Hidrojen Ekonomisi: Renkleri ve Uygulamadaki Mevcut Durumu
Hydrogen Economy: Colors and Current Status in Practice

Ph.D. candidate Kübra Aydınlı 0000-0002-6535-3857
Prof. Dr. Seyfi Yıldız 0000-0002-2382-4454

Abstract

Hydrogen is an energy carrier that plays a strategic role in the transition to low-carbon energy systems and is classified with different colors depending on the production methods. It is determined according to the carbon emission levels in the production process and reveals the environmental impact of hydrogen. The hydrogen economy is an economic model where hydrogen is widely used as an energy carrier, aiming to reduce dependence on fossil fuels and transition to sustainable energy systems. This system is based on production, storage, transportation and use of hydrogen in different sectors such as industry, transportation and energy production. It plays a critical role in reducing carbon emissions and accelerating the clean energy transition. In this context, it is seen that the flexibility provided by the hydrogen economy in energy storage and transportation, reducing dependence on oil and natural gas, creating new business opportunities in the fields of renewable energy, engineering and fuel cells and offering cost advantages in the long term, is increasingly gaining importance on a global scale. In this direction, many countries are carrying out various projects and continuing policy development studies in order to use hydrogen energy more effectively and efficiently in the economy. Serious studies are being conducted in Turkey regarding the production, storage and use of hydrogen, and policy recommendations are being made for the development of the hydrogen economy.

In this study, the concepts of hydrogen and hydrogen economy are discussed, hydrogen economy applications around the world are included and the situation in Turkey is analyzed.

1 Giriş

Günümüzde küresel enerji sektörü, iklim değişikliği ile mücadele, enerji güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma çabaları doğrultusunda köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Fosil yakıtların neden olduğu çevresel kirlilik, sera gazı emisyonları ve ekonomik dalgalanmalar, ülkeleri alternatif ve temiz enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişte stratejik bir seçenek olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen yeşil hidrojen, enerji arz güvenliğini sağlarken çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir çözüm sunmaktadır.

Hidrojen, üretim yöntemlerine bağlı olarak gri, mavi, yeşil, turkuaz ve pembe gibi farklı renklerle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, hidrojen üretiminin karbon salımı üzerindeki etkisini belirleyen temel kriterlerden biridir. Özellikle fosil yakıtlara dayalı gri hidrojen yüksek karbon salımına neden olurken, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen yeşil hidrojen sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, hidrojenin enerji sistemlerindeki yerini giderek daha kritik hale getirmektedir.

Hidrojen ekonomisi, hidrojenin üretimi, depolanması, taşınması ve farklı sektörlerde kullanımı üzerine kurulu bir model olup, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi hedeflemektedir. Hidrojen, özellikle sanayi, ulaşım ve enerji sektörlerinde fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahip olup, düşük karbonlu enerji sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak görülmektedir. Bu doğrultuda, ülkeler hidrojen teknolojilerine büyük yatırımlar yapmakta, yeni politikalar geliştirmekte ve hidrojenin ekonomide daha etkin ve verimli kullanımı için çeşitli projeler yürütmektedir.

Türkiye, sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli, jeopolitik konumu ve enerji politikaları doğrultusunda hidrojen ekonomisini geliştirmeye yönelik önemli adımlar atmaktadır. Yeşil hidrojen üretimi, hidrojen depolama teknolojileri ve uluslararası hidrojen ticareti gibi alanlarda yeni projeler geliştirilmekte ve bu alana yönelik yasal düzenlemeler hayata geçirilmektedir. Ancak, hidrojen ekonomisine tam anlamıyla geçiş yapabilmek için altyapı yatırımlarının artırılması, maliyetlerin düşürülmesi ve Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, hidrojen ve hidrojen ekonomisi kavramları ele alınarak, hidrojenin dünya genelinde ve Türkiye'deki durumu incelenmiştir.

2 Hidrojen Enerjisine ve Hidrojen Ekonomisine Kapsamlı Bakış

2.1 Hidrojen Enerjisi Kavramı

Enerji, modern toplumların temel gereksinimlerinden biridir. Sanayi devrimi öncesinde odun, rüzgâr, su ve kas gücü gibi doğal kaynaklar kullanılırken, kömürle çalışan buhar makinelerinin keşfi enerji üretiminde devrim yaratmıştır. Günümüzde enerji üretimi ağırlıklı olarak kömür, petrol, doğalgaz, hidroelektrik ve nükleer santraller

aracılığıyla sağlanmaktadır. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri, yenilenebilir enerjiye olan ilgiyi artırarak sürdürülebilir enerji politikalarını ön plana çıkarmaktadır (Soylu ve Türkay, 2005).

Dünya, karbondioksit emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek amacıyla kapsamlı bir enerji dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümün temel unsurları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, enerji verimliliğinin artırılması, ulaşım ve ısıtma sektörlerinde elektrifikasyonun teşvik edilmesi ve enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi yer almaktadır. Bu stratejiler, sürdürülebilir bir enerji sistemi oluşturmayı ve küresel karbon salınımını azaltmayı hedeflemektedir (Hunt vd., 2023).

Enerji, en basit tanımıyla iş yapabilme yeteneği olarak ifade edilir ve temel olarak potansiyel enerji ve kinetik enerji olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Potansiyel enerji, harekete dönüşebilecek depolanmış enerji türünü ifade ederken, kinetik enerji hareket halindeki nesnelerin sahip olduğu enerjidir. Enerji farklı biçimlerde bulunabilir. Bunlar arasında hareket enerjisi (kinetik enerji), ısı (termal enerji), ışık (ışıma enerjisi), fotosentez sürecinde ortaya çıkan biyolojik enerji, bataryalarda depolanan kimyasal enerji, kapasitörlerde biriken elektrik enerjisi, atom çekirdeğinde saklı nükleer enerji ve kütle çekim alanında depolanan kütle çekim enerjisi yer alır. Bu enerji türleri, doğada ve teknolojik sistemlerde farklı şekillerde kullanılarak günlük yaşamın sürdürülebilirliğini sağlamaktadır (Fanchi, 2005).

Hidrojen, 21. yüzyılın enerji kaynağı olarak değerlendirilen sentetik bir yakıttır. Tarihsel olarak 16. yüzyılda keşfedilen hidrojenin, 18. yüzyılda yanıcı bir gaz olduğu belirlenmiştir. Günümüzde hidrojen, yakıt pilleri ve doğrudan motor yakıtı olarak kullanılabilmektedir. Bu çok yönlü kullanım alanı sayesinde hidrojen, sadece ulaşım sektöründe değil, elektrik üretimi, sanayi, tarım, konut sistemleri ve uzay teknolojileri gibi birçok alanda da önemli bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Fosil yakıtlara kıyasla çevre dostu olması ve yüksek enerji potansiyeli, hidrojeni sürdürülebilir enerji dönüşümünün kritik unsurlarından biri yapmaktadır (Aydın, 2016).

Hidrojen üretimi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. En yaygın üretim yöntemleri arasında fosil yakıtlardan elde edilen termokimyasal süreçler, elektroliz, fotoelektrokimyasal ve fotobiyolojik yöntemler yer almaktadır. Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi; Kömür, doğalgaz ve benzin gibi fosil yakıtlardan termokimyasal işlemlerle hidrojen elde edilmektedir. Ancak, bu yöntem yüksek karbon salınımı nedeniyle çevresel açıdan sürdürülebilir değildir. Elektroliz Yöntemi; Elektrik enerjisi kullanılarak suyun hidrojen ve oksijene ayrılması esasına dayanır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklendiğinde çevre dostu bir yöntemdir. Foto elektrokimyasal Yöntem; Güneş enerjisini kullanarak hidrojen üretimi sağlar. Bu yöntem, elektrolize benzemekle birlikte, elektrik akımı doğrudan suya batırılmış güneş pillerinden elde edildiği için daha verimli bir süreç sunmaktadır. Foto biyolojik Yöntem; Yeşil yosunların doğal fotosentez faaliyetlerinden yararlanarak hidrojen üretimi sağlanır. Bu yöntem biyoteknolojik gelişmelere bağlı olarak gelecekte daha yaygın hale gelebilir. Kimyasal Yöntemler; Çeşitli hibrit bileşiklerden hidrojen üretimi mümkündür. Özellikle sodyum borohidrit gibi bileşikler, hidrojen depolama ve taşımada önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemler arasında en çevreci ve sürdürülebilir olanlar elektroliz, foto elektrokimyasal ve foto biyolojik süreçler olup, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklendiğinde hidrojen üretiminin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır (İder).

Hidrojen ile elektrik arasındaki en önemli fark, hidrojenin yalnızca elektronlardan değil, moleküllerden oluşan bir kimyasal enerji taşıyıcısı olmasıdır. Bu ayrım, hidrojenin bazı durumlarda elektriğe kıyasla avantaj sağlamasının veya tam tersinin nedenlerini açıklamaktadır. Kimyasal enerji, fosil yakıtlarda (petrol, kömür, biyokütle ve doğal gaz) olduğu gibi istikrarlı bir şekilde depolanabilir ve taşınabilir olmasıyla öne çıkmaktadır. Moleküller uzun süre saklanabilir, deniz yoluyla taşınabilir, yüksek sıcaklık üretmek için yakılabilir ve mevcut fosil yakıt altyapısı ile entegre edilebilir. Bu özellikler, hidrojenin enerji sektöründe esnek ve geniş kapsamlı bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, hidrojenin moleküler yapısı, karbon ve azot gibi elementlerle birleşerek endüstride hammadde olarak kullanılan hidrojen bazlı yakıtların üretimine olanak tanımaktadır. Bu yakıtlar, emisyonların azaltılmasına katkıda bulunarak sürdürülebilir enerji dönüşümüne önemli bir destek sunmaktadır. Hidrojenin bu çok yönlü yapısı, uzun vadede fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve temiz enerji çözümleri geliştirmek açısından stratejik bir rol oynamaktadır (IEA, 2019).

Bosell ve Eliasson (2023) hidrojenin, etkili ve çevre dostu bir enerji taşıyıcısı olduğunu vurgulamaktadır. Hidrojen, elektrik ve sudan üretilebilir, ısıya veya güce dönüştürülmesi ise temiz ve pratiktir. Oksijenle yakıldığında su oluşturur ve herhangi bir kirletici madde yaymadan doğaya geri döner. Bu özellikleri, hidrojenin sürdürülebilir enerji sistemlerinde kritik bir rol üstlenmesini sağlamaktadır. Ancak hidrojen, doğada serbest halde bulunmayan bir elementtir. Kimyasal bileşiklerden, suyun elektrolizi yoluyla veya hidrokarbonlar gibi hidrojen taşıyıcılarından kimyasal süreçlerle elde edilmesi gerekmektedir. Elektroliz süreci için gereken elektrik, güneş radyasyonu, rüzgâr enerjisi, suyun kinetik enerjisi ve jeotermal ısı gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanabilir. Bu nedenle hidrojen, yenilenebilir enerji kaynakları ile kimyasal enerji taşıyıcıları arasında stratejik bir köprü oluşturarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahiptir (Bosell ve Eliasson, 2003).

Karbon salınımını azaltma hedefleri, hidrojenin gelecekte enerji üretimi ve ulaşımda önemli bir alternatif olacağını göstermektedir. Bu dönüşüm gerçekleştiğinde, hidrojen temelli sistemler **hidrojen ekonomisi** olarak adlandırılacaktır. İklim değişikliği, hava kirliliği, oksijen azalması, asit yağmurları, fosil yakıt savaşları ve çevresel bozulma gibi küresel sorunlar, hidrojen ekonomisine geçişi zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan elde

edilen hidrojen, temiz ve sürdürülebilir bir enerji çözümü sunarak çevresel ve ekonomik faydalar sağlayacaktır (Ural ve Karaca, 2016).

2.2 Hidrojen Ekonomisi

Hidrojen ekonomisi terimi, ilk kez 1970 yılında General Motors mühendisleri tarafından, hidrojenin ulaşımda yakıt olarak kullanılabileceğini öngören bir bağlamda kullanılmıştır. Bu alandaki uluslararası ilk konferans 1974 yılında düzenlenmiş ve aynı yıl Uluslararası Hidrojen Enerjisi Derneği (IAHE) faaliyetlerine başlamıştır. 1970 öncesinde bilimsel literatürde sınırlı bir yer tutan hidrojen enerjisi, hidrojen ekonomisi ve hidrojen enerji sistemi gibi kavramlar, araştırmaların ilerlemesiyle yaygınlık kazanmış ve enerji sektöründe önemli bir alternatif olarak benimsenmiştir (Aslan ve Özcan, 2008).

Enerji ekonomisi, genel ekonomi içinde enerji üretimi, tüketimi ve dağıtımıyla ilgilenen bir alt disiplin olarak öne çıkmaktadır. Enerji kaynaklarının çeşitlenmesi ve endüstri ile toplumun her alanında yaygın olarak kullanılması, enerjiyi temel ekonomik faaliyetlerden biri haline getirmiştir. Bu bağlamda, enerji ekonomisi kavramı ortaya çıkmış ve giderek daha fazla önem kazanmıştır Artan enerji talebi karşısında fosil yakıt rezervlerinin azalması, insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bu süreçte, hidrojen enerjisi, sürdürülebilir ve temiz bir alternatif olarak öne çıkmış ve 21. yüzyılın enerji kaynağı olarak kabul görmüştür (Tutar ve Eren, 2011).

Hidrojen ekonomisi, yalnızca yakıt türlerinin değiştirilmesini değil, enerji üretimi, depolanması ve iletilmesi için yeni teknolojilerin geliştirilmesini ve yaygınlaştırılmasını içeren kapsamlı bir dönüşüm sürecidir. Geleneksel ve alternatif enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin farklı kullanım alanlarına taşınabilmesi için hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak etkin şekilde kullanılması gerekmektedir. Hidrojen, doğrudan bir enerji kaynağı değil, diğer enerji kaynaklarından üretilerek depolama ve iletim süreçlerinde aracı bir rol üstlenen bir bileşendir. Bu nedenle hidrojen ekonomisinin gelişimi, enerji altyapısında önemli değişiklikleri ve yeni teknolojik çözümleri zorunlu kılmaktadır (Waegel vd., 2006).

Tutar ve Eren (2011)'e göre hidrojen ekonomine geçmek için dört aşama gerekmektedir. Bu dört aşama gerçekleştiği zaman hidrojen enerjisinin son yüzyılın enerjisi olarak değerlendirilmesi açısından son derece önemlidir. Bu dört aşama sırası ile;

I. Teknoloji, Politika ve Pazar Gelişimi; Bu aşamada, laboratuvar çalışmaları ve araştırmalar sonucunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Hidrojenin güvenli kullanımı için uluslararası standartların belirlenmesi, yakıt pilleri ve katı hal depolama sistemlerinde maliyetin düşürülmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, içten yanmalı motorlarda hidrojenin kullanımı konusunda çeşitli araştırmalar yürütülmektedir.

II. Pazar Geçişi; Hidrojen dağıtım sistemlerinin hayata geçirilmesi ve yenilenebilir enerji sistemleriyle entegre edilmesi bu aşamanın temel adımlarıdır. Hafif ve düşük maliyetli hidrojen sistemlerinin ticari olarak uygun hale getirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir.

III. Pazarın ve Altyapının Yaygınlaştırılması; Hidrojen üretiminin artırılması, maliyetlerin düşürülmesi ve pazar payının genişletilmesi hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra, hidrojenle çalışan yakıt pili araçlarının ve otobüslerin sayısının artırılması ve ulusal ölçekte hidrojen altyapısının oluşturulması üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

VI. **Hidrojenin Yaygın Kullanımı;** Son aşamada, hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları ile kullanılarak fosil yakıtların yerine geçmesi amaçlanmaktadır. Yakıt ve elektrik üretiminde hidrojenin etkin şekilde kullanılması için ulusal altyapının tamamlanması hedeflenmektedir.

Bu aşamaların başarıyla uygulanması, Hidrojen enerjisinin geleceğin en önemli sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak görülmekte ve hidrojen ekonomisinin gelişimini hızlandırarak sürdürülebilir ve rekabetçi bir pazar oluşturmasını sağlayacaktır (Tutar ve Eren, 2011: 11).

Hidrojen, farklı enerji kaynaklarından üretilebilen ve çeşitli sektörlerde kullanılabilen çok yönlü bir enerji taşıyıcısıdır. Yenilenebilir enerji, nükleer, doğal gaz, kömür ve petrolden üretilebilen hidrojen, boru hatlarıyla gaz halinde veya LNG gibi sıvı formda taşınabilir. Elektrik üretimi, sanayi, ulaşım ve konut sistemlerinde yaygın olarak kullanılabilen hidrojen, elektrik ve metana dönüştürülebilir. Otomobiller, kamyonlar, gemiler ve uçaklar için yakıt olarak değerlendirilmesi, fosil yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunmasını sağlamaktadır (IEA, 2019: 13).

3 Hidrojen Ekonomisindeki Renklerin Anlamları ve Uygulama Alanları

Hidrojen ekonomisi, ulaşım ve ısıtma sektörlerinin ve enerji depolamasının karbondan arındırılmasına katkıda bulunacak temel bir sürdürülebilir alternatiftir (Hunt vd., 2023).

Hidrojen ekonomisinin renkleri genellikle hidrojen üretimi sırasında yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımına göre şekillenmiştir. Kaynak şekline göre renk alan hidrojenin bu şekilde sınıflandırılması ekonomideki kullanımını daha anlaşılır ve uygulanır kılmaktadır.

Son yıllarda, hidrojen üretim kaynaklarını belirtmek için renk kodları yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Siyah, Gri ve Kahverengi Hidrojen; Sırasıyla kömür, doğal gaz ve linyitten hidrojen üretimini ifade eder. Mavi Hidrojen; Fosil yakıtlardan üretilir ve karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojileri ile emisyonları azaltılır. Yeşil Hidrojen; Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilir. Biyokütle, nükleer enerji veya şebeke elektriğinden üretilen hidrojen için belirlenmiş standart bir renk terminolojisi bulunmamaktadır. Ayrıca, hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etkileri; kullanılan enerji kaynağına, üretim bölgesine ve uygulanan CCUS teknolojilerine bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterebilir. Bu nedenle bazı raporlar, hidrojen türlerini sınıflandırırken renk terminolojisini kullanmamaktadır (IEA, 2019).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023 yılında yayımladığı *Hidrojen Yol Haritası* kapsamında hidrojen ekonomisinde kullanılan üretim yöntemlerini şu şekilde sınıflandırmaktadır:

Yeşil Hidrojen: Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilir.

Mavi Hidrojen: Fosil yakıtlardan elde edilir ancak karbon yakalama sistemleriyle emisyon azaltımı sağlanır.

Turkuaz Hidrojen: Piroliz yöntemiyle üretilir ve karbon salımı içermez.

Pembe Hidrojen: Nükleer enerji kullanılarak üretilir.

Gri Hidrojen: Doğal gazın reformasyonu ile elde edilir ve karbon salımı içerir.

Kahverengi Hidrojen: Kömürün gazlaştırılmasıyla üretilir ve karbon yakalama sistemi bulunmaz.

Bakanlık, düşük karbonlu hidrojen üretiminin enerji dönüşümündeki kritik rolünü vurgulayarak, emisyon azaltımı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yeşil ve mavi hidrojenin teşvik edilmesini önermektedir (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETKB, 2023).

Ekonominin Renkleri	**Özellikleri**
Yeşil Hidrojen	Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilir. Karbon emisyonu oluşturmaz, çevre dostudur Ulaşım, sanayi, enerji üretimi ve ısıtma gibi çeşitli sektörlerde uygulanabilir
Mavi Hidrojen	Doğal gaz veya diğer fosil yakıtlardan elde edilir. Sanayi, enerji üretimi ve ulaşım sektörlerinde kullanılır
Turkuaz Hidrojen	Doğal gazın piroliz yöntemiyle parçalanmasıyla üretilir. Ulaşım, sanayi ve enerji üretiminde kullanılabilir.
Pembe Hidrojen	Nükleer enerji kullanılarak elektroliz yöntemiyle üretilir. Hidrojen bazlı yakıt sistemlerinde kullanılabilir.
Gri Hidrojen	Doğal gazın reformasyonu veya kömür gazlaştırma yöntemiyle üretilir. Kimya sanayisi (amonyak ve metanol üretimi), rafineriler ve enerji santrallerinde kullanılır
Kahverengi Hidrojen	Kömürün gazlaştırılması ile üretilir. Ciddi çevresel zararlar ve hava kirliliği yaratır. Sanayi tesisleri, enerji üretimi ve bazı kimyasal süreçlerde kullanılır.

T*ablo 1.* *Hidrojen Ekonomisin Renkleri* ***Kaynak:*** *Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı'nın yayımladığı yol haritasından yararlanılarak hazırlanılmıştır.*

Hidrojen üretim yöntemleri içinde çevresel etkileri en düşük olan yeşil ve turkuaz hidrojen, sürdürülebilir enerji dönüşümünde ön plana çıkarken, yüksek karbon salımı nedeniyle gri ve kahverengi hidrojenin yerini zamanla düşük karbonlu alternatiflere bırakması beklenmektedir. Üretim süreçlerindeki bu farklılıklar, hidrojen ekonomisinin gelişimini doğrudan etkileyerek gelecekteki enerji politikalarının belirlenmesinde kritik bir rol oynayacaktır (Cordonnier ve Saygın, 2022).

Esasen hidrojen üretimi, suyun elektroliziyle oksijen ve hidrojenin ayrıştırılmasıyla üretilir ve bu süreçte yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik kullanılır. Karbondioksit salınımına neden olmayan bu yöntem, çevre dostu bir alternatif sunar. Fosil yakıtlı araçlar ve konutlarda uzun süredir kullanılan hidrojenin, gelecekte enerji sistemlerinde daha büyük bir rol üstlenmesi beklenmektedir. Karbon emisyonlarını sıfıra indirmek için hidrojen, yalnızca elektrik üretiminde değil, sanayi süreçlerinde ısı kaynağı olarak ve ulaşımda yakıt olarak da değerlendirilecektir. Düşük karbonlu bir enerji çözümü olması nedeniyle, hidrojenin kullanım alanları giderek genişleyecektir (Bossel ve Eliasson, 2003).

Yeşil hidrojen, en çok önem verilen ve bu doğrultuda çeşitli sistemler geliştirilen, yalnızca yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen ve karbon salımı oluşturmayan bir hidrojen türüdür. Rüzgâr, güneş, dalga, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjiyle üretilen yeşil hidrojen, üretim sürecinin hiçbir aşamasında atmosfere karbondioksit salmaz. Bu özelliği sayesinde çevre dostu, sürdürülebilir ve fosil yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır.

Hidrojen üretiminin kaynaklara göre renklere ayrılması, hidrojen ekonomisinin yapılandırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından, fosil yakıtlardan ve nükleer enerjiden farklı

yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu üretim süreçleri, maliyetleri, çevresel etkileri ve kullanım alanları bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Üretim yöntemlerinin belirlenmesi, hidrojenin hangi alanlarda daha verimli ve sürdürülebilir şekilde kullanılabileceğine dair yol haritası oluşturulmasını sağlar. Aynı zamanda, yatırım planlamaları, devlet teşvikleri ve sanayi uygulamaları için stratejik bir çerçeve sunar.

Hidrojen bazlı enerji sistemleri, ulaştırmada yenilenebilir enerji kullanımını artırarak sera gazı emisyonlarını azaltır ve hava kirliliğini düşürür. Enerji sistemlerinde güçlü bir taşıyıcı olarak esneklik sağlar, geleneksel motorların hidrojen yakıt hücreleriyle değiştirilmesi ise gürültü kirliliğini azaltır. Yakıt hücreleri, pil değişimi ve yedek güç sistemlerinde ekonomik hale gelirken, rüzgâr türbinlerine entegre edilen hidrojen elektrolizörleri enerji dalgalanmalarını dengeler. Hidrojen ekonomisinin gelişimi, yeni pazar fırsatları yaratırken istihdamı da artıracaktır (Mirza vd., 2009).

Hidrojen yakıt döngüsünün her aşamasında belirli ölçüde verim kaybı meydana gelir. Üretim, depolama, dağıtım ve yakıt hücresinde kullanımı süreçlerinde, verim kademeli olarak azalır. Örneğin, dört aşamalı bir sistemde her aşamanın verimi %90 olsa bile, toplam verim %60'ın altına inebilir. (Waegel vd., 2006).

Sektör	Kullanımındaki Rolü
Sanayi Sektörü	Karbon salımını önemli ölçüde azaltır. Amonyak ve metanol üretiminin merkezinde yer alır ve diğer birçok küçük ölçekli kimyasalda kullanılır.
Petrol Rafinasyonu	Ham petroldeki kükürt gibi zararlı metanları temizler ve daha ağır ham petrolü yükseltir. Daha küçük hacimlerde ise petrol kumları ve biyoyakıtlar için kullanılır.
Ulaşım Sektörü	İçten yanmalı motorlar ve yakıt hücreleriyle çalışabilmesi nedeniyle fosil yakıtlara kıyasla daha temiz bir enerji kaynağı sunar.
Binalarda Kullanım	Isıtma ve elektrik üretiminde kullanılır. Karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli sunar.
Elektrik Üretimi	Doğrudan enerji santrallerinde yakıt olarak kullanılır ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.

Tablo 2. *Hidrojen Ekonomisinin Kullanım Alanları ve Rolü.* ***Kaynak:*** *IEA, 2019.*

Hidrojen ekonomisi, sanayi, ulaşım, enerji ve ısıtma gibi çeşitli sektörlerde fosil yakıtların yerine geçerek sürdürülebilir enerji dönüşümüne katkı sağlamaktadır. Sanayide çelik üretimi, kimya sanayisi ve rafinerilerde temel bir hammadde olarak kullanılırken, ulaşımda yakıt hücreli araçlar, trenler ve gemiler için temiz bir enerji kaynağı sunmaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerjiyle üretilerek elektrik şebekelerini dengeleme ve enerji depolama gibi stratejik alanlarda da değerlendirilmektedir. Hidrojenin bu geniş kullanım yelpazesi, küresel enerji politikalarının sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir sisteme geçişinde kritik bir rol oynamaktadır (Hunt vd., 2023).

4 Hidrojen Ekonomisinin Dünyadaki Yeri

Hidrojen enerjisinin küresel ölçekte yaygınlaştırılması amacıyla çeşitli uluslararası iş birlikleri oluşturulmuştur. Bu süreçte önemli adımlardan biri, 2018 yılında Japonya'da gerçekleştirilen Hidrojen Enerjisi Bakanlar Toplantısı olmuştur. Bu toplantıda ortaya konan öneriler, hidrojen ekonomisini destekleyen küresel girişimlerin temelini oluşturmuştur. Mayıs 2019'da Vancouver'da düzenlenen CEM H2I (The Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative) başlatılmıştır. CEM H2I, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin ekonominin tüm sektörlerinde ticarileşmesini ve yaygınlaşmasını hızlandırmaya yönelik gönüllü bir hükümetler arası girişimdir. CEM çerçevesinde geliştirilen bu girişim, bağlayıcı olmayan düzenlemeler kapsamında ulusal hükümet bakanlıkları arasında iş birliğini teşvik etmektedir. Bu kuruluş hidrojenin enerji sektöründeki rolünü güçlendirmek için küresel tedarik zincirlerini göz önünde bulundurarak temiz, ekonomik ve güvenilir bir enerji sistemine geçişi desteklemeyi amaçlamaktadır (Clean Energy Ministerial, 2019).

2019 yılında yayımlanan Temiz Enerji Bakanlığı Yeni Hidrojen Girişimi (Clean Energy Ministerial New Hydrogen Initiative (CEM H2I), hidrojenin ekonomideki rolünü güçlendirmek ve yaygınlaştırmak amacıyla çeşitli hedefler belirlemiştir. Girişimin temel amacı, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin gelişimini teşvik eden politikalar, programlar ve projeler için küresel bir iş birliği ortamı yaratmaktır. Yayınlanan raporda, bu hedefler şu şekilde sıralanmıştır:

Politika ve strateji geliştirme: Enerji, ulaşım, iklim ve çevre politikaları çerçevesinde hidrojenin etkin bir rol üstlenmesini sağlamak ve bu doğrultuda politika, program ve proje yaklaşımlarının paylaşımını teşvik etmek.

Karar alma mekanizmalarını bilgilendirme: Ülkeler arası diyaloglarla, ulusal ve yerel yönetimlerde üst düzey karar alıcıları altyapı dağıtımı, politika ve proje uygulamaları konusunda yönlendirmek.

Küresel tedarik zincirlerini güçlendirme: Hidrojenin dağıtımı için uluslararası ve bölgesel ölçekte altyapıyı geliştiren politikalar ve programlar üzerine küresel diyaloğu kolaylaştırmak.

Yeni analitik araçlar geliştirme: Hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin yaygınlaşmasını sağlayacak analitik modellerin oluşturulmasını desteklemek.

Paydaş katılımını artırma: Hidrojen ve yakıt hücresi sektöründe faaliyet gösteren şirketler, altyapı sağlayıcıları ve yenilenebilir yakıt üreticileri gibi paydaşları teknik danışmanlık ve sektörel iş birlikleriyle sürece dahil etmek.

Bu girişim, hidrojen ekonomisinin gelişimi için küresel bir çerçeve sunarak, temiz ve sürdürülebilir enerji dönüşümüne katkıda bulunmayı hedeflemektedir (Clean Energy Ministerial, 2019).

Bu kapsamda, dünya genelinde ve Avrupa Birliği'nde hidrojen ekonomisini geliştirmeye yönelik önemli çalışmalar yürütülmektedir. Hidrojenin enerji sistemlerinde daha geniş çapta kullanılması için ülkeler stratejik planlar oluşturmakta, altyapı yatırımları yapmakta ve uluslararası iş birliklerine katılmaktadır. Hidrojen ekonomisine öncülük eden ve CEM protokolüne üye olan ülkeler, bu alandaki ilerlemeyi hızlandırmak için çeşitli girişimlerde bulunmaktadır.

4.1 Japonya

2017 yılında Dünya'nın ilk ulusal hidrojen stratejisini açıklayarak, hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanımını yaygınlaştırmak için büyük yatırımlar yapmaktadır. Japon hükümeti, hidrojen enerjisini ithal ederek sanayi ve ulaşımda kullanmayı amaçlamaktadır (Ministry of Economy, Trade and Industry [METI]). T.C. Ticaret Bakanlığı Ticaret Araştırmaları ve Risk Değerlendirme Genel Müdürlüğü'nün (TB) yayımladığı haberde Japonya Hükümet, hidrojen üretim süreçlerini sübvanse ederek fiyat farkını doğal gaz ile karşılamayı hedefliyor. 2017'de oluşturulan hidrojen stratejisi, Haziran 2023'te güncellenerek hidrojen tüketim hedefleri artırıldı; 2030 yılında 3 milyon ton; 2040 yılında 12 milyon ton; 2050 yılında 20 milyon ton. Hidrojenin yenilenebilir enerji ile üretildiğinde sera gazı salınımını önleyebilmesi, Japonya'nın karbonsuzlaşma planında kilit rol oynadığını ifade etmiştir (Ticaret Bakanlığı Ticaret Araştırmaları ve Risk Değerlendirme Genel Müdürlüğü).

Japonya ve Rusya, karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla hidrojen, amonyak ve karbon yakalama teknolojileri (CCS ve CCU) üzerine iş birliği yapmayı öngören bir bildiri imzalamıştır. Bu kapsamda, araştırma-geliştirme (Ar-Ge) ve teknoloji paylaşımı konularında ortak çalışmalar yürütülmesi planlanmaktadır. Hidrojen günümüzde petrol rafinerilerinde, amonyak ise gübre ve endüstriyel üretimde kullanılmakta olup, her iki bileşenin de fosil yakıtların yerine geçme potansiyeli bulunmaktadır. Japonya, hidrojenin doğal gaz yerine kullanımı ve kömür santrallerinde amonyak dönüşümü üzerine çalışmalar yapmaktadır. Ülke, hidrojen talebini 2030'da 3 milyon tona, 2050'de ise 20 milyon tona çıkarmayı, amonyak tüketimini ise 2030 itibarıyla yıllık 3 milyon tona ulaştırmayı hedeflemektedir. Bu ortak girişimler, düşük karbonlu enerjiye geçişi hızlandırarak her iki ülkenin sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamaktadır (World Energy Councıl)

4.2 Almanya

Almanya'da, Nürnberg yakınlarında küçük ölçekli bir hidrojen enerji sistemi geliştirilmektedir. Solar-Wasserstoff-Bayern projesi kapsamında, güneş enerjisiyle çalışan hidrojen üretim ve depolama sistemleri kurulmuştur. Almanya ve Suudi Arabistan ise Hysolar Programı ile Riyad yakınlarında güneş enerjili bir hidrojen tesisi inşa etmeyi planlamakta, Suudi Arabistan ise bu sayede yenilenebilir hidrojen ihracatını artırmayı hedeflemektedir. Uluslararası projeler arasında öne çıkan Euro-Quebec programı, Kanada'nın hidroelektrik kaynaklarından üretilen hidrojenin Avrupa'ya taşınması ve kullanımı üzerine çalışmalar yürütmektedir. Suudi Arabistan'ın Almanya ile bu alanda ortaklık kurması, hidrojenin gelecekte önemli bir enerji kaynağı olacağını ve petrol rezervlerinin sınırlı olması nedeniyle alternatif yakıtlara yönelmenin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir (Tutar ve Eren, 2011).

Avrupa'daki en büyük hidrojen projelerinden biri olan Ulusal Hidrojen Stratejisini 2020 yılında hayata geçirerek, sanayi ve ulaşımdaki hidrojen kullanımını artırmayı hedeflemektedir. Alman hükümeti, bu strateji kapsamında 9 milyar Euroluk yatırım yapmayı planlamaktadır. Federal Hükümet, 2030 yılına kadar ulusal hidrojen ve hidrojen türevlerine olan talebin 95 ila 130 TWh seviyesine ulaşmasını öngörmektedir. Bu talebin yaklaşık %50 ila %70'lik kısmının (45 ila 90 TWh) yurt dışından ithal edilmesi beklenmektedir. Ayrıca, 2030 sonrasında ithalat oranının artmaya devam edeceği tahmin edilmektedir. İlk öngörüler, 2045 yılına kadar hidrojen ve türevlerine olan toplam talebin 360 ila 500 TWh seviyesine çıkabileceğini ve bu miktarın yaklaşık 200 TWh'lik kısmının hidrojen türevlerinden oluşacağını göstermektedir. Bu doğrultuda, Almanya'nın hidrojen ithalat stratejisi, ülkenin hidrojen ve türevlerine yönelik ihtiyacını karşılamayı ve tedarik zincirini dayanıklı hale getirmeyi amaçlamaktadır. (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy).

4.3 Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

Hidrojen Atılım Programı, hidrojen teknolojilerini ticarileştirme sürecini hızlandırmayı ve hidrojen altyapısını geliştirmeyi amaçlamaktadır. ABD Enerji Bakanlığı, hidrojen üretimi ve yakıt hücreleri konusunda sanayiye doğrudan destek sağlamak için 1 milyar dolarlık bir yatırım planlamaktadır (U.S. Department of Energy [DOE). Bu program kapsamındaki hedefleri ABD, Haziran 2021'de başlattığı hidrojen girişimi kapsamında, temiz hidrojenin maliyetini on yıl içinde kilogram başına 1 dolara düşürme taahhüdünde bulunmuştur. Hidrojen atılım programı çerçevesinde, temiz hidrojen üretiminin artırılması hedeflenmektedir. Günümüzde neredeyse sıfır seviyesinde olan üretimin:

2030'a kadar 10 milyon tona, 2040'a kadar 20 milyon tona, 2050'ye kadar 50 milyon tona ulaşması öngörülmektedir.

Bu hedeflere ulaşmak için ABD hükümeti, çeşitli yasal düzenlemelerle hidrojen projelerini teşvik etmektedir. Ağustos 2022'de yürürlüğe giren Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) kapsamında, enerji ve iklimle ilgili programlara 369 milyar ABD doları (yaklaşık 51,7 trilyon yen) finansman sağlanmış ve temiz hidrojen projeleri için kilogram başına 3,00 ABD dolarına kadar on yıllık vergi kredisi sunulmuştur.

Buna ek olarak, Kasım 2021'de yürürlüğe giren İki Partili Altyapı Yasası (BIL), temiz hidrojenle ilgili projelere 5 yıl boyunca toplam 9,5 milyar ABD doları (yaklaşık 1,34 trilyon yen) yatırım yapılmasını öngörmektedir.

Bu yasa kapsamında, hidrojen üretim hammaddeleri, nihai kullanım alanları ve bölgesel çeşitliliği kapsayacak şekilde altı ila on bölgesel hidrojen merkezine 7 milyar ABD doları (yaklaşık 980 milyar yen) tahsis edilmesi planlanmaktadır. Bu stratejik yatırımlar, ABD'nin hidrojen ekonomisini güçlendirmeyi, karbon emisyonlarını azaltmayı ve yenilenebilir enerji kullanımını artırmayı amaçlamaktadır (The Ministerial Council on Renewable Energy 2023).

4.4 Avustralya

Hidrojen üretimi ve ihracatı konusunda önemli projeler geliştirerek, özellikle yenilenebilir kaynaklardan üretilen yeşil hidrojen alanında küresel bir lider olmayı amaçlamaktadır. Avustralya Hidrojen Stratejisi kapsamında ülke, 2050 yılına kadar küresel hidrojen ihracat pazarında öncü olmayı hedeflemektedir. Avustralya, 2022 yılında elektrik üretiminin %35,9'unu yenilenebilir kaynaklardan sağlamıştır. Hükümet, 2005'ten bu yana emisyonlarda %43'lük bir azalma gerçekleştirmiş olup, bu hedefleri yasal çerçevede güvence altına almaktadır. Ülkenin uzun vadeli çevresel stratejileri kapsamında;2030 yılına kadar emisyon seviyelerinin önemli ölçüde azaltılması, Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji payının %82'ye çıkarılması, 2050 yılına kadar ekonomi genelinde net sıfır sera gazı emisyonuna ulaşılması hedeflenmektedir. Bu politikalar, Avustralya'nın sürdürülebilir enerji dönüşümünü hızlandırma ve iklim değişikliği ile mücadele etme taahhüdünü yansıtmaktadır (Commonwealth of Australia, 2019).

4.5 Çin

Çin, hidrojen enerjisini geliştirmek amacıyla orta ve uzun vadeli bir strateji benimsemiştir. Ülke, 2025 yılına kadar 50.000 yakıt hücreli araç (FCV) kullanımına ulaşmayı ve 100.000 araç üretmeyi hedeflemektedir (National Development and Reform Commission [NDRC], 2022, p. 5). Ayrıca, yıllık 200.000-ton yenilenebilir hidrojen üretimi ve 1-2 milyon ton CO_2 emisyon azaltımı planlanmaktadır (Ministry of Finance of China, 2020)

Hidrojen enerjisi sektörünü geliştirmek amacıyla orta ve uzun vadeli bir plan oluşturmuştur. 2025 yılına kadar 50.000 yakıt hücreli araç (FCV) kullanımına ulaşmayı ve 100.000 araç üretmeyi hedefleyen ülke, ayrıca yıllık 200.000-ton yenilenebilir hidrojen üretimi ve 1-2 milyon ton CO_2 emisyon azaltımı planlamaktadır. Eylül 2020'de, Çin hükümeti FCV teknolojisini desteklemek için bir sübvansiyon programı başlatmış ve 2025'e kadar yıllık 1,7 milyar Yuan (34 milyar yen) teşvik sağlamayı taahhüt etmiştir. Pekin, hidrojenli araç sayısını 10.000'e, dolum istasyonlarını ise 74'e çıkarmayı planlarken, Jilin Eyaleti yılda 60.000-80.000-ton yeşil hidrojen üretmeyi hedeflemektedir. 2030 yılı itibarıyla, Çin'in hidrojen üretimini 300.000-400.000 tona, amonyak üretimini ise 2 milyon tona çıkarması öngörülmektedir. Bu stratejiler, ülkenin karbon emisyonlarını azaltma ve hidrojen ekonomisini büyütme hedeflerini desteklemektedir The Ministerial Council on Renewable Energy 2023).

Yeşil Dönüşüm Kapsamında Enerji Politikaları ve Yatırımlar kapsamında; Japonya, mevcut yakıtlarla hidrojen arasındaki fiyat farkını dengelemek ve hidrojen tedarik zincirlerini geliştirmek amacıyla 2024 mali yılı için 8,9 milyar yen bütçe ayırmıştır. Almanya, Özel İklim ve Dönüşüm Fonu (KTF) kapsamında, endüstriyel üretimde hidrojen kullanımının artırılmasına yönelik devlet desteği sağlamayı taahhüt etmiştir. Avustralya, "Avustralya'da Üretilen Gelecek" planı çerçevesinde, 2024 yılında temiz enerji teknolojileri üretimini desteklemek amacıyla özellikle güneş enerjisi ve batarya sistemleri için 1,4 milyar Avustralya doları yatırım yapacağını açıklamıştır. Çin hükümeti ise 2024 yılında yerel kamu hizmetleri ve elektrik üretim şirketlerine rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik sübvansiyonlar sağlamayı planlamaktadır. Bu politikalar, küresel ölçekte sürdürülebilir enerji dönüşümünü hızlandırmayı ve karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlayan stratejik adımların bir parçası olarak değerlendirilmektedir (IEA Politikalar Veri Tabanı 2024).

Yeşil dönüşüm kapsamında, ülkeler enerji harcamalarını sürdürülebilir projelere yönlendirerek hidrojen, yenilenebilir enerji ve temiz teknoloji yatırımlarını artırmaktadır. Bu süreç, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji altyapılarının güçlendirilmesi ve düşük karbonlu teknolojilere yönelik teşvik mekanizmalarının oluşturulması gibi çeşitli stratejiler ile yapılmaktadır.

5 Türkiye'de Hidrojen Ekonomisi

Türkiye, sürdürülebilir enerji hedefleri doğrultusunda hidrojen ekonomisini geliştirmek için önemli adımlar atmakta; bu kapsamda hem mevzuat altyapısı oluşturulmakta hem de teknoloji odaklı projeler hayata geçirilmektedir.

5.1 Hidrojen Ekonomisinin Yasal Altyapısı

Hidrojen teknolojisi, Türkiye'de ilk kez 2 Mayıs 2007 tarihli Resmî Gazete 'de yayımlanan 5627 sayılı *"Enerji Verimliliği Kanunu"* ile mevzuata dâhil edilmiştir. Bu kanun ile Enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılması, enerjinin etkin bir şekilde değerlendirilmesini, israfın önlenmesini, ekonomik yük oluşturan enerji maliyetlerinin azaltılmasını ve çevrenin korunmasını amaçlamaktadır. Kapsamı dahilinde Enerji verimliliğini artırma ve destekleme düzenlemeleri, üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda, sanayi, bina, ulaşım, tarım ve hizmet sektörlerini kapsar. Ayrıca, toplumda enerji bilincini geliştirmeyi ve yenilenebilir kaynakların kullanımını teşvik etmeyi hedefler (5627 sayılı kanun, md.1-2.).

Hidrojenin ulaştırma sektöründeki kullanımına yönelik ilk yasal düzenleme, 7 Haziran 2011 tarihli ve 27957 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan "Hidrojen ile Çalışan Motorlu Araçların Tip Onayına İlişkin Yönetmelik" ile yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik, 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu kapsamında motorlu araçların karayolu altyapısına ve trafik güvenliğine uygunluğunu sağlamayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda sağlık ve çevreyi koruma çerçevesinde, hidrojenle çalışan motorlu araçlar ve hidrojen sistemlerinin tip onayı ile montaj süreçlerine ilişkin teknik şartları belirlemektedir. Bu düzenleme, hidrojenin ulaşım sektöründe güvenli ve standartlara uygun şekilde yaygınlaşmasını teşvik etmektedir (27957 Sayılı Yönetmelik).

26 Temmuz 2024 tarihinde, 32613 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan Yeşil Dönüşüm Destek Programı Uygulama Usul ve Esasları Tebliği yürürlüğe girmiştir. Bu tebliğ kapsamında, Türkiye'de döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu, doğal kaynakların korunmasını esas alan ve düşük karbonlu üretimi teşvik eden yatırımları desteklemek amacıyla Yeşil Dönüşüm Destek Programı oluşturulmuştur. Program, iklim ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunarak kaynak verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, başvuru, değerlendirme, izleme, revizyon ve tamamlama süreçlerine ilişkin yöntemleri belirleyerek program yönetimine dair esasları düzenlemektedir. Bu çerçevede, sanayi ve enerji sektörlerinde yeşil dönüşüm odaklı yatırımların desteklenmesi amaçlanmaktadır (32613 sayılı kanun, md.1).

Türkiye Hidrojen Teknolojiler Stratejisi ve Yol Haritasında ifa edildiği üzere; 4 Eylül 2022 tarihli ve 31943 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan "Orta Vadeli Program (2023-2025)" kapsamında, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşması için tüm sektörlerde gerekli adımların atılmaya devam edileceği vurgulanmaktadır. AB'nin kaynak verimli ve rekabetçi yeşil dönüşüm politikalarına uyum sağlamak amacıyla, çeşitli stratejik hedefler belirlenmiştir.

Bu kapsamda:

Yeşil dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi amacıyla tarım, sanayi, ulaştırma ve enerji sektörlerinde yeşil teknoloji Ar-Ge projelerine destek sağlanacaktır. Özellikle yeşil hidrojen ve enerji depolama teknolojileri gibi emisyon azaltımına katkı sunan alanlarda yatırım ekosistemi geliştirilecektir.

Düşük karbonlu büyüme stratejisi oluşturularak, sektörlerin yeşil dönüşüme yönelik ek yatırım gereksinimleri belirlenecek ve rekabet gücünün korunmasını destekleyen mekanizmalar devreye alınacaktır.

İklim finansmanına erişim olanakları özel sektörün ihtiyaçlarına göre geliştirilecek, sera gazı emisyonlarını sınırlayan, katma değeri yüksek ve verimliliği artıran yatırımlara öncelik verilecektir.

Bu politikalar, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda çevresel ve ekonomik dönüşümünü desteklemeyi amaçlamaktadır ((ETKB, 2023: 4)

5.2 Hidrojen Ekonomisinin Geliştirilmesine Yönelik Projeler

Türkiye, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi ve yeşil hidrojen üretimi konusunda son yıllarda önemli projeler hayata geçirmiştir.

Tutar ve Eren (2011)'e göre, Türkiye'de hidrojen tabanlı projeler arasında yenilenebilir enerji kaynaklarıyla hidrojen üretimi, hidrojen depolama teknolojileri ve sanayide hidrojen kullanımı üzerine çalışmalar öne çıkmaktadır. Bu projeler, hidrojenin sürdürülebilir enerji sistemlerine entegrasyonu ve düşük karbonlu enerji dönüşümünü desteklemek amacıyla yürütülmektedir (Tutar ve Eren, 2011). Bunlardan bazıları;

Atatürk Hava Meydanı Otobüs Projesi: TPAO ve TEMSA iş birliğiyle yürütülen bu proje kapsamında, hidrojen yakıtlı otobüslerin havaalanı içinde ve dışında kullanılması planlanmaktadır. TEMSA tarafından üretilen otobüslerin içten yanmalı hidrojen motorlarıyla çalışması öngörülmektedir (Tutar ve Eren, 2011).

Rüzgâr-Hidrojen Projesi: Demirer Holding, BOS, Çukurova Holding ve Unilever iş birliğiyle geliştirilen bu projede, rüzgâr enerjisiyle hidrojen üretimi hedeflenmektedir. Yenilenebilir enerji ile entegre edilen sistem, düşük karbonlu enerji üretimine katkı sağlamayı amaçlamaktadır (Tutar ve Eren, 2011).

Güneş-Hidrojen Projesi: Ekim 2006'da başlatılan bu proje, güneş enerjisiyle hidrojen üretimini hedeflemektedir. Araçların üzerine yerleştirilen güneş panelleri aracılığıyla elektrik üretilmesi ve bu elektriğin hidrojen yakıt hücrelerini doldurmak için kullanılması planlanmaktadır. Özellikle motosiklet gibi küçük ölçekli araçlar için alternatif bir yakıt çözümü sunması amaçlanmaktadır (Tutar ve Eren, 2011).

Türkiye'de Hidrojenle Çalışan Otobüs Projesi: İstanbul'da hidrojen yakıtlı otobüslerin hizmete alınmasını amaçlayan bu proje kapsamında, hidrojenin gece saatlerinde kullanılmayan elektrikle üretilmesi planlanmaktadır.

Yaklaşık üç yıl içinde faaliyete geçirilmesi öngörülen otobüslerden bir kısmı hidrojen yakıt hücreleriyle, bir kısmı ise içten yanmalı hidrojen motorlarıyla donatılacaktır (Tutar ve Eren, 2011).

Türkiye'de gerçekleştirilen hidrojen projeleri, yenilenebilir enerji kullanımını artırarak sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişi desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu projeler, hidrojen üretimi, depolanması ve kullanımı üzerine yapılan araştırmalar ve teknolojik geliştirmeler yoluyla enerji bağımsızlığını güçlendirmeyi ve sanayide yeşil dönüşümü teşvik etmeyi hedeflemektedir.

Hidrojen alanındaki araştırma ve inovasyon çalışmalarını desteklemek amacıyla "Hidrojen Araştırma Merkezi" Yıldız Teknik Üniversitesi bünyesinde kurulmuştur. Bununla birlikte, "Temiz Hidrojen Enerji Teknolojilerinin Geliştirilmesi" adlı proje kapsamında, hidrojen temelli üretim, depolama ve uygulama teknolojilerinin geliştirilerek sürdürülebilir enerji sistemlerine entegrasyonu hedeflenmektedir (Beşer, 2024). Bu proje ile hidrojen üretim, depolama ve kullanım teknolojilerini geliştirerek sürdürülebilir enerji sistemlerine entegre etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, fotokatalitik hidrojen üretimi, metal hidrür ve sıkıştırılmış gaz sistemlerinde hidrojen depolama, yakıt hücrelerinde güç çıkışı ve ömür testleri üzerine çalışmalar yürütülmekte; ayrıca, hidrojenin verimli kullanımına yönelik bütünleşmiş sistem tasarımı ve analizleri gerçekleştirilmektedir (Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrojen Araştırma Merkezi).

Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu (GMKA) ve HYSouth Marmara Hidrojen Vadisi Projesi; bu projenin amacı Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA) tarafından yürütülen projeler, Türkiye'de ilk hidrojen vadisinin oluşturulmasını amaçlamaktadır. HYSouth Marmara Projesi, 36,8 milyon avroluk bütçesi ve 8 milyon avro hibe desteğiyle ülke genelinde bu alandaki en büyük yatırımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Proje kapsamında, Türkiye'nin ilk megavat ölçekli elektrolizörünün kurulması ve yeşil hidrojen üretimine başlanması planlanmaktadır. Bununla birlikte, hidrojen taşımaya uygun boru hatlarının tasarlanması, amonyak ve metanol gibi hidrojen türevlerinin yeşil üretimine yönelik fizibilite çalışmalarının yürütülmesi ve sodyum borhidrür tabanlı yeni bir enerji sisteminin geliştirilmesi hedeflenmektedir (GMKA,2025).

Marmara Hidrojen Vadisi Projesi ile Türkiye'de hidrojen ekonomisinin gelişimine katkı sağlayacak bir dizi yenilikçi uygulamayı içermektedir. Bu kapsamda:

Sanayi Sektöründe Yeşil Hidrojen Üretimi: Türkiye'nin ilk megavat ölçekli elektrolizörünün kurulmasıyla en büyük kapasiteli yeşil hidrojen üretim tesisinin faaliyete geçmesi.

Hidrojen Taşıma Altyapısı: %100 hidrojen taşıyabilen boru hatlarını içeren Türkiye'nin ilk bölgesel hidrojen yol haritasının oluşturulması.

Hidrojen Türevlerinin Üretimi: Amonyak ve metanol gibi hidrojen türevlerinin yeşil üretimine yönelik ilk yatırım fizibilite çalışmalarının yapılmasıyla, bu alanlardaki dışa bağımlılığın azaltılması.

Hidrojen Depolama Teknolojileri: Katı fazda hidrojen depolayabilen sodyum borhidrürün ticari ölçekte ilk kez üretilmesi ve bu tabanlı yeni bir güç sisteminin geliştirilmesi.

Sanayide Hidrojen Kullanımı: Türkiye'de hidrojenle çalışabilen ilk yerli hibrit karo seramik fırınının geliştirilmesi.

Yerli PEM Elektrolizör Üretimi: Türkiye'nin en büyük kapasiteli yerli PEM elektrolizörünün geliştirilmesi ve ilk yerli yeşil hidrojen tesisinin sanayi sektöründe üretime başlaması.

Yenilenebilir Enerji ve Hidrojen Entegrasyonu: Türkiye'nin ilk yenilenebilir enerji parkı olan Bandırma Enerji Üssü'nün hayata geçirilmesi.

Hidrojen Ekosistemi Geliştirme: Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformunun kurulması ve Türkiye'nin en geniş katılımlı hidrojen platformunun oluşturulması.

Eğitim ve Ar-Ge Çalışmaları: Türkiye'nin ilk hidrojen eğitim merkezi olan Yeşil Deniz Endüstrisi Ar-Ge, Test ve Eğitim Merkezi ile Türk sanayisinin ilk %100 yeşil endüstri bölgesi olan Güney Marmara Yeşil Endüstri Bölgesi için fizibilite çalışmalarının tamamlanarak uygulama aşamasına geçilmesi.

Bu projeler, Türkiye'nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecini hızlandırarak enerji sektöründe sürdürülebilir ve yenilikçi çözümlerin uygulanmasına öncülük etmeyi amaçlamaktadır (GMK,2025).

Enerjisa Üretim Bandırma Enerji Üssü Yeşil Hidrojen Üretimi; Enerjisa Üretim, Bandırma'daki tesisinde Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen pilot üretim tesisini kurarak hidrojen ekonomisine yönelik önemli bir adım atmıştır. Temmuz 2022'den itibaren faaliyet gösteren tesis, ticari ölçekte yeşil hidrojen üretimine başlamış ve bu alanda öncü bir model oluşturmuştur. Ayrıca, Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu Güdümlü Projesi kapsamında, Balıkesir'de sodyum borhidrür pilot tesisinin kurulması planlanmaktadır. Bu yatırım ile bor mineralinin hidrojen depolama süreçlerindeki potansiyeli araştırılacak ve hidrojenin enerji sistemlerine entegrasyonuna katkı sağlanacaktır (Enerjisa, 2025).

TÜBİTAK'ın da paydaşları arasında yer aldığı çok ortaklı projeler kapsamında, Türkiye'nin ilk hidrojen vadisi ve en büyük kapasiteli yerli yeşil hidrojen tesisi inşa edilmektedir. Bu projeler, Bandırma Enerji Üssü bünyesinde yürütülmekte olup, yeşil hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanımı için entegre bir enerji ekosistemi oluşturmayı amaçlamaktadır Türkiye'de hidrojen teknolojilerine yönelik çeşitli projeler hayata geçirilmekte olup,

bunlar arasında Güney Marmara Hidrojen Kıyısı (HYSouth Marmara) Projesi, Enerjisa Üretim Bandırma Enerji Üssü Yeşil Hidrojen Üretim Tesisi, Eti Maden Sodyum Borhidrür Tesisi ve Kale Seramik ile Şişecam'ın yeşil hidrojen kullanımına yönelik çalışmaları yer almaktadır. Bu projeler, ekonomik ve teknik fizibilite analizleriyle desteklenmekte olup, yeşil hidrojen üretimi ve kullanımının yaygınlaştırılmasını hedeflemektedir Söz konusu projeler, Türkiye'nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecinde stratejik öneme sahip olup, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin değerlendirilmesi ve sürdürülebilir enerji politikalarının hayata geçirilmesi açısından kritik rol oynamaktadır (TÜBİTAK,2025).

Güney Marmara Kalkınma Ajansı, 8 Kasım 2008 tarihli ve 27048 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan "Kalkınma Ajansları Proje ve Faaliyet Destekleme Yönetmeliği" çerçevesinde, gerçek ve tüzel kişilere mali ve teknik destek sağlamaktadır. Bu destekler, bölgesel kalkınmayı teşvik etmek, ekonomik ve teknolojik gelişimi hızlandırmak amacıyla belirlenen usul ve esaslar doğrultusunda yürütülmektedir. Bu kapsamda yapılan destekler mali ve teknik desteklerdir mali desteklerin içerisinde; doğrudan finansman desteği bunlar, proje destek çağrış, fizibilite desteği ve güdümlü proje yer alır finansman ve faizsiz finansman desteği de yapılan mali destek içerisinde yer alır (GMKA, 2025).

Türkiye'de gerçekleştirilen hidrojen projeleri, yenilenebilir enerji kullanımını artırarak sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişi desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu projeler, hidrojen üretimi, depolanması ve kullanımı üzerine yapılan araştırmalar ve teknolojik geliştirmeler yoluyla enerji bağımsızlığını güçlendirmeyi ve sanayide yeşil dönüşümü teşvik etmeyi hedeflemektedir.

Ülkemizde hidrojen enerjisi ve teknolojilerinin gelişimini engelleyen başlıca faktörler, uzun vadeli strateji ve yatırım eksikliklerinden kaynaklanmaktadır. Kamu ve özel sektöre yönelik uzun vadeli politikaların yetersiz olması, bu alandaki ilerlemenin sürdürülebilirliğini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, hidrojen enerjisi konusunda öngörülerin sınırlı kalması, hidrojenin yeterince tanınmaması ve eğitim altyapısının eksikliği, teknolojik gelişmelerin yaygınlaşmasını geciktirmektedir. Enerji endüstrisinde orta ve uzun vadeli yatırımların yetersizliği ve temiz enerji alanındaki iş fırsatlarının beklentileri karşılamakta gecikmesi, hidrojen ekonomisine geçiş sürecini zorlaştıran temel sorunlar arasında yer almaktadır (Tutar ve Eren, 2011).

Hidrojenin araştırılması, geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması süreçlerinde küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ'ler) aktif katılımı büyük önem taşımaktadır. Hidrojen ekonomisine geçiş, yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda köklü bir paradigma değişikliğidir. Bu nedenle, sürecin sağlam temellere dayandırılması ve iyi planlanmış bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Benzin ve sıkıştırılmış doğalgaz, hidrojen ekonomisine geçişin ara aşamaları olarak değerlendirilirken, bu dönüşümdeki en büyük zorluk küresel ölçekte petrol ve kömüre olan bağımlılığın devam etmesidir. Ayrıca, doğalgaz pazarının genişlemesi ve temiz yanma özelliği nedeniyle birçok tesisin doğalgaz kullanımına yönelmesi, fosil yakıtların enerji sistemlerindeki etkisini sürdürmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, hidrojenin enerji sistemlerine entegrasyonunu hızlandırmak için yatırım teşvikleri, Ar-Ge çalışmaları ve sanayi iş birliklerinin artırılması gerekmektedir (Clark ve Rifkin, 2006).

Türkiye'nin coğrafi konumu ve doğal kaynak potansiyeli, hidrojen üretimi açısından stratejik fırsatlar sunmaktadır. Üç tarafının denizlerle çevrili olması, su kaynaklarının etkin kullanımına olanak tanıyarak hidrojen üretiminde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Hidrojen, temiz, yenilenebilir ve enerjiye dönüştürülebilen bir element olarak, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini destekleyebilecek önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ülkenin petrol ve doğalgaz ihtiyacını dış kaynaklardan yüksek maliyetlerle karşılaması, enerji politikalarında yenilenebilir ve ekonomik çözümlere yönelme gerekliliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, hidrojen teknolojileri, Türkiye'nin sürdürülebilir enerji dönüşümünde kilit bir rol oynayabilecek potansiyele sahiptir ve enerji bağımsızlığına katkı sağlayabilecek önemli bir yenilenebilir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Tutar ve Eren, 2011).

6 Sonuç

Günümüzde temiz enerji dönüşümünün hız kazanmasıyla birlikte hidrojen, fosil yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Düşük karbonlu enerji sistemlerine geçiş sürecinde stratejik bir rol üstlenen hidrojen, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltan, sürdürülebilir enerji sistemlerinin gelişimine katkı sağlayan ve düşük karbon emisyonu ile öne çıkan kritik bir enerji taşıyıcısıdır. Üretim yöntemlerine göre gri, mavi, yeşil, turkuaz ve pembe gibi farklı renk kategorilerine ayrılan hidrojen, özellikle yeşil hidrojen üretiminin yaygınlaştırılmasıyla birlikte çevre dostu bir enerji kaynağı olarak küresel ölçekte giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Sanayi, ulaşım, enerji üretimi ve depolama gibi geniş kullanım alanlarına sahip olan hidrojenin, gelecekte enerji sektöründe kritik bir rol oynaması beklenmektedir.

Hidrojen ekonomisi, fosil yakıtların yerini alabilecek bir alternatif olarak değerlendirilmekte olup, birçok ülke bu alanda çeşitli politikalar geliştirmektedir. Hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanımı üzerine kurulu olan bu ekonomik model, enerji güvenliğini artırırken karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Teknolojik ilerlemeler, altyapı yatırımları ve sürdürülebilir enerji politikaları ile hidrojenin ekonomik ve çevresel avantajları daha belirgin hale gelmekte ve enerji sektöründeki yeri giderek genişlemektedir. Bu kapsamda, hidrojen enerjisinin küresel ölçekte yaygınlaştırılması amacıyla çeşitli uluslararası iş birlikleri geliştirilmiş ve hidrojenin enerji

sistemlerindeki rolünü artırmaya yönelik önemli adımlar atılmıştır. Ülke örnekleri incelendiğinde, hidrojen ekonomisinin sağladığı katma değerin artırılması için üretim süreçleri, teknik altyapı çalışmaları, Ar-Ge faaliyetleri ve uluslararası koordinasyonun büyük önem taşıdığı görülmektedir. Bu doğrultuda, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin yaygınlaştırılması amacıyla analitik modellerin geliştirilmesi ve uygulanmasına yönelik çalışmalar yürütülmektedir.

Türkiye, hidrojen enerjisi alanında enerji arz güvenliği, sürdürülebilir kalkınma ve sanayide yeşil dönüşüm açısından önemli fırsatlara sahiptir. Bu doğrultuda, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesine yönelik yasal düzenlemeler yapılmakta ve teknoloji odaklı projeler hayata geçirilmektedir. Yeşil hidrojen üretimi ve enerji depolama teknolojilerinin yaygınlaşması, Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecinde hidrojenin stratejik bir rol üstlenmesini sağlamaktadır. Ancak, yenilikçi yatırımların yetersizliği ve uzun vadeli politika eksiklikleri, hidrojen ekonomisinin potansiyelinin tam anlamıyla değerlendirilmesini engellemektedir. Buna rağmen, yenilenebilir enerji kaynakları ve stratejik konumu sayesinde Türkiye, hidrojen ekonomisine geçiş sürecinde avantajlı bir konumdadır. HYSouth Marmara Hidrojen Vadisi, Enerjisa Üretim Yeşil Hidrojen Tesisi ve TÜBİTAK destekli projeler, hidrojenin sanayi, ulaşım ve enerji sektörlerindeki kullanımını yaygınlaştırmayı hedeflemektedir. Bu projeler, Türkiye'nin hidrojen enerjisinde bölgesel bir merkez olma potansiyelini artırarak temiz enerji dönüşümüne katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, hidrojen ekonomisine geçiş süreci, enerji arz güvenliğini artırma, karbon emisyonlarını azaltma ve yeni istihdam alanları yaratma açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Türkiye'nin bu dönüşüm sürecinde rekabet gücünü artırabilmesi için politika geliştirme, teknoloji yatırımları ve uluslararası iş birlikleri konularına odaklanarak hidrojen ekonomisini sürdürülebilir bir model haline getirmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, hidrojenin gelecekteki enerji sistemlerinde nasıl bir rol oynayacağı ve Türkiye'nin bu sürece nasıl entegre olacağı üzerine yapılacak çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Kaynakça

- Aslan, Ö. ve Özcan, B. (2008). ''Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi', *Humanities Sciences*, 3(2), 152-160. https://doi.org/10.12739/10.12739. P. 157.
- Aydın, L. (2016). **Enerji Ekonomisi ve Politikaları**. Ankara: Seçkin Yayıncılık. 2.Baskı Şubat.
- Bossel, U., Eliasson, B. (2003). ''Hydrogen Economy,*"Alternative Fuels Data Center (AFDC) Report USA. P.3*
- Clean Energy Ministerial (2019). Clean Energy Ministerial New Hydrogen Initiative Cooperation Framework, *Clean Energy Ministerial Accelaretingtransition To Clean Energy Techonology* https://iea.blob.core.windows.net/assets/1bd7d97f-9d48-4ae7-96f8-d8ed910b9833/CEMHydrogenInitiativeCooperationFrameworkfinal.pdf
- Commonwealth of Australia. (2019). ''National Hydrogen Strategy," *Australian Government*.
- Clark II, WW., Rifkin, J.A., (2006). "Green Hydrogen Economy", *Energy Policy*, p. 2630–2639.
- 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
- Enerjisa, Üretim Bandırma Enerji Üssü Yeşil Hidrojen Üretimi projesi (2025) https://www.enerjisauretim.com.tr/blog/turkiyenin-ilk-hidrojen-vadisi-enerjisa-uretim-bunyesinde-kuruluyor .
- Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA). (2025). https://www.gmka.gov.tr/hidrojen-ekonomisi
- Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA), (2025). Destekleme Türleri https://www.gmka.gov.tr/ajans-destek-turleri
- Hunt, J. D., Montanari, P. M., Hummes, D. N., Taghavi, M., Zakeri, B., Romero, O. J., ... & Wada, Y. (2023). ''Solid air hydrogen liquefaction, the missing link of the hydrogen economy," *international journal of hydrogen energy*, *48*(75), p. 29198-29208.
- İDER, S. Kemal, ''Hidrojen Enerji Sistemi", *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, Sayı 134, İstanbul.
- Mirza, U. K., Ahmad, N., Harijan, K., Majeed, T. (2009). ''A vision for hydrogen economy in Pakistan", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(5), p. 1111-1115.
- Ministry of Finance of China. (2020). *National Hydrogen Energy Development Policy*
- Fanchi, R.J. (2005). "Energy in The 21st Century", *World Scientific Publishing Company*.
- Soylu, A.,Türkay, M. (2005). ''Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Geçiş Sürecinin Planlanmasında Doğrusal En İyileme Tekniğinin Kullanılması," *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, p. 19-21.

- Tutar, F., Eren, M. (2011). ‘’Geleceğin enerjisi: Hidrojen ekonomisi ve Türkiye,” *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (6). P.
- Ticaret Bakanlığı Ticaret Araştırmaları ve Risk Değerlendirme Genel Müdürlüğü (TB) 2024. https://ticaret.gov.tr/blog/sektor-haberleri/japonya-yaz-aylarinda-20-milyar-abd-dolari-tutarindaki-hidrojen-planindan-yararlanilmasi-icin-basvurulari-kabul-etmeye-baslayabilir .
- The Ministerial Council on Renewable Energy (2023). Basic Hydrogen Strategy. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_4.pdf
- Cordonnier, J., Saygın, D. (2022). ‘’Green Hydrogen Opportunities For Emerging And Developing Economies’’, *Organisation for Economic Co-operation and Development* , 4 November 2022.
- Ural, T., Karaca, G. (2016). Hidrojen ekonomisi. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, *3*(2), 145-154.
- Waegel A., Byrne J., Tobin D., Haney B., (2006). “Hydrogen Highways: Lessons on the Energy Technology-Policy Interface”, *Bulletin of Science, Technology & Society, 26(4) p.* 288-298.
- World Energy Councıl (Dünya Enerji Konseyi) https://dunyaenerji.org.tr/japonya-ve-rusya-iklim-degisikligiyle-mucadele-icin-hidrojen-ve-amonyak-konusunda-is-birligi-yapacak/ .
- IEA (International Energy Agency) (2019). "The Future Of Hydrogen: Seizing Today’s Opportunities." *International Energy Agency Report.*
- IEA (International Energy Agency), **Politikalar veri tabanı** https://www.iea.org/policies .
- 5627 sayılı *"Enerji Verimliliği Kanunu* *https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5627&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5*
- 27957 Sayılı Hidrojen ile Çalışan Motorlu Araçların Tip Onayına İlişkin Yönetmelik https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/06/20110607-4.htm .
- 32613 Yeşil Dönüşüm Destek Programı Uygulama Usul ve Esasları Tebliği https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/07/20240726-19.htm
- Yıldız Teknik Üniversitesi, Hidrojen Araştırma Merkezi (2025)https://tet.yildiz.edu.tr/arastirma/arastirma-merkezleri/hidrojen-arastirma-merkezi
- TÜBİTAK (2025), https://tubitak.gov.tr/tr/haber/turkiyenin-ilk-hidrojen-vadisi-ve-turkiyenin-en-buyuk-kapasiteli-ilk-yerli-yesil-hidrojen-tesisi-kuruluyor