla üretilen bir dizi hidrojen bazlı yakıtı ifade eder. Metanol, jet yakıtları, metan ve diğer hidrokarbonları içerir. Bu yakıtların ana avantajı, fosil yakıt bazlı muadillerinin yerine ve çoğu durumda doğrudan ikame yakıtlar (damla yakıt) olarak kullanılabilirlerdir. Sentetik yakıtlar yakıldıklarında karbon emisyonu üretirler, ancak üretim süreçleri aynı miktarda CO₂ tüketirse, prensip olarak net sıfır karbon emisyonlarına sahip olmalarını sağlar.

Şekil 5: Yeşil hidrojen üretimi, dönüşümü ve enerji sistemi genelinde son kullanımlar^[30].

4. YEŞİL HİDROJENİN YÜKSELİŞİ

Hidrojen alanındaki önemli gelişim süreci, AB'nin 2050 yılına kadar karbon nötr olmaya yönelik taahhüdü ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın ilan edilip yenilenebilir enerjilere yönelik teşviklere yenilerinin eklenmesiyle birlikte başlamıştır. Temmuz 2020'de yayınlanan "AB Hidrojen Stratejisi", hidrojeni Avrupa Yeşil Mutabakatı'na ulaşmak için kilit bir öncelik olarak tanımlamaktadır^[5].

Küresel iklim değişikliğinin uzun zamandır yaşanan olumsuz etkileri devam ederken, Rusya'nın 2022'de Ukrayna'yı işgaliyle jeopolitik riskler de artınca tüm dünya kendini sarsıcı bir enerji krizinin içinde bulmuştur. Bu gelişme özellikle enerjide Rusya'nın fosil yakıtlarına bağımlı Avrupa başta olmak üzere tüm dünyada yenilenebilir enerjilere yönelik düzenlemelerin daha da artmasına yol açmıştır. Bu alanda en son yenilik ise, 2023'ün Mart ayı sonunda AB Konseyi, üye ülkeler ve Avrupa Parlamentosu (AP) arasında müzakere edilen "Yenilenebilir Enerji Yönetmeliği"nin

üzerinde anlaşma sağlanması olmuştur. Yakın bir zamanda AP ve üye ülkeler tarafından resmen onaylanması beklenen yönetmeliğe göre, 2030 yılı için AB'nin toplam enerji tüketiminde yenilenebilir kaynakların payı yüzde 32'den yüzde 42,5'e yükseltilecek ve bu hedefin yüzde 45'e çıkartılması söz konusu olabilecektir (Hâlihazırda bu oran yüzde 22'dir). AB ülkeleri, ulaşım sektöründe kullanılan toplam enerjide yenilenebilir kaynakların payını yüzde 29'a yükseltecek ve yenilenebilir enerjinin sanayide kullanımını yıllık yüzde 1,6 oranında artıracaktır. Yönetmelik kapsamında, binaların enerji kullanımı için yenilenebilir enerji hedefleri getirileceği ve yenilenebilir enerji projelerindeki izin süreçlerinin hızlandırılacağı da ilan edilmiştir^[31].

Düzenlemenin hidrojen açısından önemi, temiz hidrojen için de yeni hedefler belirlenmesidir. Buna göre sanayide kullanılan hidrojenin 2030'a kadar yüzde 42'sinin, 2035'e kadar da yüzde 60'ının biyolojik olmayan yenilenebilir yakıtlardan sağlanacağı kararlaştırılmıştır.

Yeşil hidrojen, temiz bir enerji kaynağı olarak ülkelerin iklim taahhütlerine sağlayabileceği katkılar ve ekonomik

potansiyeli nedeniyle son yıllarda uluslararası kurumlar ve hükümetlerce ciddi biçimde teşvik edilmektedir. Avrupa Komisyonu 2023'ün Şubat ayında 2030 yılına kadar 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen üretme ve yılda 10 milyon ton daha ithal etme hedefini açıklarken^[32], ABD'de 2022'nin Ağustos ayında yürürlüğe giren Enflasyon Azaltma Yasası kapsamında getirilen yeşil hidrojen üretimine yönelik güçlü teşvik ve vergi indirimleri dünyada yeni bir hidrojen ekonomisinin şekillenmekte olduğunun işaretlerini vermektedir. Söz konusu yasa, 10 yılda 437 milyar dolar tutarında yeni harcama öngörmekte ve bu rakamın yaklaşık 370 milyar doları, yenilenebilir enerji, elektrikli araç ve diğer sera gazı azaltma önlemlerine yönlendirilmektedir^[33]. 2030 yılına kadar sürdürülebilir şekilde yeşil hidrojen üretiminin maliyetini azaltabilecek sübvansiyonlar içeren yasa^[34], düşük karbonlu hidrojen üreticilerine, üretim sırasında salınan karbon miktarına bağlı bir oranda vergi kredisi sağlamaktadır. Buna göre üreticiler, en düşük emisyon oranını (üretilen 1 kg hidrojen başına 0,45 kg CO₂) sağlamaları hâlinde, 1 kg hidrojen başına 3 dolara kadar kredi almaya hak kazanmaktadır. Böylece bazı durumlarda yeşil hidrojen maliyeti gri hidrojenden daha ucuz hâle gelmektedir^[33]. Gri hidrojenin ABD'deki maliyeti ortalama 2 dolar civarında bulunmaktadır.





Yasa ile karbon emisyonu salımı olmadan üretilen her 1 kg hidrojen için en az yüzde 3'lük bir "hidrojen üretimi vergi indirimi" sağlanması düzenlenmektedir. ABD Enerji Bakanlığı, hâlihazırda kg başına 5 dolar civarında olan yenilenebilir enerji ile hidrojen üretim maliyetini 10 yıl içinde kademeli olarak kg başına 1 dolara düşürmeyi hedeflemektedir^[35].

Goldman Sachs analistleri tarafından hazırlanan bir araştırma raporunda, hidrojen üretimi için net erişilebilir pazarın 2050 yılı itibarıyla bir trilyon doları aşabileceği ve o tarihte "net sıfır" hedefine ulaşılabilmesi için, hidrojen tedarik zincirine beş trilyon dolar yatırım yapılması gerektiği belirtilmektedir^[35].

Getirilen yeni düzenleme ve teşvikler sayesinde yeşil hidrojen pazarı gün geçtikçe gelişirken, geleceğe yönelik olumlu beklentiler de artmaktadır (Tablo 1). Londra merkezli veri analizi ve danışmanlık şirketi GlobalData tarafından hazırlanan "Hidrojen Dönüşümü Görünümü ve Trendler: Q1 2023" raporuna göre, küresel yeşil hidrojen üretim kapasitesi 2022 yılında bir önceki yıla göre yüzde 44 gibi yüksek oranlı bir artışla 109 bin tona ulaşmıştır. Rapor, küresel düşük karbonlu hidrojen piyasası geliştirme çabalarının artış göstermesi hâlinde, dünya genelinde yıllık hidrojen üretim kapasitesinin 2030'a kadar 111 milyon tonu aşacağını öngörmektedir. Yeşil hidrojen için toplam proje kapasitesinin 2022'nin sonunda 166 milyon tona ulaştığı belirtilen rapora göre, 2022'de 393 hidrojen projesi anlaşması yapılırken, bu projelerin yüzde 90'ını düşük karbonlu hidrojen projeleri oluşturmaktadır^[36].

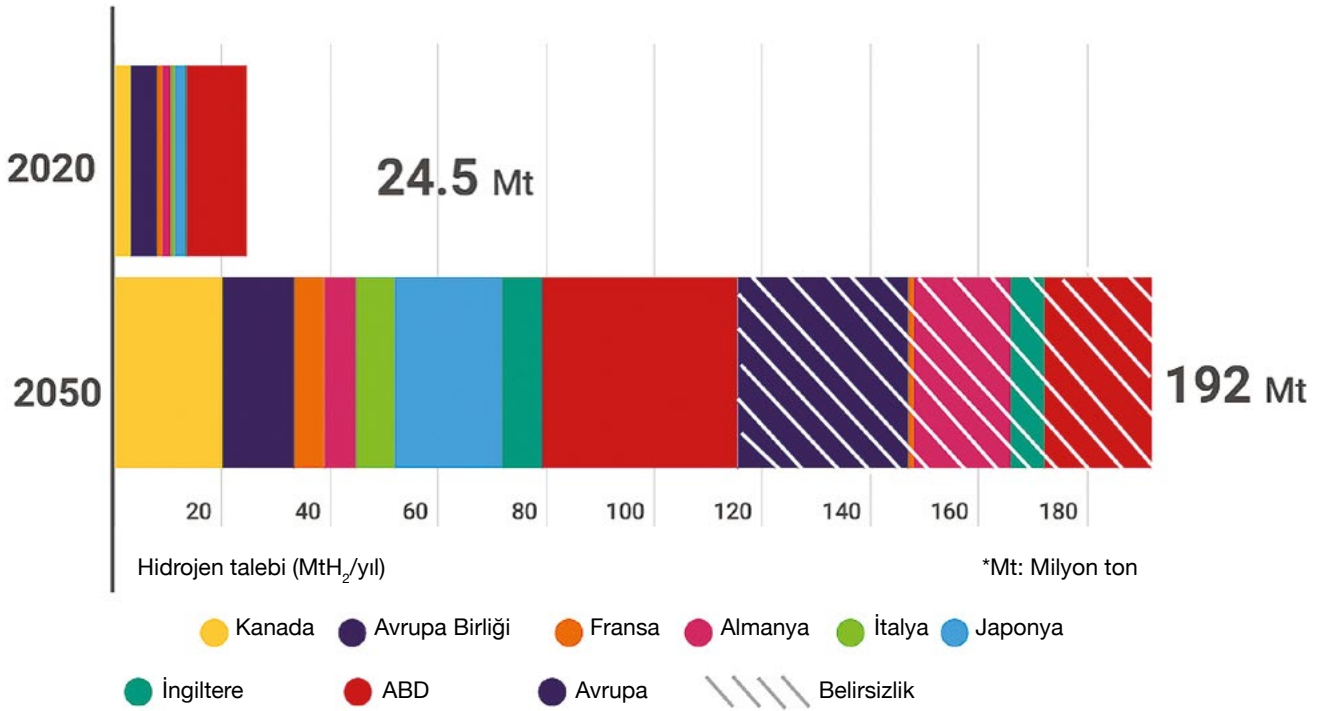
Mevcut enerji krizi nedeniyle hükümetler gelecekte temiz hidrojeni barındırabilecek yeni doğalgaz ve LNG altyapısına da yatırım yapmaktadır. Mevcut tüm projeler devreye alınırsa, 2030 yılına kadar düşük karbonlu hidrojen kapasitesinin yılda 16-24 milyon tona ulaşabileceği; bunun 9-14 milyon tonunu elektrolizörlerden gelen yeşil hidrojenin ve 7-10 milyon tonunu ise mavi hidrojenin oluşturacağı öngörülmektedir^{[14], [37]}. Kurumların tahminleri bir arada değerlendirildiğinde, yeşil hidrojenin 2030 ila 2050 arasındaki 20 yıl içerisinde yüzde 2.000'den fazla bir artış oranıyla adeta bir sıçrama yapması beklenmektedir.

IRENA'ya göre hidrojene yönelik endüstriyel talebin 2050 yılına kadar 613 milyon tona ulaşması ve bunun en az üçte ikisinin yeşil hidrojen olması öngörülmektedir. Başka bir deyişle, hidrojen üretmek için gereken elektrik talebi neredeyse bugünkü toplam küresel elektrik tüketimi düzeyine ulaşacaktır^[38]. Yeşil hidrojenin 2030 yılına kadar 60,6 milyar dolarlık bir piyasa değerine ulaşması beklenmektedir^[10]. G-7 ülkelerinin 2020'de 24,5 milyon ton olan hidrojen talebinin ise 2050'de 192 milyon tona ulaşması beklenmektedir^[14].

	2022	2030	2050		
HİDROJEN	Temiz Hidrojen Üretimi	0,7 Mt/yıl	21,4 Mt/yıl	518 Mt/yıl	
	Elektrolizör Kapasitesi	0,5 GW	233 GW	5.722 GW	
	Temiz Hidrojen ve Türevleri Altyapı Yatırım İhtiyacı	1,1 milyar dolar/yıl	80 milyar dolar/yıl	170 milyar dolar/yıl	
	Temiz Hidrojen Tüketimi -Endüstri	0,04 EJ*	2,4 EJ	40 EJ	

* EJ = Egzajul

Tablo 1: Yeşil hidrojenin tahmini gelişimi (2022-2050)^[1].



Şekil 6: 2020'den 2050'ye kadar G-7 ülkelerinin hidrojen talebi^[14].

Tüm bu gelişmeler nedeniyle, hidrojen üretmek için kullanılan elektrolizörlerin sayısında ve toplam kapasitesinde de yüksek oranlı artışlar beklenmektedir. BloombergNEF, elektrolizörlerin dünya çapındaki yıllık üretim kapasitesinin önümüzdeki iki yıl içinde üç kattan fazla artacağını tahmin ederken^[39], IRENA'nın "2023 Dünya Enerji Geçişleri Görünümü" raporu^[1] bugün 0,5 GW olan toplam kurulu elektrolizör kapasitesinin 2030 yılında 233 GW'a, 2050 yılında ise 5.700 GW'a yükseleceğini öngörmektedir. Kuruluşun hesaplamalarına göre, 2050 yılına kadar yılda ortalama 160 GW elektrolizör kurulması gerekmekte ve kurulum oranının 2030'dan itibaren önemli oranda artması beklenmektedir^[38]. Üretim kapasitelerinde planlanan ölçek artışı bu gelişmeye eşlik ederse, elektrolizörlerin maliyetinin 2030'a kadar 2022 fiyatlarına göre yüzde 70 düşebileceği belirtilmektedir^[14].

Elektrolizör kapasiteleri ve yeşil hidrojen üretimine dair olumlu projeksiyonlara rağmen yeşil hidrojen üretimi yine de IEA'nın 2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosunu karşılayacak kadar hızlı büyümektedir. Gelecekteki hidrojen talebindeki belirsizlikler, tutarsız düzenleyici çerçeveler ve hidrojeni taşımak için ihtiyaç duyulan altyapı eksiklikleri gibi bazı faktörler bu durumun nedenleri arasındadır. Uzmanlar, daha büyük yatırımları cesaretlendirmek, arzı artırmak ve bugün yüksek fiyatlı olan düşük karbonlu hidrojene talep yaratmayı teşvik etmek için acil eylem gerektiğine dikkat çekmektedir^[14].

Yeşil hidrojen maliyetlerini belirleyen en önemli etkenler yenilenebilir enerji maliyetleri, elektrolizörlerin ilk yatırım maliyetleri, elektrolizör verimliliği ve kapasite kullanım faktörleridir. Yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik, yeşil hidrojenin en büyük maliyet kalemini

oluşturmaktadır. Hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kullanımındaki artış, maliyetlerde düşüşe katkı yapabilir. Enerji Politikaları Araştırma Merkezinin "Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi" başlıklı raporuna göre, son 10 yılda şebeke ölçeğinde güneş fotovoltaik ve rüzgâr santralleri tarafından üretilen enerjinin seviyelenirilmiş elektrik maliyetlerinin sırasıyla yüzde 82 ve yüzde 39 oranlarında düşmüş olması, düşüş eğiliminin devam edeceğinin bir göstergesi olabilir. Elektrolizörlerin yaygınlaşmasını destekleyecek düzenlemelerle ve daha agresif kapasite kurulumlarıyla birlikte, yeşil hidrojen maliyetlerinin fosil yakıt alternatiflerinden daha ucuz olan kilogram başına 1 dolar seviyesine kadar düşebileceği tahmin edilmektedir^[40].

IEA, 2018 verilerine göre yeşil hidrojenin kilo başına maliyetinin 3 ila 7,50 dolar olduğunu belirtirken, buhar metan reformasyonu kullanan üretim için maliyet 0,90 dolar ila 3,20 dolar arasındadır. Elektrolizörlerin maliyetinin düşürülmesi, yeşil hidrojenin fiyatının düşürülmesi için kritik öneme sahip olacak, ancak bu husus zaman alacaktır. IEA, bugün yaklaşık 840 dolar olan kilovat başına elektrolizör maliyetlerinin, 2040 yılına kadar yarı yarıya düşebileceğini belirtmiştir. Shell'e göre elektrolizör verimlilikleri yaklaşık yüzde 60 ila yüzde 80 arasında değişmektedir^[41].

Yeşil hidrojen, bugün doğalgazdan elde edilen hidrojenin yaklaşık üç kat daha pahalı olsa da 10 yıl önceki maliyetinin yarısı kadardır. Rüzgâr ve güneş enerjisinin maliyeti düşmeye devam ettikçe ve yeşil hidrojen üretimi etrafındaki ölçek ekonomileri devreye girdikçe, yeşil hidrojenin çok daha ucuzlaması beklenmektedir^[42].

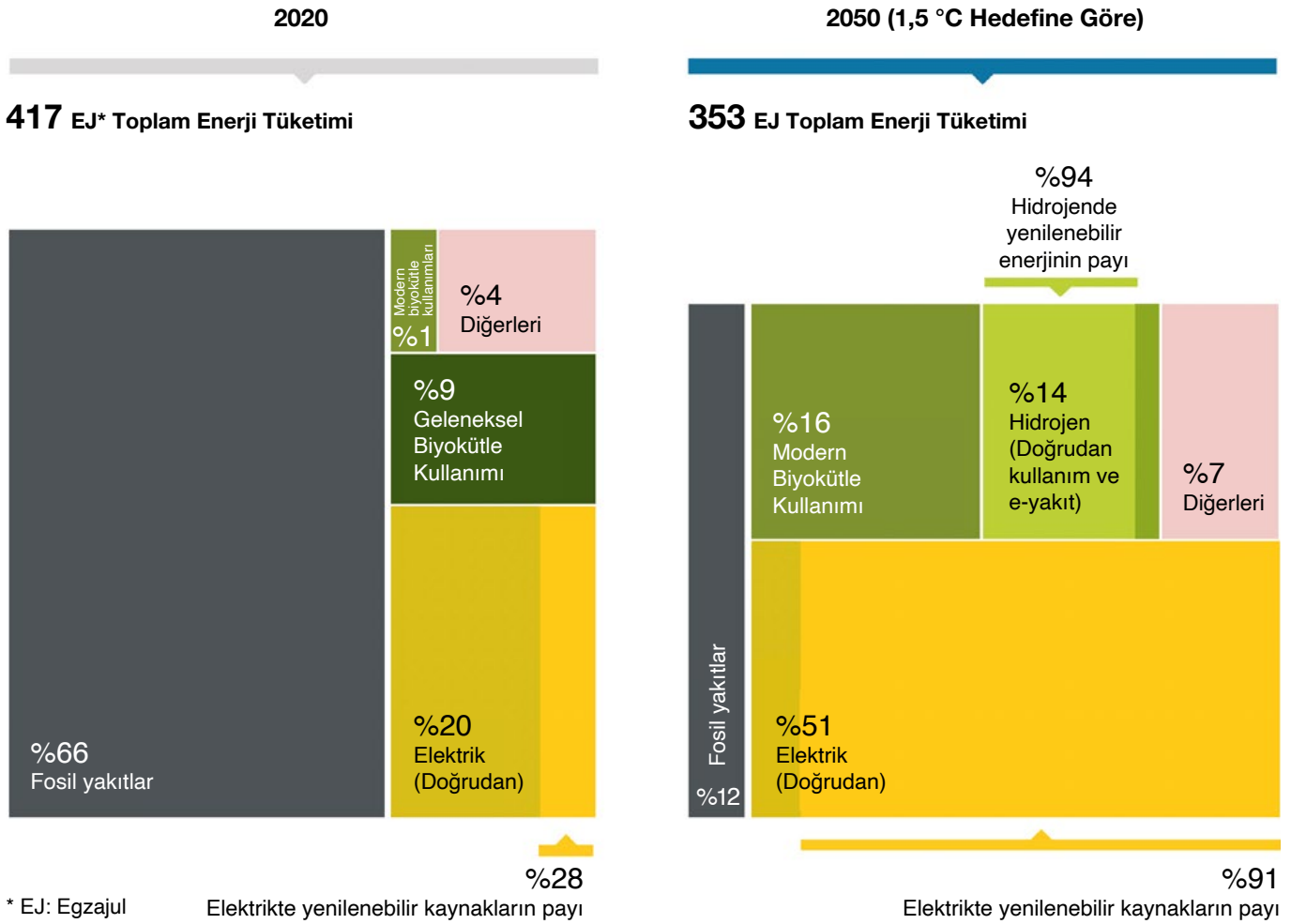
5. ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNDE YEŞİL HİDROJENİN SUNDUĞU İMKÂNLAR

5.1 Karbon Emisyonlarını Azaltma Potansiyeli

Nisan 2022 itibarıyla, küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 88'inden sorumlu olan 131 ülke net sıfır emisyona ulaşma hedefi açıklamıştır. İnsan kaynaklı emisyonlar, şimdiden, sanayi öncesi seviyelere kıyasla küresel sıcaklıkta 1,1°C'lik bir artışa yol açmış durumdadır. Bu sıcaklık artışını 1,5°C içinde tutma şansını artırmak için 2050 yılına kadar net sıfıra ulaşmanın zorunlu olduğuna dair dünyada yaygın bir anlayış mevcuttur. Bu, enerjinin tüm nihai kullanımlarından kaynaklanan emisyonların azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir. Enerji verimliliği, elektrifikasyon ve yenilenebilir enerji kaynakları, ihtiyaç duyulan azaltımın yüzde 70'ini sağlayabilirken; ağır sanayi, uzun mesafeli taşımacılık ve mevsimlik enerji depolama gibi diğer seçeneklerin daha az olgun veya daha maliyetli olduğu durumlarda, son kullanımları dekarbonize etmek için hidrojene ihtiyaç duyulacaktır. Bu

uygulamalar dikkate alındığında, hidrojen, 1,5°C senaryosuna ulaşmak için gereken azaltımın yüzde 10'una ve nihai enerji talebinin yüzde 12'sine katkıda bulunabilecektir^[30]. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) de, hidrojenin küresel ekonomiyi karbondan arındırma dönüşümünde hayati önem taşıyacağını kabul etmektedir^[15].

2021'de dünyada hidrojen üretimi sürecinde 900 milyon tondan fazla sera gazı salınmıştır. Fosil bazlı hidrojen, dünyadaki sera gazlarının yaklaşık yüzde 2'sini (yaklaşık olarak küresel havacılık sektörüyle aynı miktar) oluşturmaktadır^[15]. Kullanıldığında temiz bir enerji kaynağı olmasına rağmen hidrojenin üretimi esnasında yaratacağı karbon salımını ortadan kaldıracak olan yeşil hidrojen, bu nedenle günümüzün en temel önceliği sayılan enerji dönüşümünün önemli bir parçasıdır. Hidrojen; kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yerine yakılabilir. Bu yakıtların tümü yakıldıklarında CO₂ üretirken, bir türbinde saf hidrojen yakılması sadece su buharı üretmektedir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklar nedeniyle zararlı nitrojen oksitlerin üretimini de katalize etmektedir^[42].



Not: Hidrojen (doğrudan kullanım ve e-yakıtlar) kategorisi, toplam hidrojen tüketimini (yeşil ve mavi) ve diğer e-yakıtları (e-amonyak ve e-metanol) kapsamaktadır.

Şekil 7: Toplam enerji tüketiminde hidrojenin payı (2020-2050)^[1].

IEA'e göre yeşil hidrojen elde etme yöntemi olan elektroliz, hidrojen fosil yakıtlar kullanılarak üretildiğinde yıllık olarak ortaya çıkan CO₂'nin tamamına yakını ortadan kaldıracaktır^[19]. Kurumun "Net Sıfır Emisyon Senaryosu 2021-2050"ye göre hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların, yüzyılın ortasına kadar 60 gigaton CO₂ emisyonunu önleyebileceği işaret edilmektedir. Bu, toplam kümülatif emisyon azaltımının yüzde 6'sına eşdeğerdir^[14]. Goldman Sachs'a göre ise temiz hidrojen, sektörler genelinde küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 15'inin karbonsuzlaştırılmasına yardımcı olacaktır^[35].

IRENA'nın Dünya Enerji Geçişi Görünümü 2023 raporunda öngörülen 1,5°C senaryosu, hidrojenin 2050 yılına kadar toplam küresel nihai enerji tüketiminde yüzde 14 ile daha önemli rol oynayacağına işaret etmektedir. Raporda dikkat çekici olan, hidrojen tüketiminin yüzde 94'ünün yenilenebilir kaynaklardan geleceği yönündeki beklentidir ve bu beklenti temiz enerji kaynaklarına artan güvenin bir göstergesidir (Şekil 7)^[1].

Elektrifikasyonun güç olduğu sektörleri karbondan arındırma, enerji güvenliğini sağlama ve yenilenebilir enerjiyi farklı coğrafyalar arasında yeniden dağıtılma yeteneği gibi hidrojenin sahip olduğu esneklikler sayesinde, çeşitli bölgelerde her biri kilit role sahip boru hatlarında hâlihazırda 680 proje bulunmaktadır^[14].

5.2 Enerjide Kaynak Çeşitliliği Sağlama

Düşen yenilenebilir enerji fiyatları, elektrolizörlerin azalan maliyeti ve teknolojiye gelişmelerin sağladığı artan verimlilik yeşil hidrojen üretiminin ticari uygulanabilirliğini de artırmıştır^[8]. Bloomberg New Energy Finance'e göre, maliyetler düşmeye devam ederse, 2050 yılına kadar dünyanın birçok yerinde kg başına 0,70-1,60 dolar arasında değişen maliyetlerle yeşil hidrojen üretilebilecek ve bu fiyat doğalgazla rekabet edebilecektir. Dünyanın en büyük elektrolizör üreticisi olan NEL, yeşil hidrojen üretiminin fosil yakıtlarla maliyet eşitliğine (hatta üstünlüğüne) 2025 gibi erken bir tarihte ulaşılabileceğine inanmaktadır^[8]. Hem hidrojen üretme maliyetinin yüzde 70'ini oluşturan yenilenebilir elektriğin hem de elektroliz teknolojisinin azalan maliyetleri, yeşil hidrojenin, temiz enerji dünyasında bir sonraki en iyi yatırım olabileceği yönündeki görüşleri desteklemektedir^[43].

Bazı hesaplamalara göre, mevcut fosil bazlı hidrojen sektörünü yeşil hidrojen kullanarak dekarbonize etmek için, 2019'da dünyada üretilen rüzgâr ve güneş elektriği miktarının yaklaşık üç katına ihtiyaç duyulmaktadır^[15]. IEA, pek çok olası kullanımıyla hidrojenin, 2050 yılına kadar küresel enerji ihtiyacının yüzde 10'undan fazlasını karşılayabileceğini ve yılda 11 milyon gigawatt/saatten fazla enerji üretebileceğini tahmin etmektedir. Ancak bu, hidrojen üretmek, depolamak ve taşımak için dört trilyon dolardan fazla altyapı yatırımı gerektirecektir. Yalnızca Avrupa, 2030 yılına kadar 40 gigawatt'lık elektroliz kapasitesini hedeflemektedir. Bu, UEA'nın 2050 tahmininin yaklaşık yüzde 2'sine denk gelmektedir^[42]. Gerçek bir küresel hidrojen geçişinin ise 15 trilyon dolarlık toplam yatırım gerektireceği tahmin edilmektedir. Bu yatırım ihtiyacının yüzde 85'i yeşil hidrojen üretiminde kullanılacak

yenilenebilir enerjinin temin edilmesinden, yüzde 15'i ise elektrolizörler, üretim tesisleri ve hidrojen taşıma ve depolama gibi ekipman ve altyapıya yapılacak yatırımlardan oluşmaktadır^[44].

5.3 Yeni Endüstriyel Gelişim Fırsatları Yaratma

Yeşil hidrojen geçişi birçok endüstride yeni yapılanma ve yatırımların önünü açacaktır. Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı United Nations Industrial Development Organization -UNIDO), yeşil hidrojen geçişinin yaygın olarak kabul edilen faydalarının ötesinde, bunu yeni endüstriyel gelişim yolları ve becerilerinin yükseltilmesi için de bir fırsat olarak görmektedir. Kuruluş bu fırsatların özellikle, birçoğu geniş yenilenebilir enerji potansiyelleri nedeniyle yeşil hidrojen üreticisi olarak iyi bir konumda olan gelişmekte olan ülkeler için geçerli olduğuna inanmakta ve bu ülkeler için destek mekanizmaları tasarlamaktadır. "Sanayide Yeşil Hidrojen Küresel Programı" adlı bir teşvik programı yürüten UNIDO, yeşil hidrojenle ilgili sanayileşme fırsatlarının; yenilenebilir enerji donanımı, elektrolizörler ve yeşil hidrojen türevlerinin üretimi de dahil olmak üzere tüm yeşil hidrojen değer zincirini kapsadığını ifade etmektedir^[44].

5.4 Enerji Güvenliğine Katkı Sağlama

Dünya çapında enerji dönüşümünü hızlandırmak için umut verici bir çözüm olarak görülen yeşil hidrojen elektrolizi, coğrafi olarak fosil yakıtların çıkarılmasının zor olduğu bölgelerde gerçekleştirilmesi gerektiğinden, küresel enerji güvenliğinin sağlanmasında kilit rol oynayabilir. Avrupa'daki mevcut enerji krizi ve Rusya Ukrayna Savaşı'nın ortaya çıkardığı tedarik çeşitlendirme arayışı nedeniyle yeşil hidrojen, uzun vadede Rusya'nın fosil yakıt ithalatına olan bağımlılığını azaltarak özellikle Avrupa'nın enerji güvenliğini destekleme potansiyeline de sahiptir^[45].

Özellikle hidrojenin türevi konumundaki ürünlerin daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, düşük maliyetli yenilenebilir enerji bölgelerini ya sınırlı ya da yüksek maliyetli yenilenebilir enerjiye sahip olan talep merkezlerine bağlayarak, enerjinin maliyet etkin bir şekilde taşınabilirliğini etkili bir şekilde artıracaktır. Hidrojenin türevleri yoluyla küresel enerji ticareti, ithalatçı ülkeler daha ucuz (yerli) kaynaklardan yararlanabilecekleri için ekonomik faydalar sağlayacak, nihai enerji talebini karşılamının alternatif yollarını oluşturduğu için sistemin dayanıklılığını artırarak enerji güvenliğini güçlendirecektir. Bununla birlikte, hidrojen ticareti sadece ekonomik fayda sağlamakla kalmayacak, teknolojiler uzun vadede tam olgunluğa erişip geniş çapta uygulandığında ithalatçı ülkelerin küçük bir maliyet aralığında birden fazla alternatife güvenebilmeleri mümkün olacaktır^[30].

Ancak erken gelişim aşaması göz önüne alındığında, yeşil hidrojen pazarının hızlı ve başarılı bir şekilde ölçeklenmesi için teşvike ihtiyacı bulunduğu ortadadır. Bu, fosil bazlı ara ve son ürünlerle karşılaştırıldığında, yeşil ürünler pazarındaki fiyatları dengelemek için daha fazla mali destek mekanizmasına ihtiyaç olduğu anlamına gelmektedir. Yeşil hidrojen geçişi için gereken yatırımın bir kısmı bugüne kadar taahhüt edilen 70 milyar dolar ile

doğrudan hükümetler tarafından finanse edilecektir. Bu noktada UNIDO özel finansmanın gerekliliğine özellikle vurgu yapmaktadır. UNIDO, çevresel ve ekonomik faydaların mümkün olan en kısa sürede gerçekleştirilebilmesi için gereken fonu bulmak ve güvence altına almak için dünya çapında bir yatırım atağına ihtiyaç duyulduğuna dikkat çekmektedir^[44].

5.5 Yeşil Hidrojene Geçişi Hızlandıracak Dijital Teknolojiler

Yeşil hidrojene geçişi hızlandırmak için kritik kaldıraçlardan biri de dijital teknolojidir. Özellikle yapay zekâ ve nesnelerin interneti teknolojisinin bir kombinasyonu olan Nesnelerin Yapay Zekâsı (AloT), gelişmiş veri analitiği aracılığıyla sistemlerin optimizasyonunu ve otomasyonunu sağlamaktadır. Dijital teknolojinin yeşil hidrojen geçişini hızlandırmaya yardımcı olabileceği dört alan söz konusudur^[43]:

- **Dijital İkipler:** Dijital ikipler, hava durumu, alıcıların talep oynaklığı, mevcut ve gelecekteki yerel altyapı gibi değişkenler dahil olmak üzere, birden fazla tasarımı ve senaryoyu modelleyerek, yatırım getirisini en üst düzeye çıkarmak ve riski en aza indirmek için her tasarımı optimize edebilir. Tahminler, dijital ikiz analizinin sermaye harcamalarını yüzde 10-15 oranında optimize edebileceğini göstermektedir.
- **İzleme ve Kontrol:** Enerji tüketimi, tesis performansı, üretim oranları, saflık ve depolama, verimli üretim sağlamaya yönelik görünürlük gibi unsurlar hidrojen üretimi için temel performans göstergeleri (KPI) arasındadır. AloT, akıllı alarmlar, KPI'ları izlemek için varlıklar üzerine yerleştirilen sensörler ve bulut tabanlı uzaktan izleme kullanılarak anormallikleri hızlı bir şekilde tespit edebilmektedir. Uzaktan kontrolle birlikte tesis operasyonlarının ve varlık sağlığının gerçek zamanlı izlenmesini sağlamak maliyetleri yüzde 10-20 oranında azaltabilmektedir.
- **Gelişmiş Analitik:** Analitik, elde edilen verileri iş zekâsına dönüştürebilir. Yeşil hidrojen alanında tesisler, depolama tankları, borular, enerji toplayıcılar ve hatta hava durumundan elde edilen veriler aracılığıyla analitik uygulaması, verimi en üst düzeye çıkarmak için eylem önerilerinde bulunabilir. Arızaları tahmin ederek ve elektrolizörlerin çalışma süresini optimize ederek enerji kayıpları önlenir ve böylece gelirler artabilir. Dijital ikiz ve analitik modeller yatırımcıların ve kredi sağlayıcı bankacıların getirilerini optimize etmek için stratejik ve taktiksel kararlar almasına olanak tanır.
- **Menşe Belgeleri:** Menşe garantisi, tüketilen tüm elektriğin yenilenebilir kaynaklı olduğunu onaylayarak yeşil hidrojenden para kazanmak için bir ön koşuldur. Menşe garantisi veren kuruluşlara girişi otomatikleştirmek için gerçek zamanlıya yakın verilerden yararlanılması daha fazla güven ve güvenilirlik sunar. AloT ayrıca yeşil hidrojenin tüm yaşam döngüsü boyunca uçtan uca izlenebilirlik sağlayabilir.

Yeşil hidrojene yönelik artan yatırımlar; devlet desteği, mühendislikteki ilerlemeler ve yetenekli bir işgücü ile birleştiğinde, AloT çözümlerinin yeşil hidrojene geçişin sağlanmasında hayati öneme sahip olacağı ve küresel karbonsuzlaştırma çabalarında kritik bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Uzmanlar, AloT özellikli çözümlerin sermaye harcamaları ve operasyonel harcamaları yüzde 15 ila yüzde 25 oranında azaltabileceği ve ticari olarak uygun yeşil hidrojenin ölçeklendirilmesini dört ila yedi yıl hızlandırabileceğini tahmin ettiklerini ifade etmektedir. Böylesi bir durumda kilit endüstriler, uçaklar ve gemiler yüzde 100 yeşil hidrojenle çalıştırılabilecektir^[43].

6. YEŞİL HİDROJENİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Yeşil hidrojen, küresel ekonomilerin 2050 yılında karbon nötrlüğe ulaşmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için öncülük etmek zorunda olduğu, enerji geçişi sürecinin başrol oyuncularından biridir. Ancak gelişmekte olan her yeni teknoloji ve atılım gibi yeşil hidrojenin de kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

6.1 Yeşil Hidrojenin Avantajları

Atmosferdeki sera gazlarını azaltma, küresel sıcaklıkları düşürme ve çevre kalitesini iyileştirme potansiyeli göz önüne alındığında, yeşil hidrojenin getireceği fırsatlar ihmal edilemez derecede fazladır. Yeşil hidrojen temiz, yüzde 100 sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerjidir. Yüksek hacimli bir gaz olmasına rağmen hidrojen hafiftir, karbonsuzdur ve enerji yoğunudur; havada yandığında karbonmonoksit veya hidrokarbonlarla ilişkili sülfatlar üretmez. Ne kadar maliyetli olursa olsun, yakıt hücrelerinde kullanıldığında yanma olmadan elektrik üretir ve tek yan ürünü sudur. Hidrojen, elektroliz kullanarak elektrik şebekelerindeki arz ve talebi dengeleyebilir ve bir kez sıkıştırıldığında depolama kapasitesi nedeniyle mevsimsel ayarlamalara daha iyi yanıt verebilir^[46]. Ayrıca sıkıştırılabilir ve özel tanklarda uzun süre depolanabilir. Çok hafif bir element olduğu için lityum pillere göre daha kolay kullanım sağlar, bu da sonuç olarak onu taşınabilir kılar. En önemli avantajlarından biri de çok yönlü olmasıdır. Elektrik veya sentetik gaza dönüştürülebilir; ticari, endüstriyel veya mobilite amaçları için kullanılabilir^[19], ^[29].

Değişken yenilenebilir enerjinin daha fazla konuşlandırılmasını destekleyen ek sistem esnekliği ve depolama potansiyeli, enerji güvenliğine katkı, hava kirliliğinin azaltılması, ekonomik büyüme, istihdam yaratma ve endüstriyel rekabet gücü gibi diğer sosyoekonomik katkılar yeşil hidrojenin ek faydaları arasındadır^[16].

6.2 Yeşil Hidrojenin Dezavantajları

Cesaret verici beklentilerine ve tüm avantajlarına rağmen, yeşil hidrojen henüz dünya enerji karışımının bir parçası sayılamamaktadır; çünkü araştırmaların, hükümet politikalarının ve özel yatırımların üstesinden gelmekte zorlandığı çeşitli zorluklara sahiptir^[29].

- **Yüksek Maliyetler:** Yeşil hidrojenin potansiyelini tam olarak yerine getirmesi için aşması gereken çeşitli engellerin en başında maliyet gelmektedir. Yeşil hidrojen üretim maliyeti şu anda gri hidrojenden iki ila üç kat daha pahalıdır^[16]. Elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretmenin anahtarı olan yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin yüksek maliyeti, yeşil hidrojeni pahalı hâle getirmektedir^[19]. Ayrıca IRENA'ya göre hidrojen boru hatları yüzde 10-50 daha pahalı olabilir. Karayolu taşımacılığı için yakıt hücreleri ve depolama tankları, içten yanmalı motorlardan birkaç kat daha pahalıdır. Havacılık için sentetik yakıtlar şu anda fosil yakıttan elde edilen jet yakıtından üç ila altı kat daha pahalı olabilir^[30]. Bununla birlikte optimum tasarım ve yatırım getirisi hakkında sınırlı bilgi olması yatırımın güvenilirliğini sınırlandırmaktadır. Pazar talebini karşılamak için kuruluşların yeşil hidrojen tesisi tasarımlarını büyütmeleri ve iyileştirmeleri gerekecektir. Bununla birlikte, sınırlı pazar verilerine ve sahadaki düşük olgunluğa dayanarak, tesis tasarımlarını ve uçtan uca yeşil hidrojen sistemlerini optimize etmek maliyetli ve son derece karmaşık olabilmektedir. Ayrıca, büyük yeşil hidrojen tesislerinin çoğu, yeşil hidrojene geçiş sırasında mevcut operasyonlar üzerinde sınırlı etki sağlamak için hâlihazırdaki endüstriyel kümelermeler içinde inşa edilmiştir^[43].
- **Sınırlı Sayıda Uzman İşgücü:** Yeşil hidrojenin yükselişi sayısız yeni iş fırsatı yaratacak olsa da, işgücü hidrojen ekonomisini desteklemek için gerekli eğitim ve becerilere henüz sahip değildir. Endüstri olgunlaştıkça, uzmanlaşmış işçi eksikliğinin sektörün ilerlemesini engelleme potansiyeli vardır^[43].
- **Aşırı Enerji Tüketimi:** Genel olarak hidrojen ve özel olarak yeşil hidrojen üretimi, diğer yakıtlardan daha fazla enerji gerektirir. Bu da yüksek enerji tüketimini yeşil hidrojenin dezavantajlarından biri hâline getirmektedir^[19]. Bunun yanında yeşil hidrojen, tedarik zincirinin her noktasında önemli miktarda enerji kaybeder. Hidrojen üretmek için kullanılan enerjinin yaklaşık yüzde 30-35'i elektroliz işlemi sırasında kaybedilir; hidrojenin sıvılaştırılması veya amonyak gibi diğer taşıyıcılara dönüştürülmesi yüzde 13-25 enerji kaybıyla sonuçlanır ve hidrojenin taşınması, tipik olarak hidrojenin kendi enerjisinin yüzde 10-12'sine eşit olan ek enerji girdileri gerektirir. Yakıt hücrelerinde hidrojen kullanımı yüzde 40-50 oranında ek bir enerji kaybına neden olacaktır^[47]. Bu verimsizlikler, eğer optimize edilemezlerse, son kullanım elektrifikasyonu ile rekabet edebilecek yeşil hidrojen elektrolizörlerinde kullanılmak üzere önemli ölçüde yenilenebilir enerji gerektirecektir. Enerji portföyünün ağırlığını temiz hidrojene doğru çeşitlendirmenin, daha verimli yenilenebilir uygulamalara yönelik yatırımları dışlayabileceği de dile getirilen endişeler arasındadır^[46].
- **Lojistik Zorluklar:** Yeşil hidrojenin depolanması ve taşınması pahalıdır. Uygun maliyetli yeşil hidrojen güneşli yerlerde (Avustralya, Portekiz, İspanya veya Tunus gibi) üretilebilirken, alım yapan sanayiciler

genellikle uzak bölgelerdedir. Bu, teslim süreleri ve maliyetlerle birlikte özel boru hatları ihtiyacı ortaya çıkar^[43]. Hidrojenin düşük hacimsel enerji yoğunluğu, nakliyesini pahalı hâle getirmektedir. Depolama aracı olarak mükemmel görünmekle birlikte, örneğin Avrupa büyük miktarda yenilenebilir enerji fazlası üretmekten uzaktır^[45]. Diğer temiz enerji kaynaklarına benzer şekilde, şebekeye bağlı bir ulaşım altyapısı (boru hatları dahil) ve olgun bir tedarik zinciri ağından yoksun olması yeşil hidrojenin önündeki aşılması gereken engeller arasındadır^[46]. IRENA'ya göre sınırlı altyapı, önemli zorluk alanlarından biridir. Küresel olarak, yalnızca yaklaşık 4.500 km hidrojen boru hattı bulunduğu dikkat çeken IRENA, uzak konulardan yenilenebilir kaynakların kullanılmasının, boru hatlarından dönüştürme ve sıvılaştırma birimlerine ve depolamaya kadar ulaşım altyapısına ek yatırım gerektireceğini ve bunun da gereken ilk yatırım tutarını artıracığına dikkat çekmektedir^[30].

- **Güvenlik:** Oldukça uçucu ve yanıcı bir gaz olan hidrojen sızıntı ve patlamalarını önlemek için kapsamlı güvenlik önlemleri alınması gerekmektedir^[19].
- **Çevresel Problemler:** Yeşil hidrojene yönelik eleştirilerden biri de aşırı temiz su tüketimine yol açacağı için iddia edildiği kadar "çevre dostu" olmadığı yönündeki görüşlerdir. Londra merkezli finansal düşünce kuruluşu Carbon Tracker'ın "Temiz Hidrojenin Enerji Dönüşümündeki Yeri" başlıklı raporu, aşırı temiz su tüketimi ve oluşan enerji kaybı sorunları çözülmeden yeşil hidrojenin sürdürülebilir sayılamayacağını savunmaktadır^[48]. Gerçekten de yeşil hidrojen üretimi 2050 yılına kadar önemli bir ekonomik rol oynayacak şekilde ölçeklendirilirse, tatlı su talebinin mevcut küresel yıllık tüketiminin dörtte birini aşacağı ve bazı bölgelerin su kıtlığı riskiyle karşı karşıya kalacağı öngörülmektedir^[12].

Önündeki engelleri aşmak ve yeşil hidrojeni niş bir oyuncudan yaygın bir enerji taşıyıcısına dönüştürmek, teknolojiye hazır olma, pazara giriş ve pazar büyümesi aşamalarının her birinde entegre bir politika yaklaşımı gerektirmektedir. Bu politika yaklaşımı: ulusal hidrojen stratejileri oluşturma, politika önceliklerini belirleme, bir yönetim sistemi oluşturma, politikaları etkinleştirme ve yeşil hidrojenin menşenin garanti altına alınması için bir sistem oluşturma gibi dört temel unsura dayanmaktadır^[16].

7. SONUÇ

AB'nin 2050 yılına kadar karbon nötr olmaya yönelik taahhüdü ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın ilan edilmesiyle gün geçtikçe cazibesini artıran hidrojen, çok yönlülüğü ile değerli bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen, petrol rafinerilerinden kimyaya, evsel kullanımdan ulaşımaya kadar çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır.

Şubat 2022'de Rusya Ukrayna Savaşı'nın başlamasının ardından küresel doğalgaz ve petrol arzında meydana gelen belirsizlikler ve AB'nin Rus enerji ürünlerine uyguladığı ithalat ambargolarının enerji piyasalarında

dengelesizlikleri beraberinde getirmiş, ülkelerin yenilenebilir enerji projelerine yönelimi hız kazanmıştır. Bu çerçevede rüzgâr ve güneşin yanında temiz hidrojene yönelik kamusal teşvikler gün geçtikçe artmaktadır.

Özellikle elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojen, hem hidrojen üretiminde günümüzde kullanılan fosil yakıtların meydana getirdiği hem de karbondan arındırılması zor sektörlerin yol açtığı sera gazı emisyon oranlarını düşürme potansiyeli sayesinde geleceğin kilit enerjilerinden biri olarak görülmektedir. 2050'ye gelindiğinde toplam küresel enerji tüketiminin yüzde 14'üne yakınının yenilenebilir kaynaklar kullanılarak üretilen temiz hidrojen tarafından karşılanacağı öngörülmektedir.

Günümüzde aralarında Türkiye'nin de bulunduğu 60'tan fazla ülke hidrojen stratejilerini açıklamış ve dünya çapında yürütülen hidrojen projelerinin sayısı katlanarak artmıştır. Bu projelerin yüzde 90'ını düşük karbonlu hidrojen projeleri oluşturmaktadır. Yapılan hesaplamalar hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 15'inin karbonsuzlaştırılmasına yardımcı olacağına işaret etmektedir. Yeşil hidrojenin yaygınlaşması enerjide kaynak çeşitliliğini artıracağı gibi, 2050 yılına kadar küresel ortalama sıcaklıkları da 1,5 derecenin altında tutma küresel hedefine de ciddi katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] *International Renewable Energy Agency*, (2023), "WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2023", <https://bit.ly/3o15z61>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [2] *STM ThinkTech*, (2022), "Sera Gazı Salımını Azaltmada Yeni Teknoloji ve İnovasyonlar", (6 Nisan 2022), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/sera-gazi-salimini-azaltmada-yeni-teknoloji-ve-inovasyonlar>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [3] *International Renewable Energy Agency*, (2023), "Global Landscape of Renewable Energy Finance 2023", <https://bit.ly/3KVsDfG>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [4] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2023), "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası", https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [5] *TSKB*, (2021), "Hidrojen Enerji si Bilgilendirme Notu", (Mayıs 2021), <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/hidrojen-enerjisi-bilgilendirme-notu-120721.pdf>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [6] Koşar, Cihan; (2021), "Hidrojen Depolama Yöntemleri", *Open Journal of Nano*, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1772051>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [7] Crownhart, Casey; (2023), "When hydrogen will help climate change—and when it won't.", *MIT Technology Review*, (23 Şubat 2023), <https://www.technologyreview.com/2023/02/23/1069086/when-hydrogen-will-help-climate-change-and-when-it-wont/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [8] KOBINA KANE, MICHAEL; GIL, STEPHANIE; (2022), "Green Hydrogen: A key investment for the energy transition", *World Bank*, (23 Haziran 2022), <https://blogs.worldbank.org/ppps/green-hydrogen-key-investment-energy-transition>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [9] *PricewaterhouseCoopers*, "Green Hydrogen: A key investment for the energy transition", <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html#qualifying-the-opportunity-in-green-hydrogen>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [10] Garden, Leah; (2023), "Making sense of the hydrogen rainbow", (6 Mart 2023), *World Economic Forum*, <https://www.weforum.org/agenda/2023/03/making-sense-of-the-hydrogen-rainbow/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [11] *Heinrich Böll Stiftung*, (2021), "Hidrojen hakkında bilinmesi gereken on şey", (18 Ekim 2021), <https://tr.boell.org/tr/2021/11/17/hidrojen-hakkinda-bilinmesi-gereken-sey>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [12] Dale, Gareth; Szabo, John; (2023), "Green hydrogen: why low-carbon fuels are not benefiting from high fossil fuel prices", *The Conversation*, (12 Ocak 2023), <https://theconversation.com/green-hydrogen-why-low-carbon-fuels-are-not-benefiting-from-high-fossil-fuel-prices-195774>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [13] Chugh, Abhinav; Taibi, Emanuele; (2021), "Green hydrogen: why low-carbon fuels are not benefiting from high fossil fuel prices", *World Economic Forum*, (21 Aralık 2021), <https://www.weforum.org/agenda/2021/12/what-is-green-hydrogen-expert-explains-benefits/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [14] Boussidan, Noam; (2023), "Everything you need to know about hydrogen in the clean energy transition", *World Economic Forum*, (12 Ocak 2023), <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/hydrogen-clean-energy-transition-2023/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [15] Cebon, David; Whitmore, Johanne; (2023), "Hydrogen's role in the energy transition to 2050—Three evidenced-based recommendations", *OECD Forum*, (30 Ocak 2023), <https://www.oecd-forum.org/posts/hydrogen-s-role-in-the-energy-transition-to-2050-three-evidenced-based-recommendations>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [16] *Dünya Enerji Konseyi Türkiye*, (2020), "YEŞİL HİDROJEN RAPORU ÖZET", (Kasım 2020), <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2020/11/Yesil-Hidrojen-Raporu.pdf>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [17] *Energy.gov*, (2020), "Could Hydrogen Open New Markets for Nuclear?", (24 Haziran 2020), <https://www.energy.gov/ne/articles/could-hydrogen-open-new-markets-nuclear>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [18] Kahraman, Nafiz; Orhan Akansu, Selahattin; Albayrak, Bilge; "İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanılması", *Mühendis ve Makina*, https://mmo.org.tr/sites/default/files/8ab2f9b45957ab5_ek.pdf. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [19] *İberdrola*, "Green hydrogen: an alternative that reduces emissions and cares for our planet", <https://www.iberdrola.com/sustainability/green-hydrogen>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [20] *International Energy Agency*, (2019), "The Future of Hydrogen", (Haziran 2019), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [21] Blain, Loz; (2023), "Acid coating converts regular electrolyzers to split seawater", *New Atlas*, (2 Şubat 2023), https://newatlas.com/energy/electrolysis-seawater-hydrogen/?itm_source=newatlas&itm_medium=article-body. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [22] Li, Zhen; (2021), "Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining", *Royal Society Chemistry*, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/EE/D1EE00354B#cit3>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)

- [23] Xie, Heping; (2022), "A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation", *Nature*, (30 Kasım 2022), <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05379-5>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [24] RMIT, (2023), "How to make hydrogen straight from seawater – no desalination required", (13 Şubat 2023), <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2023/feb/hydrogen-seawater>
- [25] Blain, Loz; (2023), "'Exceptional' new catalyst cheaply splits hydrogen from seawater", *New Atlas*, (13 Şubat 2023), <https://newatlas.com/energy/rmit-seawater-hydrogen/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [26] AVK Vana, "Daha fazla yeşil enerjisi olan bir geleceğe geçiş", <https://www.avkvana.com.tr/tr-tr/%C4%B0%C3%A7g%C3%B6r%C3%BCler/s%C3%BCrd%C3%BCr%C3%BClebilir-bir-gelecek/daha-fazla-ye%C5%9Fil-enerjisi-olan-bir-gelecek>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [27] Beşergil, Bilsen; "Hidrojen", *Manisa Celal Bayar Üniversitesi*, <http://besergil.cbu.edu.tr/hidrojen.pdf>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [28] *International Renewable Energy Agency*, (2022), "Green Energy For Industry", https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022_.pdf?rev=720f138dbfc44e30a2224b476b6dfb77. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [29] *Acciona*, "GREEN HYDROGEN", https://www.acciona.com/green-hydrogen/?_adin=11551547647. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [30] *International Renewable Energy Agency*, "Hydrogen", <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [31] Şeker, Ata Ufuk; (2023), "AB, yenilenebilir enerji hedeflerini yükseltiyor", *Anadolu Ajansı*, (30 Mart 2023), <https://www.aa.com.tr/tr/dunya/ab-yenilenebilir-enerji-hedeflerini-yukseltiyor/2859172>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [32] *European Commission*, (2023), "Commission sets out rules for renewable hydrogen", (13 Şubat 2023), https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_594. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [33] Zorpette, Glenn; (2022), "2022—The Year the Hydrogen Economy Launched?", *IEEE Spectrum*, (17 Ağustos 2022), <https://spectrum.ieee.org/hydrogen-economy-inflation-reduction-act>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [34] *T.C. Ticaret Bakanlığı*, (2023), "2022—The Year the Hydrogen Economy Launched?", (13 Şubat 2023), <https://ticaret.gov.tr/blog/sektor-haberleri/abd-ab-arasinda-yesil-uzlasmanin-temeli-hidrojen-olarak-one-cikiyor>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [35] *Midas*, "Temiz Hidrojen Pazarı 1 Trilyon Doları Aşabilir! Hangi Hisse Öne Çıkıyor?", (30 Ocak 2023), <https://www.getmidas.com/midasin-kulaklari/temiz-hidrojen-pazarı-1-trilyon-dolari-asabilir-hangi-hisseler-one-cikiyor-p-17553>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [36] *Global Data*, (2023), "Hydrogen market growth to surge in 2023 despite slowing global economy, says GlobalData", (7 Şubat 2023), <https://www.globaldata.com/media/oil-gas/hydrogen-market-growth-surge-2023-despite-slowing-global-economy-says-globaldata/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [37] *International Energy Agency*, (2022), "Global Hydrogen Review 2022", (Eylül 2022), <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a1c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [38] *International Renewable Energy Agency*, "Policies for green hydrogen", <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Policies-for-green-hydrogen>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [39] Fairley, Peter; (2022), "AUSTRALIA GOES ALL-IN ON GREEN HYDROGEN", *IEEE Spectrum*, (25 Aralık 2022), <https://spectrum.ieee.org/green-hydrogen>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [40] Shura, (2021), "Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi", <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2021/12/SHURA-2021-12-Turkiyenin-Yesil-Hidrojen-Uretim-ve-Ihracat-Potansiyelinin.pdf>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [41] Deign, Jason; (2020), "So, What Exactly Is Green Hydrogen?", *Green Tech Media*, (29 Haziran 2020), <https://www.greentechmedia.com/articles/read/green-hydrogen-explained>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [42] Fairley, Peter; (2021), "Cheap renewables could make green hydrogen a practical replacement for fossil fuels", *MIT Technology Review*, (24 Şubat 2021), <https://bit.ly/3GBTQBI>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [43] Hyde, David; (2022), "Could hydrogen-fuelled flights be a reality by 2035?", *World Economic Forum*, (25 Temmuz 2022), <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/how-to-achieve-net-zero-in-aviation>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [44] Müller, Gerd; (2022), "Green Hydrogen: The energy opportunity for decarbonization and developing countries", *Industrial Analytics Platform*, (Kasım 2022), <https://iap.unido.org/articles/green-hydrogen-energy-opportunity-decarbonization-and-developing-countries#fn-2077-0>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [45] Hanlon, Elizabeth; (2023), "Is Hydrogen Our Future?", *Belfer Center*, (24 Ocak 2023), <https://www.belfercenter.org/publication/hydrogen-our-future>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [46] Nevshahir, Noel; (2023), "Why we can't ignore green hydrogen in the clean energy mix", *World Economic Forum*, (16 Mart 2023), <https://www.weforum.org/agenda/2023/03/green-hydrogen-clean-energy-development/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [47] Ouziel, Sylvie; Avelar, Luiz; (2021), "4 technologies that are accelerating the green hydrogen revolution", *World Economic Forum*, (29 Haziran 2021), <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/4-technologies-accelerating-green-hydrogen-revolution/>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- [48] *NTV*, (2022), "Yeşil hidrojen için 73 milyar dolarlık yeni yatırım taahhüdü", (20 Ekim 2022), <https://www.ntv.com.tr/ntvpara/yesil-hidrojen-icin-73-milyar-dolarlik-yeni-yatirim-taahhudu,q1tpDTHv7E2RsuQ8cnQhGA>. (Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)



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

