



HİDROJENİN EKONOMİK YÖNDEN İRDELENMESİ

ECONOMIC EXAMINATION OF HYDROGEN

Servet ÖZKAN

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Bölümü, Van, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-8101-9173

Ahmet YAKIN

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-6716-2811

Cite As: Özkan, S. & Yakın, A. (2021). "Hidrojenin Ekonomik Yönden İrdenmesi", International Social Mentality and Researcher Thinkers Journal, (Issn:2630-631X) 7(52): 3047-3056.

ÖZET

Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenerek olması, bilim adamlarını alternatif yakıtlar ile ilgili çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir. Hidrojen gazının suyun elektrolizi ile elde edilmesi, çevreye zararlı egzoz emisyonu vermemesi, doğa dostu olması, fosil kökenli bir yakıt olmaması gibi özelliklerinden dolayı karayolu taşıtları, deniz yolu taşıtları, hava taşıtlarında, tarım makinelerinde kullanılabilir. Elektrikli araçların pahalı olması, günümüzde içten yanmalı pistonlu motorların üretiminin devam etmesi bu araçlarda alternatif yakıt kullanımını daha cazip hale getirmiştir. Bu çalışmada hidrojen yakıtının, kara yolu taşıtlarında, deniz yolu taşıtlarında, hava araçlarında ve tarım makinelerinde kullanılmasının avantaj ve dezavantajları, hidrojen yakıtının özellikleri ve diğer yakıtlarla kıyaslaması yapılmıştır. Hidrojenin, benzinli ve dizel araçlarda, kara, hava, deniz taşıtlarında alternatif yakıt olarak kullanılması ile ülkemize hem ekonomik hem de ekolojik olmak üzere her açıdan katkı sağlanacaktır. Ülkemizde hidrojen üretimine geçmesi ekonomik olarak dışa bağımlılıktan kurtaracak en önemli projelerden biri olacaktır. Üç tarafı denizlerle kaplı olan ülkemizin üretiminin temel kaynağı su olan hidrojen üretimine geçişi diğer ülkelere göre daha ekonomik ve hızlı olacaktır. Fosil yakıtlara olan ortalama %87 bağımlılığın ülkemiz açısından ekonomik strese ve yapılabilecek önemli yatırımlara engel teşkil etmektedir. Aynı zamanda yıllık 230 milyar dolarlık bir enerji ithalatı cari açıkların en önemli sebebi olmakta ve bu aynı zamanda istihdamın gelişmesini, refahın artmasını engellemektedir. Fotovoltaik panellerden elde edilecek elektrik enerjisi ile suyun elektrolizinden hidrojen üreten yöntemle 1 m³ sudan 108.7 kg hidrojen elde olunabilmektedir ki, bu 422 litre benzine eşdeğerdir. Bu veriye göre üretim girdi maliyetlerini ciddi manada azaltmaktadır ve hidrojen enerjisi ülkemizi için bağımsız milli ve sürdürülebilir bir ekonomik yapıya sahip olmasını sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: hidrojen, ekonomi, yakıt pilleri

ABSTRACT

The fact that fossil fuels will be used up in the near future has encouraged scientists to conduct studies on alternative fuels. Hydrogen gas can be used in road vehicles, sea vehicles, aircraft, agricultural machinery due to its properties such as being obtained by electrolysis of water, not giving harmful exhaust emissions to the environment, being environmentally friendly, not being a fossil fuel. The fact that electric vehicles are expensive and the production of internal combustion piston engines continues today has made the use of alternative fuels in these vehicles more attractive. In this study, the advantages and disadvantages of using hydrogen fuel in land vehicles, sea vehicles, aircraft and agricultural machinery, the characteristics of hydrogen fuel and its comparison with other fuels were carried out. Hydrogen in gasoline and diesel vehicles, land, air and sea vehicles, will contribute to our country in all respects, both economically and ecologically. The transition to hydrogen production in our country will be one of the most important projects that will economically save it from external dependence. The transition of our country's production, which is covered by the seas on three sides, to hydrogen production, the main source of which is water, will be more economical and faster than in other countries. On average, 87% of the dependence on fossil fuels is an obstacle to economic stress and significant investments that can be made from the point of view of our country. At the same time, an annual energy import of 230 billion dollars is the most important reason for the current account deficit, and this also prevents the development of employment and the increase of prosperity. With the electrical energy obtained from photovoltaic panels, 108.7 kg of hydrogen can be obtained from 1 m³ of water by the method that generates hydrogen from the electrolysis of water, which is equivalent to 422 liters of gasoline. According to this data, production significantly reduces input costs, and hydrogen energy will ensure that our country has an independent national and sustainable economic structure.

Keywords: hydrogen, economy, fuel cells

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların çevreye, insanlara ve canlılara verdiği zararlardan dolayı günümüz karayolu, denizyolu ve tarım makinelerinde kullanılan LPG, motorin, doğalgaz, benzin gibi yakıtlara alternatif bir yakıt olarak hidrojeni biyogazları alkol kökenli yakıtları söyleyebiliriz. Hidrojen sudan elektroliz yöntemiyle elde edildiği gibi, fosil yakıtlardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından, atık gaz akımlarından elde edilmektedir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması benzin yakıtına göre oktan sayısının yüksek olması benzinli ve dizel motorlar için bir avantajdır aynı zamanda hidrojenin hem çok zengin ve hem de çok fakir karışımlarda tutuşması önemli avantajlardan biridir. Elementler arasında en hafif olan hidrojen diğer elementlere kıyasla en yüksek enerjiye sahiptir. Amonyak elde etmede de hidrojen kullanılır.

Elektrik enerjisi her ülkenin gelişmişlik düzeyinin bir göstergesidir. Hem sanayileşme hem de sanayinin temel girdisi olması açısından önemlidir. Ayrıca sanayinin temel girdisi olarak önemlidir(Kürker, 2007).

Hidrojenin oktan sayısı ve otto prensibine göre çalışan benzinli motorlara belli oranlarda katılarak benzinli motorun fakir karışımlarda çalışmasını sağlayarak egzoz emisyonlarını düşürür. Dizel motordan çok benzinli motorlar için daha uygun bir yakıttır (Gül, 2006).

Suyun elektrolizi ile elde edilebilmesi, benzinli motorda benzin yakıtına göre motordan daha yüksek güç sağlaması, çevreye ve canlılara zararlı olmaması hidrojeni alternatif yakıt durumuna getirmektedir. Motorlarda hidrojenin yakıt olarak kullanımı 1920lerden günümüze kadar gelmektedir. Ekonomik faktörler ve mevcut enerji sistemleri hidrojenin uygulamasının önündeki sakıncalardır. Çevre kirliliğini en aza indirmek için kullanımının başlamasını zorlamaktadır (Ültanır, 1997).

Benzinli ve dizel motorlarda, hidrojen, doğalgaz, likid petrol gazı, biyodizel, alkol kökenli yakıtlardan etil ve metil alkol gibi alternatif yakıtların üzerindeki araştırmalar artmıştır. Yapılan araştırmalarda dizel yakıtı yerine bitkisel yağ ve metil esterlerinden elde edilen yakıtların doğrudan, diğer yakıtların ise genellikle ikinci yakıt olarak kullanılabilceğini göstermiştir (Carraretto ve ark, 2004).

Yanma odasındaki oluşan sıcak noktalar erken ateşlenmeye sebebiyet verir. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle; motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir. yanma odası sıcaklığının düşürülmelidir. Fakir karışımlar, egzoz gazları resirkülasyonu (EGR), supap bindirme süresinin azaltılması, yanma odasına su püskürtülmesi, giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması gibi yöntemler kullanılır. Ancak karışıma EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi sonucu farklılıkları artıracak ve motorun düzenli çalışmasını önleyecektir. böylece EGR sonucu ortalama efektif basınçta düşecektir (Soruşbay ve Arslan, 1988).

Hidrojenin alternatif yakıt olarak kullanılmasında hava-yakıt karışım oranları için tutuşma sınırının çok geniş aralıkta tutulmasıdır. Hidrojenin tutuşması çok geniştir. hava fazlalık katsayısı hidrojen için 0,15-4,35 benzin için hava fazlalık katsayısı 0,3-1,7 değerleri arasındadır. Hidrojen-hava karışımlarını yanması için enerji miktarında diğer yakıtlara oranla çok düşüktür. bu durum tutuşma garantisi sağlaması açısından otto prensibine göre çalışan motorlarda avantaj sağlamakla birlikte, erken tutuşma ve geri tutuşma gibi sorunlarda oluşturmaktadır. Dizel araçlarda dizel yakıtı hidrojenin tek veya ek yakıt olarak uygulandığı uygulamalar mevcuttur. Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Gaz halindeki hidrojen, aynı hacimdeki havadan yaklaşık 15 kez daha hafiftir. İçten yanmalı motorlarda kullanılmakta olan diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında sıvı hidrojenin sıvı hidrokarbonlara oranla yaklaşık 10 kere daha hafiftir. Gaz halindeki hidrojenin metan gazından 10 kere daha hafif olduğu görülmektedir (Soruşbay ve Soruşbay, 1988).

Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı motorlarda, atmosfere atılan zararlı emisyon olarak NO_x'leri sayabiliriz. Fakir karışımlarda NO_x'leri azalmaktadır. Bundan dolayı motorun gücünde düşmeler olacaktır. NO_x emisyonu da azalmak için, hem ateşleme zamanının geciktirilmesi hem de karışımın içeri alındığı emme manifolduna su püskürtmek gerekir. Ayrıca motorun termik verimini azaltma emisyonları da azaltmaktadır. Direk hidrojeni yakıt odasına püskürtme NO_x emisyonunu azaltır(Baker, 1981).

Bu çalışmada alternatif yakıtlar arasında gösterilen, hidrojen yakıtının benzinli ve dizel motorlarda kullanılması, deniz ve hava araçlarında kullanılması, bunların tanıtılması, hidrojenin avantaj ve dezavantajları amaçlanmıştır.

2. HİDROJENİN ÖZELLİKLERİ

Hidrojen renksiz, kokusuz, tatsız ve saydam bir yapıya sahiptir. Oldukça iyi bir ısı iletkenidir. Atom ağırlığı 1.00797 kg/kmol ve atom numarası 1'dir(Finegold ve ark, 1973).

Tablo 1. Hidrojenin Genel Özellikleri(Veziroğlu ve Barbir, 1998).

Özellikler	Değeri	Birimi
Molekül Ağırlığı	2.016	kg/kmol
Yoğunluğu	0.0838	kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141.9	MJ/kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11.89	MJ/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119.9	MJ/kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10.05	MJ/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20.3	K
Sıvı Yoğunluğu	70.8	kg/m ³

Kritik Noktadaki Sıcaklık	32.94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12.84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31.40	kg/m ³
Kendinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% hacimsel
Havada Stokiyometrik Karışım	29.53	% hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0.61	cm ² /s
Özgül Isısı	14.89	KJ/kg.K

2.1. Hidrojenin Kullanım Alanları

Taşıtlarda hidrojenin kullanılması direk gaz halinde veya yakıt pilleri aracılığı ile kullanımı konusunda da, BMW, Dodge, Buick, Daimler-Benz, Suzuki firmalarının deneme otomobilleri, Macchi Ansaldo'nun ve MAN firmasının S1202 otobüsleri, Kanada demiryollarının lokomotifleri ile Almanya, Avustralya ve Kanada donanmaları için imal edilen denizaltılar sayılabilir. Bunların dışında, %15-20 hidrojen ve %80-85 doğal gaz karışımından oluşan hytane adlı yakıt ile çalışan yeni bir otobüs 1993 senesinden beri montreal de (Kanada) denemektedir.

2.2. Yakıtlarda Aranılan Özellikler

- ✓ Çevreye fazla zarar vermemesi,
- ✓ Depolanabilmesi,
- ✓ Kolay bulunabilmesi,
- ✓ Isının, mekanik ve elektrik enerjisine kolay ve hızlı dönüştürülmesi,
- ✓ Güvenli olarak istenilen yere nakledilmesi,
- ✓ Yüksek verimle enerji üretebilmesi, şartları aranmaktadır.
- ✓ Ekonomik olması.

Havadaki azot 'tan dolayı sadece hidrojenle NO_x oluşumu söz konusudur. Bunun dışında hidrojen çevreye zararlı emisyonlar oluşturmaz. Çevre dostu enerji seviyesi yüksek bir yakıttır.

2.3. Hidrojenin Avantaj ve Dezavantajları

Hidrojen, küresel ısınmaya sebep olan, fosil yakıtlara olan ihtiyacı azaltır. Hidrojen, benzinli ve dizel motorlarda metan, etan, doğal gaz, petrol la birlikte yakıt olarak kullanılabilir. Böylece içten yanmalı motorlarda performansı arttığı gibi, zararlı egzoz emisyonlarını azaltarak hava kirliliğini de azaltır(A).

2.4. Avantajları

Hidrojen temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı, enerjiye dönüştürülebilir bir element ayrıca suyun hidrolizi ile elde edilebilmesi gibi özelliklerinden dolayı Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılayabilir. Türkiye'nin üç tarafının denizlerle çevrili olması hidrojenin elde edilmesi açısından önemlidir. Hidrojenin yenilenebilir enerji kaynağı olması, fosil yakıtlardan daha verimli olması, elektrikten veya solar enerjiden üretilmesi, çevreyi kirlilememesi, sudan elde edilmesi, çok temiz bir yakıt olması hidrojenin avantajlı tarafları arasında sayılabilir.

Tablo 2. Hidrojenin Alternatif Yakıtlarla Kıyaslanması

Yakıt	Hidrojen	Metan	Propan	Benzin	Metanol
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı(°C)	585	540	510	440	385
Min. tutuşma enerjisi (MJ)	0.02	0.28	0.25	0.25	-
Tutuşma aralığı (% hacim)	4-75	5-15	2.2-9.5	1.3-7.1	6.7-3.6
Max. Laminer alev hızı(cm/s)	270	38	40	30	-
Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	0.63	0.2	-	0.08	-

2.5. Dezavantajları

Hidrojenin kullanılması depolanması yönündeki teknolojilerin yetersiz olması, Tutuşma gecikmesi meydana gelir. Ateşleme sisteminde düzensizlikler meydana gelir. Yanma tam olarak üst ölü noktada gerçekleşmez. Hidrojen enerjisinin bilinmemesi, zararlı egzoz emisyonlarından sadece azotoksitin oluşması. Enerji endüstrisinde kısa, orta ve uzun vadeli döneme ait yatırımların olmaması. Hidrojenin depo edilebilme sorunu, içten yanmalı motorlarda yanma esnasında geri tepkimelere sebep olması, hidrojen dolmuş istasyonları, taşıtlarda hidrojen kullanımının ek teçhizatlar gerektirmesi gibi dezavantajları vardır. Şirketler tarafından hidrojenin Pazar payının anlaşılması(Yılmaz, 2006).

2.6. Türkiye'deki Hidrojen Projeleri

- ✓ Hidroelektrik santrallerinde hidrojenin üretilerek doğal gaz boru hatları ile sevki edilmesi
- ✓ Türk Traktör Fabrikasında üretilen traktörlerde hidrojen kullanımı
- ✓ Hidrojenin evlerde kullanılması, güneş pillerinden elde edilen elektrik ile hidrojen üretilmesi amaçlanmaktadır.
- ✓ Tatlı Sorgum bitkisinden hidrojen üretilmesi
- ✓ Ankara'daki bir hastanede hidrolizle oksijen ve hidrojen üretilerek, oksijen ve hidrojenin kullanılması amaçlanmaktadır.
- ✓ Rüzgar dan hidrojen üretilmesi
- ✓ Hidrojenin hava, kara ve deniz araçlarında kullanılması
- ✓ TEMSA'nın ürettiği hidrojenle çalışan otobüsler.
- ✓ Güneş enerjisinden hidrojen üretilmesi gibi projeler bulunmaktadır.

2.7. Sera Gazları

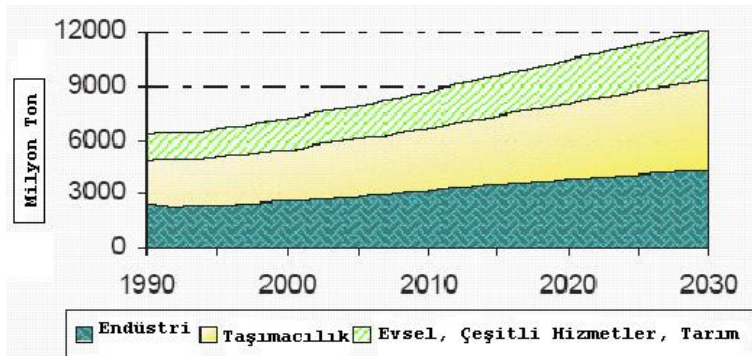
Küresel ısınmaya sebep olan sera gazlarının en tehlikelisi olarak Sülfür Heksaflorür (SF₆), en tehlikesiz sera gazı ise CO₂ gibi görünmektedir.

Tablo 3. Kyoto Protokolü'nde belirtilen sera gazları(Bekiroğlu, 2016).

Sembol	İsim	CO ₂ Eşdeğeri	Ana Kaynak
CO ₂	Karbon dioksit	1	Fosil yakıtların yanması, orman yangınları, çimento üretimi
CH ₄	Metan	21	Landfill sahalar, petrol ve doğal gazın üretim ve dağıtımı, çiftlik hayvanlarının sindirim sistemlerindeki fermantasyon
N ₂ O	Diazot monoksit	310	N ₂ O fosil yakıtların yanması, gübreler, naylon üretimi
HFCs	Hidroflorokarbonlar	140 ~ 11.700	Buzdolabı gazları, alüminyum eritme, yarı iletken üretimi
PFCs	Perflorokarbonlar	6.500 ~ 9.200	Alüminyum üretimi, yarı iletken üretimi
SF ₆	Sülfür Heksaflorür	23.900	Elektrik iletimi ve dağıtım sistemleri, magnezyum üretimi

Hidrojen fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı diğer yakıtlara göre daha avantajlıdır. Hem kendi kendine tutuşma sıcaklığı hem de oktan sayısının yüksek olduğu hidrojen, dizel motorlardan çok benzinli motorlar için daha uygun bir yakıttır. Benzin yakıtına belli oranlarda katılan hidrojen, motorun hem fakir karışımlarda çalışmasını sağlar hem de zararlı egzoz emisyonlarını azaltır(Soruşbay, 2003). Yakıt olarak hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanılması, kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı, buji ateşlemeli benzinli motorlar için uygun bir yakıttır(Ganes ve ark, 2008). Enjeksiyonlu ve karbüratörlü motorlarda hidrojen karışımsız olarak kullanılabilir(Verhelts ve Sierense, 2005). Yoğunluğun düşük olması, karışımın silindirin dışında hazırlanarak motora verildiği karışımlarda motorun gücünde azalma olur. Hidrojen yakıtının yanma karakteristiklerini geliştirmek için biyogaz, bitkisel yağ, etanol, doğal gaz, benzin ve LPG gibi yakıtlara ilave edilebilir(Al- Baghdadi ve Al- Janabi, 2000; Choi ve ark, 2005).

Abdul ve Al-baghdadinin yaptıkları çalışmada, yakıt olarak test motorunda, etilalkole hidrojen ilave etmişlerdir. Deney sonucunda motor performansının iyileştiği görülmüştür. Hidrojen ilavesiyle motor gücü artarken alkol ilavesiyle NO_x emisyonları azalmıştır. Benzin yakıtına %30 etilalkol eklenip kütsel olarak %8'de hidrojen ilave edilip oluşturulan yakıtla yapılan deneylerde, karbon monoksit, azot oksit, özgül yakıt tüketimleri azalmıştır(Abdul ve Al- Baghdadi, 2000).

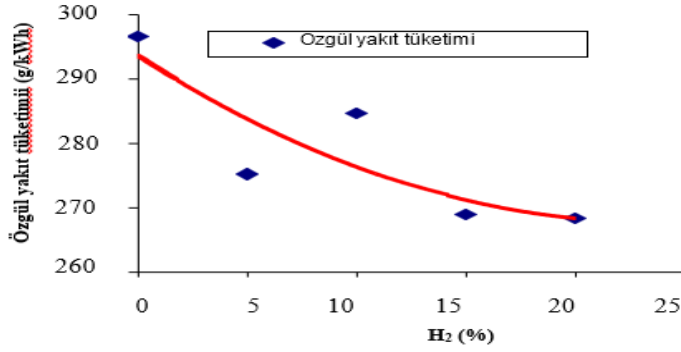


Şekil 1. Dünyanın 1990 – 2030 Dünya Geneli Enerji Tüketimi (Tahmini) (Milyon Ton Petrol Eşdeğeri)

Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenmesi enerji arz ve talebinin oluşturduğu durumlarda, arz ve talep arasındaki farkın giderek artması 2020'li yıllardan sonra fosil yakıtlardaki azalma nedeniyle kaçınılmaz görünmektedir. Dünyada elektrik enerjisinin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır.

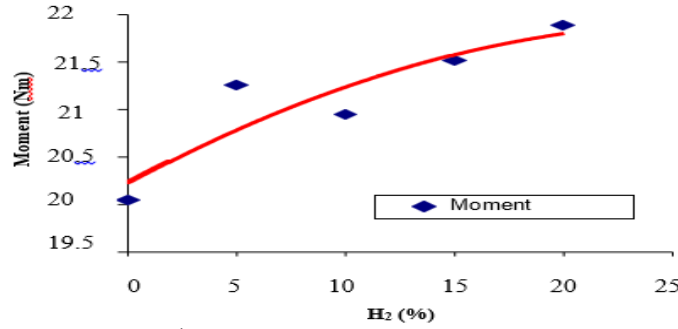
2.8. Dizel Motorlarında Hidrojenin Ek Yakıt Olarak Kullanılması

İçten yanmalı motorlarda hidrojenin dizel yakıtla birlikte ek yakıt olarak kullanımı, dizel yakıtın kullanımı ile aynıdır. Erken ateşlemeye etkisi olmayan bir oranda hidrojen-hava karışımı silindire alındıktan sonra piston üst ölü noktaya yaklaştığında normal püskürtme işlemi yapılarak karışım ateşlenebilir.



Şekil 2. 1800 min⁻¹ farklı H₂ oranlarındaki özgül yakıt tüketimi değişimi(Batmaz ve Murcak, 2004).

Hidrojenin özgül yakıt tüketimine bağlı olarak değişim grafiği Şekil 2.' de görülmektedir. Motorun 1800d/d'da H₂ oranlarındaki özgül yakıt tüketimi, standart yakıt motorda yakıldığında daha iyi gerçekleşmektedir. Hidrojen oranı %20 oranında özgül yakıt tüketimi en azdır(Batmaz ve Murcak, 2004).

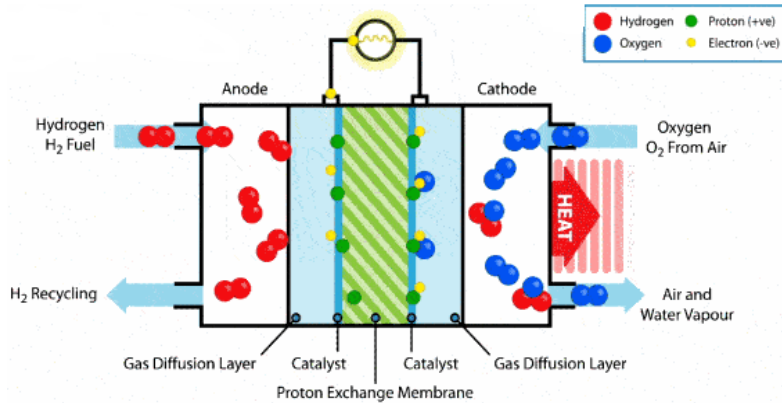


Şekil 3.1800 min⁻¹ farklı H₂ oranlarındaki motor moment değişimi(Batmaz ve Murcak, 2004).

Karışımındaki hidrojen miktarı arttığında Motor momentini artmıştır. Karışımındaki hidrojen oranı %20 iken en yüksek moment elde edilmiştir. Şekil 3' incelendiğinde, volümetrik verim karışımındaki hidrojenin artmasıyla azalmaktadır. Dolayısıyla yanma olayı için hidrojen yeteri kadar süre bulunduğundan momentte artış olur((Batmaz ve Murcak, 2004).

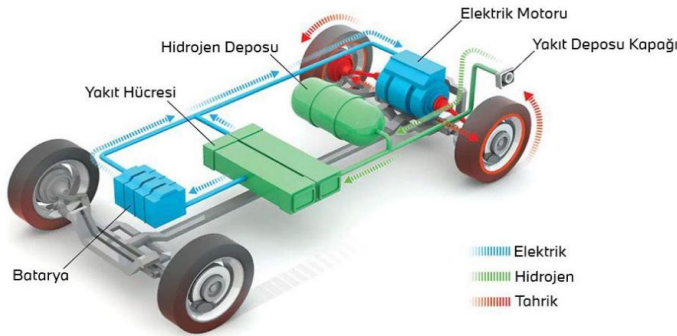
2.9. Hidrojen Yakıt Pilleri

Yakıt pili (yakıt hücresi), sessiz, verimli çevreye duyarlı, ve elektrokimyasal prensibe göre çalışan yakıt enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elemandır.



Şekil 4. Yakıt Pili(C).

Yakıt pilleri elektrokimyasal bir prensiple temel olarak yakıt pilinin içinde, gaz yakıtlarındaki kimyasal enerjiyi, elektrik ve ısı enerjisine dönüştürür. Yakıt pilleri otomobillerde, savunma sanayinde, ev aletlerinde ve çeşitli amaçlar için kullanılmasıyla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Yakıt pili üç ana üniteden oluşmaktadır. Bunlar Yakıt İşleme Ünitesi, Yakıt Besleme ünitesi ve Güç Üretim Sistemi



Şekil 5. Hidrojen Yakıtlı Araç(D).



Şekil 6. Dünyanın ilk Hidrojen ve Yenilenebilir Enerjisiyle Çalışan Deniz Gemisi(E).

3. HİDROJEN EKONOMİSİ

Tüklenen enerji kaynaklarından olan fosil yakıtların çevreye verdikleri zararları ve yakın gelecekte tükenen olduğunu, Miami Üniversitesi “Temiz Enerji Araştırmaları Enstitüsü” başkanlığını yapan Prof. Dr. Nejat Veziroğlu “Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı”nda (THEME) söyleyerek “Hidrojen Ekonomisi” fikrini de ortaya atmıştı. 1974 yılı ciddi enerji krizinin yaşandığı ve enerji konusunda çeşitli fikirlerin ortaya atıldığı ve bu fikirlerin yapılabirliğinin tartışıldığı bir yıl olarak algılanır. O dönemde “Temiz Enerji Araştırmaları Enstitüsü’nün başkanlığını da yürütmekte olan Nejat Veziroğlu, hidrojenin ekonomik olarak kullanılabilirliğini ortaya atmıştır. Onun bu fikri doğrultusunda Uluslararası Hidrojen Enerjisi Kurumu kurulmuştur (Kurtuluş ve diğerleri, 2006).

Geçmişten günümüze enerji insan için hep bir ihtiyaç olarak hayatımızın her alanına girmiştir. Bu enerji ihtiyacı çeşitli kaynaklardan sağlanmaya çalışılmıştır. Bu kaynaklar yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak literatürde yer almıştır. Yenilenemeyen enerji kaynakları fosil yakıtlar yaklaşık olarak yüz yıldır yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle son zamanlarda yapılan bazı araştırmalar fosil yakıtların tükeniyor olması dünyayı ve aynı zamanda ülkemizi de enerji konusunda ciddi bir şekilde alternatif enerji kaynakları bulma konusunda araştırmalara yöneltmiştir. Bu yönelme yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşmıştır. Günümüzde enerjiye olan talep gittikçe artmaktadır. Aynı zamanda son yirmi yılda uluslararası ilişkilerde enerji temini ve güvenliği ön plana çıkmakta ve anlaşmaların ana maddeleri haline gelmektedir. Enerji kaynaklarının çeşitlenmesi, endüstride ve toplumda genişçe yer kapsaması enerjiyi ekonomik bir faaliyet haline getirmiştir.

Hidrojen doğada saf halde bulunmadığından, bileşikler halinde bulunduğu birincil enerji kaynağı değildir. Hidrojenini elde edilmesi çeşitli kimyasal tekniklerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu kendi başına bir parasal bir maliyet gerektirmektedir. Hidrojen fosil kaynaklardan, biyokütle, elektrik, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından ve sudan karbonsuz enerji kaynaklarından üretilmektedir. Hidrojen enerjisinden zararlı sera gazı emisyonları oluşmadığından geleceğin enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Hidrojen ekonomisinin sağlayacağı faydaların başında temiz hava, temiz çevre, iklim değişikliğinin önlenmesi, ozon tabakasının korunması, fosil yakıtların kullanımının bitmesi ve en önemlisi de her ülkenin kendi yakıtlarını üretir hale gelmesidir. Bununla birlikte petrol savaşlarının bitmesi, artan nüfusla birlikte artan enerji talebinin karşılanabilmesi açısından hidrojen enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır.

Enerji- Ekonomi-Ekoloji açısından bakıldığında günümüzün en verimli enerji kaynağı olarak hidrojen görülmektedir. Çünkü hidrojen ekonomisinin (Nalbant, 2019:17-18);

- ✓ Temiz ve sürekli bir enerji sistemi olması,
- ✓ Ülkelerin kendi yakıtlarını üretecek olmasından dolayı dışa bağımlılığı azaltacak olması,
- ✓ Dış ticaret açıklarını azaltacak olması,
- ✓ Sera gazının oluşturduğu kirlilik ve asit yağmurlarını azaltacak olması,
- ✓ Çevreci ve ülke ekonomisine destek sağlıyor olması,
- ✓ İstihdam sağlayacak potansiyele sahip olması gibi önemli avantajlara sahiptir.

Günümüzde tüketilen enerjinin büyük bir kısmı birincil enerji kaynağından elde edilmektedir. Nalbant'a (2019:9) göre, 2017 yılı verileri dikkate alındığında dünyada tüketilen toplam birincil enerji miktarı on üç bin beş yüz on bir (13.511) Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiştir. Enerjinin kaynaklara göre dağılımı petrol (%34,21) kömür (%27,62) doğal gaz (%23,36) hidroelektrik (%6,80) nükleer (%4,41) ve yenilenebilir (%3,60) olarak gerçekleşmiştir. Bu verilerden de anlaşıldığı gibi dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmını fosil yakıtlardan elde etmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının payı gün geçtikçe artmakta olduğu gözlemlenmektedir.

Ülkemiz açısından bakıldığında 2016 yılı itibarıyla tüketilen birincil enerji miktarı 129,27 Mtep (milyon ton eşdeğeri petrol) olarak gerçekleşmiştir. Kaynaklara göre tüketilen enerji dağılımı ise; Doğalgaz'da %31, Petrol'de %30, Kömür %26, Hidroelektrik %5 ve Yenilenebilir enerjinin payı ise %8'dir (Dertli ve Yınaç 2018:584-589). Türkiye bu rakamlardan hareketle doğalgazda %96, Petrolde %91 ve kömürde %31 oranında dışa bağımlı olduğu ortadadır. Bu bağımlılık ekonomik olarak yılda 230 milyar doların enerji ithalatına harcamak zorunda kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla ülkemizin büyük bir kaynağı fosil yakıt ithalatı için harcadığı ve bu yüzden istihdam ve ekonomik sorunlarla karşı karşıya kaldığı açıktır. Sosyal refahın sağlanması ekonomik refahla mümkün olduğu bilinen bir gerçektir. Ekonomik refah ise daha düşük maliyet ve dışa bağımlı olmayan bir ekonomik girdi kaynağıyla mümkün olacaktır. Tamamen yerli ve milli enerji kaynaklarının kullanılabilmesi ülkemiz ekonomisi bakımından önemli bir aşama olacaktır. Ülkemizin jeopolitik yapısının ve coğrafi konumunun sağladığı avantaj sayesinde birçok yenilenebilir enerji kaynağından faydalanabilme potansiyeline sahiptir. Bu nedendir ki bir taraftan elektrikli motor üretimi ve bunların öncelikle elektrikli otomobillerde kullanılması ve 2023 yılı itibarıyla elektrikli otomobil üretim hedefi önemli bir aşama olarak görülmektedir. Bu süreç diğer hava kara ve deniz araçlarında elektrikli motor kullanılması şeklinde bir gelişme göstereceği düşünülmektedir. Bu aynı zamanda ülkemizde alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi anlamına gelmektedir ki hidrojen enerjisinin kullanılması bu alternatiflerden biri olarak karşımızda çıkmaktadır. Ülkemizde enerji kaynakları olarak toplamda %87 oranında fosil yakıtlara olan bağımlılığı ekonomik olarak sürdürülebilir bir enerji kaynağı bulma zarurietini göstermektedir (Hepaktan, 2018:156-157).

Gelişmiş ülkeler hidrojen teknolojisine geçiş sürecini oldukça hızlandırmıştır ve bu teknolojiye yapılan yatırımlarını arttırmışlardır. Şayet ülke olarak bu teknolojinin gerisinde kalmak istemiyorsak ve Paris Mutabakatı anlaşmasına taraf olarak CO₂ azaltmayı hedefleyip, temiz ve yeşil emisyonun yanı sıra sürdürülebilir büyümeye katkıda bulunmak istiyorsak hidrojene geçiş sürecini hızlandırmalıyız.

Temmuz 2020' de Avrupa Birliği, AB'nin 2050' ye kadar net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirecek olan vizyoner planını yeni Hidrojen Stratejisini açıkladı. IEFPA (Enerji Ekonomisi Ve Finansal Analiz Enstitüsü), Güney Kore ve Japonya'daki küçük ölçekli planlarla bir başlangıç olan küresel yeşil hidrojen planları başlatılmış bulunmaktadır.

Onlarca yıldır büyük destek gören ve yalnızca yenilenebilir enerji ile üretilen yeşil hidrojen yüksek yatırım maliyetlerinden dolayı ertelenmektedir. Ancak güneş enerjisi maliyetlerindeki düşüşler dikkate alındığında 2030 yılına kadar öngörülen 430 milyar Euro'luk yatırım ve mevcut doğalgaz boru hatlarının yeniden tasarlanarak kullanılabilir hale getirilmesi ve enerji geçişini sağlayabilmesi AB girişimi stratejisinin güçlü bir destek bulmasını sağlayabilecektir.

AB Hidrojen Stratejisi'nin spesifik hedefleri;

- ✓ 2020-24 arasındaki ilk aşamada, AB'de 1 milyon tona kadar yeşil hidrojen üretimi ile en az 6 gigawatt (GW) hidrojen elektrolizör tesisleri kurulacak,
- ✓ 2025-30 arasındaki ikinci aşamada, 10 milyon tona kadar yeşil hidrojen üretimi ile en az 40 GW'lık hidrojen elektrolizör tesisatları kurulacak,
- ✓ 2030'dan itibaren yeşil hidrojen, karbondan arındırılması zor olan tüm sektörlerde geniş ölçekte kullanılacaktır.

Güney Kore ve Japonya 2050'ye kadar 27 milyon tonluk hidrojen talebini öngörmektedir. Çin'in hidrojen konusundaki planları çok daha iddialıdır. Çin 2050'ye kadar toplam enerjisinin %10'unu (yılda 60 milyon ton hidrojene eşdeğer) hidrojenin oluşturulması ve 10.000 hidrojen yakıt istasyonu inşa edilmesi hedeflerini öngörmektedir.

Hidrojene dair açıklanan projelerin sayısı hızla artmaktadır. 2020 itibariyle açıklanan en az beş yeni proje mevcuttur;

- ✓ ABD'deki Nikola Motor Company, dünyadaki beş hidrojen yakıt istasyonunu desteklemek amacıyla 85 megawatt (MW) alkali elektrolizör sipariş ettiğini açıklamıştır.
- ✓ Air Products, ACWA Power ve NEOM konsorsiyumu, Suudi Arabistan'da 4 GW rüzgar ve güneş enerjisi ile çalışan, yılda 237.000 ton yeşil hidrojen üretmek amacıyla yeşil bir amonyak tesisi kurmayı planladığını açıklamıştır.
- ✓ NextEra Energy, kömürle çalışan elektrik tesisini kapatarak, Florida'daki ilk yeşil hidrojen tesisine yatırım yaptığını açıkladı. Bu tesis tam güneş enerjisi ile çalışan yeşil hidrojen üretmek için 20 MW'lık bir elektrolizörden oluşmaktadır.
- ✓ İspanya'da Iberdrola ve Fertiberia, 100 MW güneş (PV), 20MWh lityum-iyon batarya sistemi ve 20MW elektrolizör içeren entegre bir hidrojen tesisi yapımı için bir ortaklık kuracaklarını açıkladı.
- ✓ WESTKÜSTE100 konsorsiyumu, Hamburg'daki Heide petrol rafinerisinde 30 MW'lık bir elektrolizör tesisi yapacağını açıkladı (<https://www.dunyaenerji.org.tr>)

Dünyada duyurulan 50 proje sözkonusudur ve bunların 14'ü inşaat aşamasında diğer 34'ü ise henüz mutabakat anlaşması düzeyindedir. Yalnızca Japonya'nın Fukushima Hidrojen Enerjisi Araştırma Alanı (FH2R) ve Brunei'nin Teknoloji Geliştirme için Gelişmiş Hidrojen Enerjisi Zinciri kuruluşu (AHEAD) olmak üzere 2 tesis pilot tesis olarak faaliyet göstermektedir ve yılda 1000 tondan daha az hidrojen üretim kapasitesine sahiptir.

Hidrojen enerjisinin kullanılması hala elverişsiz olan ekonomi ve finansman kaynaklarının yeterli olmamasından dolayı bu projelerin bazılarının yapılabilmesi konusunda ciddi riskler mevcuttur. Şimdiye kadar açıklanan projelerin gelecekte talep tahminlerini karşılamaktan uzaktır. Aynı zamanda proje ekonomisi, başarılı elektrolizör ve ekipman endüstrisine, deniz yoluyla hidrojenin taşınmasına olanak sağlanması ile maliyetlerin düşürülmesi gibi faktörlere bağlıdır (IMMFA.org).

Ülkemiz için hidrojenden faydalanabilme olasılığı bir çok ülkeden daha çok imkanlara sahip olduğu ortadadır. Hidrojen üretiminin en önemli kaynağı sudur ve ülkemiz üç tarafı denizlerle kaplı bir coğrafyaya sahiptir. Bu coğrafik üstünlüğünü kullanmak yapılacak yatırımlara bağlı olacaktır. 2030 yılı için gelişmiş ülkelerde yeşil hidrojen projeleri yürütülürken, Paris Mutabakatı ile taraf olanlar açısından ilk etapta %55 emisyon hacminin azaltılması hedeflenirken taraf olduğumuz bu anlaşmanın gereğini yapabilmemizin ancak bir an önce yeşil hidrojen projelerinin hazırlanması ile mümkün olacaktır.

4. SONUÇ

Hem fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenecek olması hem de çevre dostu bir yakıt olması hidrojenin önemini arttırmaktadır.

Sera gazının azaltılması için hava, kara, deniz araçlarında ve tarım makinalarında hidrojen kullanımının yaygınlaştırılması gereklidir.

Küresel ısınmaya karşı temiz yenilenebilir enerji kaynaklarından olan hidrojen v.b. kaynakların kullanılması gerekir.

Hidrojenin yaygınlaşması ve depolanmasıyla ilgili problemler en kısa zamanda giderilmelidir.

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması için geri tutuşma, erken ateşleme ve depolama problemlerinin çözülmesi gereklidir bu amaçla çalışmalar bu konu üzerinde yoğunlaşmalıdır.

Hidrojen enerjisinin kullanımının yaygın olmaması, yakıt pilleri ve hidrojen yakıtı geleceğin enerji teknolojileri arasında yer almaktadır.

Ekonomik olarak hidrojen öncelikle yerli ve milli bir enerji olması bakımından önem taşımaktadır. Ülkemizde hidrojen yakıtı üretiminde kullanılabilecek kaynaklar olarak, hidro enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, deniz-dalga enerjisi, jeotermal enerji ve nükleer enerjidir. Ülkemiz gelişmekte olan bir ülke olarak teknolojik geçiş aşamasındadır. Uzun dönemde fotovoltaiik güneş-hidrojen sistemi ülkemiz için uygun görülmektedir. Fotovoltaik panellerden elde olunacak elektrik enerjisi ile suyun elektrolizinden hidrojen üreten bu yöntemde, 1 m³ sudan 108.7 kg hidrojen elde edilebilmektedir ki, bu 422 litre benzine eşdeğerdir.

Ülkemiz açısından ilk kurulum maliyetleri çok yüksek olan hidrojen üretimi çok cazip görünmese de geleceğin enerji kaynağı olması hesabı ile düşünülmesi gereken ilk projelerden biri olarak hidrojen enerjisinden faydalanma olmalıdır. Özellikle ilk etapta taşıma sektöründe kullanımı daha uygun görünen hidrojenin daha ucuz bir enerji kaynağı olması nedeniyle daha az maliyetle daha uzun mesafeler kat edilebilecek ve petrole olan bağımlılığı azaltacaktır. Aynı zamanda yatırımcılar için cazip bir ülke haline gelecektir. Bu durum ülkemizin önemli sorunları olan enerji dış bağımlılığını azaltacak ve işsizlik oranlarını düşürerek daha müreffeh bir ülke olmamızı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Al-Baghdadi, M. A. R. S. (2000). Performance study of a four-stroke spark ignition engine working with both of hydrogen and ethyl alcohol as supplementary fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(10), 1005-1009.

Al-Baghdadi, Maher Abdul-Resul Sadiq, and Haroun Abdul-Kadim Shahad Al-Janabi. (2000). "Improvement of performance and reduction of pollutant emission of a four stroke spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline fuel mixture." *Energy conversion and management* 41.1:77-91.

Baker, R. E., & Macpherson, I. (1990, October). Future transportation fuels and the environment. In *Vehicle Electronics in the 90's: Proceedings of the International Congress on Transportation Electronics* (pp. 299-312). IEEE.

Batmaz, İ., & Murcak, A. (2004). Dizel Motorlarında Hidrojenin Ek Yakıt Olarak Kullanımının Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 7(2), 119-128.

Bekiroğlu, O., & Kuralı, S. K. Y. Karbon Ayak İzi. Erişim Tarihi: 06.05. 2016.

Carraretto, C., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A., & Tonon, S. (2004). Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations. *Energy*, 29(12-15), 2195-2211.

Choi, G. H., Lee, J. C., Chung, Y. J., Caton, J., & Han, S. B. (2006). Effect of Hydrogen Enriched LPG Fuelled Engine with Converted from a Diesel Engine. *Journal of Energy Engineering*, 15(3), 139-145.

Dertli, G., & Yinaç, P. (2018). Yenilenebilir Enerji Tüketimi, Karbondioksit Emisyonu, Enerji İthalatı ve Ekonomik Büyüme: Türkiye Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(2), 583-606.

Finegold, J. G., Lynch, F. E., Baker, N. R., Takahashi, R., & Bush, A. F. (1973). The UCLA Hydrogen Car: Design, Construction, and Performance. *SAE Transactions*, 1626-1637.

Ganesh, R. H., Subramanian, V., Balasubramanian, V., Mallikarjuna, J. M., Ramesh, A., & Sharma, R. P. (2008). Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study. *Renewable energy*, 33(6), 1324-1333.

Great Expectations Asia, Australia and Europe Leading Emerging Green Hydrogen Economy. IEEFA.org. Erişim tarihi 04.10.2021.

Gül, K. E. (2006). Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performans etkileri.

Hepaktan, C. E. (2018). Türkiye’de Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme Ve Cari İşlemler Açığı İlişkisinin Yapısal Kırılmalar Altında Ekonometrik Analizi. Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 16(04), 141-160.

Kurtuluş, G. F., Tabakoğlu, F. Ö., & Türe, İ. E. (2006). Türkiye’de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve UNIDO-ICHET. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi, (s 459), 466.

Kükreler, B. (2007). Hidrojen enerjisinin potansiyeli ve Türkiye ekonomisi açısından değerlendirilmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans tezi, Anadolu Üniversitesi SBE.

Nalbant, M. K. (2019). Hidrojen Ekonomisinin Otomotiv sektöründe önemi: Türkiye örneği (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).

Soruşbay, C., & Arslan, E. (1988). Hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda yanma performansı. Mühendis ve Makine Dergisi, 29(339).

Soruşbay, C., Hidrojeni Doğrudan Yakıt Olarak Kullanan Taşıt Uygulamaları, II. Ulusal Hidrojen Kongresi, Ankara, 9 Temmuz, 2003.

Tutar, F., & Mehmet, E. R. E. N. (2011). Geleceğin enerjisi: Hidrojen ekonomisi ve Türkiye. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, (6).

Ültanır, M. Ö. (1997). Temiz Enerji Olarak Hidrojen Yakıtı ve Teknolojisi, Türkiye 7. Enerji Kongresi, Teknik Oturum Tebliği, 3.

Verhelst, S. (2005). A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines.

Veziroglu, T. N., & Barbir, F. (1998). Hydrogen Energy Technologies, UNIDO, A1400. Vienna, Austria.

İnternet Kaynakları

(A) Toyota, <https://seekingalpha.com/article/3965730-hydrogen-cars-threat-electric-vehicle>

(B) <https://elektrikmen.com/yakitli-piller/> Erişim Tarihi:09.10.2021

(C) <https://www.bmw.com.tr/tr/topics/fascination-bmw/bmw-joy-blog/hidrojen-yakit-hucreli-otomobiller.html> Erişim Tarihi:09.10.2021

(D) <https://www.yenisafak.com/teknoloji/ilk-hidrojen-gemisi-deniz-suyundan-yakitini-uretiyor-3382330> Erişim Tarihi:09.10.2021

(E) <https://www.dunyaenerji.org.tr/buyuk-umutlar-yesil-hidrojen-ekonomisi-raporu-ozeti/> Erişim tarihi: 09.10.2021.