



HİDROJEN EKONOMİSİ

HYDROGEN ECONOMY

Tolga URAL^a Gülşah KARACA^{b*}

^{a,b}Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 48000, Muğla

tolgaural@mu.edu.tr,

gulsahkaraca@mu.edu.tr

Özet

Dünyadaki enerji ihtiyacı artan popülasyona paralel olarak artmaya devam etmekte ancak doğal kaynaklarımız hızla tükenmektedir. Fosil yakıtlara dayalı enerji sistemleri, fosil yakıtların tükenme sürecine girmesi ve yarattıkları çevre sorunları nedeniyle gittikçe pahalılaşmaktadır. Tüketilen enerjinin önemli kısmını ithal eden ülkemizde kaynak güvenliği ve sürdürülebilirliği tehdit altındadır. Bu unsur göz önünde bulundurularak enerji üretimi yerli kaynaklarla karşılanmalıdır. Yerli üretimin yanı sıra çevre bilinci ile hareket edilerek yenilenebilir kaynaklar ve emisyon azaltıcı teknolojiler kullanılmalıdır. Fosil kaynakların tükenmesi, çevre bilinci ve yeni kaynak arayışı hidrojen enerjisini ön plana çıkarmıştır. Birçok ülke hem enerji taşıyıcısı hem de yakıt olarak kullanılacak hidrojene yönelmiştir. Hidrojen ekonomisine geçiş için gelecek planlarını yapan ve hayata geçiren ülkeler gelecekte dünya ekonomisine yön vereceklerdir. Bu çalışmada hidrojenin üretim, depolama ve taşınma adımları incelenmiş ve hidrojen enerjisi ve ekonomisi anlatılmıştır..

Anahtar Kelimeler: Hidrojen ekonomisi, hidrojenin üretilmesi, depolanması, taşınması.

Abstract

Parallel to the increasing population in world energy demand continues to rise, but our natural resources being depleted rapidly. Energy systems based on fossil fuels are becoming more expensive because of that fossil fuels entered into the exhaustion process and created environmental problems. Security of supply and sustainability are under threat in our country where significant portion of consumed energy import. Considering these factors energy production must be met by domestic resources. Acting by environmental awareness as well as domestic production, renewable resources and emissions-reducing technologies should be used. The depletion of fossil resources, environmental awareness and the search for new sources bring hydrogen energy to forefront. Many countries go towards hydrogen which can be used as energy carrier and fuel. Country who planned transition to the hydrogen economy in the future and implemented this will direct world economy. In this study, hydrogen production, storage and transport steps examined and explained hydrogen energy and economics.

Key Words: Hydrogen economy, hydrogen production, storage and transport.

1. GİRİŞ

Enerji varlığıyla yaşam kalitemizi, uluslararası ilişkileri, ekonomiyi ve çevremizin istikrarını etkileyen yegane unsurlardan birisidir [1]. Dünya nüfusundaki artışa ve yenilikçi teknolojik gelişmelere bağlı olarak enerji tüketimindeki artış mevcut rezervleri hızla azaltmaktadır. Türkiye enerji arzında yüksek oranda dışa bağımlı bir ülkedir. Bir ülkenin enerjide yüksek oranda dışa bağımlılığı o ülkenin bağımsızlığına vurulmuş bir gemidir. Sürdürülebilir enerji politikalarının temelinde enerjinin kesintisiz, sürekli, ucuz ve anında tüketiciye temin edilmesi vardır. Bu nedenle yerli ve yenilenebilir kaynak kullanılarak dışa bağımlılık en aza indirilmeli ve kaynak güvenliği sağlanmalıdır. Teknolojinin hızla geliştiği ve taleplerin arttığı günümüzde diğer bir önemli konu olan emisyon salınımı Kyoto protokolü ile uluslararası gündemde yasal bir zemine oturtulmuştur [2]. Emisyon salınımını azaltmak için ileri teknolojiler, yenilenebilir kaynaklar kullanılmaya başlanmış ve enerji verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Artan emisyon salınımının sebep olduğu küresel ısınmayı engellemek için tek önlem karada alınmamıştır. Marpol 73/78 sözleşmesiyle gemilere de emisyon sınırlamaları getirilmiştir [3]. Çünkü küresel ısınma ekosisteme geri dönülemeyecek zararlar vermektedir. Bu yalnızca bizim dünyamız değildir. Gelecek nesillerin bize emaneti olan dünyayı yaşanabilir bırakmak en temel vazifemizdir. Bu çevre bilinci çerçevesinde ve fosil yakıtların tükenerek olması nedeniyle bazı ülkeler hidrojen enerjisi üzerine gelecek planları yapmakta ve uygulamaktadırlar.

Hidrojenin karayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonları azalttığı ve kaynak güvenliğini arttırdığından dolayı öngörülebilir bir gelecek için ideal bir enerji taşıyıcısı olacağı düşünülmektedir. Hidrojen fosil yakıtların kullanılabilirdiği her yerde örneğin fırınlarda, türbinlerde, içten yanmalı motorlarda ve jet motorlarında kullanılabilir. Son zamanlarda otomobil endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Otomobillerin yanı sıra otobüs, tren, gemi, denizaltı ve roketler hidrojenle çalıştırılmaktadır. Önemli bir endüstriyel gaz olan hidrojen telefon, bilgisayar, metalürji, kimyasal, eczacılık, gübre ve gıda endüstrisi gibi birçok endüstride önemli bir hammaddedir [4].

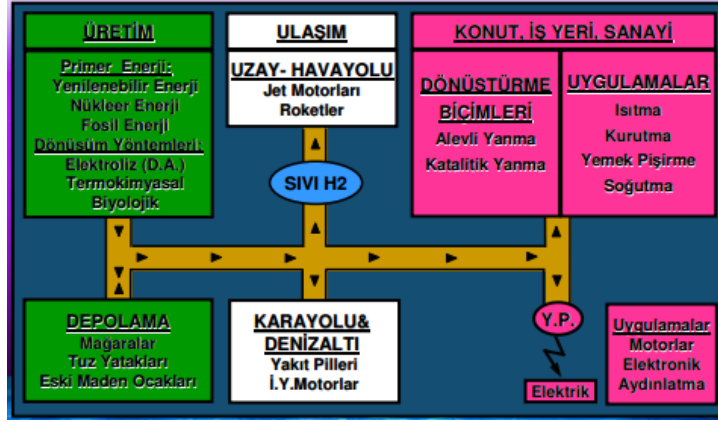
2. HİDROJEN EKONOMİSİ

Enerji günümüz çağının vazgeçilemeyen gereksinimlerinden birisidir. Uluslararası ilişkiler enerji temini ve güvenliği üzerine kurulmaktadır. Günümüz dünyasında enerjinin olmadığı bir zaman dilimi düşünülemez. Talebe anında cevap vermek için gerekli enerji çeşitli kaynaklar kullanılarak karşılanır. Bu kaynaklar fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerjidir. Enerjinin kaynaklar itibariyle çeşitlenmesi endüstride ve toplumda geniş yer kaplaması onun ekonomik faaliyetlerden biri haline gelmesine neden olmuş ve böylelikle ekonominin bir alt dalı olan enerji ekonomisi kavramı ortaya çıkmıştır. Enerji ekonomisi var olan enerji kaynaklarının ekonomik faaliyetlerle ilişkisini incelemektedir [5].

Karbon salınımını azaltmaya yönelik eğilimler birçok enerji tahmincisinin ileride güç tesislerinin ve motorlu araçların hidrojenle çalışacağı iddiasını yansıtmaktadır. Böyle bir durumda ortaya çıkan ekonomilerin çoğu hidrojen ekonomisi olarak adlandırılacaktır. İklim değişiklikleri, hava kirlenmesi, oksijen azalması, asit yağmurları, ozon tabakasının delinmesi, çevre kirlenmesi, saçılan petroler, gürültü, görüntü kirlenmesi, petrol harpleri ve nüfus artışını içeren çevre, sağlık ve toplum problemleri sebebiyle hidrojen ekonomisine geçilmesi gerekmektedir.

Önemli bir yakıt kaynağı olan hidrojenin kullanımı ilk defa 20. yüzyılın ortalarında büyük ölçekli nükleer elektrik üretme kapasitesinin kabul edilmesinde tamamlayıcı olarak keşfedilmiştir. Küresel ısınma gerçeği ve sürdürülebilir kalkınmaya ulaşma isteği hidrojenin kullanımına dair ilgiyi canlandırmıştır [1]. Hidrojen enerjisi ilk defa 1973 enerji krizi sonucunda bilim adamlarının bu soruna çare aramasıyla dünya gündemine oturmuştur [6]. 1974 yılında Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı (THEME) sonrasındaki toplantılar sonucunda Uluslararası Hidrojen Enerjisi Kurumu kurulmuş ve çalışmaya başlamıştır [7]. THEME konferansından önce bu konu neredeyse hiç bilinmezken

bugün süreli yayınlar ve konferanslar sayesinde halk hidrojenin geleceğin yakıtı olduğunu bilmektedir [8]. Hidrojen ekonomisi hidrojenin üretim, depolama, taşıma ve dağıtım aşamalarını içermektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Hidrojen ekonomisi

Hidrojen medeniyeti, normal iklim şartları, temiz hava, asit yağmurlarının yok olması, ozon tabakasının korunması, temiz çevre, petrol saçılmalarının azalması veya bitmesi, sessiz güç çevrim cihazları, bölgesel elektrik üretimi ile azalan dağıtım hatları (enerji yer altından borularla taşınacak), her ülkenin kendi yakıtını üretme imkanı, petrol savaşlarının bitmesi ve hayat seviyesinin yükselmesi gibi kalıcı çözümler getirir [9].

Hidrojen ekonomisinin Türkiye'ye yararları:

- Öz enerji kaynaklarımızı kullanarak yakıtımızı (hidrojeni) kendimiz üreteceğiz.
- Petrol, doğal gaz ve kömür için sarf ettiğimiz döviz azalacak, ve nihayet (30-40 yılda) sıfırlanacaktır.
- İhtiyaç fazlası hidrojeni Avrupa'ya ihraç edip döviz kazanacağız.
- Hidrojen üretim tesisleri ve hidrojen depolama, dağıtım ve kullanma endüstrileri yeni istihdam yaratacaktır.
- Türkiye katma değeri fazla hidrojen kullanan araç ve gereçleri ihraç eden bir ülke olacaktır.
- Türkiye ithalatını azaltıp, ihracatını arttırarak kalkınmasını hızlandıracaktır.
- Türkiye ekonomik istiklaline kavuşacaktır [9].

3. HİDROJEN YAKITININ ÖZELLİKLERİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili olmaları, tüketim merkezinden uzakta olmaları, yakıt olmamaları, depolanamaz (nükleer hariç) ve taşınmaz olmaları (nükleer hariç) gibi dezavantajlarını ortadan kaldıracak bir bağlayıcıya ihtiyaç vardır. Bağlayıcı, depolanabilir, taşınabilir, ekonomik, yenilenebilir ve temiz bir yakıt olmalıdır. Sonuç olarak bağlayıcı sentetik bir yakıt olmalıdır. Yakıt, araçlarda kullanılabilirliği, güvenlik, çevrim verimi, çok yönlü kullanıma uygunluk, çevreye uyumluluk ve ekonomi parametrelerine bağlı olarak seçilir. Ayrıca fosil yakıtların tükeneceğinin aşikar olması, fiyatlarının gün geçtikçe artması, alternatif bir sentetik yakıtı ihtiyaç duyulması, roketler için hidrojenin mükemmel bir yakıt olması, son derecede güvenilir olması, fosil yakıtlardan farklı olarak alevli yanmanın yanı sıra, katalitik, kimyasal (hidrit), elektro-kimyasal (yakıt pilleri) veya direk buhar üretimi çevrimlerle enerji üretebilmesi açısından hidrojen tercih edilmektedir. Hafiflik, iyi araç yakıtı, verimlilik, temizlik, ekonomiklik, dönüşebilirlik ve yenilenebilirlik parametreleri açısından yakıtlar karşılaştırıldığı zaman (odun, kömür, ham petrol, gaz yağı, etanol, metanol, metan, doğalgaz, benzin, hidrojen) hidrojen enerji sisteminin en iyi bağlayıcı sistem olduğu görülmüştür [9].

Alevli yanma özelliği sayesinde içten yanmalı motorlarda, gaz türbinlerinde, ocaklarda yakıt olarak kullanılabilir. Direk buhara dönüşüm özelliği sayesinde buhar türbinlerinde kullanılırken, mutfak ocakları, su ısıtıcılar ve sobalarda katalitik yanmasından faydalanılır. Emniyetli bir şekilde depolanması ise hidritleşme özelliği sayesinde olmaktadır. Yakıtın motor yakıtı olarak seçilmesinde ısıl değer yanında devindirme faktörü de dikkate alınmaktadır. Çeşitli motor yakıtlarının karşılaştırılması Tablo 1’de gösterilmiştir [10].

Tablo 1: Hidrojen ve diğer motor yakıtlarının karşılaştırmalı temel özellikleri [10].

| Yakıt | Kimyasal formül | Isıl değer (MJ/kg) | Isıl değer (MJ/m ³) | Devindirme faktörü (%) |
|----------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------|
| <i>Sıvı yakıtlar</i> | | | | |
| Fuel-oil | $C_{\leq 20} H_{\leq 42}$ | 45.5 | 38.65 | 78 |
| Benzin | $C_{5-10} H_{12-22}$ | 47.4 | 34.85 | 76 |
| Jet yakıtı | $C_{10-15} H_{22-32}$ | 46.5 | 35.30 | 75 |
| LPG | $C_{3-4} H_{8-10}$ | 48.8 | 24.40 | 62 |
| LNG | CH_4 | 50.0 | 23.0 | 61 |
| Methanol | CH_3OH | 22.3 | 18.10 | 23 |
| Ethanol | C_2H_5OH | 29.9 | 23.60 | 37 |
| LH ₂ | H_2 | 141.9 | 10.10 | 100 |
| <i>Gaz yakıtlar</i> | | | | |
| Doğalgaz | CH_4 | 50.0 | 0.040 | 75 |
| GH ₂ | H_2 | 141.9 | 0.013 | 100 |

Geniş alev cephesi, yüksek alev hızı ve yüksek detanasyon sıcaklığına sahip olan hidrojen kontrolsüz yanmaya (vuruntuya) karşı dayanıklıdır. Hidrojen motorları geniş bir tutuşma sıcaklığına sahip olduğundan 20,13 K’de (-253 K) ilk hareket verildiği zaman bile sorun çıkartmazlar ve değişik hava fazlalık katsayılarında çalıştırılabilirler. Buhar tıkaçı, soğuk yüzeylerde yoğuşma, yeterince buharlaşmama, zayıf karışım gibi akaryakıt motorlarında görülen sorunlar hidrojen motorlarında olmadığı için azot oksit (NO_x) emisyon salınımı içten yanmalı motora göre 200 kat daha azdır [10]. Hidrojenin, benzin, doğal gaz, etanol, bitkisel yağ, biyogaz, LPG gibi yakıtlara ilave yakıt olarak eklenmesiyle hidrojenin yanma karakteristikleri geliştirilir. Hidrojenin ilave yakıt olarak benzin, metan, etanol ve biyogaz ile çalışan motorlara eklenmesiyle motor performansını artırdığı motorlara yapılan testlerle tespit edilmiştir [11].

Tablo 2: Çevresel zarar ve çevresel uygunluk faktörleri [10].

| Enerji sistemi | Yakıt | Çevresel zarar (ABD \$/GJ) | Çevresel uygunluk faktörü |
|-----------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|
| Fosil yakıt | | 8.42 | |
| | Kömür | 9.82 | 0.047 |
| | Petrol | 8.47 | 0.054 |
| | Doğalgaz | 5.60 | 0.082 |
| Kömür/ sentetik yakıt | | 10.47 | |
| | Sent. gaz | 13.77 | 0.033 |
| | S. doğ. gaz | 9.13 | 0.050 |
| Güneş-hidrojen | | 0.46 | |
| | Hidrojen | 0.46 | 1.000 |

Benzin-hava karışımına %5 hidrojen eklendiğinde NO_x emisyonu %30-40 azalma göstermektedir. Yakıtlar için çevresel uygunluk bir diğer kriterdir. Fosil yakıtların ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerin çevre zararları dünya genelinde 1990 verileriyle; kömür için 9.8 ABD \$/GJ, petrol için

8.5 ABD \$/GJ ve doğal gaz için 5.6 ABD\$/GJ olarak saptanmıştır. Çevresel zarar ve çevresel uygunluk faktörü fosil yakıt sistemi, kömür/sentetik yakıt, güneş-hidrojen sistemi (güneş PV panellerinden sağlanacak enerji ile hidrojen üretim sistemi) karşılaştırılmış olup sonuç Tablo 2’de verilmiştir.

4. HİDROJEN ÜRETİMİ

Hidrojen birincil enerji kaynakları kullanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütleden elde edilen sentetik bir yakıttır. Doğalgaz, atık yağ, kömür, elektrik (fosil yakıtlardan elde edilen), rüzgar, fotovoltaik ve hidroelektrik santralinden elde edilen elektrik, biyokütle, solar kolektörler, biyokütle (yeşil algler gibi) ve nükleer enerji kullanılarak, reformasyon, kısmi oksidasyon, gazlaştırma, elektroliz, termokimyasal proses, fotobiyolojik yöntem ve yüksek sıcaklık prosesleri kullanılarak hidrojen elde edilmektedir. Bugünkü hidrojen üretiminin büyük çoğunluğu (%95’i) fosil yakıtlardan buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon veya kömür gazlaştırma ticari proseslerini kullanarak sağlanmaktadır [13].

Doğalgaz, kömür, petrol gibi fosil yakıtlardan termokimyasal yöntemler sonucunda hidrojen elde edilir. Buhar metan reformasyonu yöntemi yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup doğalgazdan hidrojen elde edilmesinde kullanılır. İki adımdan oluşan yöntemde ilk olarak doğalgaz yüksek sıcaklıkta buhara tabi tutularak hidrojen, karbondioksit ve karbonmonoksit elde edilmektedir. İkinci adımda karbonmonoksit tekrar buhara tabi tutulmakta ve tekrar hidrojen ve karbondioksit elde edilmektedir. Hidrojenin diğer önemli bir kaynağı da kömürdür. Kömür gazlaştırma işleminden geçirilerek hidrojen üretilmektedir [12]. Rafinerilerdeki atık yağlardan kısmi oksidasyon işlemi sonucunda hidrojen elde edilmektedir [13].

Elektroliz işlemiyle suyu hidrojen ve oksijenlerine ayırmak diğer bir yöntemdir. Dünya genelinde çok saf hidrojen üretmek için kullanılan bu yöntemde verim %70’lere ulaşmasına rağmen, yaygın olarak kullanılmamaktadır [12]. Rüzgar, fotovoltaik panel, hidroelektrik santralleri gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik elektroliz işleminde kullanılmaktadır. Biyokütleden gazlaştırma prosesi ile hidrojen elde edilmektedir.

Güneş enerjisinden hidrojen elektroliz yönteminin bir benzeri olan fotoelektrokimyasal yöntemle elde edilir. Elektrik akımının suya batırılmış güneş pillerinden sağlandığı yöntem elektrolizden daha verimlidir. Yeşil yosunlardan ve doğal fotosentez faaliyetlerinden faydalanılarak sudan fotobiyolojik yöntemle hidrojen elde edilmektedir.

Çeşitli hidrit bileşiklerinden kimyasal yöntemlerle hidrojen elde edilmektedir. Bu bileşiklerin en önemlisi sodyum bor hidrittir [12].

Nükleer enerji kullanarak hidrojen üretimine, dünya çapında ilgi uyanmıştır. Hidrojen; nükleer reaktörler kullanılarak elektroliz veya termoliz yöntemiyle karbondioksit emisyonuna yol açmadan üretilebilir.

5. HİDROJENİN DEPOLANMASI

Hidrojen 120 MJ/kg gibi yüksek özgül enerjiye sahip olmasına rağmen hidrojenin fiziksel yoğunluğu 90 g/m³’tür. Bu durum normal sıcaklık ve basınçta 1 kg gazın 11 m³ yer kapladığını göstermektedir. Yakıtların karşılaştırılması Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3: Yakıtların enerji içeriği ve birim hacimlerinin karşılaştırılması.

| Yakıt | Enerji içeriği (MJ/kg) | 1 kg yakıtın kapladığı hacim (m ³) |
|----------|------------------------|------------------------------------------------|
| Hidrojen | 120 | 11 |
| Benzin | 44 | 0,001 |
| Doğalgaz | 54 | 1,4 |

Hidrojenin, enerji arz ve talebi arasındaki dengeyi kurabilmek için depolanmasına ihtiyaç vardır. Hidrojenin kullanımının yaygınlaşması için daha küçük hacme daha fazla hidrojen depolayan sistemler geliştirilmelidir. Hidrojen, gaz, sıvı formunda olduğu gibi metal hidrürler, kimyasal hidrürler, nanotüpler, gibi katı maddeler içinde de depolanabilmektedir. Yöntemlerin ekonomik hale gelmesi gelişim aşamasında olduğundan biraz zaman alacaktır.

Hidrojen 50 litrelik silindirik basınçlı tanklarda 200-250 bar basınçta (bazen 600-700 bara kadar çıkabiliyor) sıkıştırılmış gaz olarak depolanmaktadır. Hafif bir yakıt olan hidrojenin hacimsel yoğunluğunun düşük olması ve tankların basınç sebebiyle ağır oluşu hidrojenden alınacak verimi azaltmaktadır [14]. Hidrojen gaz olarak doğalgazın tükendiği yer altı mağaralarında depolanabilmektedir. Sızma eğilimi diğer gazlara göre yüksek olmasına rağmen bu teknikte depolamada sızıntı oluşmamaktadır. Ayrıca doğalgaz boru hatlarında da depolanabilmektedir [5]. Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kapladığından yüksek basınç ve soğutma işlemiyle sıvılaştırılarak depolanmaktadır. Sıvı hidrojen 900 bar basınç altındaki hidrojenle aynı yoğunluktadır ancak sıvı hidrojen düşük basınçlarda depolandığından güvenlidir [14]. Depolama tankı ağırlıkça %26 hidrojen taşımaktadır [15]. Hidrokarbonlar birim hacim ve basınçta saf sıvı hidrojenden daha fazla hidrojen içermektedirler. Bu sayede hidrojen depolama ve pahalı dolum tesislerine ihtiyacı ortadan kaldırdığı için önemli olmasına rağmen araçlarda kullanımında bir hidrojen dönüştürücüye gerek duyması bu yöntemin en büyük eksikliğidir. Yüksek sıcaklıkta su buharı kullanılarak hidrokarbonlardan hidrojen ayrıştırılabilmektedir. Metanol diğer hidrokarbonlu yakıtlara göre daha kolay ayrışmaktadır ve daha az emisyon oluşturmaktadır. Hidrojen sıkıştırılmış gaz depolamaya benzeyen ancak grafitler sayesinde daha fazla depolama yapabilen karbon nanotüplerde depolanmaktadır. Hidrojen gözenekli süper aktif grafit yüzeyine depolanırken bazen soğuk ortam bazen de oda sıcaklığı gerekmektedir. Mevcut sistem ağırlık olarak %4 hidrojen depolamaktadır, gelecekte %8'e çıkarılması amaçlanmıştır. Grafitler ek ağırlık getirmesine rağmen aynı basınçta ve tank boyutunda daha fazla hidrojen depolanmasına olanak sağlamıştır [14]. Hidrojen metal hidritlerde çok hızlı bir şekilde malzeme formunda depolanabilmektedir. Metale zayıf bağlarla bağlanan hidrojen ısıtılınca serbest kalmaktadır. Genellikle absorblanan hidrojen numunenin toplam ağırlığının %2'sini oluşturmaktadır. Bazı metal hidritler ağırlıkça %5-%7'ye kadar depolayabilmektedirler ancak hidrojenin serbest kalması için daha yüksek sıcaklık gerekir [16]. Dünyada hidrojen depolama çoğunlukla sıvılaştırma ya da sıkıştırma yoluyla sıvı ya da gaz formda gerçekleştirilmektedir. Hidrojenin farklı malzemeler üzerinde depolanması üzerine teknolojiler gelişme aşamasındadır. Sıkıştırılmış hidrojen gazının tanklarda depolanması dünyada en çok gelişen teknolojilerden birisidir. Hidrojenin yüksek basınçta depolanması enerji yoğunluğunu artırır böylece sınırlı alandan faydalı şekilde yararlanır. Yüksek basınçlandırılmış hidrojen uygulamaları düşünüldüğünde iyi malzemeler ve yenilikçi tasarım kullanarak etkenlik, fiyat, güvenlik açısından tankın emniyetinin geliştirilmesi gerekmektedir [17]. Fosil yakıtlarla güç üretimi karşılaştırıldığında hidrojenin depolanma problemi hidrojen ekonomisinin büyük teknik zayıflığını göstermektedir [18].

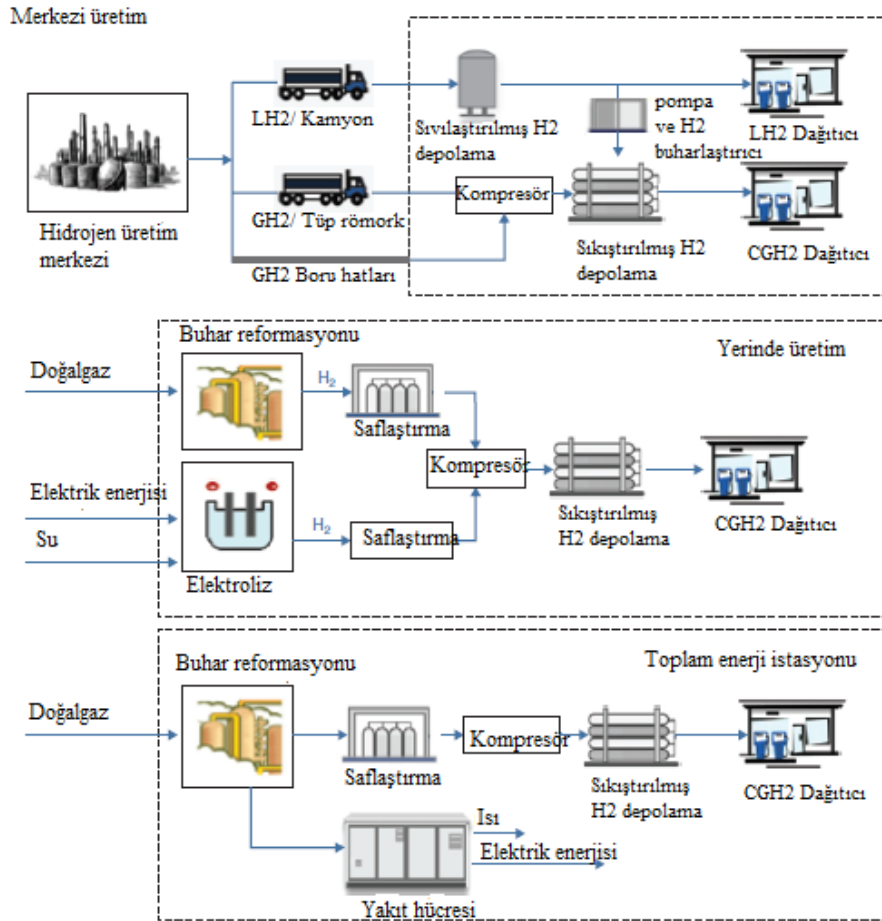
6. HİDROJENİN TAŞINMASI

Hidrojen bugünlerde boru hatlarıyla, yollarda ise silindirler, tüp römorklar, ve kriyojenik tanklar kullanılarak taşınmaktadır. Uzun mesafelerde hidrojen genellikle süper yalıtılmış tanklarda, vagonlarda ve mavnalarda kriyojenik sıvı formunda ulaştırılır ve son kullanıcıya ulaştırıldığında kullanılmak üzere buharlaştırılır. Kısa mesafeler için yüksek basınçlı silindirler kullanılabilir. 100-200 mil kadar sıvı hidrojen tüp römorkları tercih edilir, sıvı hidrojen tankı veya gaz hidrojen boru hatları 1000 mil kadar tercih edilebilir. Daha uzun yolculuklarda bu teknikler uygulanabilir değildir [18].

Taşıma ve dağıtma işlemi hidrojenin üretim proseslerine (fosil veya fosil olmayan hammadde) ve yerine (üretim geniş sahalarda merkezileştirilebilir ya da küçük dağıtılmış tesislerde yerinde üretim yapılabilir) bağlıdır. Bugünlerde hidrojeni taşımak ve dağıtmak için sıkıştırılmış hidrojen gazı ve sıvılaştırılmış hidrojen şeklinde iki temel proses vardır. Farklı hidrojen üretim alternatifleri Şekil 2'de gösterilmiştir [13].

Sıkıştırılmış hidrojen boru hatlarıyla taşınabilir (normalde 1-2 MPa basınçta çalışırlar) veya küçük mesafeler ve az miktarlar için karayoluyla taşınabilir (20-35 MPa basınçta hidrojen 2000-6200 m³ yaklaşık olarak 150-500 kg kamyonlarla taşınabilmektedir) [13].

Sıvı formdaki hidrojen (-253 °C'ye kadar soğutulmuş) gaz forma göre daha yoğundur (atmosferik basınçta 800 kat), bu nedenle kriyojenik tank kamyonları, sıkıştırılmış hidrojen gazı tüp römorkundan önemli derecede daha fazla sıvı hidrojen taşıyabilmektedirler (50000 litre yaklaşık olarak 10 katı ve 3700 kg). Sıvı hidrojen eldesinde teknolojik bir zorluk hidrojenin enerji içeriğinin %30'unun harcanmasıdır. Ayrıca dağıtım, hidrojen dolun istasyonlarının olası yapılandırmasında kullanım noktasında kısmen problemler ortaya çıkarmaktadır. Bugünkü örnek projelerin çatısında 200 dolun istasyonu işletilmekte veya henüz yapım aşamasındadır. Toplam enerji istasyonu olarak adlandırılan bazı orta seviye çözümler yerinde hidrojen üretim istasyonuna entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. Burada merkezi üretim yerinde üretimden farklı olarak yakıt pili kullanılarak elektrik enerjisi ve ısı elde edilmiştir. Kullanım noktasında hidrojen maliyetinin ekonomik etkileri bakımından, çok yüksek altyapı yatırımlarının gerekmesine rağmen borularla taşımının en uygun seçenek olduğu görülmüştür (500-1500 k€/km). Taşıma ve dağıtım işleminin son hidrojen maliyetine katkısı merkezi üretim durumunda yaklaşık olarak 5-10 €/GJ olmaktadır [13].



Şekil 2: Merkeziden dağıtılmış üretime olası hidrojen taşıma ve dağıtım şeması [13].

7. HİDROJEN EKONOMİSİNE GEÇİŞTE ENGELLER

Hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi üzerine olumlu gelişmelere rağmen, teknolojinin gelişmesi, piyasanın kabulü ve hidrojene yönelik yatırımlarla ilgili birtakım engeller çıkmaktadır [20]. Hidrojen ekonomisi gelişmeyi tamamladığı evrede hidrojen tamamen yenilenebilir kaynaklardan elde edilecektir. Ancak bu sistem ekonomik değildir. Bu nedenle hidrojen temelli bir enerji sistemine geçiş biraz zaman alacaktır. Tablo 3'te hidrojen ekonomisini teşvik eden ve engelleyen unsurlar gösterilmektedir.

Tablo 3: Hidrojen ekonomisini teşvik eden ve engelleyen unsurlar [20].

| HİDROJEN | EKONOMİSİ |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <i>Hidrojen ekonomisini teşvik eden faktörler</i> | <i>Hidrojen ekonomisinin önündeki faktörler</i> |
| Küresel çevresel sorunlar | Yakıt hücresi uygulanabilirliği/maliyeti |
| Yerel hava kalitesi kaygıları | Yakıt hücreli araçların güvenilirliği/dayanıklılığı |
| Enerji güvenliği ve arzı konuları | Lojistik yatırım |
| Sürdürülebilir kalkınma konuları | İçten yanmalı motorlardaki ilerlemeler |
| Teknolojik yenilikler | Fosil yakıt bağımlılığı |

Hidrojen yakıt döngüsünün her bir aşamasının verimi %90 olsa da üretim, depolama, dağıtım ve yakıt hücrelerinde kullanılmasına kadar verim azalmakta ve %60'ın altına düşmektedir [21]. Yakıt hücrelerinin ve diğer hidrojen teknolojilerin kitleler tarafından kabul görmesi için maliyet ve teknolojiyle ilgili sorunların üstesinden gelinmelidir. Hidrojen kullanan yakıt hücreleri temiz enerji kaynağı kullanılarak hidrojen elde edildiğinde güç üretimine temiz ve etkin enerji tedarik edecektir [22].

Hidrojen ekonomisine geçiş için ihtiyaç duyulan altyapının oluşturulması, araçların ve yakıt pillerinin maliyetlerinin düşürülmesi, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımıyla ilgili teknik problemlerin çözümü hükümet ve sanayiden gelecek yatırımlara bağlıdır [21]. Birçok çalışma hidrojen teknolojilerinin halen talepleri karşılamada yetersiz ve pahalı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle aşağıdaki maddeler gerçekleştirilmelidir:

- Daha etkin ve daha ucuz hidrojen üretim yolları geliştirilmelidir.
- Yakıt hücresi fiyatlarının düşüşüne karşın, çalışma süreleri arttırılmalıdır.
- Ulaştırma sektöründeki hidrojen depolama sistemleri kritik öneme sahiptir.
- Yakıt hücreli araçların piyasaya girişi ve araç sayısının artması için önkoşul, yeterli hidrojen dağıtım altyapısının mevcudiyetidir [23].

8. HİDROJEN EKONOMİSİNE GEÇİŞTE DİKKATE ALINMASI GEREKEN UNSURLAR

Clark II ve Rifkin'e göre fosil yakıt ağırlıklı bir ekonomiden yeşil hidrojen temelli (güneş, rüzgar ve su kaynaklı) bir ekonomiye geçişte optimize edilmesi gereken unsurlar vardır [19]. İkinci dünya savaşından bu yana endüstrileşmiş ülkeler, hükümetin tüm araştırma geliştirme paralarını dizel motor yakıtlarından internete kadar her şeyin ticarileşme sürecine destek için kullanmışlardır. Vergi indirimleri, devlet teşvikleri ve hatta tedarik politikası yeni teknolojilerin ticarileştirilme sürecinde büyük öneme sahiptir. Yeni teknolojiye girişte bir diğer yol yönetmelikler ve standartlardır. Yenilenebilir enerji sadece ekonomik güvenlik ve çevre için iyi değildir aynı zamanda yeni iş fırsatları da yaratmaktadır [19].

Küçük ve orta ölçekli işletmelerin hidrojenin araştırma, geliştirme ve yayma faaliyetlerine katılım sağlamaları gerekmektedir. Hidrojene geçiş çok büyük bir paradigma değişikliği olduğundan, sağlam ve iyi düşünülmüş bir değişim ihtiyacı göz önünde bulundurulmalıdır. Benzin ve sıkıştırılmış doğalgaz kullanılması hidrojen ekonomisine geçişin bir parçası olmuştur. Gelişen hidrojen ekonomisinin en büyük sorunlarından birisi dünyanın petrol ve kömüre bağımlılığının artmasıdır. Doğalgaz için sürekli büyüyen bir pazar vardır. Temiz yanan bir yakıt olduğundan birçok tesis doğalgazlıdır. Doğalgaz evlerde

güç için, araba ve otobüslerde yakıt olarak bu kadar hızla kullanılmaya devam edilirse temel enerji güvenlik problemleri oluşacak, azalan kararlılıkla daha yüksek fiyatlardan daha fazla petrol ve kömür ithal edilecektir [19].

Enerji verimi ve enerjinin depolanması, sürdürülebilir bir hidrojen geleceğine entegre bir geçişin önemli unsurlarındandır. Hem talebi düşürmek için, hem de güvenlik konularına dikkati çekmek açısından enerjinin depolanması ve verimi önemlidir [19].

9. SONUÇ

Çevre kirliliği ve küresel ısınmanın çevreye, topluma ve ekonomiye etkilerini yavaşlatabilmek, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltabilmek, enerji kaynak güvenliğini sağlamak amacıyla hem enerji taşıyıcısı hem yakıt olarak kullanılabilen temiz hidrojen ekonomisine biran önce geçmek gereklidir. Hidrojen fosil yakıtlardan biyokütle ya da sudan elde edilebilmektedir. Hidrojen ekonomisi gelişmeyi tamamladığı evrede tamamen yenilenebilir kaynaklardan üretilecektir. Ancak şimdilik böyle bir sistem ekonomik olmadığından fosil yakıtlar hidrojen kaynağı olarak daha yoğun kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar sürekli emre amade iken yenilenebilir enerji kaynakları süresizdir ve talebe anında cevap veremezler. Bu olumsuzluklar yenilenebilir kaynaklar hidrojen enerjisiyle beraber kullanılarak giderilmektedir. Rüzgar türbinlerinde, güneş ve hidroelektrik santrallerde kullanım fazlası elektrik hidrojen şeklinde depolanabilmekte ve gerektiğinde elektrik olarak tekrar sisteme verilebilmektedir. Sürdürülebilir bir kalkınma için yol haritalarına hidrojeni ekleyen ve bu yönde çalışmalarına hız veren birçok ülke gelecekte ekonomiye yön veren ülkeler olacaktır. Birçok ülke hidrojeni yakıt olarak araçlarda kullanmaya başlamıştır. Hidrojen ekonomileri hidrojenin üretilmesi, depolanması, taşınması ve dağıtılması için teknolojilerin geliştirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Hidrojen ekonomisine geçişte bazı engeller ve dikkat edilmesi gereken unsurlar vardır. Hidrojeni kitlelerin kabul edebilmesi için maliyet ve teknolojiyle ilgili sorunlar devlet ve özel sektörün işbirliğiyle çözüme ulaştırılmalıdır. Yakıt hücresi fiyatları azaltılmalı ve çalışma süreleri arttırılmalıdır. Ulaştırma sektöründeki hidrojen depolama sorununa çözüm bulunmalıdır. Hidrojenin üretimden kullanıma kadar geçen sürede verimlilik kayıpları azaltılmalıdır.

10. TEŞEKKÜR VE KATKI BELİRTME

Hidrojen Ekonomisi adlı makalemiz, 01-03 Ekim 2015 tarihleri arasında düzenlenen 3. Anadolu Enerji Sempozyumu'nda bildiri olarak sunulmuştur.

11. KAYNAKLAR

[1] Fanchi, R.J. (2005). "Energy in The 21st Century", World Scientific Publishing Company.

[2]Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, [[Erişim Tarihi 26.07.2015](http://iklim.cob.gov.tr/iklim/AnaSayfa/Kyoto.aspx?sflang=tr)]
<http://iklim.cob.gov.tr/iklim/AnaSayfa/Kyoto.aspx?sflang=tr>.

[3]UDHB, Ulaştırma Denizcilik Ve Haberleşme Bakanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi, <http://imo.udhb.gov.tr/TR/19Marpol.aspx>, [[Erişim Tarihi 27.07.2015](http://imo.udhb.gov.tr/TR/19Marpol.aspx)].

[4] Apak, S., Tuncer, G., Atay, E. (2012). "Hydrogen Economy and Innovative Six Sigma Applications for Energy Efficiency", Procedia - Social and Behavioral Sciences, 41: 410 – 417.

[5] Tutar, F., Eren, M. V., (2011). "Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye", International Journal of Economic and Administrative Studies, 3 (6) : 1-26.

[6] Kurtuluş, G., Tabakoğlu, F. Ö., Türe, İ. E., (2006). "Türkiye'de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve Unido-Ichet", Türkiye 10. Enerji Kongresi, s. 459-466.

- [7] Veziroglu, T.N., (2000). “Quarter Century of Hydrogen Movement 1974–2000”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 25, Issue 12, s. 1143-1150.
- [8] Momirlan, M., Veziroglu, T.N., (2002). “Current Status Of Hydrogen Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 6(1-2):141-179.
- [9] Veziroğlu, N., Türe, E., (2006). “21. Yüzyılın Enerjisi: Hidrojen Enerji Sistemi”, *Türkiye 10. Enerji Kongresi, İstanbul, Türkiye*.
- [10] TÜSİAD, (1998). “21. Yüzyıla Girerken Türkiye’nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi”.
- [11] Al-Baghdadi, M.A.S. and Al-Janabi, H.A.S., (2000). “Improvement of Performance and Reduction of Pollutant Emission of a Four Stroke Spark Ignition Engine Fueled With Hydrogen–Gasoline Fuel Mixture”. *Energy Conversion & Management*, 41(1):77–91.
- [12] Aslan, Ö., Dinçer, M.Z., (2009). “Sürdürülebilir Kalkınma Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Hidrojen Enerjisi: Türkiye Değerlendirmesi”, *İstanbul Ticaret Odası*.
- [13] Conte, M., (2009). “Hydrogen Economy”, *Casaccia Research Center, Rome, Italy, Elsevier*.
- [14] Şimşek, E., Şen, Ü., İder, M., Ata, A., (2006). “Hidrojen Depolayıcısı Olarak Sodyum Borhidrür Kullanımı”, *III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi Bildiri Kitabı*, s. 81-85.
- [15] Sherif, S.A., Barbir, F., Veziroğlu, T.N., (2005). “Wind Energy and The Hydrogen Economy-Review of The Technology”, *Solar Energy*, 78(5): 647-660.
- [16] Sakintuna B., Darkrim F.L., Hirscher M., (2007). “Metal Hydride Materials for Solid Hydrogen Storage: A Review”. *Int J Hydrogen Energy*, 32: 1121–1140.
- [17] Jorgensen SW., (2011). “Hydrogen Storage Tanks For Vehicles: Recent Progress and Current Status”, *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 15: 39–43.
- [18] Pudukudy, M., Yaakob, Z., Mohammad, M., Narayanan, B., Sopian, K., (2014). “Renewable Hydrogen Economy in Asia – Opportunities and Challenges: An Overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30 : 743–757.
- [19] Clark II, WW., Rifkin, J.A., (2006). “Green Hydrogen Economy”, *Energy Policy*, 34: 2630–2639.
- [20] Dixon R. K., (2007). “Advancing Towards A Hydrogen Energy Economy: Status, Opportunities And Barriers”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12: 325-341.
- [21] Waegel A., Byrne J., Tobin D., Haney B., (2006). “Hydrogen Highways: Lessons on the Energy Technology-Policy Interface”, *Bulletin of Science, Technology & Society*, 26(4): 288-298.
- [22] Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M.A., (2005). “On Hydrogen and Hydrogen Energy Strategies: I: Current Status and Needs”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(3): 255-271.
- [23] Umar, M.K., Nasir, A., Khanji, H., Tariq, M.A., (2009). “Vision for Hydrogen Economy in Pakistan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*”, 13: 1111-1115.