



Yeşil Dönüşümde Hidrojen Etkisi: Türkiye’de Son Gelişmelere İlişkin Bir İnceleme

Berna HIZARCI BEŞER*

Özet

Sürdürülebilir bir dünya için iklim değişikliği ile mücadele küresel düzeyde her bir bireyin ve her bir ülkenin çabasına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Gaz endüstrisinin hidrojene dönüştürülmesi ve devletlerin buna destek sağlanmasının da iklim değişikliği ile mücadelede etkili olacağı vurgulanmaktadır. Bu çalışmada yakıt, enerji taşıyıcısı ve hammadde olarak kullanılabilen Hidrojen, daha düşük sera gazı emisyonları ve sürdürülebilir enerji sağladığı için yenilebilir enerji kaynaklarını desteklemesi açısından önemine değinilmiştir. Çalışmanın amacı; Hidrojen ekonomisini tanıtmak, Hidrojenin etkisinin nasıl ve ne gibi avantaj ve dezavantajlarının olduğunu açıklamak ve Türkiye’nin Hidrojen ekonomisi noktasında ne gibi ilerlemeler kaydettiğini, hidrojen enerjisine yönelik potansiyelinin ve neler yapılması gerektiğini vurgulamaktır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, Hidrojen, Sera gazı etkisi

Jel Kodları: H23

Hydrogen Effect in Green Transformation: A Review of Latest Developments in Turkey

Abstract

The need for the efforts of an individual and a country at the global level to combat climate change for a sustainable world is increasing. It is emphasized that converting the gas industry to hydrogen and providing state support for this will also be effective in the fight against climate change. In this study, the importance of Hydrogen, which can be used as fuel, energy carrier and raw material, in terms of supporting renewable energy sources as it provides lower greenhouse gas emissions and sustainable energy, is emphasized. Purpose of the study; To introduce the hydrogen economy, to explain how the effect of Hydrogen has and what advantages and disadvantages it has, and to emphasize what progress Turkey has made in terms of the Hydrogen economy, its potential for hydrogen energy and what needs to be done.

Keywords: Climate change, Hydrogen, Greenhouse gas effect

Jel Codes:H23

* Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İİBF Maliye Bölümü, berna.beser@dpu.edu.tr ve Orcid no: 0000-0002-2957-5030

GİRİŞ

Ekonomik büyüme ve gelişmişlik seviyelerini artırmak için ülkelerin ihtiyaç duydukları temel unsurlardan biri enerjidir. Enerjinin üretimi ve tüketimi ise atmosferde daha fazla sera gazı emisyonu oluşmasına neden olmaktadır. Sera gazları insan faktörü ile oluşabildiği gibi doğada kendiliğinden de oluşabilmektedir. Fakat insan faktörünün her geçen gün artması sera gazı emisyonunun da artmasına neden olmaktadır. Sera gazı emisyonunun kontrolsüz artması küresel ısınma ile iklimlerin değişmesine neden olmaktadır. Bu durum insanlık dâhil tüm canlıların yaşamını tehdit eden bir durum oluşturmaktadır (Kılınçarslan, 2020:5).

Çevrenin küresel kamusal mal olduğunu ilk kez vurgulayan Samuelson (Ulucak, 2018)'dan bugüne ülkelerin iklim değişikliğinin etkileri ve boyutlarını da göz önünde bulundurarak çevreye duyarlı teknolojileri kullanmalarını ve ekosisteme zarar vermeden üretime odaklandıkları görülmektedir.

Karbonsuzlaştırma eğilimine yönelik literatüre bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmenin yansira alternatif olarak hidrojeni karbonsuzlaştırmanın önemli olduğu vurgulanmaktadır. Negatif dışsallık yayan ve ekosistemdeki tüm canlıları etkileyen sera gazı emisyonlarının artışına sebep olan hava kirliliği atmosferde gaz halinde yayılabilmesi sebebiyle toprak kirliliği veya su kirliliğine kıyasla daha fazla sera etkisine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Son zamanlarda hidrojen enerjisi bu sorunların giderilmesinde özellikle ulaşım sektöründe kullanılarak bir alternatif olarak değerlendirilebilir mi sorusu üzerinde durulmuş ve halkın desteğini almak açısından hidrojen konusunda bilinçlendirilmesinin sosyal açıdan önemli olduğu ve alternatif bir kaynak olarak hidrojen enerjisinden faydalanılmasının etkili olacağı görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulum maliyeti yüksek olduğundan hidrojen kullanımı çok yaygın değildir. Günümüzde daha çok fosil yakıtların taşınmasında ve depolanmasında hidrojen kullanılmaktadır. Hidrojen ekonomilerini oluşturulmasında yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir enerji destekli hidrojen kullanarak doğal gazı daha çevre dostu yapan teknolojiler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Henüz başlangıç aşamasında olan Hidrojen ekonomisinin, önümüzdeki günlerde mali ve siyasi iş birliği aracılığıyla verilen taahhütler ışığında gelişme potansiyelinin fazla olduğu görülmektedir. Ancak sosyal değerlendirmelerin eksik olduğu bu alanda mühendislik ile birlikte çevresel dışsallık açısından yapılacak çalışmalara olan ihtiyaç önemli bir eksiklik olarak değerlendirilmelidir. Halkın hidrojeni bir sistem olarak algılamasını ve kabul etmesini değerlendiren ulusal çalışmalarda eksiklik bulunmaktadır (Mutlubaş ve Özdemir, 2023:26). Hidrojen enerji sistemi ile ortaya çıkacak beklentiler oldukça fazladır. Bunlar; sera etkisi, kirlilik ve asit yağmurları problemlerini çözmesi, temiz ve devamlı bir enerji sistemini yerleştirmesi, istihdam sağlaması, petrol ithalatını azaltması, yeni bir enerji teknolojisi için ihracat potansiyeli oluşturması, ticaret açığını azaltarak ve çevreyi koruyarak ekonomiye destek olacağı şeklindedir (Şahin, 2006:123). Bu doğrultuda sürdürülebilir, kaynak-etkin ve yeşil bir ekonomiye geçişi destekleyecek dönüşüme doğru yönelim büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda ekonomik, rekabete açık ve çevre dostu olarak hidrojen; ulaşım sektöründe yakıt olarak kullanılarak kirliliğin azaltılmasında büyük bir adım olarak öne çıkmaktadır.

Sürdürülebilir hidrojen üretimine geçilmesinde neler yapılması gerektiğini ve Ayrıca Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) 14.01.2024 tarihinde Türkiye'nin Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı doğrultusunda Hidrojen Teknolojisinin Ulusal Enerji Hedefleriyle uyumlu biçimde geliştirilmesi için tedbirlere yer verilmiştir. Diğer taraftan Hidrojenin yeri ve öneminden enerji sektöründe giderek artan şekilde ilgi görmesinden ulaşım sektörüne olası katkılardan bahsedilmektedir.

Küresel ısınma potansiyeli yüksek olan sera gazlarının olumsuz etkilerinden hidrojen ile özellikle ulaşım sektöründe sıfır emisyon ile gelecekte kullanılabilirliği tartışılmaktadır. Bunun nedeni ise yakıt olarak hidrojenin düşük karbon salması ve çevre dostu bir enerji üretim yöntemi olarak öne çıkmasıdır.

1. İklim Değişikliği ve Hidrojen

Avrupa Komisyonu'nun enerji danışmanı Tudor Constantinescu;

“AB'nin iklim hedeflerine ulaşmak için gaz endüstrisinin hidrojene ve diğer düşük karbonlu gazlara dönüşümünü hızlandırması gerektiği”

Hidrojen Teknolojileri Derneği¹ Başkanı Dinçer,

“Özel sektörün büyük projeleri yürütebilmesi için devletin hidrojen projelerine destek vermesi, koordine etmesi ve yenilenebilir kaynaklara yapıldığı gibi teşvik sağlaması gerekiyor”

...ifadeleriyle iklim değişikliği ile mücadelede önemli platformlarda hidrojenin ve hidrojen projelerine devletlerin teşvik sağlanması gerektiği vurgusu yapılmaktadır. İklim değişikliğinin önemli sebeplerinden birisi de enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların sera gazı salınımına sebebiyet vermesidir. Sera gazı emisyonuna neden olan zararlı gazlar için çözüm bulunması tüm ülkelerin ortak sorunudur. Çünkü çevresel dışsallıklar sonucu iklim değişikliği, üzerinde sıklıkla durulan doğal kaynak sorununa da yol açmaktadır.

Kyoto protokolü ile emisyonları kontrol altında tutulması gereken özellikle 6 gazın olduğunu öne çıkarılmaktadır. Bu gazlar; karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O) ve soğutma amaçlı kullanılan F gazları olarak bilinen (HFCs, PFCs, SF₆)'dir.

Hidrojen 1500'lü yıllarda bulunmuş olup 1700'lü yıllarda ise yanıcı olduğu ve de evrende bolca bulunan basit bir element olarak bilinmektedir. Evrenin temel enerji kaynağı olarak gösterilen Hidrojen; Güneş'te dahil bütün yıldızların termonükleer tepkimeyle vermiş olduğu ısının da yakıtıdır. Bu enerji çeşitli yöntemlerle ısı ve elektriksel enerji formuna dönüştürülebilmektedir (Oğlu ve Kızı, 2022:139). Hidrojen gazı; kömürden benzin elde etmede, ev içerisinde fırın ve ocak gibi cihazlara bağlamada, hava gemisi ve sıcak hava balonu şişirme, paslanmaz çelik üretimi ve diğer metallerin üretiminde, reaktör soğutma gibi durumlarda kullanılmaktadır. Sıvı haldeki hidrojen, havacılık, uzay ve gaz sanayii, elektrikli ve hibrit araçlar ve petrol rafineri tesislerinde petrolün doygunluk oranını artırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Metal hidrit alaşımı şeklinde hidrojen katı formda saklanabilmektedir. Bu şekilde kullanım alanları, ısıtma ve soğutma sistemleri, beyaz eşyaların üretimi, elektrikli otomobillerin sistemleri ve şarj edilebilir pil üretimi gerçekleştirilebilmektedir².

¹ Not: detaylı bilgi için bkz. <https://www.hidrojenteknolojileri.org/blog/hidrojen-enerjisi-sektoru-devletten-destek-bekliyor/>

² Not: detaylı bilgi için bkz. Hidrojen enerjisinin geçmişi bu günü ve yeşil geleceği, <https://www.enerjisauretim.com.tr/blog/hidrojen-enerjisinin-gecmisi-bugunu-ve-yesil-gelecegi#:~:text=Ulusal%20hidrojen%20stratejisinin%20göre%2C%20Türkiye,yenilenebilir%20enerji%20ekonomisine%20değer%20kazandırıyoruz.> (Erişim tarihi: 10.12.2023).

Şekil 2: Hidrojen'in Üç Ana İşlevi

	Yakıt
Hidrojen	Enerji Taşıyıcısı
	Ham madde

Kaynak: Veziroğlu, 2021:405.

Yakıt olarak hidrojen, düşük karbon salınımı nedeniyle çevre dostu bir enerji üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük işletme maliyeti ve sıfır emisyon bulunmaktadır. Dezavantajlı noktalar ise yüksek üretim maliyeti, hidrojen gazının depolanması ve taşınması sırasında oluşabilecek güvenlik sorunlarıdır (Mutlubaş ve Özdemir, 2023:24). Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi, genellikle parçalama, gazlaştırma ve katalitik reformasyon işlemlerine dayanan geleneksel ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Şu ana kadar dünyadaki hidrojenin yaklaşık %96'sı bu teknolojiden üretilmektedir. İşlemden genellikle hammadde olarak petrol, kömür ve doğal gaz kullanılmaktadır. Bu fosil yakıtlar kolaylıkla temin edilebilir ancak yenilenemezler ve bunların yanması ile karbondioksit, nitrojen oksitler, kükürt oksitler vb. gibi ağır kirlilik üretir (Xu vd., 2022:33677-33698). Doğal gaz küresel olarak toplam enerji talebinin üçte birini oluşturan ve en yüksek karbon emisyonu üreten fosil yakıttır. Hidrojen bilinenin aksine benzin ve doğal gaz gibi yanıcı yakıtlara kıyasla tehlikeli olması açısından farklı değildir. Hidrojen içinde aynı önlemler alınmalı standartlar geliştirilerek güvenli bir şekilde kullanılabilir. Bu doğrultuda devletin üstlenmesi gereken düzenleyici rol ve fonksiyonları gereği özellikle iş güvenliğine, çalışma güvenliğine ve kullanım güvenliğine yönelik yasaların ve düzenlemelerin hazırlanması gerekmektedir (Sorgulu ve ark. 2023).

Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, diğer proseslerde üretilen enerjiyi taşır. Hava ile etkileşime girdikten sonra ürün olarak azot (N_2), H_2O ve O_2 oluşur. Petrol ve türevlerinin kullanıldığı yanmalı motorların oluşturduğu azot oksit emisyonları, hidrojen motorlarında çok daha azdır. Okyanuslarda bulunan rüzgâr çiftlikleri ürettiği elektrik ve gelgit hareketleriyle okyanus altında bulunan santraller üretilen elektrik Hidrojen ile güvenilir olarak taşınabilir. Yine açık denizlerde elde edilen elektriğin depolanması da elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen sayesinde olabilmektedir (Mutlubaş ve Özdemir, 2023:25).

Doğal gaza hidrojen karıştırılmasının önemli avantajları bulunmaktadır³. Bunlar; Isıtmada ve elektrik üretiminde doğal gaz kullanılması sayesinde milyonlarca metreküp hidrojenin depolanabilme imkânı ortaya çıkacaktır. Doğal gaz iletim hatlarının hidrojen depolamaya yetecek kadar uzun olması sayesinde basınçlı tüplere, sıvılaştırmaya ya da metal hidritlere ihtiyaç duymadan üretilen hidrojenin doğrudan depolanabilmesine olanak sağlayacak olması, karbondioksit gazının salınımının azaltılmasına büyük bir katkı sağlanacak olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli bir şekilde depolanabilecek olması ve özellikle fosil yakıt kullanımı ve ithalatına olan bağımlılığı azaltacak olması ekonomik açıdan ve çevre kirliliğini önlemede etkin olacağı görülmektedir (Sorgulu ve ark. 2023).

³ Detaylı bilgi için bkz. Sorgulu, F., Merve Öztürk, Nader Javani, ve İbrahim Dinçer (2023), "Türkiye'de Hidrojen ve doğal gaz karışımı ile ilgili öncü çalışmalar" <https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/323/turkiye-de-hidrojen-ve-dogal-gaz-karisimi-ile-ilgili-ocnu-calismalar-32953.html> (Erişim Tarihi:10.01.2024).

Doğada çok bulunmasına rağmen saf halde olmayan Hidrojen çeşitli yöntemler ile ayrıştırılır. Hidrojen doğal bir yakıt değildir, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen⁴ bilinen yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip alternatif bir kaynak olarak da bilinmektedir. Petrol türevlerine kıyasla ortalama yüzde 33 daha verimli bir yakıttır ve çevreye zararlı herhangi bir kimyasal madde salınımı gerçekleştirilmemektedir.

Tablo 1: Hidrojen Üretiminde Kullanılan Yöntemler



Kaynak: Oğlu ve Kızı, 2022:139.

Hidrojen, biyolojik ve kimyasal olarak iki farklı biçimde üretilir. Kimyasal yöntemler maliyetli olduğu için çok tercih edilmemektedir. Biyolojik yöntemler ise maliyeti düşük ve en önemlisi sürdürülebilir çevre dostu yöntemlerdir. Biyolojik işlemlerden (mikrobiyal yollarla) elde edilen H₂'ye biyohidrojen denmektedir (Özdemir ve Mutlubaş, 2019:17). Biyokütle enerjisinden hidrojen üretimi iki şekilde gerçekleşmektedir. Birincisi termokimyasal yöntem ikincisi ise biyolojik süreçlerdir. Termokimyasal prosesler süperkritik su, geleneksel gazifikasyon ve piroliz yöntemidir. Biyolojik proses ise direkt biyofotoliz, dolaylı biyofotoliz, fotofermantasyon, biyolojik yoldansuyun gaza dönüşümü ve karanlık fermentasyon yöntemidir (Özdemir ve Mutlubaş, 2019:18).

⁴ Not: detaylı bilgi için bkz. <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/hidrojen-enerjisi-sektoru-devletten-destek-bekliyor/1681454> (Erişim tarihi:10.11.2023).

23. Dünya Hidrojen Enerji Konferansı 5-9 Temmuz 2020 tarihinde İstanbul da yapılmıştır.

Tablo 2: Hidrojen Üretiminde Kullanılan Bazı Biyokütle Türleri

Biyokütle Türleri	Temel Dönüşüm Prosesleri
Fındık kabuğu	Buhar gazlaştırma
Zeytin küspesi	Piroliz
Çay atığı	Piroliz
Saman atıkları	Piroliz
Şehirselle katı atıklar	Süperkritik su ekstraksiyonu
Tahıl atıkları	Süperkritik sıvı ekstraksiyonu
Pulp ve kağıt atığı	Mikrobiyal fermantasyon
Petrol Esaslı plastik atığı	Süperkritik sıvı ekstraksiyonu
Gübre çamuru	Mikrobiyal fermantasyon

Kaynak: Önal ve Yarbay, 2010:92.

Biyokütle gazlaştırma yöntemi, organik atıkların yakılması sırasında hidrojen gazı üretilir ve atık yönetimi sorunlarına çözüm olabilecektir (Mutlubaş ve Özdemir, 2023:22). Doğal gaza hacimsel olarak %20'ye kadar hidrojen ilavesi ile fosil yakıt kullanımı ve ithalat bağımlılığının azalmasına ve ekonomiye olumlu katkılar sağlayacaktır (HTD, 2021:37). Hidrojen ekonomisinin gelişimi ve kurulmasını hızlandırmada tek geçiş yakıtı olarak doğal gaz gösterilmektedir (Clark ve Rifkin, 2006:2634).

Hidrojen yenilenebilir kaynaklardan suyun elektroliz yöntemiyle elde edilirse yeşil hidrojen; fosil kökenli yakıtların kullanımıyla karbondioksit tutma sistemleriyle buhar metan reformeri (SMR) ile karbon yakalama ve depolama yoluyla elde edilen hidrojene mavi hidrojen; fosil kökenli yakıtlar kullanılarak karbondioksit salınımı olmadan metan gazının piroliz yoluyla parçalanmasıyla elde edilen hidrojene turkuaz hidrojen; nükleer kaynakların kullanımı ile suyun hidrolizi yöntemiyle üretilen hidrojene pembe hidrojen; doğal gazın yeniden yapılandırılması sonucu buhar metan reformeri (SMR) tekniği ile doğal gaz veya diğer fosil yakıtlar kullanılarak elde edilen hidrojene gri hidrojen ve son olarak termokimyasal dönüşüm teknolojilerinden gazlaştırma yöntemiyle linyit kömüründen üretilen hidrojene kahverengi hidrojen adı verilir⁵.

2. Hidrojenin Avantajları ve Dezavantajları

Sadece su buharı emisyonu vermesi nedeniyle büyük avantaja sahip olması özellikle taşıtlarda Hidrojenin kullanımını cazip kılmaktadır. Günümüzde fosil yakıtların gerek emisyonları gerekse rezervlerin ihtiyacı karşılayamayacağı gelecekte ihtiyaca cevap veremeyeceğini düşündürmektedir. Ayrıca Hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilerek depolanabilir ve daha sonra enerji üretiminde kullanılabilir. Hidrojen yakıtlı araçlar, benzinli ve dizel araçlara alternatif olarak kullanılabilir ve sıfır emisyonlu taşımacılık için bir seçenek olarak hidrojen yakıtlı araçlar gösterilmektedir (Mutlubaş ve Özdemir, 2023). Hidrojenin dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Oğlu ve Kızı, 2022:141-142);

- Doğada son derece bol olmasına karşın enerji üretiminde kullanılan hidrojen gazının son derece saf olması gerekmektedir. Saflaştırma işlemi maliyeti artırmaktadır.

⁵ detaylı bilgi için bkz.

https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf

- Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kaplamaktadır. Bu nedenle hidrojeni sıvı halde depolamak gereklidir. Bunun için de yüksek basınç ve soğutma işlemine gerek vardır.
- Yakıt hücresi ile çalışan araçlar yakıt takviyesi yapmak istedikleri zaman Petrol istasyonlarında yakıt malzemesi bulmak bir sorun olabilir. Belli bir ekonomik maliyet ve zaman gerektirir.
- Petrol ile çalışan motorlar içten yanmalı motorlardır. Bu motorların yakıt hücresi ile çalışmalarında çeşitli zorluklar vardır. Dolayısıyla yakıt hücresi ile uyumlu çalışacak motorların geliştirilmesi gerekmektedir.

Çevre dostu önlemler ile birlikte Hidrojen yakıt hücresi ile çalışan araçlar kirletici benzinle çalışan araçlara alternatif olarak gösterilmektedir. Karbon bazlı malzemeler kullanılarak hidrojen depolanması avantajlı bir hale gelebilir. Düşük maliyet, yüksek yüzey alanları, yüksek kimyasal kararlılık, ucuz yenilenebilir kaynaklardan üretilme olasılığı ve metal hidritlere göre düşük ağırlık olarak özetlenebilir (Altınsoy, 2024).

Hidrojenin avantajlı olmasının sebepleri ise şöyle sıralanabilir (Veziroğlu, 2021:406-407);

- Yakıt hücreli araçlar tamamen emisjonsuzdur.
- Yakıt hücrelerinin hareketli parçaları yoktur.
- Hidrojen yenilenebilirdir ve bol miktarda bulunur.
- Yakıt hücreli araçlar soğuk havayla uyumludur.
- Yakıt hücreleri kompakt ve hafiftir-aşırı hacimli veya ağır değildir.
- Yakıt hücreli araçlar çok yüksek menzillere sahip olacak ve
- Tanklar hızlıca doldurulacaktır.
- Hidrojen güvenlidir, titizlikle test edilmektedir ve birçok araçta kullanılmaktadır.

Ekonomik bağımsızlık için hidrojenin bir an önce yakıt olarak kullanımı sağlanması ve gerek üretim, dağıtım ve gerekse depolama sistemlerinin de geliştirilmesi gerekmektedir. Devletin yatırımlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak kullanımı hakkında gelecek nesiller ve onları eğiten eğitimcilerin bilgilendirilmesine olan ihtiyaç sosyal açıdan saha çalışmalarına hız kazandırılmasını adeta zorunlu kılmaktadır. Hidrojen teknolojilerine yönelik sempozyumlar, bildiriler, televizyon programları ve eğitimler ile toplumun her kesimi bilgilendirilmelidir. Toplumsal bilinirliğin sağlanması için tanıtımlara ihtiyaç bulunmaktadır.

3. Hidrojen Ekonomisine Yönelik Bazı Çalışmalar

Çagalitan ve Abundo, 2021 yaptıkları çalışmalarında hidrojen ekonomisini uygulanabilir bir duruma dönüştürmek için daha yoğun araştırma gerektiren alanların olduğunu ve temiz hidrojen için alternatif bir kaynak olarak biyohidrojenin potansiyelinin üzerinde durulması gerektiğini belirtmişlerdir. Sürdürülebilir olması için H₂'nin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi gerektiğini, geleneksel H₂ üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında biyohidrojen, daha çevre dostu ve daha az enerji yoğun bir alternatif sunduğunu vurgulamışlardır.

Biyokütlerdeki karbon fosil enerjiden değil, atmosferdeki bitkilerin yakaladığı karbondioksitten gelir. Biyohidrojen üretimi sürecinde üretilen karbondioksit, karbon elementlerinin geri dönüşümü ve nötr karbon emisyon sürecidir. Bu nedenle, geleneksel hidrojen üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında biyohidrojen üretimi esasen karbon nötrdür (Xu vd., 2022:33677-33698).

Gübre üretiminde girdilerden amonyak için de hidrojene ihtiyaç bulunmaktadır. Yeşil hidrojen üretimi ile doğalgaza bağımlılık gübre sektöründe de etkili olacağı görülmektedir. Yeşil hidrojen üretiminde birim fiyat düşürüldüğünde amonyak üretimi de çevreyi koruyan bir şekilde sağlanabilecektir (Kılıç, 2023:101).

Dinçer vd., 2021 yılında yaptıkları çalışmada Türkiye’de üretilen hidrojenin 2030 yılına kadar doğal gaz tercih edilen tüm alanlarda doğal gaza hacimsel olarak %20 hidrojen karıştırılması hedeflendiğini vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmalarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre ise CO₂ emisyonlarının %18,5 azalması, NO_x ve SO₂ emisyonlarının da %17,5 ve %16,6 oranında azalması öngörülmektedir. Bu önemli çevresel kazanım, hidrojenin karbonuz olması, kükürt ve azot gibi bileşenleri yapısında ihtiva etmemesinin sonucu olarak değerlendirmişlerdir.

Literatürdeki mevcut çalışmalar ve gerçekleştirilen deneyler sonucunda doğal gaza hacimsel olarak %20’ye kadar hidrojen ilavesinin boru hattının ve yakıcı cihazların güvenilirliği üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir (HTD, 2021:17).

Bir diğer çalışmada ise Türkiye’nin dip sularında bulunan hidrojen sülfür⁶ (H₂S)’ün yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenerek kullanılması gerektiği özellikle artan enerji talebinin karşılanmasında önemle durulması gereken bir nokta olarak gösterilmektedir. 21. yüzyılın enerji taşıyıcısı olmak gibi büyük bir önem yüklenen Hidrojen enerjisinden beklentilerin son yıllarda giderek arttığı görülmektedir (Öztürk vd., 2009:3).

4.Türkiye’nin Hidrojen Ekonomisi Gelişim Süreci

Hidrojen ekonomisi terimi ilk olarak General Motor’un mühendisleri tarafından 1970 yılında tüm ulaşım türleri için hidrojeni yakıt olarak öngören bir şekilde kullanılmıştır. Hidrojen enerjisi ve hidrojen ekonomisine ilişkin ilk uluslararası konferans ise 1974 yılında gerçekleştirilmiştir. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Derneği (IAHE) aynı yıl faaliyete geçmiştir. 1970 yılından önce neredeyse bilinmeyen “hidrojen enerjisi” “hidrojen ekonomisi” ve “hidrojen enerji sistemi” kelimeleri yapılan çalışmaların sonucu olarak günümüzde iyi bilinmekte ve geniş bir kitle tarafından kabul edilmektedir (Aslan ve Özcan, 2008:157). Türkiye’de Hidrojen teknolojisi, 2 Mayıs 2007 tarihli Resmî Gazete ’de yayımlanan “Enerji Verimliliği Kanunu” ile mevzuata girmiştir. 7 Haziran 2011 tarihli ve 27957 sayılı Resmî Gazete’de13 yayımlanan “Hidrojen ile Çalışan Motorlu Araçların Tip Onayına İlişkin Yönetmelik” ile hidrojenin ulaştırma sektöründe kullanımına yönelik ilk yasal düzenleme belirlenmiştir.

Hidrojen Araştırma Merkezi” Yıldız Teknik Üniversitesinde araştırma, inovasyon ve ticarileşme öncelikli çalışmaları sürdürmek için kurulmuştur. Aynı kapsamda “Temiz Hidrojen Enerji Teknolojilerinin Geliştirilmesi” adlı proje kapsamında sürdürülebilir enerji sistemlerine entegre edilebilecek hidrojen temelli üretim, depolama ve uygulama teknolojilerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

⁶Not: detaylı bilgi için bkz. Öztürk vd. (2009). Hidrojen Enerjisi ve Türkiye’deki Hidrojen Potansiyeli https://www.emo.org.tr/ekler/51c5ffd6b62cc21_ek.pdf

Karadeniz dip sularından hidrojen sülfür’ün %100 ayrıştırılması sonucu 268,823x106 ton hidrojen elde edilmesinin mümkün olduğu belirtilmektedir. Bir evin yıllık enerji ihtiyacı yaklaşık 3600 kWh olduğu kabul edilirse Karadeniz bölgesinde yaklaşık 10 milyon ailenin yaşadığı varsayılırsa bu kitlenin yıllık enerji ihtiyacı toplamı 3,6x1010 kWh olacaktır. Bu enerji ihtiyacının tamamının sadece Karadeniz dip sularından elde edilecek hidrojen yakıtından elde edilirse takribi 180 yıllık enerji ihtiyacının karşılanacağı öngörülmektedir.

Ocak 2023 tarihinde ETKB tarafından yayımlanan “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası ve Stratejisi” Raporu yayınlanmıştır. Türkiye’de “Güney Marmara Hidrojen Kıyısı” Vadi Projesi atılan en önemli adımlardan biri olarak gösterilmektedir⁷. Ufuk Avrupa Çerçeve Programı kapsamında hak kazanılan 8 milyon Euro hibe desteğinin de etkisiyle Vadiye ve Bölgenin Hidrojen ekonomisine yerli ve yeni bir katkı sağlanacağı beklenmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü koordinasyonunda çalışan Güney Marmara Kalkınma Ajansı tarafından hibe desteği sağlanan ve Eti Maden ile Enerjisa Üretim’ in eş finansman sağladığı “Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu” GÜDÜMLÜ Projesi’nin sözleşmesi de 2023 yılında mart ayında imzalanmıştır (ENERJİSA, 2023).

5.Türkiye’nin Hidrojen Teknolojisi 2024 Hedefleri ve Hidrojen Enerjisinden Beklentiler

Eylem Planı Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 14.01.2024 tarihinde paylaştığı Türkiye’nin, 2053 net sıfır emisyon hedefi kapsamında 2024-2030 yılları arasında enerji verimliliği alanında atacağı adımları ve hedefleri içeren Türkiye’nin Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı belgesi bu dönemde 7 ana, 61 de alt başlık içermektedir.

Türkiye’nin Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı Enerji Sektörü ana başlığında E9-Hidrojen⁸ Teknolojisinin Ulusal Enerji Hedefleriyle Uyumlu Biçimde Geliştirilmesi İçin Tedbirler Alınması alt başlığında yer alan yürütülecek faaliyetler şunlardır;

- *Mevcut mevzuat gözden geçirilerek “hidrojen üretim, taşıma, depolama ve kullanım” için uygun hâle getirilecektir.*
- *Yenilenebilir enerjiden elde edilen hidrojen ve amonyak gibi hidrojen türevlerinin kullanım imkanları araştırılacaktır.*
- *Karbon salımının azaltılması zor olan sektörler (kimya, demir-çelik, ulaşım, cam, seramik vb.) öncelikli olmak üzere ilgili tüm sektörlerde yeşil hidrojenin kullanımının yaygınlaştırılması teşvik edilecektir.*
- *Çimento ve demir-çelik gibi yüksek sıcaklık gerektirdiği için doğrudan elektrifikasyon kullanılamayan sektörlerde dolaylı elektrifikasyonu sağlayacak PtX (Power to X) potansiyeli araştırılacaktır.*
- *Hidrojen ekonomisi için gerekli faktörler (gerekli alan, su kaynakları, elektrik iletim altyapısı, elde edilecek ürünlerin ulaşım imkanları, çevresel etkisi vb.) bir arada değerlendirilecek ve kurulması planlanan tesislerin önceden planlanmış bölgelere yönlendirilmesi sağlanacaktır.*
- *Hidrojen üretimi tesisi kuracak yatırımcılara, bu tesislerin elektrik ihtiyacının karşılanmasıyla sınırlı olacak şekilde yenilenebilir santral kurmak istemeleri halinde şebekeye bağlanmada öncelik tanınacaktır.*
- *Hidrojen ve alternatif yakıtlarla çalışabilecek güç sistemlerinin geliştirilmesine ve hidrojen tedarik zincirinin optimizasyonuna yönelik projeler desteklenecektir.*
- *Yerli teknolojilerin (elektrolizör, yakıt hücresi vb.) geliştirilerek üretilmesi için teşvikler geliştirilecektir.*

⁷ Detaylı bilgi için bkz. <https://www.enerjisauretim.com.tr/blog/hidrojen-enerjisinin-gecmisi-bugunu-ve-yesil-gelecegi>

⁸https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular//TürkiyeninEnerjiVerimliliği2030StratejisiVeIIUlusalEnerjiVerimliliğiEylemPlanı_202401161407.pdf

Planlama kapsamına alınan hedeflerin gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Hidrojen teknolojileri stratejisi ve yol haritasını belirleyen Türkiye bölgesel hidrojen ekonomisine geçişinde önünü açmaktadır. Planda açıklanan verilere göre; bu yatırımlar aracılığıyla Türkiye'nin enerji tüketiminde 24,6 MTEP tasarruf sağlanmış ve emisyonları da 68,62 milyon ton CO₂ eşd. miktarı daha az gerçekleşmiştir. Türkiye'nin GSYİH başına tüketilen enerji miktarının 2030 yılında 2023 yılına göre %15 oranında azaltılması ve birincil enerji tüketiminin de %16 oranında azaltılarak 37,1 MTEP düzeyinde enerji tasarrufu sağlanması ile birlikte sera gazı emisyonlarının da 100 milyon ton CO₂ eşdeğeri düzeyde düşürülmesinin öngörüldüğü planda 2017-2023 yılları arasında kapsayan I. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ile belirlenen adımlar sayesinde 2017-2023 yılları arasında gerçekleşen yatırım miktarı 8,47 milyar ABD Doları olarak gerçekleştiği ve 44.880 yeni istihdamın sağlanması önemli gelişmeler olarak yerini almaktadır. 2030 yılına kadar 20,2 milyar dolarlık enerji verimliliği yatırımı yapılması planlanırken bu sayede 2040 yılına kadar 46 milyar dolar tasarruf sağlanacağı da öngörülmektedir.

Türkiye'de tamamen yenilenebilir enerji kullanılarak hidrojen üretimi gerçekleştirilebilecek potansiyel mevcut olduğu ileri sürülmektedir. Hidrojen ekonomisinde sıfır bağımlılıkla üretimin gerçekleşeceği ve elde edilen bulgulara göre enerji arz ve güvenliği açısından da çok önemli bir avantaja sahip olan Türkiye'nin 2030 yılına kadar hidrojene geçiş sürecinin başarıyla gerçekleşmesi durumunda yaklaşık olarak 250 milyar TL'lik bir gelir hedefi bulunmaktadır. Hidrojen ekonomisinin sağlanması beklenen önemli bir avantajı da yaklaşık 170.000 istihdam olup, enerji sektöründe yeni bir çalışma alanı oluşturulması da önemli ekonomik beklentilerin yıllar içinde oluştuğunu göstermektedir (Dinçer vd. 2021). Türkiye'de ayrıca doğal gazla hidrojen karıştırma projesi ile yüzde 95 doğal gazla yüzde 5 Hidrojen karıştırılarak araştırmalar⁹ deneme testleri yapılmaktadır.

2022 yılı Shura Enerji Dönüşüm Merkezi'nin, Bilkent Enerji Politikaları Araştırma Merkezi ve Alman Enerji Ajansı (dena) iş birliğiyle hazırladığı "Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açısından Değerlendirilmesi" Raporuna göre; Türkiye'nin 2050'de yıllık 3.4 milyon ton yeşil hidrojen üretme potansiyeli olduğuna, yıllık 1.5-1.9 milyon ton hidrojen ihracatı potansiyelinin var olduğuna vurgu yapılmıştır. Tekno ekonomik değerlendirmeye göre 3.4 milyon ton yeşil hidrojen üretimi için 2050'ye kadar toplam 85 ile 119 milyar dolar arası yatırım gerektiği belirtilmekte ve 2050'de yeşil hidrojenin Türkiye ekonomisine katkısının yıllık 6-8 milyar dolar arasında gerçekleşeceği beklenmektedir (Ekonomist, 2023:54).

Yerli kömür rezervi ve karbon yakalama teknolojileri yardımıyla hidrojen üretimi ve bor madeni rezervleriyle Hidrojen depolama teknolojilerinde ilerleme sağlanabileceği vurgulanmaktadır. Hidrojenin temiz olarak üretilebilmesi için yatırımların artırılması etkili olacaktır (Kılıç, 2023). Türkiye'nin bor rezervi bakımından dünyanın %74 lük kısmına sahip olması ülke ekonomisine katkı sağlamak açısından önemlidir. Hidrojenin depolanmasında sodyum bor hidrür üretiminin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Altınsoy, 2024).

⁹ Not: detaylı bilgi için bkznz. <https://www.hidrojenteknolojileri.org/blog/ulkemiz-hidrojen-kullanarak-dogal-gazi-daha-cevre-dostu-yapan-teknoloji-ile-bulusuyor/>

SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yirmi yıllık süreçte küresel ısınmadan kaynaklı buzulların erimesi ve deniz seviyesinin yükselmesi, çölleşme yaşanması, toprakların verimsizleşmesi, kıtlık oluşması sorunları ön plandadır. Bir taraftan da kıtlık nedeniyle güvenlik ve sağlık sorunlarının oluşması, ozon tabakasında bozulmalar yaşanması, büyük seller, su baskınları ve tufanların ortaya çıkması muhtemel dışsallıklardandır. Antarktika’da büyük hacimli buzulların dahi erimesi, ozon tabakasında bozulmaların yaşanması nedeniyle ivedilikle çözüm getirilmeye çalışılmaktadır (Sağlam, 2008: 40-41).

21. yüzyılın enerji-ekonomi-ekoloji uyumu açısından hidrojen çağı olacağı vurgusu sıklıkla yapılırken (Aslan ve Özcan, 2008:157). Özellikle doğal kaynaklardan elde edilen yeşil ve yenilenebilir enerjinin sıfır emisyon nedeniyle çevre kirliliğinin azalmasına katkı sunacağı beklenmektedir. Atık yönetimine katkı sunan Hidrojen kullanımının ekonomiye de olumlu etkisinin olacağı beklenmektedir.

Küresel bir güç unsuru olan enerji ihtiyacı artarken hızla tükenen fosil yakıtlar ve iklim değişikliğinin yıkıcı etkileri ile daha temiz ve sürdürülebilir çevre için yenilenebilir enerji arayışlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Önümüzdeki son 30 yılda çevresel negatif dışsallıklar, önemli reformların ve uluslararası düzeydeki kararların alınmasını gerektirerek tüm ülkelerin birlikte hareket etmelerini adeta zorunlu kılmaktadır. Karbondioksit ve metan gibi sera gazları, atmosferdeki dengeyi önemli ölçüde etkileyerek çeşitli sektörleri etkilemektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir tarım uygulamaları, enerji sektöründeki yeşil teknolojiler ve çevresel etkileri azaltmaya yönelik inovasyonlar, gelecek nesiller için daha sağlıklı bir çevre bırakma amacını taşımaktadır.

Özellikle net sıfır emisyona ulaşmadaki önemli araçlardan biri olarak bilinen Hidrojen alternatif yakıt kaynağı olarak da gereksinimleri karşılanması beklenmektedir. Hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanımı; küresel iklim değişikliği, enerji verimliliği ve hava kalitesinin de iyileştireceği beklentisi ile olumlu karşılanmaktadır.

Sınırdaki karbon düzenlemeleri, yeşil ve döngüsel bir ekonomi, yeşil finansman, temiz, ekonomik ve güvenli enerji, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir akıllı ulaşım, iklim değişikliği ile mücadele, diplomasi ve Avrupa yeşil mutabakatı bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri kapsamında her alanda reformlar yapılmaktadır. Küresel iklim değişikliği konusu global bir sorun olup iş birliğine girilerek ancak sorunlar çözülebilecektir. Küresel kamusal olan bu sorunun giderilmesi ve temiz bir çevre ihtiyacının önemine halkın daha fazla duyarlı olması ve toplumun desteğinin alınması da sağlanmalıdır. Devletin düzenleyici ve denetleyici rolü ve fonksiyonu kapsamında Ar-ge faaliyetleri artırılmalı, önemli çalışmalar yapılmalı, gerekli mevzuat düzenlemeleri ve teşvik politikaları (Clark ve Rifkin, 2006:2632) ile maddi destek sağlanarak geleceğin yakıtı olarak görülen Hidrojenin üretimine yönelik yeni teknolojilerin önü açılmalıdır. Hidrojen ekonomisine geçiş de hidrojen teknolojisi ve altyapı uygulamalarına karşı toplumun olumlu tavır geliştirilmesine ve bu konuda üniversite sanayi iş birliğine olanak tanınmalıdır. Tüm canlıların yaşanabilir bir dünya sorumluluğunu üstlenmeleri ve bunun gereklerini yerine getirmeleri adeta zorunludur.

Türkiye’de hidrojenin üretimi, depolanması, taşınması ve son kullanımı için kapsamlı planlar geliştirilmeli ve planı gerçekleştirmek için gerekli bütçesinde ayrılması gerekmektedir. Hidrojen planı, hidrojen yatırımları için uygulanabilir olan mevcut planları desteklemelidir. Bu anlamda devletlerin düzenleyici ve denetleyici rolüne ihtiyaç başta

gelmektedir. Başarılı bir Hidrojen ekonomisine geçiş sırasında gerekli aktörlerin bilgilendirmesi ve asimetrik bilgiyi gidermek gerekmektedir. Küresel düzeyde alınan bu önlemler, çevresel sorunlara karşı daha dirençli ve sürdürülebilir bir dünya yaratma yolunda önemli bir adım olarak görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Akın, G. (2006). Küresel ısınma, nedenleri ve sonuçları, *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, Cilt 46, Sayı 2, 29-43.
- Altınsoy, Y. (2024). Hidrojen Depolama ve Taşıma, https://www.researchgate.net/profile/Yelda-Altinsoy/publication/377268487_HIDROJEN_DEPOLAMA_VE_TASIMA/links/659e0dd33c472d2e8ec1e550/HIDROJEN-DEPOLAMA-VE-TASIMA.pdf (Erişim Tarihi: 14.3.2024)
- Aslan, Ö. ve Özcan, B. (2008). Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi. *Humanities Sciences*, 3(2), 152-160. <https://doi.org/10.12739/10.12739>.
- Aslan, Ö. 2008, Hidrojen ekonomisine doğru, İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, yıl:6, sayı:11, Bahar 2007/2, s.283-298.
- Clark, Woodrow W. II ve Rifkin, Jeremy (2006); “A green hydrogen economy”, *Energy Policy*, Vol. 34, Issue 17, s. 2630-2639.
- Dincer, I., Eroğlu, I. ve Öztürk, M. (2021). Türkiye için Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası. Hidrojen Teknolojileri Derneği Yayınları. ISBN: 978-605-66381-9-0.
- ENERJİSA (2023), <https://www.enerjisauretim.com.tr/blog/hidrojen-enerjisinin-gecmisi-bugunu-ve-yesil-gelecegi>
- HDT, Hidrojen Teknolojileri Derneği, (2021). Türkiye’de yeşil hidrojenin üretilip doğal gazla karıştırılması çalışmaları raporu. ISBN: 978-605-70717-2-9. https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Yesil_Hidrojenin_Uretilip_Dogal_Gaz_a_Karistirilmesi_Calismalari.pdf
- IEA, Uluslararası Enerji Ajansı (2023). https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/11/SHURA-2023-10-shurastat37_TR-1.pdf
- IPCC, Climate Change (2021). Retrieved from: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf
- Kılıç, F. (2023). Alternatif bir kaynak olarak Türkiye’de hidrojen enerjisi, Karabük Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Karabük.
- Kılınçarslan, T. B. (2020). İşletmelerin sosyal sorumlulukları bağlamında sera gazı beyanlarının raporlanması ve güvence denetimi: Türkiye’deki farkındalığın araştırılması. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. Bursa
- Mutlubaş, H. ve Z. Ö. Özdemir (2023), Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi, *Yekarum*, 8(1), 20-31.
- Önal E. ve Yarbay R.Z. (2010). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18, 77–96.

- Oğlu, . F. A., ve Kizi, A. . S. F. (2022). Hidrojen Gazının Üretim Yöntemleri ve Enerji Kaynağı Olarak Avantaj ve Dezavantajları. *Endless light in science*, (İюль 2022), 138-142.
- Özdemir, Z.Ö. ve Mutlubaş, H. (2019). Enerji taşıyıcısı olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri, Bartın Üniversitesi International Journal of Natural and Applied Sciences, 2(1):16-34.
- Öztürk, N., Bilgi, M. ve Arslan, C. (2009). Hidrojen Enerjisi ve Türkiye’deki Hidrojen Potansiyeli, https://www.emo.org.tr/ekler/51c5ffd6b62cc21_ek.pdf
- Ramsey, C. M., vd. (2003). Ligand dependence of magnetic dimensionality in chromium (IV) complexes: Layered vs three-dimensional antiferromagnets. *Chemistry of Materials*, 15(1), 92-99.
- Sağlam, N. E., Düzgüneş, E. ve Balık, İ. (2008). Küresel ısınma ve iklim değişikliği. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 25(1), 89-94.
- Sorgulu, F., Öztürk, M., Javani N. ve Dinçer, İ. (2023), “Türkiye’de Hidrojen ve doğal gaz karışımı ile ilgili öncü çalışmalar” https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/323/turkiye-de-hidrojen-ve-dogal-gaz-karisimi-ile-ilgili-ocnu-calismalar_32953.html (Erişim Tarihi: 10.01.2024).
- Steiner, M., Wiegel, U. & Dizdar, A. (2009). Katı atık yönetimi: Atık yönetiminin temellerine yönelik rehber kitap. İstanbul: Eflatun.
- Şahin, S., (2006). Nükleer Hidrojen Üretimi, in: III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi Bildiri Kitabı, ss.123-128.
- 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
- Tiwari, S., Singh, C. & Singh, J. S. (2020). Wetlands: A major natural source responsible for methane emission. In *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards A Sustainable Environment*. Springer, Singapore.
- Türkeş, M. (2000). Hava, iklim, şiddetli hava olayları ve küresel ısınma. İstanbul: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü.
- Veziroğlu, A. (2021), Hidrojen Neden Potansiyel Bir Ulaşım Yakıtı Olarak Seçilmelidir? Niđde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1):404-411.
- Xu, X., Zhou, Q., & Yu, D. (2022). The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(79), 33677-33698.