

Ekolojik Uygarlığın Enerjisi: Hidrojen



SALİH ERTANElektrik Mühendisi

ODTÜ mezunu elektrik mühendisi. Biyokütleden Enerji ve Biyoyakıt üretilmesi konularında faaliyet gösteriyor. Enerji ve çevre konularında muhtelif çalışmaları bulunuyor. Güncel etkinlik konuları arasında, “Ara Ziraat” / ” Tarla Ormancılığı”, Karbon Yutakları, “Negatif Karbon Salımı” uygulaması olarak “Enerji Çiftliklerinin” kurulması da yer alıyor. Geçmişte, araştırmacı olarak, Türkiye’yi çevreleyen denizlerde yürütülen çok sayıda projede görev aldı. Denizlerdeki hidrokarbon kaynaklarının araştırılması, deniz altı doğalgaz boru hatlarının muayene çalışmaları, özellikle Karadeniz’de yürütülen sığ ve derin sismik çalışmaları ile Ege ve Akdeniz’de BM-UNEP adına yürütülen MEDPOL (Akdeniz’de Kirlilik Ölçümü ve Kontrolü Projesi), yer aldığı ve katkıda bulunduğu projeler arasındadır. İçme suyu şebekelerinde muhtelif hasarlardan kaynaklı fiziksel kayıpların, uzaktan ve hasarsız muayene yöntemleriyle saptanması konusunda çalıştı. Yurt içi ve dışında birçok STK çatısı altında faaliyet yürüten enerji çalışma gruplarında çalışmalar yürüttü. Enerji Sanayicileri ve İş Adamları Derneğinin kurucuları arasında yer aldı. Yer aldığı STK’lar bünyesindeki çalışmaları halen devam etmektedir.

E-posta: salih.ertan@gmail.com

Geliş Tarihi: 14.12.2021

Kabul Tarihi: 05.05.2022

Atf: Ertan, S. (2022). Ekolojik uygarlığın enerjisi: hidrojen. *Kuşak ve Yol Girişimi Dergisi (BRIQ)*, 3(3), 54-71.



ÖZ

Küresel Isınmaya bağlı İklim Değişikliği olgusunun başlıca nedeninin, geleneksel fosil yakıtlarına dayalı enerji üretimi olduğu, genel kabul gören bir yaklaşımdır. Bu çerçevede, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına (YEK) dayalı strateji ve enerji politikalarının ivedilikle oluşturulması ve olası en kısa zaman zarfında hayata geçirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Dünyamızdaki yaşamın varoluşsal bir tehdit altında bulunduğu günümüzde, temiz ve tükenmeyen nitelikteki YEK'e geçiş sayesinde, eşğinde bulunduğumuz "Altıncı Büyük Çöküşün" önü alınabileceği değerlendirilmektedir. YEK türleri arasında yer alan Hidrojen ve Hidrojen Enerjisinin giderek öne çıkmakta olduğu gözlenmektedir. Hidrojen, taşınabilir ve depolanabilir olmak gibi ayırt edici avantajlarının yanı sıra fosil kökenli yakıtların yerine geçme potansiyeline de sahip bulunmaktadır. Kritik soru şudur: YEK geleneksel fosil yakıtlarının yerini tamamen alabilir mi? Hidrojen Enerjisinin toplam enerji üretim kapasitesi içerisinde önemli bir paya sahip olacağı YEK türleri, sadece fosil yakıtları ile sınırlı olmaksızın nükleer enerjinin de yerini alabilecek, büyük bir potansiyel taşımaktadırlar. Bu çalışmada, Ekolojik Uygarlık olarak da adlandırabileceğimiz "Yeni Dünya Düzeni"nin, "hidrojen-karbon" teknolojileri ile karakterize edileceği yönündeki görüş incelenmekte ve tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dc grid, hidrojen enerjisi, hidrojen sülfür, hidrojen yakıt hücresi, karbon-hidrojen çağı

GELENEKSEL FOSİL YAKITLARINDAN (GFY: kömür-petrol-doğalgaz) Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına (YEK) geçişin zorunlu olduğu konusunun, bütün dünya kamuoyu ve ilgili karar vericilerin, her geçen gün artan, liste başı bir gündem maddesi olduğu görülmektedir.

Söz konusu geçişin bir tercih olmayıp, İklim Değişikliği olgusunun yol açacağı toplu ekolojik yıkım kaygısının doğurduğu itkidenden kaynaklandığı bilinmektedir. Günümüz uygarlığı esas itibarıyla, kömür-petrol-doğalgaz uygarlığıdır. Başlangıcı yaklaşık 250 yıl geriye uzanan Birinci Sanayi Devriminden bu yana, özellikle enerji üretimi ve dünyanın doğal kaynaklarını kullanma tarzından, daha genel ifadesiyle, sürgit olan mevcut yaşam tarzından kaynaklı olarak yerküre biteviye ısınmaktadır.

Küresel Isınmanın neden olduğu İklim Değişikliği olgusunun, geçen 250 yıl zarfında, insanoğlu için varoluşsal bir tehdide dönüşerek, yerküre üzerindeki

bütün ekosistemi "Altıncı Büyük Çöküşün" eşğine getirmiş bulunduğu değerlendirilmektedir (Robinson, 2021).

Bu bağlamda, günümüzün apaçık ve yakıcı gerçeği, bir gram dahi kömür ve petrol, bir metre küp daha doğalgazın enerji üretim amacıyla bundan böyle kullanılmaması gerektiridir. YEK, işte bu noktada mutlak bir zorunluluk haline gelmiş bulunmaktadır.

Öteden beri YEK konusundaki tartışmaların odağında yer alan bir soru bulunmaktadır: YEK, günümüzde ve gelecekte GFY'nin yerini bütünüyle alabilir mi?

Bu çalışmamızda ele alınan konularda bu sorunun yanıtı aranmaktadır: YEK'in, sadece GFY ile sınırlı olmaksızın, Nükleer Enerjinin de yerini alabilecek potansiyele sahip olduğu söylenebilir. YEK yelpazesi / türleri içerisinde yer alan Hidrojen Enerjisinin öne çıkmasıyla YEK, gezegenimiz üzerindeki yaşamı toplu yok oluş tehdidinden esirgeyecek kapasite ve potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir

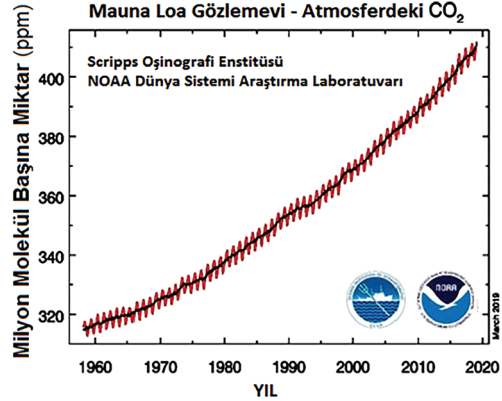
YEK türleri ana karakteristikleri bakımından iki gruba ayrılmaktadır. Şöyle ki: rüzgâr, güneş (PV), yoğunlaştırılmış güneş (CSP), dalga (gel-git dahil) kesikli karaktere sahip türler olarak sınıflanırken; jeotermal, biyokütle ve hidrojen esaslı enerji üretim yöntemleri “baz yük” karakterine sahip YEK türleri olarak ayrılmaktadır. Bunlar arasında, sadece biyokütle ve hidrojen, taşınabilir ve depolanabilir olma özelliğine ve avantajına sahip bulunmaktadır.

Hidrojen ve biyokütle kaynaklı enerji üretim sistemlerinin yılda 7.500-8.000 saat devrede olabilmesine karşın, rüzgâr ve güneş enerji kaynaklı sistemlerin yıl içerisinde emre amade olabildikleri sürenin 2-3 bin saat süre zarfında ve üstelik kestirilemez zaman dilimlerinde olduğuna işaret edilmektedir. Diğer taraftan, “birincil” olarak tanımlanan GFY ve diğer YEK türlerinden farklı olarak, hidrojenin enerji üretiminde kullanılmak üzere öncelikle diğer kaynaklardan üretilmesi gerektiği ve bu anlamda “birincil” bir enerji kaynağı olmadığı da belirtilmelidir. Hidrojen, literatürde bir “enerji taşıyıcısı” olarak tanımlanmaktadır (European Environment Agency, 2022).

İklim Değişikliği ve YEK’e Geçişin Zorunluluğu

Birinci Sanayi Devriminden bu yana, genel olarak yaşam tarzı, özel olarak da doğal kaynakların sınırsızcasına tüketilmesinden kaynaklı olarak, günümüzde, yerküre üzerindeki ekosistemin topluca çöküşün eşiğine taşınmış olduğu söylenebilir. Bu sonuca yol açan etmenlerin başında GFY’nin enerji üretiminde kullanılması yer almaktadır. GFY kaynaklı enerji üretimi, Küresel Isınma olgusunun insanlığı eliyle gerçekleşen başlıca nedeni olarak, günümüzde varoluşsal bir sorunsala dönüşen İklim Değişikliğine yol açmış bulunmaktadır. Söz konusu zorunluluğun

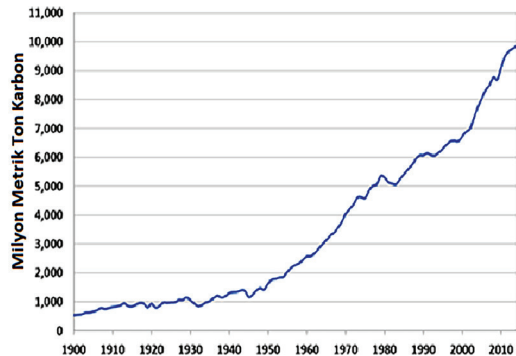
Şekil 1a- Atmosferdeki Karbondioksit



Kaynak: NOAA Global Monitoring Laboratory, 2022.

arka planında yer alan gerekçelere ilişkin bulgu ve göstergelere yer vermek, konunun bütünlüğü bakımından yararlı olacaktır. Aşağıda yer alan NOAA kaynaklı grafiklerde, Hawaii Adalarındaki Mauna Loa gözlemevinde, 1950’li yıllarda başlatılan CO₂ konsantrasyonu ölçümlerinde elde edilen sonuçlar ile (Şekil 1a ve Şekil 1b) daha geniş bir zaman aralığında, 1. Sanayi Devriminin başlangıcı sayılabilecek 1750 yılından günümüze kadar uzanan zaman dilimi boyunca, CO₂ konsantrasyonunda gözlenen sürekli artışın yanı sıra, atmosfere salınan CO₂ miktarları da (Şekil 2) gösterilmektedir.

Şekil 1b- Atmosferdeki Karbondioksit



Kaynak: NOAA Global Monitoring Laboratory, 2022.

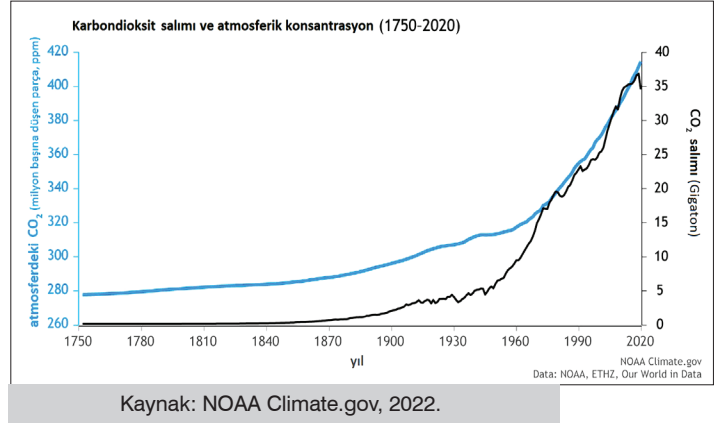
Yapılan ölçüm ve bir hesaplama göre, güncel olarak atmosferde mevcut CO₂ gazı, yaklaşık olarak toplamda 3,2 trilyon tondur. Endüstri öncesi dönemde 280 ppm olan CO₂ konsantrasyonunun günümüzde 420 ppm'e ulaştığı göz önüne alındığında, anılan miktarın üçte birine karşılık olan yaklaşık 1,1 trilyon CO₂ gazının son 250 yılda salındığı sonucu çıkarılabilir (Lindsey, 2020). Ancak, değişik varsayımlara dayalı hesaplamalarda tam bir uyum olmadığını da vurgulamak gerekir.

Şekil 4'te ise 1880–2020 yılları arasında yer kürenin sıcaklığındaki ortalama artış yer alıyor. Grafiğin solda yer alan y-ekseni sıcaklık değişimini Celsius birimiyle göstermektedir. Düzenli yapılan ölçümler, 1880–2020 yılları arasında yer kürenin en az ortalama 1,1°C artmış olduğunu ortaya koymaktadır. (World of Change: Global Temperatures, t.y.)

Bu arada, Mauna Loa gözlemevi sonuçlarında sadece CO₂ konsantrasyonu ölçümleri yer almaktadır. Metan, azot oksit, HFC vs. gibi diğer sera gazları hesaba katıldığında, toplam sera gazı konsantrasyonunun 2018 yılında 457.0 ppm değerine eriştiği görülmektedir (European Environment Agency, 2022).

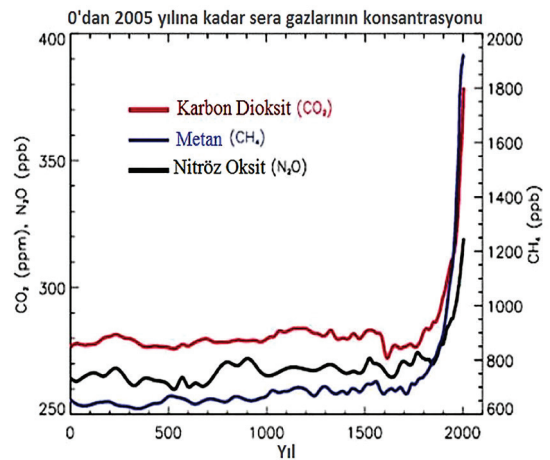
Geçen yıl 26'ncısı düzenlenen BM İklim Değişikliği Konferansları serisinde "Sıfır Karbon Salımı", "Düşük Karbon Ekonomisine Geçiş" başlıkları altında sıralanan vaat, dilek ve temennilere sıkça karşılaşılmıştır. Ayrıca 2050 yılında "Karbon Nötr" döneme geçileceği yönünde iddialar ortaya konmaktadır. Buna karşın şu sorunun yanıtı açıkta kalmaktadır: Örneğin 2040 yılında atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu, farz edelim ki 500 ppm seviyesine eriştiğinde, "Geri Dönülmez Noktanın" hala aşılmamış olacağını nereden ve nasıl bilinmektedir?

Şekil 2- Atmosfere Salınan Karbondioksit Miktarı



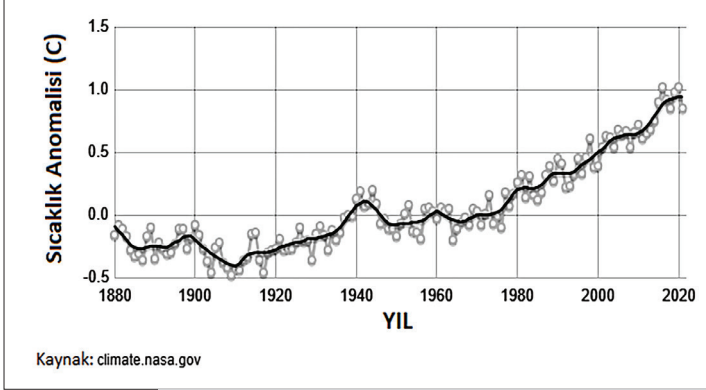
Kapıya dayanan tehlike Permafrost'un (çoğunlukla Kuzey Buz Denizini çevreleyen ve genişliği 20.0 milyon km²'yi geçen sürekli donuk araziler) süratle çözülmekte olduğudur. Hızlanarak devam eden çözülme süreciyle birlikte, donmuş toprak tabakaları arasındaki on milyarlarca ton metan gazı atmosfere karışacağı gibi, binlerce yıldır kış uykusunda bulunan virüs ve bakteriler de uyanacaklardır. Bazıları belki de COVID-19'dan daha tehlikeli olan bu

Şekil 3- Sera Gazlarının Konsantrasyonlarındaki Değişim



Kaynak: Environment and Natural Resources, t.y.

Şekil 4. Yerkürenin Sıcaklığındaki Ortalama Artış



Kaynak: Earth Science Communications Team, 2021.

hastalık vektörlerine karşı bağışıklığımız da bulunmamaktadır.

İklim Değişikliği olgusunun kısa erimde baş göstermesi olasılığı yüksek bu tür sonuçları da açıkça gösteriyor ki, oyalanmadan, daha fazla gecikmeksizin, Sıfır Salım gibi, mevcut varoluşsal tehdit karşısında etkisiz stratejiler, kısa düşen yetersiz vaatler yerine, “Negatif Karbon Salımı / Karbon Negatif” uygulamaların küresel ölçekte hayata geçirilmeleri gerekmektedir. Atmosfere salmakta olduğumuz sera gazlarından fazlasını kalıcı olarak tutmak zorunluluğu bulunuyor. Peki, bu hedef nasıl gerçekleştirilebilir? Bu konu başlı başına bir inceleme konusu olup, ayrı bir çalışmada etraflı olarak ele alınmalıdır.

Neden Hidrojen Enerjisi

Küresel ısınma ve buna bağlı İklim Değişikliği tehdidinin gözler önüne serdiği tabloya yukarıdaki bölümde yer verdikten sonra, YEK’e geçişin ivedi ve çok güncel bir zorunluluk olduğunun altını çizerek tekrarlar vurgulamak gerekiyor.

YEK türleri arasında hidrojen enerjisi, öne çıkan bir önem ve ayrıcalık taşıyor. YEK, GFY ve nükleer enerjinin yerini bütünüyle doldurabilecektir. Ancak, şu noktanın da altını çizmekte yarar var: Hiçbir YEK türü kendi başına bir “gümüş mermi” değildir.

Başka bir ifadeyle, sadece hidrojen veya örneğin güneş enerjisinin (PV veya yoğunlaştırılmış güneş), dünyadaki enerji sorununu çözmekte tek başına yeterli olabileceği yönünde bir sav öne sürülemez.

Ancak, hidrojen enerjisinin sağladığı biricik avantajlara, diğer YEK türlerine kıyasla sahip olduğu üstünlüklere de işaret etmek yararlı olacaktır.

Hidrojen de dahil olmak üzere YEK türlerinin ortak özelliği ve çevre etkisi bakımından sağlanan başlıca avantaj, “Temiz ve Tükenmez” karaktere sahip olmalarıdır. Diğerlerinden farklı olarak hidrojenin dolaylı şekilde başka kaynaklardan üretilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yukarıda da belirtildiği üzere, hidrojen bir “enerji taşıyıcısı” olarak sınıflandırılmaktadır (IEA, 2021).

RES ve GES’e Dair Kısıtlar

“Baz Yük” (yılda 7,000+ saat devrede/emre amade) özelliğine sahip olan hidrojene göre, biyokütle (BES) ve jeotermal (JES) ayrı tutulursa, günümüzde hayli popüler olan güneş (GES) ve rüzgâr enerjilerinin (RES), kaynak bakımından kesikli karakterde olmalarının önemli bir dezavantaj oluşturduğu görülmektedir.

Küresel ölçekte popüler ve kurulu güç kapasitesi her geçen gün ivmeli bir artış gösteren RES ve GES’ten ibaret bir enerji iletim ağı kurulması, teknik kısıtlamalar yüzünden olanaklı değildir. Rüzgâr ve güneş kaynakları, yıl boyunca toplamda sadece, olsa olsa 3,000 saat dolayında kullanıma elverişlidirler. GES için kaynağın mevcudiyeti bir ölçüde kestirilebilirken, RES için böyle bir tahminde bulunmak mümkün değildir. Yerel iklimsel anomaliler RES’e ilişkin tahminleri büsbütün belirsiz hale getirmektedir.

RES ve GES’i enerji arzı bakımından, bir nebze olsun güvenli kaynaklara dönüştürmek ise enerji depolanmasını gerekli kılmaktadır. RES ve GES tesislerinde üretilen enerji depolanmıyorsa,

üretildiği anda tüketmek zorunluluğu vardır. Depolama yapıldığı durumda, örneğin, bunların emre amade olduğu süreyi yıl içerisinde 6.000 saat dolayına çıkarmak için kurulu güç kapasitesini iki kat arttırırken, üretilecek elektrik enerjisinin depolanacağı “batarya çiftliği” tesislerinin de kurulması gerekmektedir. Bu çalışmamızda, maliyet unsurunun esas belirleyici parametre olarak kabul edilmediği ve bunun minimize edilmesi arka planda yer aldığı için, yaklaşık baz yük karakteri kazandırılmış RES veya GES’lerin kuruluş maliyetindeki artışa değinmiyoruz. Maliyet faktörüne ilişkin bazı belirlemelere aşağıda yer verilmektedir.

Biyokütle; temiz, tükenmez, taşınabilir, depolanabilir ve çöller dışında her alanda mevcut olabilen bir YEK türü olarak öne çıkıyor.

Enerji depolanması konusu açıldığında bir diğer popüler isim ya da markaya değinmek gerekiyor: Li-Ion bataryalar.

Bu noktada şu belirlemenin altı çizilmelidir: Enerji depolama araç ve teknolojileri henüz emekleme çağındadır. Bunları geliştirilerek olgun ve yetkin çözümler haline getirme aşamasından henüz uzak bulunuyoruz.

Dahası, rüzgâr ve güneşin bol ve bedava olmasına karşın, Lityum için aynı durum geçerli değildir. Burada, adı enerji depolama konusunda en sık anılan çözümlerin dayandığı ana element olduğu için Lityum üzerinde özellikle durulmaktadır. Her ne kadar kanıtlanmış ve olası lityum rezervleri mevcut üretim seviyesi ve küresel talebin çok üzerinde olması dolayısıyla, yakın ve orta vadede arzda bir sıkışıklık ve buna bağlı olarak fiyatlarda bir sıçrama beklentisi bulunmuyorsa da sınırlı

sayıda tedarikçiye bağımlılığın potansiyel bir sorun kaynağı olabileceği düşünülmektedir (National Minerals Information Center, t.y.). Ancak, Li-Ion batarya tipine alternatif olarak çok sayıda çözüm (Sodyum-Sülfür, Alüminyum-İyon vs.) üzerinde yoğun çalışmalar olduğu da belirtilmelidir. Rüzgâr ve güneşe ilişkin bir dezavantajın da bunlara dayalı enerji üretiminin kısıtlı alanlarda; örneğin yılda 3,000+ saat rüzgârın estiği ya da gün ışığına poz süresinin de asgari bu seviyede olduğu alanlarda Rüzgar ve PV enerji üretim tesislerinin kurulması, “proses verimliliği” açısından uygun olacaktır.

Hidrojene Kıyasla Jeotermal ve Biyokütle Üzerine Kısa Değerlendirme

JES esaslı enerji üretim tesisleri de baz yük işlevine sahip olmakla birlikte, gerekli jeotermal kaynakların mevcut bulunduğu alanların, yer kabuğunun faylarla kırılmış ve magmanın yer yüzüne yakın olduğu, tektonik riskler taşıyan arazilerle sınırlı olduğunu belirtmek gerekiyor. Kaynak, pratikte sınırsız olmakla beraber jeotermal alanlarını sınırlı oluşu başlı başına bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Buna karşılık, biyokütle; temiz, tükenmez, taşınabilir, depolanabilir ve çöller dışında her alanda mevcut olabilen bir YEK türü olarak öne çıkıyor. Biyokütleden enerji tesisleri (BES), baz yük işlevine sahip, coğrafi bir alan üzerinde farklı kapasitelerdeki tesisler ağı şeklinde dağıtık bir sistem oluşturacak şekilde kurulabilirler. BES’e ilişkin ayırt edici önemli bir avantaj, kentsel alanlarda açığa çıkan organik atıkların bertaraf edilmesinde BES’in etkili bir araç olarak, enerji ve çevre sorunlarına ilişkin çözümleri bütünleştirici bir rol oynama potansiyeline sahip olmasıdır. Biyokütleden, fosil yakıtlarının yerini alabilecek biyoyakıtların üretilmesi olanağı da bulunmaktadır.

Çalışmamızın ana teması bakımından,

biyokütlenin aynı zaman da bir hidrojen kaynağı olarak kullanılabilmesini de bu arada belirtmek gerekiyor. Biyokütlenin bu işlevine aşağıda değinilmektedir.

Hidrojenin bir enerji ve akaryakıt kaynağı olarak kullanılması sayesinde, yenilenebilir enerji kaynakları geleneksel fosil yakıtlarının bütünüyle yerini alabilecektir.

Hidrojen Enerjisinin Önemi ve Ayrıcalığı

Hidrojen, biyokütlenin yukarıda değinilen bütün avantaj ve ayrıcalıklarına sahip bir YEK türüdür. Hidrojenin bir enerji ve akaryakıt kaynağı olarak kullanılması sayesinde, YEK GFY'nin bütünüyle yerini alabilecektir. Bu olanak, hidrojen ve biyokütlenin öne çıkmasıyla gerçekleşebilir.

YEK'in GFY'nin yerini tamamen alması hedefi, "Karbon Sıfır" / "Net Sıfır Karbon Salımı" biçiminde de ifade edilebilir. Ancak, "Karbon Sıfır" aşaması İklim Değişikliği ile mücadelede nihai bir aşama olmaktan uzaktır. Asıl hedeflenmesi gereken, "Negatif Karbon Salımı" / "Negatif Karbon" uygulamalarının hızla hayata geçirilmesi ve küresel ölçekte yaygınlık kazanmasıdır.

Biokütleden farklı olarak hidrojenin, doğrudan (birincil) bir enerji kaynağı olmadığı için, muhtelif kaynaklardan üretilmesi gerekmektedir. Hidrojen, ısı ve elektrik üretimi amacıyla veya araçlarda yakıt olarak kullanıldığında atmosfere sadece su buharı salınmaktadır.

GFY'den YEK'e geçişte bir "fren mesafesi"

söz konusudur. Geçiş bir günde, akşamdan sabaha olmayacaktır. Kısa zaman içerisinde gerçekleştirilecek değişimlere karşı işleyen bir atalet mevcuttur. Enerji sektöründeki oyuncu ve karar vericilerin YEK'e karşı değillerse de uzunca bir süre daha fosil yakıt kullanmaya devam yönünde bir eğilime sahip oldukları bilinmektedir. Oldukça yaygın olan görüş, ehven-i şer kabilinden, doğalgaz kullanımına mevcut enerji denkleminde daha ağırlıklı bir yer vermek şeklindedir. Bu noktada iki temel saptama yapılabilir:

1. Giriş başlığı altında da vurgulandığı üzere, bundan böyle, atmosfere 1,0 metreküp dahi CO₂ veya bir diğer sera gazı salınmalıdır.

2. Doğalgazı, "saf değiştirerek" YEK arasına katmak üzere yöntem ve uygulamalar geliştirmek zorunluluğu bulunmaktadır. Somut bir öneri olarak, doğalgaz bir hidrojen ve aynı zamanda karbon kaynağı olarak kullanılmalıdır.

Her bakımdan iflas etmiş olduğu açık seçik ortada olan "eski dünya düzeninin" yerini alacak olan "Ekolojik Uygarlık"ın bir hidrojen-karbon çağı olacağı öngörülebilir. Şöyle ki:

Hidrojen, başta doğalgazı ikame etmek üzere "Sıfır Karbon" bir yakıt olarak kullanılırken, metanın ayrıştırılması yoluyla (karbon ve hidrojen bileşenlerine ayırma) doğalgazdan elde edilecek karbon da yüzlerce çeşit ileri malzemenin üretilmesinde kullanılabilir. Bu sayede, doğalgazın yakılması durumunda açığa çıkacak olan karbon kalıcı olarak depolanmış olacaktır (Meier vd., 2013).

Doğalgazın "ehlileştirilerek" YEK saflarına geçmesi sayesinde, tamamen YEK'e geçilmesiyle, mevcut doğalgaz ve "Gaz Hidratı" rezervlerinin heba edileceği yönündeki, ekonomik temelli kimi kaygılar da giderilmiş olacaktır.

Hidrojen Üretim Yöntemleri

Metan (dolayısıyla doğalgaz, gaz hidratları, kaya gazı), biyokütle ve en büyük kaynak olarak su, hidrojenin elde edilebileceği kaynakları oluşturmaktadır.

Doğalgazdan “metan re-formasyonu (methane reformation)” yöntemiyle hidrojen ve karbon elde edilebilmesi, hidrojeni, pek çok kullanım alanında doğalgazın yerini en kolay ve görelî olarak kısa erimde alabilecek YEK türü olarak öne çıkarmaktadır. Doğalgazdan hidrojen üretiminde başlıca yöntemlere aşağıda kısaca değinilmektedir.

İstım / Buhar-Metan Re-Formasyonu

Geçmiş 80 yıl kadar geriye uzanan, kanıtlanmış bir yöntem olarak istım-metan re-formasyonu, günümüzde en yaygın hidrojen üretim teknolojisidir. Örneğın, ABD’de gerçekleştirilen güncel hidrojen üretiminin %95’i doğalgazdan bu yöntemle sağlanmaktadır (8). Yöntem özlü olarak şöyle açıklanabilir:

Metan, 700-1000°C sıcaklık aralığında kızgın buharla (istım) işleme tabi tutulur. 3,0 ila 25,0 bar basınç altında ve katalizörler vasıtasıyla gerçekleşen işlem sonunda karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H₂) açığa çıkar.

İşlemin basit bir kimyasal denklemlle anlatımı da şöyledir:

$CH_4 + H_2O (+ ısı) \rightarrow CO + 3H_2$ (suyu buharlaştırmak için enerji sarf edildiğinden, reaksiyon ısı soğuruyor - “endotermik”)

İşlemin “Su – Gaz Değişimi” olarak adlandırılan ikinci aşamasındaki kimyasal reaksiyon:

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (+ küçük bir miktar ısı)$

Burada bir miktar daha hidrojen elde edilirken CO₂’de açığa çıkmaktadır. Reaksiyon esnasında ısı da açığa çıkıyor (ekzotermik reaksiyon). Yöntem, metanol ve diğer kısa karbon zincirli

hidrokarbonlara da uygulanabiliyor. Önemli nokta ise şu oluyor: CO ve CO₂ oluşumu, bu yöntemle, Küresel Isınma bağlamında hala bir sorun olmaya devam ediyor.

Eski bir yöntem olmakla birlikte, istım-metan re-formasyonu günümüzde hala geliştirilmekte olup reaksiyonlarda kullanılacak daha uygun katalizörler konusunda araştırmalar da sürmektedir (Chen vd., 2020). Bu yöntemle, CO₂ bir yan ürün olarak açığa çıkmaktadır. Klasik, sık kullanılan, ancak İklim Değişikliği koşullarında ve “Negatif Karbon” yöntemlerine geçişin asıl ölçüt olduğu günümüzde, istım re-formasyonu artık geçerli sayılmayacak bir yöntem olarak görünmektedir.

Kısmi Yakma-Gazlaştırma

Metandan hidrojen üretimine yönelik bir diğer yöntem, Kısmi Yakma / Gazlaştırmadır. Metanın yanı sıra ağır yağ ve farklı petrol türevleri de bu işlemde hammadde olarak kullanılabilir (Zhang & Ruan, 2019). Gazlaştırma, karbon ihtiva eden organik materyalin (metan), işlemin gerçekleştirildiği reaktöre kontrollü miktarda su buharı ve oksijen verildiği koşullarda kısmi yakma (eksik oksijenle yakma) işlemine tabi tutulmasıdır. İşlem sonunda açığa çıkan ürünler; H₂, CO, CO₂ ile hammadde türüne bağlı olarak hidrojen sülfür de (H₂S) olabilir. Metan söz konusu olduğunda ilgili kimyasal reaksiyonlar şunlardır:

$CH_4 + O_2 \rightarrow CO + 2H_2$

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

$CH_4 + H_2O (Gaz) \rightarrow CO + 3H_2$

Gazlaştırma işlemi endotermiktir. Bu işlemde de nihai ürünlerin, H₂’nin yanı sıra CO ve CO₂ olduğu görülüyor. İstım-metan re-formasyonu

işleminde açığa çıkan H₂ ile CO ürünlerinin hacim olarak oranı 3:1 iken gazlaştırmada bu oranın 1:1 olduğu bilinmektedir (Syed, 2021).

1300–1500°C aralığında olan işlem sıcaklığını azaltmak üzere katalizörlerin kullanıldığı Gazlaştırma yöntemleri de bulunmaktadır. Sonuç olarak; CO ve CO₂ gazlarının da yan ürün olarak açığa çıkması bu yöntemleri, Küresel Isınma açısından olumlu kılmamaktadır. Ancak, H₂ üretmek amacıyla bu yöntemlere başvurulduğu dönemde, İklim Değişikliği olgusu, günümüzde olduğu gibi belirleyici bir ölçüt, bütün kararlara esas bir parametre değildir.

İnsanoğlunun bütün etkinlik alanlarında, İklim Değişikliği ana ölçüt ve bütün yatırım ve işletme planlarında başat parametre haline gelmiş bulunmaktadır.

Biyokütleden Hidrojen

Avantajları ve sağladığı esneklikler itibarıyla biyokütle ve H₂ çok benzer özelliklere sahiptir. Her iki YEK türü de taşınabilir ve depolanabilir olma avantajına sahiptir. Gerek biyokütle gerekse H₂, RES ve GES tesisleri için geçerli olan uygun konum kısıtlamasından bağımsızdırlar. Biyokütle, organik kökenli oluşu dolayısıyla bünyesinde büyük oranda H₂ ve karbon barındırmasından dolayı, birincil enerji olma niteliğinin yanı sıra, aynı zamanda bir H₂ ve karbon kaynağıdır.

Organik kökenli kentsel katı atıklar, kanalizasyon çamuru, hurda araç lastiklerinden, “enerji bitkileri”, tarımsal ve orman ürünü atıklarına kadar uzanan geniş bir ürün yelpazesi, biyokütle tanımlı kapsamında yer almaktadır.

Bir önceki başlık altında yer alan Gazlaştırma, biyokütlenin termo-kimyasal işlem vasıtasıyla, esas

olarak iki bileşeni olan CO ve H₂'ye (Sentez Gazı) ayrıştırılmasını sağlamaktadır. İşlem, 800-1000°C ortam sıcaklığı ile yüksek basınç ortamında, bir gazlaştırıcı / gazlaştırma reaktöründe meydana geliyor. Burada elde edilen Sentez Gazı (esas olarak CO + H₂ bileşimi), istenirse, bir sonraki aşamada Fischer-Tropsch işlemi vasıtasıyla, biy yakıtlar (biodizel, biogazolin, vs.) ile günümüzde tipik bir petrokimya tesisinde üretilen başka birçok materyalin üretiminde de kullanılabilir. Bu arada, nispeten daha yeni bir teknoloji olan plazma gazlaştırma yönteminin de H₂ üretiminde kullanılabileceği bilinmektedir (Favas vd. 2017).

Hidrojen Üretimi ve İklim Değişikliği İlişkisi

Hidrojen, pek çok sanayi kolunda muhtelif amaçlarla kullanılagelen bir hammadDEDİR. Bu çalışmamızda ise, hidrojenin, sadece GFY'nin yerini alacak bir YEK türü olarak, bir enerji kaynağı olma özelliği esas alınmaktadır.

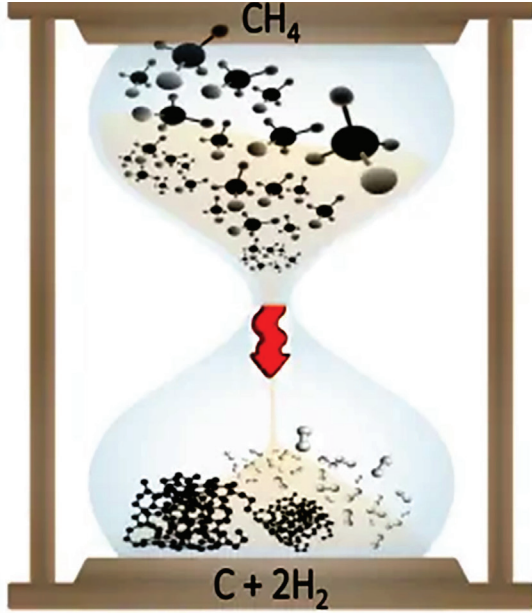
GFY'ye dayalı enerji paradigmasının sorgulanmadığı, İklim Değişikliği olgusunun henüz, bugünkü düzeyde yaşamsal bir tehdit oluşturmadığı dönemde, bir önceki bölümde yer alan yöntemlerle hidrojen üretiminin, işlem sonunda açığa çıkan CO ve CO₂ gibi yan ürünler dolayısıyla kritik edilmediği görülmektedir.

Ne var ki, günümüze gelindiğinde, başta enerji sektörü olmak üzere, insanoğlunun bütün etkinlik alanlarında, İklim Değişikliği ana ölçüt ve bütün yatırım ve işletme planlarında başat parametre haline gelmiş bulunmaktadır.

“Dekarbonize” / Temiz Hidrojen Üretimi

Geçmişe göre kökten değişikliğe uğramış koşullar altında, “hidrojen ekonomisine” geçişi olanaklı kılacak biçimde, hidrojen üretimini sağlamanın yol

Şekil 5. Dekarbonizasyon



Kaynak: Ozin, G., 2018.

ve yöntemleri neler olmalıdır?

Doğalgazın piroliz (pyrolysis) işlemine tabi tutularak, karbon ve hidrojen bileşenlerine ayrışması, temiz hidrojen üretimi için geçerli bir yöntem olarak görünmektedir. Piroliz, en basit anlatımıyla; biyokütle gibi yüksek yapıdaki organik maddelerin, oksijensiz ortamda, ısıl işleme tabi tutularak daha basit yapıdaki bileşenlere ayrıştırılmasıdır. Piroliz işleminin ürünleri; kısa karbon zincirli uçucu gazlar, piroliz yağı ve kok kömürüdür (Basu, 2018).

Amaçlanan nihai ürüne bağlı olarak ham madde, yüksek sıcaklıkta (800°C ve üzeri) görel olarak kısa süreyle (piroliz yağı üretimi amaçlı) veya görel olarak düşük sıcaklık (500°C ve uzun süreyle (kok kömürü üretimi amaçlı) piroliz işlemi uygulanabilir.

Söz konusu olan metan/doğalgaz ise, nihai ürünler hidrojen ve karbon olmaktadır.

Şekil 5'te, doğalgazın "dekarbonizasyonu" (karbondan arındırma) görsel olarak ifade edilmektedir. Genel olarak biyokütle hammadde

olarak alındığı, basitleştirilmiş bir işlem akış şemasında da Şekil 6'da piroliz işleminin aşamaları gösterilmektedir.

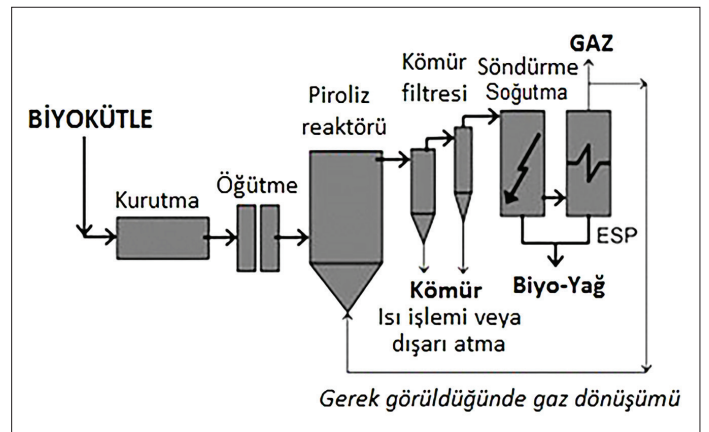
Piroliz işlemiyle doğalgazın karbon ve hidrojene dönüştürülmesi, doğalgazın "dekarbonizasyon" yoluyla çevre dostu hale gelmesi olarak da nitelenebilir. Böylelikle doğalgaz, halihazırda bulunduğu GFY saflarından dolayı bir biçimde YEK saflarına geçmiş olmaktadır.

"Temiz" hale gelen doğalgazdan ısıl işlem (piroliz) yoluyla elde edilen hidrojen, elektrik üretiminde hammadde ve akaryakıt olarak kullanılırken, karbon, yüzlerce çeşit ileri malzemenin üretilmesinde kullanılacaktır. En basit ve yaygın kullanım alanı olarak, "siyah karbonun / kok" en azından bir toprak iyileştiricisi olarak kullanılma imkânı bulunmaktadır. Graphene, yeni kuşak PV paneller ve güncel bir yenilik olarak karbon esaslı yarı iletkenler, karbona dayalı yapı malzemeleri vs., yüzlerce kullanım alanı arasında sadece birkaçıdır.

Bu suretle karbon kalıcı olarak tutulmuş ve depolanmış olacaktır.

Yaygın bir görüşe göre, doğalgazın, karbon ayak izinin kömüre kıyasla daha az (yarı yarıya ve hatta daha az) olması dolayısıyla, gelecekteki enerji

Şekil 6. Piroliz İşlem Aşamaları



Kaynak: Meier vd., 2013.

stratejilerinde hala yer alması düşünülebilir. Enerji çevrim santrallerinde doğalgazın yakıt olarak kullanılmasından kaynaklı olarak, baca gazında mevcut CO₂ gazını tutmak ve depolamak (KTD) sıkça dile getirilen ve pek çok uzmanlarca savunulan bir yöntem olarak görülmektedir. Ancak bu sağlandığında iki seçeneği birlikte değerlendirmek olanağı doğmaktadır. Bacada tutulan CO₂ gazının yer kabuğunun / litosferin derin katmanlarında depolanması en sık üzerinde durulan çözüm olagelmıştır. Eğer, doğalgaz çevrim santrali, İskandinavya Yarımadası gibi çok eski bir kara parçasında yer alsaydı bu bir depolama çözümü olarak görülebilirdi.

Hidrojen, hiçbir kuşkuyla yer vermeyecek şekilde geleceğin başat enerji kaynağı olmaya adaydır.

Ne var ki, bu çözüm, örneğin Yeni İpek Yolu'nun Batı kapısı olan Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde kurulu bir santrali için bu tarz bir KTD çözümü asla söz konusu olmaz. Çünkü, Anadolu Yarımadası ve özellikle Batı Anadolu, faylar ile arızalı olup çok yüksek tektonik riskler taşımaktadır. Sık faylarla kırılmış bir kara parçasında CO₂'yi, yüz milyonlarca yıllık bir jeolojik sürecin ardından durağan yer katmanlarında depolama olanağı mevcut değildir. Tartışmalı ve çok su götürür bir çözüm olarak, açığa çıkan CO₂, çekilecek özel bir boru hattı ile Karadeniz'in tabanına sevk edilebilir. Bu ise Öngörülemez risklerle dolu bir seçenektir.

CO₂ boru hattı güneye, Akdeniz'e doğru çekilirse, 4,700 metre derinliğindeki Rodos Çukuru da akla gelebilir. Sonuç: Tektonik risklerin yer aldığı hiçbir bölgede, fosil yakıtlarıyla yola

devam imkânı sağlıyor gibi görünebilen KTD'nin bir çözüm olması düşünülemez.

Doğalgazdan hidrojen üretimini sağlamak üzere, "Pirroliz" (pyrolysis) yönteminin (Schneider vd., 2020). özel ve birincil bir öneme sahip olduğu söylenebilir. GFY'den YEK'e geçiş sürecinde, görel olarak kısa erimde, en kolay vazgeçilebilir GFY türünün kömür olduğu görülmektedir. Buna karşılık, en dirençli olan, kalmakta en fazla ayak direyen ise, görünen o ki, doğalgaz olacaktır. Doğalgazdan buna alternatif yakıtlara geçişte, bu dönüşümden en çok zararlı çıkacak ülkenin Rusya olacağı ise çok açıktır. Ne var ki, Rusya'nın hidrojen enerjisine geçiş konusunda planlarının olması çok dikkat çekicidir (Sharma, 2021; Barlow & Tsafos, 2021).

Hidrojen enerjisinin gelecekte oynayacağı rol konusunda isabetli saptamalar yapan Rusya'nın bu yöndeki eğilimine işaret eden çarpıcı bir örnek ise, Rosatom ve Gazprom şirketlerinin Sakhalin Adası'nda, hidrojen enerjisine dayalı bir çözüm konusunda ortak hareket etme kararı vermiş olmalarıdır (ROSATOM, 2021).

Türkiye açısından çok dikkate değer gelişme şudur: Mersin Akkuyu'da nükleer santral kurmakta olan Rosatom ile Türkiye'ye büyük miktarda doğalgaz temin etmekte olan Gazprom bir araya gelerek hidrojen enerjisine dayalı bir çözümde ortaklık yapmaktadırlar. Bu durum dahi, kendi başına, enerji alanındaki güncel eğilimlerin yönü konusunda yeterli ve ikna edici bir fikir vermekte yeterli olsa gerekir.

Hidrojen, hiçbir kuşkuyla yer vermeyecek şekilde geleceğin başat enerji kaynağı olmaya adaydır. Çalışmamızın odağındaki esas sav, pratikte sonsuz bir enerji kaynağı olan hidrojeni öne çıkaran YEK'e dayalı enerji politikalarının hayata geçirilmesiyle, GFY ve hatta nükleer enerjiye hiçbir şekilde gerek kalmayacak

olmasıdır. Hidrojenin önemi, enerji (elektrik ve ısı) kaynağı olması kadar aynı zamanda akaryakıt olarak da kullanılabilmesinden ileri gelmektedir.

Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

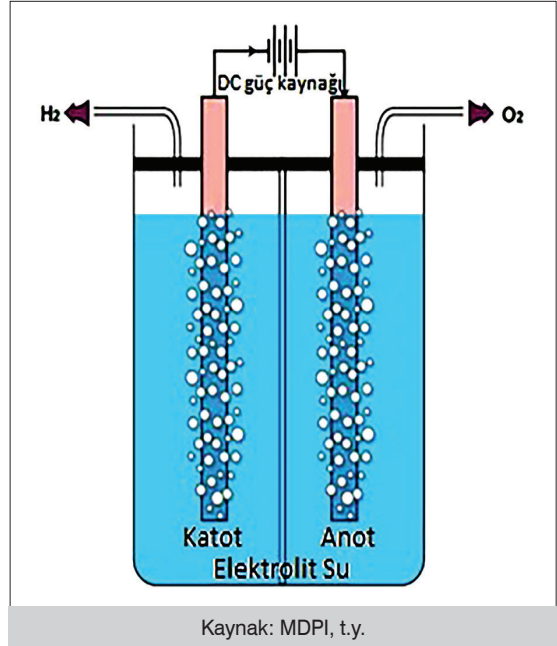
Saf su ve/veya deniz suyundan hidrojen üretimi sayesinde hidrojen tükenmeyen bir kaynak haline gelebilir. Maliyet engeli gibi, teknik sorunların giderilmesi yolunda pek çok çalışma yürütülmektedir. Yakın bir gelecekte, hidrojen üretimi amacıyla elektroliz yönteminin kullanılmasının son derece yaygın hale gelmesi öngörülmektedir (FuelCellWorks, 2022). Elektroliz, suyun bulunduğu bir elektroliz hücresinde/kabında, belirli bir doğru akım (DC) gerilimi uygulanarak, suyu hidrojen ve oksijenden ibaret bileşenlerine ayırma işlemidir. Doğru akım gerilimi altında iyonlaşan oksijen (anyon) artı yüklü anot iletkeninde toplanırken, pozitif hidrojen iyonları da (katyon) eksi yüklü katot iletkeni çevresinde gaz fazına geçmektedirler.

Çok basite indirgenmiş bir elektroliz şeması Şekil 7’de yer almaktadır.

Bu noktada, rüzgâr (RES) ve güneş (PV – GES) enerjileri gibi kesikli karaktere sahip YEK türlerinin, elektroliz işleminde enerji kaynağı olarak kullanılması çok sık telaffuz edilen ve tartışılan bir konu olarak önümüzde durmaktadır. Bu şekilde elde edilecek hidrojen, literatürde “Yeşil Hidrojen” olarak adlandırılmaktadır. RES ve GES tesislerinde zaten elektrik üretilirken, buralarda üretilecek enerjiyi neden hidrojen üretiminde kullanalım?

Hemen akla gelen yanıtlar: Hidrojen vasıtasıyla, depolanabilir ve taşınabilir olduğu gibi, akaryakıt olarak da kullanılacak bir enerji kaynağı elde edilmiş olacaktır. Hidrojen, pek çok enerji uzmanının öne sürdüğü gibi, neredeyse “temiz”(!) olarak nitelendirilen doğalgazın yerini kolaylıkla

Şekil 7. Suyun Basite İndirgenmiş Elektroliz İşlemi



alacak bir enerji taşıyıcısıdır. Örneğin hidrojen, mevcut doğalgaz iletim hatları üzerinden taşınabilecektir.

Peki, Yeşil Hidrojen üretimi tedarik zincirine bir bakla daha eklemekle maliyet artışının yanı sıra, olasılıkla ek teknik sorunlar da getirmeyecek midir? Bu soru ilk bakışta isabetli gibi görünmekle birlikte, maliyetler konusuna farklı bir bakış açısından eğilmekte de yarar var. Ancak, bu başlıktan önce, Türkiye’nin biricik avantajı olan iki konudan bahsetmekte yarar var. Şimdi kısaca bunlara değinelim.

Bir Hidrojen Kaynağı: Hidrojen Sülfür (H₂S)

Türkiye’nin en uzun sahiline ve en geniş Münhasır Ekonomik Alanına sahip olduğu Karadeniz, oluşumundan kaynaklanan etkenler ve süreçlere bağlı olarak, büyük bir H₂S kaynağıdır. Karadeniz bu özelliği dolayısıyla, diğer dünya denizlerine kıyasla, hidrojen kaynağı olarak biricik bir avantaj,

bir ayrıcalık taşımaktadır (Demirbas, 2009; Yüksel vd., 2021b). İzole bir iç deniz özelliğine sahip Karadeniz'in derin su katmanlarında, organik maddelerin oksijensiz ortamda bozunmasına bağlı olarak, H_2S oluşma süreci, 9,000 yıl önce meydana gelen Karadeniz'de yaklaşık 7,500 yıldır aralıksız sürmektedir. H_2S 'den H_2 üretiminin, neredeyse sınırsız bir kaynak olan suya kıyasla daha kolay ve daha düşük bir enerji bütçesiyle gerçekleştirilebileceğine işaret etmek isteriz. Dolayısıyla, Karadeniz, H_2S oluşumuna bağlı olarak bir hidrojen kaynağı olma özelliğine sahip bulunmaktadır (Haklıdır & Kapkin, 2005; Baykara vd., 2007).

Her ülke gibi Türkiye de biricik olan avantajlarını rekabetçi üstünlüğe taşımak zorundadır.

Yapılan muhtelif saha çalışmaları ve ölçümler sonucunda, Karadeniz'in dip seviyelerinde 4,6 milyar ton H_2S mevcut olduğu hesaplanmaktadır (Volkov & Neretin, 2007). Karadeniz'deki su kütlesi %90 oranında oksijensiz olup H_2S ihtiva etmektedir. Bilim insanları Karadeniz'de her gün 10 bin ton dolayında H_2S oluşumunun meydana geldiğini belirtiyorlar (Baykara vd., 2007).

Bu arada, yüksek derecede toksin özelliğine sahip H_2S 'in Karadeniz'de giderek artan bir çevre tehdidi oluşturduğuna da dikkat çekilmektedir. Miktarı gün geçtikçe artan H_2S , Karadeniz'i süratle bir ölü deniz alanına dönüştürmektedir. 1955 – 2015 yılları arasında, Karadeniz'de yaşama elverişli su kütlesinin (yüzeyden 90 ila 200 metre derinlikte yer alan üst tabaka) %40 oranında azalmış olması, alarm niteliğinde çok dikkat çekici bir gelişmedir (22). Toksik bir kirletici

olan H_2S 'den hidrojen üretimi, değerli bir enerji kaynağı sağladığı gibi olumlu bir çevre etkisine de yol açacaktır.

H_2S 'den H_2 üretiminde, 800-1000°C işlem sıcaklığında gerçekleştirilecek “termal ayrıştırma / piroliz” en uygun yöntem olarak görünüyor (Demirbas, 2009).

Karadeniz'de, eylemsiz kalmak durumunda kaçınılmaz olan bir çevre felaketinin önü alınırken, aynı zamanda geleceğin enerji kaynağı olan hidrojen üretimi, Karadeniz'i çevreleyen ülkeler arasında verimli olduğu kadar zorunlu bir iş birliği alanı oluşturmaktadır.

Hidrojen – Sodyum Bor Hidrür ($NabH_4$) Esaslı Yeni Teknolojiler

Her ülke gibi Türkiye de biricik olan avantajlarını rekabetçi üstünlüğe taşımak zorundadır. Türkiye, dünyada kanıtlanmış Bor rezervlerinin %70'ten fazlasına sahip bulunuyor. $NaBH_4$, bir hidrojen taşıyıcısı olduğu gibi, yepyeni hidrojen yakıt hücresi tasarımlarına da olanak tanıyan bir malzeme, bir kimyasal madde olarak öne çıkıyor. $H_2 - NaBH_4$ esaslı yakıt hücrelerinin geliştirilmesi Türkiye'nin önünde duran bir sınama niteliğindedir.

Özellikle H_2 enerjisine dayalı araçların yaygınlaşmasında $NaBH_4$ 'e dayalı yakıt hücrelerinin geliştirilmesi önemli bir rol oynamaya adaydır (Wee vd., 2006). Kuşak ve Yol Girişimi bağlamında önemli bir iş birliği alanı söz konusudur.

Hidrojeni Taşımak

Hidrojeni nakletmek için ilk akla gelen, doğallıkla, mevcut doğalgaz boru hatlarının kullanılmasıdır. Aşamalı olarak, belirli oranda harman edilecek olan hidrojen ve doğalgazın, doğalgaz iletim hatlarıyla taşınması üzerinde durulmaktadır.

Elbette ki bu senaryo, hidrojenin üretildiği kaynaktan ötede, nihai kullanım noktasında enerjiye dönüştürüleceği varsayımıyla geçerli olabilir.

Doğalgazın nakliyesinde olduğu gibi, hidrojenin sıvılaştırılarak sevk edilmesi ise katlanılması gereksiz yüksek maliyetler ve hidrojen molekülünün hemen her yüzeyden geçebilecek olmasına bağlı olarak, çok kalın çeperli tüp / basınçlı kap ve haznelere muhafaza edilmesini gerektirmesi nedeniyle teknik bakımdan da elverişli bir seçim değildir. Bu bağlamda, olası en uygun yöntem, yüksek basınç altında sıkıştırılmış ve hala gaz formundaki hidrojenin mevcut iletim boruları vasıtasıyla sevk edilmesi olabilir.

NaBH_4 'ün yanı sıra amonyağın da (NH_3) hidrojen taşıyıcısı bir madde olduğu, literatürde sıkça yer almaktadır. Suudi ARAMCO ile Japonya kökenli ENEOS, 25 Mart 2021 tarihinde, aralarında hidrojen ve amonyak esaslı bir tedarik zinciri oluşturmak konusunda bir anlaşma bağlatmış bulunuyorlar (Sampson, 2021). Bu anlaşmadan daha önce, Eylül 2020'de ARAMCO 40 tonluk ilk parti amonyağı Japonya'ya ihraç etmişti (Saudi Arabian Oil Co., 2020). Petrol ve doğalgaz zengini Suudi Arabistan'ın, Kızıl Deniz kıyısında kurmayı tasarladığı fantastik / fütüristtik Neom kentinde 5,0 milyar dolarlık yatırımla, hidrojen üretmek ve depolamak amacıyla bir tesis kurmayı hedeflemesi çok dikkate değer bir konudur. Bu tesisin, YEK ile çalıştırılması da amaçlanmaktadır (The Japan Times, 2020).

Mevcut boru hatları, kimyevi maddeler veya yine bir kimyevi madde olan amonyağın, hidrojenin taşınmasında kullanılmasının yanı sıra geçerli bir seçenek daha bulunmaktadır: Hidrojen yerine hidrojen üretilen elektrik taşıması...

Hidrojenin Elektrifikasyonu

YEK'e geçişle enerji iletim ve dağıtım ağının mevcut yapısı ve gelecekte nasıl bir geometrik bir yapıya (ağ-yapı) evrilmesi gerektiği konusu üzerinde de durulmalıdır. Mevcut ulusal şebekelerin (ulusal enterkonnekte sistem – Grid), özellikle, kesikli karakterdeki GES ve RES'lerin bağlanmasına pek elverişli olmadığı bilinmektedir.

RES ve GES'leri sorunsuz olarak barındıracak ağ-yapıların, yerelde mikro-grid (ada) ve daha geniş coğrafi ölçekte (örneğin ülke ölçeğinde) bunları birbirine bağlayan DC ve/veya HVDC (Yüksek Gerilim Doğru Akım) arterlerinden oluşması gerektiği, bir çözüm olarak akla gelmektedir. Bir sonraki aşamada, ulusal ağ-yapıların uzun mesafe HVDC hatları ile birbirine bağlandığı, kıtalararası ve hatta okyanus aşırı bir ağ-yapının, küresel ölçekte bir Süper-Grid'in kurulması tartışmalara konu olabilir. Bu noktada, günümüzde ortaya çıkan ve ulusal enterkonnekte sistemlerin üst katını oluşturacak DC Grid konusuyla yakından ilintili güncel bir eğilimden de bahsetmek gerekiyor: Elektrifikasyon...

2019 Temmuz ayında Yeni Delhi'de düzenlenen bir konferansta, IEA icra heyeti direktörü Dr. Fatih Birol, elektrifikasyonun geleceği şekillendireceğini ifade etmiştir (CEEW, 2019)

Piroliz yöntemiyle doğalgazdan ve/veya suyun elektrolizi yoluyla elde edilecek hidrojenin, mevcut veya yeni inşa edilecek boru hatlarıyla uzak mesafelere nakli yerine, üretildikleri konumda kurulmuş çevrim santrallerinde elektrik enerjisine dönüştürülerek, elektrik formundaki enerjinin DC / HVDC hatlarla son tüketiciye ulaştırılması akla yakın bir çözüm olarak görünmektedir.

Hidrojen elektrik tesislerinde üretilen elektrik, örneğin, kentsel alanlarda, bölgesel ısıtma-soğutma amacıyla kurulacak ısı pompası

Şekil 9. AB–MENA (Orta Doğu Kuzey Afrika) HVDC Gridi



bir DC GRID / SÜPER GRİD, güneş ve rüzgâr gibi kesikli özelliğe sahip YEK türleri için bir yedekleme aracı işlevi de taşıyacaktır.

DESERTEC projesinin ortaya atıldığı ilk yıllarda, esas vurgu esas olarak GES ve biraz da RES üzerine olmuştur. O dönemde, hidrojen ve/veya hidrojen enerjisinin GRİD'e bağlanarak AB'ye iletilmesi konusu hemen hiç gündeme gelmemiştir. Orijinal DESERTEC ve bunu izleyen yenilenmiş fikir planlarını hayata geçirmek muhtelif nedenlerle mümkün olmamıştır. Günümüze geldiğinde, DESERTEC 3.0 olarak adlandırılan yeni bir sürümün ortaya atıldığı görülmektedir. 2000'li yılların başında kurulan DESERTEC vakfınca, enerji sektöründe faal şirketleri bir araya getirmek ve bu suretle etkin ve güçlü bir yapıyla YEK'e geçişi ivmelendirmek amacıyla, 2009 yılında DII (Desert Industrial Initiative – Çöl Endüstriyel Girişimi) konsorsiyumu oluşturulmuştur. (DESERTEC Foundation, t.y.)

DII'nın benimsediği yaklaşım ve güncel tanımlamada, orijinal DESERTEC fikrinin dayandığı öncüllerden çok farklı olarak, DESERTEC 3.0 sürümünde hidrojen enerjisini öne çıkarılmaktadır. Buna göre, ağırlıklı olarak GES ve bunun yanı

sıra RES kullanılarak üretilecek "Yeşil Hidrojen", Akdeniz tabanına döşenmiş bulunan (örneğin Cezayir – Fransa bağlantısı) doğalgaz boru hatları vasıtasıyla AB ülkelerine ulaştırılacaktır. Hidrojenin, deniz suyunun elektroliz işlemine tabi tutularak üretilmesinin hedeflendiğini de bu arada belirtelim

Bu noktada bir revizyona gerek olduğu hemen akla geliyor: Hidrojenin elektrifikasyonu... Hidrojeni taşımak yerine, hidrojenin üretildiği noktada hidrojenden elde edilecek elektrik enerjisinin HVDC hatlarıyla iletilmesi çok daha cazip bir seçenek olabilir.

YEK ve Hidrojen Enerjisine İlişkin Maliyetler

YEK'e ilişkin tartışmalarda çok sık karşılaşılan bir konu, YEK türlerinin kuruluş ve işletme maliyetleri ile ilgilidir. Maliyet ölçütünün ön planda tutulması geride kalan, 20. Yüzyıla ait bir düşünce alışkanlığından kaynaklanmaktadır. Uzunca bir zamandır, YEK – GFY karşılaştırması yapılırken maliyet, belirleyici bir parametre olmaktan çıkmıştır. Öncelikle, YEK her geçen gün ucuzlamaktadır. Dahası, mevcut sistemin ve GFY'ye dayalı geleneksel enerji paradigmasının dünyamızı getirdiği noktada,

bir yol ayırımındayız. Ölüm ile yaşam arasında kesin bir karar vermemiz gerekmektedir. Ölüm ucuz, yaşam pahalı ise hangisini seçeceğiz? GFY ucuz, YEK pahalı ise tercihimiz hangi yönde olmalıdır? “6. Büyük Kütleli Çöküşün” eşliğinde artık tercihler söz konusu değil; gezegenimizdeki yaşamı korumak uğruna zorunluluklar kendilerini dayatmaktadır.

Sanayiveticaretkuruluşlarıilekamuyaaitmekanlar ve hane halkına, YEK dolayısıyla artan bir maliyet söz konusu ise, bunu yansıtmamak devletlerin liste başı görevleri arasında olmalıdır. Dahası, hükümetlerin başlıca görevi, ülke ekonomilerini büyütürken hane halkının gelir ve refah seviyesini arttırmak değil midir? Gelirler, dağılımın da düzenlenmesiyle, artan enerji maliyetlerini karşılayacak düzeyde kalırsa, bu durum kişi ve kuruluşlara bir yük getirmeyecektir.


Fosil yakıtlarının (GFY) maliyeti konusunda bir de madalyonun arka yüzüne bakmak gerekmektedir. IMF tarafından yayımlanan 24 Eylül 2021 tarihli raporda (Parry & Black & Vernon 2021), fosil yakıtlarına uygulanan sübvansiyonların, dışsal (dolaylı) maliyetler de hesaba katıldığında, 2020 yılı itibarıyla küresel GSMH'nin %6,8'ine karşılık gelen 5,9 trilyon dolar tutarında olduğu ve bu oranın 2025 yılında %7,4'e yükseleceğinin tahmin edildiği belirtiliyor.

Çevre kirliliği kaynaklı hastalık ve buna bağlı işgücü kayıpları ve sağlık giderleri gibi dolaylı (dışsal) maliyetler bir yana, 2017-2019 yılları arasında, 52 gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin fosil yakıtlarını, doğrudan olarak, tutarı yılda ortalama 600 milyar dolara yakın sübvansiyonlar ile destekledikleri görülüyor (Timperley, 2021; Geddes vd. 2020). Korona salgını dolayısıyla 2020'de bu miktar geçici olarak azalmıştır.

Yukarıda anılan IMF raporuna göre, İklim Değişikliği olgusuna bağlı olarak insanoğlunun ödemekte olduğu bir de can bedeli var ki, buna bir maddi karşılık biçmek olanaksız; her yıl yaklaşık 900 bin kişiyi, dolaylı olarak, İklim Değişikliğine bağlı olumsuz çevre koşulları nedeniyle hayatını kaybetmektedir.

Yukarıda yer alan veriler temelinde sonuç ve ilk akla gelen düşünce şudur: Anılan sübvansiyonlar pekâlâ YEK'e geçiş sürecinde gerekli maddi teşvikler için kullanılabilir. UNDP kaynaklı bir çalışmada, fosil yakıtları için sarf edilen sübvansiyonların, küresel ölçekte yoksullukla mücadele amacıyla kullanılan kaynaklardan fazla olduğuna işaret edilmektedir (UNDP, 2021).

Sonuç

Fosil yakıtlarından tamamen ve olası en kısa süre zarfında YEK'e geçişin varoluşsal önem ve ivedilik kazandığı günümüzde, hidrojen veya daha genel ifadesiyle bir hidrojen-karbon toplumuna doğru dönüşüm ve bu yönde köklü bir paradigma değişikliği bir zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. YEK esaslı enerji stratejilerinde, hidrojenin giderek öne çıktığı gözlenmektedir. Hidrojen, temiz ve tükenmeyen bir enerji kaynağı olarak, yelpazesi içinde yer aldığı YEK'in, salt fosil yakıtlarıyla sınırlı olmaksızın, aynı zamanda nükleer enerjinin de yerini almaya adaydır. Elektrik enerjisi üretimi amacıyla, taşınabilir, depolanabilir özelliğe sahip hidrojen, aynı zamanda bir yakıt ve mevcut içten patlamalı motor teknolojisinin yerini alabilecek Hidrojen Yakıt Hücreleri sayesinde, ulaşım da yaygın bir kullanım alanına sahip olacaktır. “Değişime dirençli” doğalgazdan karbon ve hidrojen üretimi sayesinde açılacak yeni bir çığırın, Ekolojik Uygarlığı karakterize edecek bir dönüşümle doğacağı değerlendirilmektedir. 

Kaynakça

- Barlow, I., Tsafos, N. (2021). Russia's Hydrogen Energy Strategy, Center for Strategic and International Studies. <https://www.csis.org/analysis/russias-hydrogen-energy-strategy> adresinden alındı.
- Basu, P. (2018). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition), ISBN 9780128129920. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/pyrolysis> adresinden alındı.
- Baykara, S. Z., Figen, E. H., Kale, A., Veziroglu, T. N. (2007). Hydrogen from hydrogen sulphide in Black Sea, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 32, Issue 9, Pages 1246-1250.
- CEEW (2019) Electrification will shape the future: Dr Fatih Birol at Energy Horizons <https://www.ceew.in/news/electrification-will-shape-future-dr-fatih-birol-energy-horizons> adresinden alındı.

- Chen, L., Qi, Z., Zhang, S., Su, J., & Somorjai, G. A. (2020). Catalytic Hydrogen Production from Methane: A Review on Recent Progress and Prospect. *Catalysts*, 10(8), 858. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/catal10080858> adresinden alındı.
- Communications Department of ROSATOM (2021). Sakhalin Region, ROSATOM and Gazprom Cooperate in Hydrogen Energy. <https://rosatom.ru/en/press-centre/news/sakhalin-region-rosatom-and-gazprom-cooperate-in-hydrogen-energy/>
- Demirbas, A. (2009) Hydrogen Sulfide from the Black Sea for Hydrogen Production, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 31:20, 1866-1872. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567030802463844?journalCode=ueso20> adresinden alındı.
- DESERTEC Foundation (t.y.). <https://www.desertec.org/> adresinden alındı.
- European Environment Agency, (2022). Atmospheric greenhouse gas concentrations <https://www.eea.europa.eu/ims/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations> adresinden alındı.
- Environment and Natural Resources (n.d). <https://www.enr.gov.nt.ca/> adresinden alındı.
- Favas, J., Monteiro, E., Rouboa, A. (2017). Hydrogen production using plasma gasification with steam injection, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917310546> adresinden alındı.
- FuelCellWorks, (2022). Electrolysis of Sea Water Could Provide a New Boost for Hydrogen as an Energy Source. <https://fuelcellworks.com/news/electrolysis-of-sea-water-could-provide-a-new-boost-for-hydrogen-as-an-energy-source/> adresinden alındı.
- Garside, M. (2022). Leading lithium producing countries worldwide 2021, Statista. https://www.statista.com/statistics/268789/countries-with-the-largest-production-output-of-lithium/?utm_source=pocket_mylist adresinden alındı.
- Geddes, A., Gerasimchuk, I., Viswanathan, B., Suharsono, A., Corkal, V., Roth, J., Picciariello, A., Tucker, B., Doukas, A., Gençsü, I. (2020). Doubling Back and Doubling Down: G20 scorecard on fossil fuel funding <https://www.iisd.org/publications/g20-scorecard> adresinden alındı.
- Global Climate Change (n.d.) <https://climate.nasa.gov/> adresinden alındı.
- Haklıdır, Mehmet & Kapkin, Şule (2005). Black Sea, A Hydrogen Source. https://www.researchgate.net/publication/235009808_Black_Sea_A_Hydrogen_Source adresinden alındı.
- Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, (t.y.). Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming> adresinden alındı.
- IEA (t.y.). <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen> adresinden alındı.
- Kalamaras, C. M., Efstathiou, A. M. (2013). "Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments", *Conference Papers in Science*. <https://www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627/> adresinden alındı.
- Lindsey, R. (2020). Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> adresinden alındı.
- Meier, D., van de Beld, B., Bridgwater, A. V., Elliott, D. C., Oasmaa, A., Preto, F. (2013). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112006752> adresinden alındı.
- MDPI, (n.d.) <https://www.mdpi.com/> adresinden alındı.
- National Minerals Information Center (t.y.). Lithium Statistics and Information. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithium-statistics-and-information> adresinden alındı.
- NOAA Global Monitoring Laboratory (2022). <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/> adresinden alındı.
- NOAA Climate.gov (2022). <https://www.climate.gov/news-understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> adresinden alındı.
- Ozin, G., (2018). Decarbonizing Natural Gas: Methane Fuel without Carbon Dioxide. www.advancedsciencenews.com/decarbonizing-natural-gas-methane-fuel-without-carbon-dioxide/ adresinden alındı.
- Parry, I., Black, S.; Vernon, N. (2021). Still Not Getting Energy Prices Right: A Global and Country Update of Fossil Fuel Subsidies. <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2021/09/23/Still-Not-Getting-Energy-Prices-Right-A-Global-and-Country-Update-of-Fossil-Fuel-Subsidies-466004> adresinden alındı.
- Robinson, D. (2021). Sixth Mass Extinction of Wildlife Accelerating-Study, August 10th 2021 <https://earth.org/sixth-mass-extinction-of-wildlife-accelerating/> adresinden alındı.
- Sampson, J. (2021) ENEOS, Saudi Aramco to develop blue hydrogen and blue ammonia supply chains, H, View. <https://www.h2-view.com/story/eneos-saudi-aramco-to-develop-blue-hydrogen-and-blue-ammonia-supply-chains/> adresinden alındı.
- Saudi Arabian Oil Co. (2020). World's first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future. https://www.aramco.com/en/news-media/news/2020/first-blue-ammonia-shipment?utm_source=pocket_mylist adresinden alındı.
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., Kolb, T. (2020). State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cben.202000014> adresinden alındı.
- Sharma, T. (2021). Russia is preparing for a hydrogen energy future, Mint. <https://www.livemint.com/opinion/online-views/russia-is-preparing-for-a-hydrogen-energy-future-11630477176898.html> adresinden alındı.
- Syed, Mahin B. (2021). Chapter 6 - Technologies for renewable hydrogen production, *Bioenergy Resources and Technologies*, Academic Press, Pages 157-198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128225257000135>
- Timperley, J. (2021). Why fossil fuel subsidies are so hard to kill, *Nature* 598, 403-405. <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02847-2> adresinden alındı.
- The Japan Times (2020). Saudi Arabia sends blue ammonia green fuel to Japan in world first <https://www.japantimes.co.jp/news/2020/09/28/business/corporate-business/saudi-arabia-blue-ammonia-japan/> adresinden alındı.
- UNDP (2021). More spent on fossil fuel subsidies than fighting poverty. <https://www.un.org/africarenewal/magazine/november-2021/undp-more-spent-fossil-fuel-subsidies-fighting-poverty> adresinden alındı.
- University of Liège (2016). The Black Sea has lost more than a third of its habitable volume. *ScienceDaily*. <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/09/160901093155.htm> adresinden alındı.
- Volkov, I.L., Neretin, L.N. (2007). Hydrogen Sulfide in the Black Sea. In: Kostianoy, A.G., Kosarev, A.N. (eds) *The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 5Q. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_5_083 adresinden alındı.
- Yüksel, S., Mikhaylov, A., Ubay, G. G., & Uyeh, D. D. (2021b). The role of hydrogen in the Black Sea for the future energy supply security of Turkey. <https://www.researchgate.net/publication/356144249> adresinden alındı.
- Wee, Jung-Ho, Lee, Kwan-Young & Kim S. H. (2006). Sodium borohydride as the hydrogen supplier for proton exchange membrane fuel cell systems, *Fuel Processing Technology*, Volume 87, Issue 9, Pages 811-819. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.05.001> adresinden alındı.
- World of Change: Global Temperatures, (t.y.). <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures> adresinden alındı.
- Zhang, Y., Ruan, R. (2019). Gasification Technologies and Their Energy Potentials, in *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches*. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/gasification> adresinden alındı.
- Zickfeld, F., Wieland, A. (2012) Perspectives on a Sustainable Power System for EUMENA. http://www.desertec-uk.org.uk/reports/DII/DPP_2050_Study.pdf adresinden alındı.