

Hidrojen neden potansiyel bir ulaşım yakıtı olarak seçilmelidir? Why to select hydrogen as a potential transportation fuel?

Ayfer Veziroğlu^{1,*} 

¹ International Association for Hydrogen Energy, 5794 SW 40th Street #303, Miami, FL 33155

Özet

Hidrojen, hidrojen bazlı enerji sistemine geçişte önemli bir rol oynayacak bir ulaşım yakıtıdır. Doğru enerji kaynağı ile birleştirildiğinde, hidrojen enerji sistemi, herhangi bir ulaşım sektörünün en yüksek potansiyel verimliliğine ve en düşük potansiyel emisyonuna sahiptir. Bu yazının amacı, son yirmi yıldaki bazı ulaşım teknolojisi araştırma ve geliştirme çalışmalarını vurgulamaktır. Bu mevcut çabalar çeşitli bölümlerin iyileştirilmesine ayrılmıştır: motivasyon faktörü, çok yönlülük, kullanım verimliliği, güvenlik ve kirlilik azaltma. Yakıt hücresi son kullanımı da dahil olmak üzere tüm hidrojen tedarik zincirinin çevresel ve ekonomik değerlendirmeleri dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Analizler, hidrojen enerji sisteminin muhtemelen hem ekonomik olarak rekabetçi hem de çevre dostu olacağını gösteriyor. Nitekim, ulaşım sektörünün hidrojen yakıtı kullanımına geçişi, kirliliğin azaltılmasına yönelik en büyük adımlardan birini temsil edecektir.

Anahtar kelimeler: Hidrojen taşımacılığı, Ulaşım yakıtları, Hidrojen enerji sistemi, Hayat boyu değerlendirme

1 Giriş

Bir ulaşım yakıtı (veya basitçe hidrojen yakıtı) olarak hidrojen üzerine yapılan araştırmaların çoğu, hafif hizmet araçlarına odaklanmıştır [1–8]. Örneğin, yakın tarihli Temiz Enerji Geleceği araştırması, hafif hizmet araçları için bir düzineden fazla alternatif yakıt konfigürasyonunu içermekte, ancak nakliye araçları için bir konfigürasyon içermemektedir [9, 10]. Hafif hizmet araçları ulaşım yakıtı kullanımına hâkim olduğundan, bunlara yapılan vurgu, ulaşım politikası çalışmalarında anlaşılabilir bir durumdur, ancak hidrojen odaklı araştırmalar da bu vurguyu eleştirmeden benimsemektedir. Uçak uygulamalarının çeşitli analizleri [11–17], ağır araçların kısa ve sporadik ifadeleri [18, 19] ve hidrojen ekonomisinin en erken ayrıntılı çalışması gibi birkaç istisna mevcuttur [20].

Arabalarımızı kullanırken kirliliği azaltmanın en iyi yolu emisyonlu araçlar satın almaya başlamaktır. Mevcut arabalarımızı propan veya doğal gaz gibi alternatif karbon bazlı yakıtlarla çalıştırmamız gerektiği de savunulmaktadır. Bu yakıtlar benzin veya dizelden daha temiz olsa da [21], [22] kaçınılmaz olarak fosil yakıtlardır, tedarikleri sınırlıdır ve bunların sera gazı katkılarının petrol bazlı yakıtlar ile yaklaşık aynı olması beklenmektedir. Başka bir deyişle hâlâ kirlilicidirler. Gerçekte, her bir yakıtın yanması ile bir miktar emisyon üretilmektedir. Motordan gelen ısı azot oksitler üretirken, yanan yakıt ve karter yağı hidrokarbon üretir [23]. Bu kirlilikten tamamen kurtulmanın tek yolu elektrik motorları kullanmaktır [24]. Elektrik motoru

Abstract

Hydrogen is a transportation fuel that will play a major role in the transition toward a hydrogen-based energy system. When combined with the right source of energy, the hydrogen energy system has the highest potential efficiencies and lowest potential emissions of any transportation sector. The aim of this paper is to highlight some of the transportation technology research and development work from the past twenty years. These current efforts are divided into the improvement of several parts: motivity factor, versatility, utilization efficiency, safety and pollution reduction. Environmental and economic assessments of the entire hydrogen supply chain, including fuel cell end-use, are being carried out by researchers around the world. Analyses show that the hydrogen energy system will likely be both economically competitive and environmentally friendly. Indeed, the transition of the transportation sector to the use of hydrogen fuel will represent one of the biggest steps toward pollution reduction.

Keywords: Hydrogen transportation, Transportation fuels, Hydrogen energy system, Well to wheel analysis

kullanan araçlar tamamen emisyonludur ve genellikle elektrikli bataryalardan, güneşten veya hidrojen yakıt hücrelerinden alırlar.

Batarya ile çalışan elektrikli arabaların içten yanmalı motorlara göre emisyonlu olması, daha verimli olması ve kaçınılmaz olarak aşınan ve kırılan daha az hareketli parçaya sahip olması gibi birçok avantajı mevcuttur. Bununla birlikte, bataryalarda menzil, şarj süresi, boyut ve ağırlıkla ilgili sorunlar bulunmaktadır. Tipik olarak yaklaşık 100 mil olan kısa sürüş menzili, uzun mesafelerde sürüş için pratik değildir çünkü şarj edilmesi 8 saate kadar sürmektedir [22]. Ayrıca mevcut kurşun asitli bataryalar, benzin depolarına göre 17 kat daha fazla yere ve 45 kat daha fazla ağırlığa sahiptir (15 galon benzine eşdeğer bir sürüş menzili için 45 fit küp alan ve 6750 pound) [23]. Ford, General Motors ve Chrysler, bu sorunları çözmek için şu anda mevcut olanlardan daha iyi bataryalar üzerinde birlikte çalışmaktadırlar [25].

Temiz elektrik motorları hâlâ kullanırken bataryalara en iyi kirlilik içermeyen alternatif hidrojen yakıt hücresidir. Hidrojenle çalışan "yakıt hücreleri, gelecek nesil otomobiller için bir güç kaynağı olarak muazzam bir umut vaat ediyor" [26]. Ayrıca bataryaların sahip olduğu kısıtlamalara da sahip değildirler.

Hidrojen, bir yakıt hücresinde kirlilik içermeyen bir kimyasal reaksiyonla (yanma değil) tüketilir. Yakıt hücresi basitçe, elektrik, su ve atık ısı üretmek için hidrojen ve oksijeni kimyasal olarak birleştirir [22]. Hidrojen, elektroliz işlemi ile sudan elde edilebilir. Ancak elektrikli güç

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ayferveziroglu@iahe.org (A. Veziroğlu)
Geliş / Recieved: 31.10.2020 Kabul / Accepted: 04.01.2021 Yayınlanma / Published: 15.01.2021
doi: 10.28948/ngumuh.819048

santrallerinden almanın sebep olacağı dış etkiler unutulmamalıdır. Ülke genelinde bataryaları şarj etmek veya hidrojen üretmek için elektrik üreten birçok enerji santrali, kömür gibi karbon bazlı yakıtlarla çalışmakta ve dolayısıyla emisyon üretmektedir [22].

Farklı yakıt hücresi çeşitleri olmasına rağmen otomobiller için en uygun olanı Proton Değişim Membran (PEM) yakıt hücresidir. PEM yakıt hücrelerinin başlıca özellikleri, hızlı devreye alınabilme ve orta sıcaklıklarda (1900 °F yerine 150 °F) çalışabilme yeteneğidir. Bu durum, çalışması için çok fazla ısı gerektirmediği için avantajlıdır. PEM yakıt hücresi kompakt ve hafiftir. Ayrıca, maksimum verimliliği olan %60 (hidrojenden motora elektrik olarak verilen enerji), içten yanmalı motorların verimliliğinden yaklaşık 3 kat daha fazladır (çünkü yanmadan elde edilen enerjinin çoğu, pistonlar aşağı doğru itilmeden önce ısı ve sürtünme yoluyla kaybedilmektedir.) [23].

Toplumda hidrojenin güvenliği konusunda endişeler mevcuttur. Hidrojen bir yakıttır ve dolayısıyla yanıcıdır. Diğer yakıtlar gibi hidrojenin de yanma özellikleri incelenmelidir. Hidrojen, 1937 yılında New Jersey'de Hindenburg'un trajik bir şekilde alev alan ve yanan görüntüsü ile hatırlanmaktadır. Kazada 62 kişi kurtulmuş 35 kişi hayatını kaybetmiştir; ölümlerin 27'si zeplinden atlamaktan kaynaklanmıştır. Ölümlerin bir kısmı ise dizel yakıt yangınından kaynaklanan yanık ve yaralanmalara atfedilirken yanan hidrojenden kimse ölmemiştir [22, 27]. "Neyse ki, hidrojen özellikle tehlikeli bir yakıt değildir. Sızması veya dökülmesi durumunda hidrojen benzinden çok daha hızlı dağılır ve buharlaşır, bu da patlama tehlikesini en aza indirir" [22]. Hidrojen de benzin gibi diğer doğası gereği tehlikeli yakıtlar gibi dikkatli ve güvenli bir şekilde kullanılabilir. Hidrojen tankları, birçok zorlu güvenlik testinden geçmiştir. 1650 °F'ın üzerinde 70 dakikaya kadar tamamen alevler içinde tutulmuş, katı nesnelere (zırh delici mermiler gibi) delinmiş ve emniyet valfleri tamamen tıkanarak kırılıncaya kadar sıkıştırılmıştır. Bazen gaz dışarı sızmıştır, bazen yanmıştır ama asla patlamamıştır [28]. Gerçek hayattaki kullanım durumlarında, düşük sıcaklıktaki hidrojen gazı ve bu sıcaklıklarda düşük adyabatik genleşme enerjisi, tutuşma olmadığı sürece daha düşük patlama riski anlamına gelir. Kriyojenik sıcaklıklar, bu tür sıcaklıklarla çalışmak için derecelendirilmemiş basınç tahliye vanalarının arızalanmasına neden olabilir [29].

Birçok büyük ve tanınmış şirket, hidrojenin potansiyeline güvenip bu potansiyele sahip çıkmaktadır. Yollarda halihazırda hidrojen yakıtlı araçları bulunan bazı şirketler aşağıda verilmiştir [30]:

- BMW yakın zamanda Toyota ile iş birliği içinde "BMW i Hydrogen Next" konseptini tanıtmıştır. 2005 ile 2007 yılları arasında BMW, içten yanmalı motorunda hidrojen kullanan, dünyanın ilk üretime hazır hidrojen aracı Hydrogen 7 lüks otomobilini üretmiştir.

- Honda FCX (Fuel Cell eXperimental) ilk olarak 2002'de tanıtılmıştır. 2006 ve 2008'de iki yeni model piyasaya sürülmüştür. 2016'da "Honda Clarity Fuel Cell" olarak yeniden markalaştırılmıştır.

- Audi Q5 Hibrit Yakıt Hücresi (HFC) Mayıs 2011'de Almanya'nın Berlin kentinde, A7 Quattro h-tron ise 2016'da Detroit'te tanıtılmıştır.

- Hyundai Blue2 FCEV 2011'de piyasaya sürülmüştür ve şu anda Nexo SUV'u pazarlamaktadır.

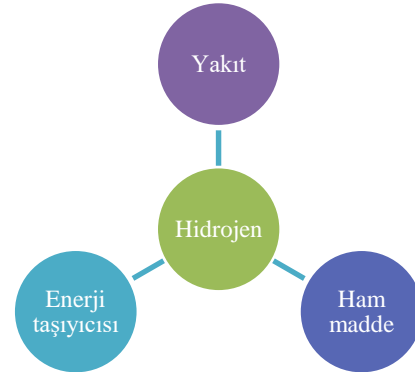
- Ballard Power Systems, yakıt hücreleri ile hidrojen yakıt hücreli otobüs ve kamyonlar geliştirmekte ve satmaktadır [22, 23]. Çeşitli bireyler ve üniversiteler de hidrojen araçlarını araştırmakta ve geliştirmektedir.

2 Değerlendirme kriterleri

Bu bölümde değerlendirme için gerekli bazı parametreler (çok yönlü kullanım imkânı, çevre dostu olması, sürdürülebilir olması, tahrik etme faktörü ve verim avantajı) ele alınıp değerlendirilecektir. Hidrojenin avantajlı olduğu alanlar göz önünde bulundurularak neden bir ulaşım yakıtı olarak seçilmesinin gerekliliği açıklanacaktır.

2.1 Çok yönlü kullanım imkânı

Hidrojenin Şekil 1'de gösterildiği gibi en önemli sayılabilecek üç ana işlevi bulunmaktadır. Bunlar enerji taşıyıcısı, yakıt ve diğer alternatif yakıtlar (metanol, etanol, dimetil eter ve amonyak) ve kimyasallar için hammadde olarak kullanılabilmesidir.



Şekil 1. Hidrojenin en önemli üç ana işlevi

Hidrojenin yakıt olarak en önemli avantajı çok yönlülüğüdür. Hidrojen çeşitli kaynaklardan türetilmektedir: doğal gaz, biyokütle ve kömür gibi hidrokarbonlardan ve yenilenebilir, nükleer veya fosil kaynaklardan üretilen elektrik kullanılarak suyun elektrolizinden. Ayrıca, yeni üretim yolları da mevcuttur: örneğin, hidrojen üreten bakteriler ve güneş veya nükleer enerjiden yüksek sıcaklıklar kullanarak suyu ayırmak uygun seçeneklerdir. Bu çok yönlülük, enerji sistemlerinin çeşitlendirilmesini ve güvenliğini artırabilir [31]. Ayrıca, rüzgâr ve biyokütle temelli enerji kaynakları hem uzun vadeli kullanılabilirlik hem de coğrafi dağılım açısından fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarından daha güvenlidir. Hidrojen üretildikten sonra enerjiyi ihtiyaç duyulan yere taşımak için kullanılabilir ve daha sonra ulaşım, ısı veya faydalı güç gibi bir enerji hizmeti sağlamak için bir yakıt hücresinde veya bir motorda enerjiye dönüştürülebilir.

2.2 Çevre dostu olması

Hayat boyu değerlendirme analizi, farklı yakıtlar ve araç tahrik sistemleriyle ilişkili enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını değerlendirmeye yönelik bir sistem yaklaşımıdır. Bir hayat boyu değerlendirme analizi, yakıtın kuyuda üretildiği andan tekerleklerin hareket ettiği ana kadar sürecin her aşamasında enerji kullanımını ve emisyonları hesaba katar. Örneğin, bu tür bir analiz kullanılarak, dizel içten yanmalı motora sahip bir araç ile doğal gazdan elde edilen hidrojeni kullanan yakıt hücreli bir araç hem emisyon hem de enerji kullanımını açısından doğrudan karşılaştırılabilir. Hidrojen yakıt hücreli araçlar düşünüldüğünde bu özellikle önemlidir, çünkü hidrojen üretme yöntemlerinden bazıları temiz ve verimli iken bazıları kirletici ve enerji yoğunluğu yüksektir [32].

Biri Avrupa'da diğeri Kuzey Amerika'da olmak üzere aşağıdaki çalışmalar, çok çeşitli yakıtlar ve araç tahrik sistemleri için enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının (CO₂) hayat boyu değerlendirme analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

- General Motors, Ludwig Bolkow Systemtechnik, BP, ExxonMobil ve Shell tarafından 2002 yılında "Gelişmiş Yakıt/Araç Sistemlerinin Enerji Kullanımı ve Sera Gazı Emisyonlarının Hayat Boyu Değerlendirme Analizi - Bir Avrupa Çalışması".

- TotalFinaElf, Mayıs 2002. General Motors, Argonne Ulusal Laboratuvarı, BO, ExxonMobil ve Shell tarafından "Gelişmiş Yakıt/Araç Sistemlerinin Hayat Boyu Değerlendirme Analizi ile Enerji Kullanımı ve Sera Gazı Emisyonları - Kuzey Amerika Analizi", Haziran 2001.

AB çalışması, yenilenebilir enerjiler haricinde, doğal gazdan üretilen sıkıştırılmış hidrojeni kullanan yakıt hücreli hibrit araçların (FCHV), hayat boyu değerlendirme analizlerine göre en düşük sera gazı (GHG) emisyonlarına sahip olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, yenilenebilir rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrolizden üretilen hidrojen FCHV'lerde kullanıldığında, hayat boyu değerlendirme analizlerine göre en az miktarda enerji tüketirler/gerektirirler. Burada rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrolizden elde edilen hidrojenle ilişkili sera gazı emisyonları sıfırdır. Mevcut AB güç karışımı kaynaklı elektroliz yoluyla üretilen hidrojeni kullanan FCHV'ler, Şekil 2. (a) ve 2. (b)'de gösterildiği gibi elektriği üretmek için kömür ve diğer fosil yakıtların kullanılması nedeniyle hem enerjisi yoğun olarak tüketir hem de yüksek sera gazı emisyonlarına sebep olmaktadır.

Kuzey Amerika çalışması da doğal gazdan dönüştürülmüş sıkıştırılmış hidrojen kullanan FCHV'lerin, konvansiyonel benzinli ve dizel araçlardan daha düşük enerji kullanımına (Btu/mil) sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde sera gazı emisyonları da doğal gazdan dönüştürülmüş hidrojen kullanan FCHV'ler için hayat boyu değerlendirme analizlerine göre en düşük seviyededir. Elektrolizden üretilen hidrojeni ve mevcut ABD güç karışımını kullanan FCHV'lerin Şekil 3. (a) ve 3. (b)'de gösterildiği gibi ABD elektrik gücünün çoğunun kömürden ve diğer fosil kaynaklardan elde edilmesi nedeniyle enerji yoğunluğu ve sera gazı emisyonları yüksektir. Kuzey

Amerika çalışması, yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojeni araştırmamıştır.

2.3 Sürdürülebilir olması

Enerji çözümlerinin ekonomiyi, çevreyi ve gelecek nesillerin kaynaklarını ve sürdürülebilirliği olumsuz etkilemeden küresel enerji sorunlarını ele alması beklenmektedir. Hidrojen, karbonsuz bir yakıt olarak yan etkisi en az olan enerji çözümlerinden biridir. Temiz enerji çözümleri, daha iyi sürdürülebilirlik için aşağıdaki hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır:

- daha iyi kaynak kullanımı,
- daha iyi verimlilik,
- daha iyi çevre,
- daha iyi maliyet etkinliği,
- daha iyi tasarım ve analiz ve
- daha iyi enerji güvenliği.

2.4 Tahrik etme faktörü

Su üstü araçları ve uçaklar, yakıt ikmali yapmadan önce yakıtlarını belli bir mesafe taşımalıdır. Uzay taşımacılığı durumunda da uzay araçları, planlanan menzilleri için gerekli olan oksidanın yanı sıra yakıtlarını da taşımalıdır. Bu nedenle, ulaşım yakıtının olabildiğince hafif olması ve mümkün olduğunca az yer kaplaması önemlidir. Bu gereksinimleri, tahrik etme faktörü olarak adlandırılan boyutsuz bir sayı altında birleştirebiliriz [33]:

$$\phi_M = \frac{\left(\frac{E}{M}\right)\left(\frac{E}{V}\right)^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{E_h}{M_h}\right)\left(\frac{E_h}{V_h}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

burada E yakıt tarafından üretilen enerjidir, M yakıtın kütlesi, V yakıtın hacmi ve alt simge olarak h hidrojeni belirtmektedir. Tahrik etme faktörü ne kadar yüksekse, ulaşım için yakıt o kadar iyi olmaktadır. Tablo 1, bazı yakıtların ilgili özelliklerini ve Denklem (1) kullanılarak hesaplanan tahrik etme faktörlerini listelemektedir. Sıvı yakıtlar arasında LH₂ en iyi tahrik etme faktörüne sahipken, metanolün en düşük tahrik etme faktörüne sahip olduğu görülebilir. Gaz yakıtlar arasında GH₂ en iyi tahrik etme faktörüne sahiptir.

Hidrojenin kullanım verimliliği avantajı göz önüne alındığında, hidrojenin en iyi ulaşım yakıtı olma özelliğini daha da iyileştirir. Hidrojenin şu anda fosil yakıtlardan daha pahalı olmasına rağmen, dünyadaki uzay programları için tercih edilen yakıt olmasının nedenlerinden biri de budur [34].

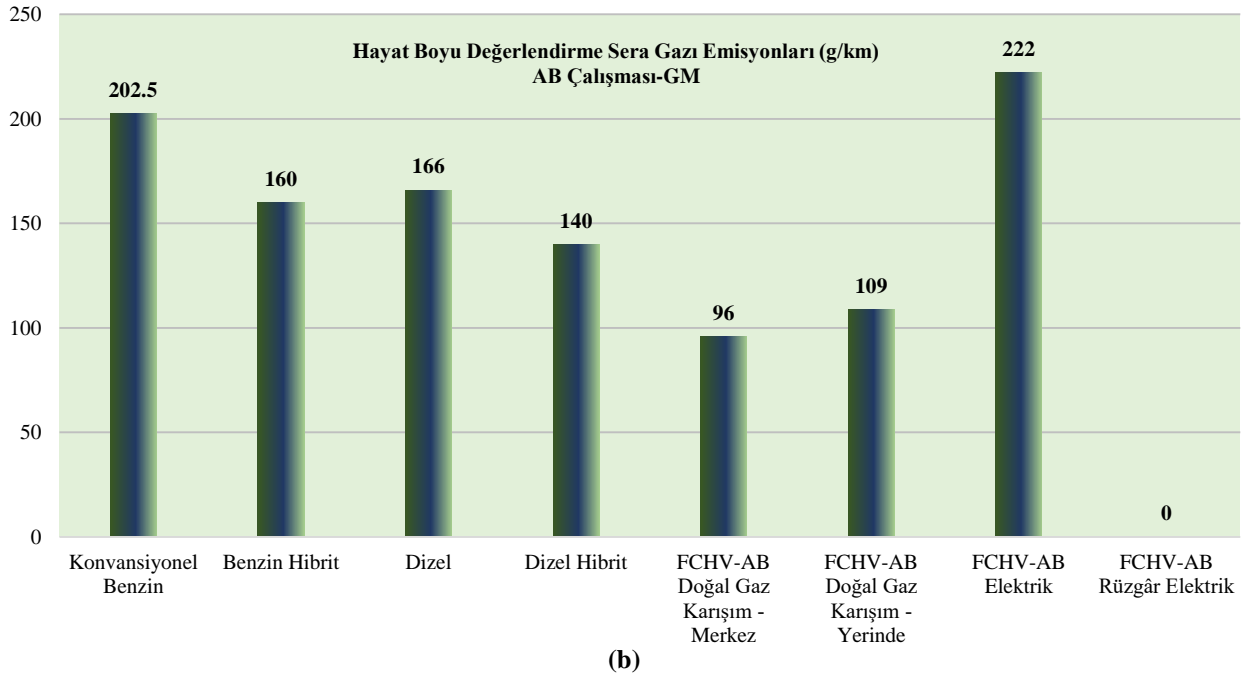
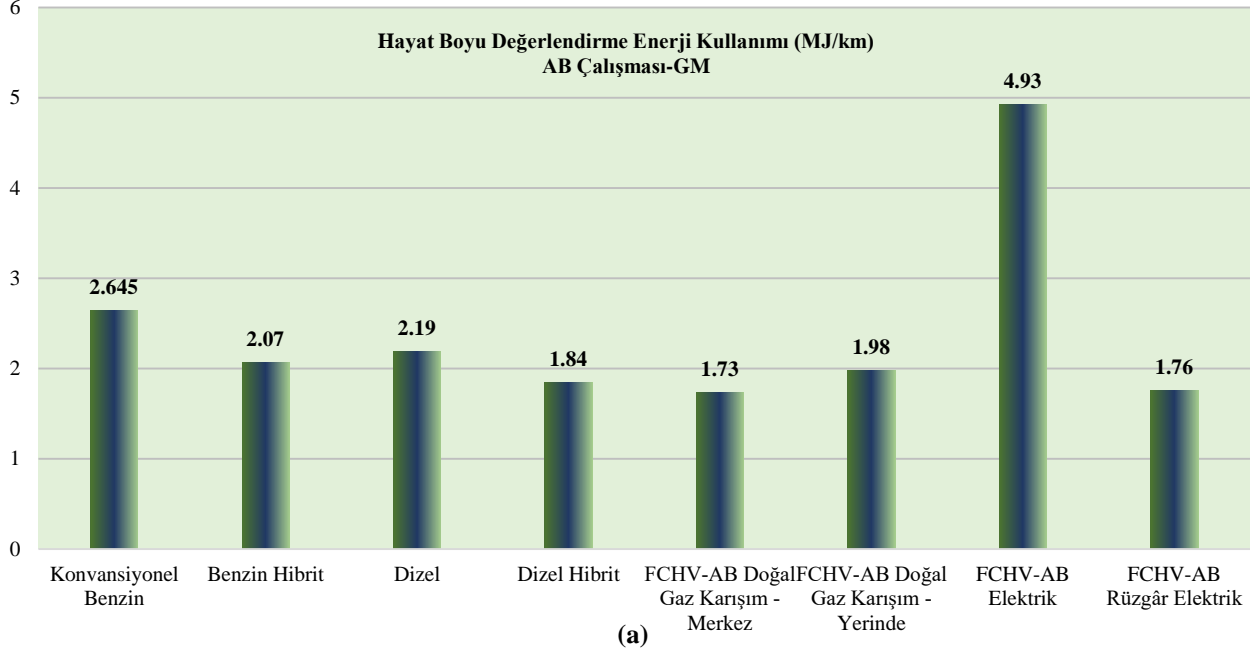
Hidrojen yakıt hücresi ile çalışan araçlar, aşağıdaki nedenlerle kirletici benzinle çalışan araçlara en iyi alternatiflerdir [35]:

- Yakıt hücreli araçlar tamamen emisyonuzdur.
- Yakıt hücrelerinin hareketli parçaları yoktur.
- Hidrojen yenilenebilirdir ve bol miktarda bulunur.
- Yakıt hücreli araçlar soğuk havayla uyumludur.

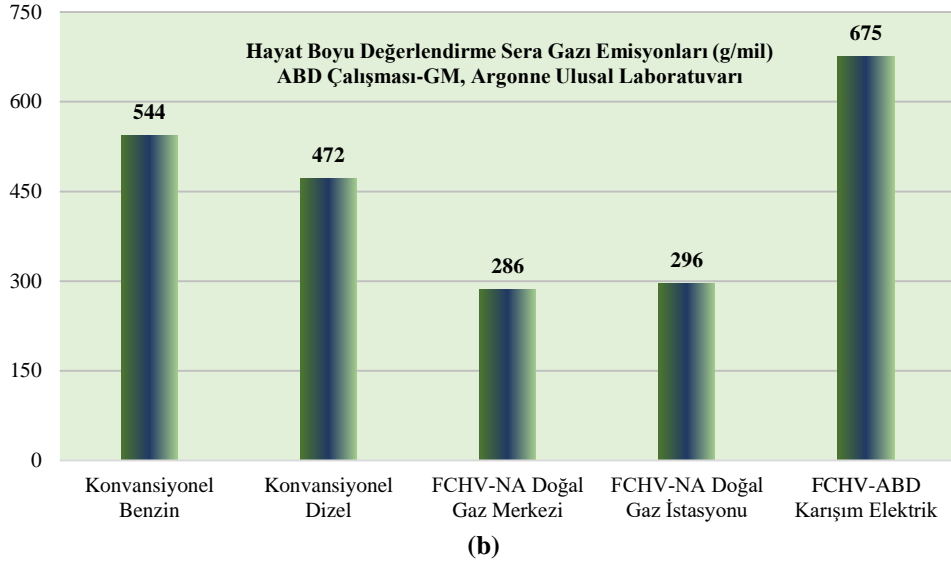
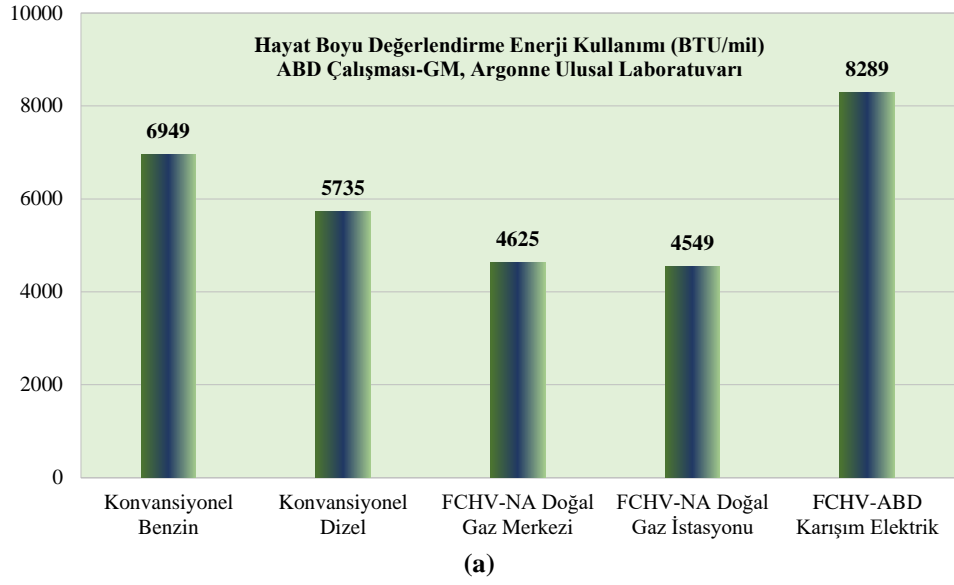
- Yakıt hücreleri kompakt ve hafiftir - aşırı hacimli veya ağır değildir.
- Yakıt hücreli araçlar benzinli araçlardan yaklaşık 3 kat daha verimlidir.
- Yakıt hücreli araçlar çok yüksek menzillere sahip olacaklar.
- Tanklar hızlı bir şekilde doldurulacak.
- Hidrojen güvenlidir, titizlikle test edilmektedir ve halihazırda birçok araçta kullanılmaktadır.

Bununla birlikte, hidrojenli araçların bazı dezavantajları da vardır:

- Yakıt pillerinin maliyeti hâlâ engelleyicidir [36].
- Yeni bir yakıt dağıtım altyapısı gerekmektedir.
- Dünya çapında ulaşım için gerekli olan büyük miktarda hidrojenin elde edilebileceğinin kanıtlanması gerekmektedir.



Şekil 2. (a) (b) Elektrik üretimi için kömür ve diğer fosil yakıtların kullanılması nedeniyle ortaya çıkan sera gazı emisyonları [37]



Şekil 3. (a) (b) ABD elektrik enerjisinin kömür ve diğer fosil kaynaklarından elde edilmesi nedeniyle ortaya çıkan sera gazı emisyonları [37]

Tablo 1. Sıvı ve gaz yakıtlar için enerji yoğunlukları (üst ısı değer, ÜİD) ve tahrik etme faktörleri

Yakıt	Kimyasal Formül	Birim kütle başına enerji $\left(\frac{E}{M}\right)$ J/kg	Birim kütle başına enerji $\left(\frac{E}{V}\right)$ J/m	Tahrik etme faktörü ϕ_M
Sıvı				
Fuel-oil	$C_{5-20}H_{42}$	45.5	38.65	0.78
Benzin	$C_{5-10}H_{12-22}$	47.4	34.85	0.76
Jet yakıtı	$C_{10-15}H_{22-32}$	46.5	35.30	0.75
LPG	$C_{3-4}H_{8-10}$	48.8	24.40	0.62
LNG	$\sim CH_4$	50	23.00	0.61
Metanol	CH_3OH	22.3	18.10	0.23
Etanol	C_2H_5OH	29.9	23.60	0.37
LH ₂	H_2	141.9	10.10	1.00
Gaz				
Doğal gaz	$\sim CH_4$	50	0.04	0.75
GH ₂	H_2	141.9	0.01	1.00

2.5 Verim avantajı

Yakıtları karşılaştırırken, kullanıcı tarafındaki kullanım verimliliklerini hesaba katmak önemlidir. Yakıtlar; termal, mekanik ve elektriksel son kullanım gibi çeşitli enerji formlarına dönüştürülebilir. Kullanım verimliliği açısından bakıldığında, hemen hemen her uygulamada hidrojenin diğer yakıtlara göre daha verimli bir şekilde istenen enerji formuna dönüştürülebileceği görülmektedir [38]. Tablo 2, çeşitli uygulamalar için fosil yakıt kullanım verimliliğinin hidrojen kullanım verimliliğine bölünmesi olarak tanımlanan kullanım verimliliği faktörlerini göstermektedir. Burada, hidrojenin en verimli yakıt olduğu görülmektedir. Bu, enerjinin korunmasına ek olarak kaynakların da korunmasını sağlamaktadır.

Tablo 2. Kullanım verimliliği faktörleri [33]

Uygulama	Kullanım Verimliliği Faktörü $\phi_M = \frac{\eta_F}{\eta_H}$
Isıl Enerji	
Alevli Yanma	1.00
Katalitik Yanma	0.80
Buhar Üretimi	0.80
Elektrik Gücü, Yakıt Hücreleri	0.54
Yüzey Taşımacılığı	
İçten Yanmalı Motorlar	0.82
Yakıt Hücreleri/Elektrik Motoru	0.40
Ses Altı Jet Taşımacılığı	0.84
Süpersonik Jet Taşımacılığı	0.72
Ağırlıklı Ortalama	0.72
Hidrojen Kullanım Verimliliği Faktörü	1.00
Fosil Yakıt Kullanım Verimliliği Faktörü	0.72

2.6 Karşılaştırmalı değerlendirme

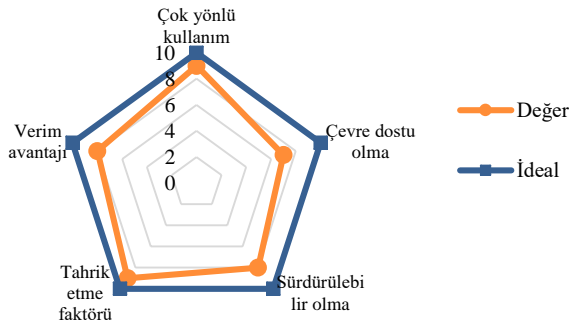
İncelenen parametrelerin etkili bir şekilde karşılaştırılması için bu parametrelerin etkileri Denklem (2) ile normalleştirile:

$$Mertebe_i = \frac{Maksimum - Metot_i}{Maksimum} \times 10 \quad (2)$$

Normalleştirilmiş değerler Tablo 3’de verilmiştir. Mertebe ifadesi 0 ile 10 arasında değişir, burada 0 en az etki eden parametreyi gösterirken 10 en etkili (ideal) parametreyi göstermektedir (Şekil 4).

Tablo 3. Normalleştirilmiş parametreler

Mertebe	Değer	İdeal
Çok yönlü kullanım	9	10
Çevre dostu olma	8	10
Sürdürülebilir olma	7	10
Tahrik etme faktörü	6	10
Verim avantajı	8	10



Şekil 4. Parametrelerin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

3 Güvenlik boyutunun değerlendirilmesi

Güvenlik, gelecek vaat eden ulaşım yakıtlarının değerlendirilmesinde anahtar bir husustur. Hidrojen sözü konusu olduğunda, büyük ölçüde 1937'deki Hindenburg felaketini takip eden talihsiz bir tanıtıma maruz kalmıştır.

Hidrojen kolayca tutuşur ve geniş bir aralıkta yanıcılık limitlerine sahiptir. Bu nedenle, hidrojenin benzinden çok daha kolay tutuşabileceği düşünülebilir, ancak havadaki hidrojen yanıcılığının alt sınırı (hacimce %4, [39]) benzine karşılık gelen noktadan (%1.4, [39]) daha yüksektir. Dahası, hidrojenin yayılma gücü benzininkinden yedi kat fazladır ve bu daha fazla kaldırma kuvveti ile birlikte hidrojenin atmosfere hızlı bir şekilde dağılmasını sağlar [40]. Diğer taraftan benzin buharı ise, havadan daha ağır olduğu için tutuşabilir bir karışım oluşuncaya kadar o bölgede kalmaktadır. Bu nedenle, genel olarak bir hidrojen yakıt sistemindeki sızıntıdan kaynaklanan hasar riski, bir benzin sisteminden kaynaklanana göre çok daha az olmaktadır. Bununla birlikte, hidrojen sistemleri sızıntıya karşı daha savunmasız olabilir ve "sızdırmaz" doğalarının en üst düzeye çıkmak için özen gösterilmelidir - aslında, herhangi bir yüksek enerjili yakıt sisteminde de durum bu şekildedir.

Literatürde güvenlik açısından hidrojen gazının doğasını anlamak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Borulardaki büyük çaplı bir kırılmadan sızan ve atmosfere yayılan yüksek basınçlı hidrojen gazının dağılması ve patlamasıyla ilgili varsayımsal senaryo üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır [40]. Bu deneyler, patlama gücünün yalnızca hidrojen/hava ön karışımının konsantrasyonuna ve hacmine değil, aynı zamanda ateşleme öncesi türbülans özelliklerine de bağlı olduğunu göstermiştir. Gelecekteki hidrojen ekonomisi altyapılarıyla ilgili bazı hidrojen yayılım senaryoları ve güvenlik hususları da incelenmiştir [41].

Sıvı hidrojenin dökülmesi de bir güvenlik sorunu olarak değerlendirilir. Sıvı dökülmesi durumunda, hidrojen pratikte benzin kadar güvenlidir [42]. Hidrojenin son derece düşük kaynama noktası (yaklaşık -424 °F veya -253 °C) ve yüksek kaldırma kuvveti, neredeyse anında buharlaşmayı ve dağılmayı sağlamaktadır. Gallego vd. [43] otomotiv senaryoları için hidrojen salınımı, dağılımı ve yanmasının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesini gerçekleştirmiş ve sıkıştırılmış gaz halindeki hidrojen sistemlerinden salınımların kentsel ve tünel ortamlarında ticari araçlar üzerindeki potansiyel etkilerinin analizini açıklamıştır. Sıkıştırılmış doğal gaz sistemlerinden karşılaştırmalı salınımlar da analize dahil edilmiştir. Hidrojen yakıtlı bir aracın temel güvenliğinin bir kanıtı da sıvı hidrojenli bir aracın planlanmamış bir "çarpışma testi" sonucunda elde edilmiştir [44]. Araç uzun mesafeli bir otomobil yarışı için hazırlanmıştı ve tankı sıvı hidrojenle doluydu. Çekicinin lastiği patladığında, araç karayolu üzerinde saatte 55 mil hızla bir römork üzerinde çekiliyordu. Römork ve hidrojenli araç, yolla ve bir veya iki tabelayla önemli etkileşimlerden sonra baş aşağı durabilmişti. Hidrojen sızıntısına rağmen yangın çıkmadı. Aslında, araç römorktan ayrıldı, dik konuma getirildi ve hidrojeni bitmeden önce mümkün olduğunca uzağa sürüldü.

4 Sonuç

Yakıt hücreli araçlar muhtemelen ulaştırma sektörünün hidrojen ekonomisine geçişinde son adım olacaktır. Hidrojenli enerji sistemleri ekonomik olarak daha uygun hale geldiğinde, farklı kaynakların üretim verimliliğini değerlendirmek için mevcut diğer enerji sistemleriyle de karşılaştırılmalıdır.

Hidrojen enerji sisteminin parlak yanı, sistemin mevcut fosil yakıt sistemine kıyasla emisyonları neredeyse kesin olarak azaltacağıdır. NO_x emisyonları daha az (sıfır olmasa da) olurken karbon emisyonları sıfıra düşecektir. Şangay ve Pekin gibi büyük şehirlerde, yerel hava kirliliğinin azaltılması vatandaşlar için yaşam kalitesini büyük ölçüde artıracak ve sonuçta sağlık hizmeti maliyetlerini azaltacaktır. Sistemin olumsuz tarafı ise henüz geleneksel fosil yakıt sistemine karşı ekonomik olarak rekabet edemeyecek durumda olmasıdır. Bununla birlikte üretim ile birlikte yakın zamanda rekabetçi maliyetlere ulaşılmış olunacaktır.

Hidrojenle çalışan yakıt hücreli araçlarla ilgili mevcut ilerleme, yaşam süremiz içerisinde ulaşım sektörünün çevre dostu bir dönüşüme uğrayacağını göstermektedir.

İlk ticari yakıt hücreli araçlar farklı firmalar tarafından üretildi ve bu araçların seri üretimini beklenmektedir. Ayrıca, yakıt hücresinin verimliliği arttığında, hidrojen sorunlarının yerleşik depolanması çözülecek ve FCV'lerin maliyeti daha rekabetçi bir hale gelecektir. Ekonomik ve çevresel analizler, hidrojen enerji sisteminin muhtemelen hem ekonomik açıdan rekabetçi hem de çevre dostu olacağını doğrulamaktadır. Bizler de hidrojen ekonomisine giden yolda ilerlerken ulaşım sektöründeki heyecanlandırıcı dönüşümün bir parçası olabiliriz.

Teşekkür

Çalışmaya destek ve katkılarından dolayı Prof. Dr. İbrahim Dinçer'e ve onun doktora talebesi Merve Öztürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar çatışması

Bu makalede çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] M. W. Jensen and M. Ross, The ultimate challenge: developing an infrastructure for fuel cell vehicles. environment. Science and Policy for Sustainable Development, 42(7), 10–22, Sep. 2000. <https://doi.org/10.1080/00139150009605747>.
- [2] H. R. Linden, Alternative pathways to a carbon-emission-free energy system. Bridge-Washington-, 29, 17–24, 1999.
- [3] A. B. Lovins and B. D. Williams, From Fuel cells to a hydrogen-based economy. Public Utilities Fortnightly, 139(4), 12–22, 2001.
- [4] B. McNicol, Fuel cells for road transportation purposes — yes or no?. Journal of Power Sources, 100(1–2), 47–59, Nov. 2001, [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00882-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00882-5).
- [5] J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, and T. G. Kreutz, A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. Journal of Power Sources, 79(2), 143–168, Jun. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9).
- [6] C. Thomas, Fuel options for the fuel cell vehicle: hydrogen, methanol or gasoline?. International Journal of Hydrogen Energy, 25(6), 551–567, Jun. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(99\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00064-6).
- [7] C. E. Thomas, Fuel cell and battery electric vehicles compared. International Journal of Hydrogen Energy, 34(15), 6005–6020, Aug. 2009, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003>.
- [8] G. Morrison, J. Stevens, and F. Joseck, Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 87, 183–196, Feb. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.005>.
- [9] D. L. Greene and S. E. Plotkin, Energy futures for the US transport sector. Energy Policy, 29(14), 1255–1270, Nov. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00071-4).
- [10] Interlaboratory Working Group, Scenarios for a clean energy future - efficient and clean energy technologies, 2000. <http://www.ornl.gov/sci/eere/cef/> Accessed: Oct. 27, 2020.
- [11] R. V. V. Petrescu, A. Machín, K. Fontánez, J. C. Arango, F. M. Márquez, and F. I. T. Petrescu, Hydrogen for aircraft power and propulsion. International Journal of Hydrogen Energy, 45(41), 20740–20764, Aug. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.253>.
- [12] Y. Bicer and I. Dincer, Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. International Journal of Hydrogen Energy, 42(16), 10722–10738, Apr. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.119>.
- [13] A. Baroutaji, T. Wilberforce, M. Ramadan, and A. G. Olabi, Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 106, 31–40, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>.
- [14] F. W. Armstrong, J. E. Allen, and R. M. Denning, Fuel-related issues concerning the future of aviation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 211, 1, 1–11, 1997, <https://doi.org/10.1243/0954410971532451>.
- [15] A. Contreras, Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 22(10–11), 1053–1060, Oct. 1997, [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00008-6).
- [16] L. W. Jones, Liquid hydrogen as a fuel for the future, Science, 174(4007), 367–370, Oct. 1971, <https://doi.org/10.1126/science.174.4007.367>.
- [17] D. Victor, Liquid hydrogen aircraft and the greenhouse effect. International Journal of Hydrogen Energy, 15(5), 357–367, 1990, [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(90\)90186-3](https://doi.org/10.1016/0360-3199(90)90186-3).

- [18] D.-Y. Lee, A. Elgowainy, A. Kotz, R. Vijayagopal, and J. Marcinkoski, Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217–229, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.012>.
- [19] G. D. Berry and A. D. Lamont, Carbonless transportation and energy storage in future energy systems, Innovative Strategies for CO2 Stabilization, Technical Report UCRL-ID-142084, 2001. <https://doi.org/10.2172/792733>
- [20] E. M. Dickson, J. W. Ryan, and M. H. Smulyan, Hydrogen economy. A preliminary technology assessment, Technical Report NP-20932, 1976.
- [21] M. I. Khan, T. Yasmin, and A. Shakoob, Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 785–797, Nov. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>.
- [22] S. J. Nadis, J. J. MacKenzie, and L. Ost, *Car trouble*. Boston: Beacon Press, Boston, 1993.
- [23] J. S. Cannon, *Harnessing hydrogen: The key to sustainable transportation*. Inform, 1995.
- [24] S. Begley and M. Hager, Running cars on plain H₂O., *Newsweek*, 124(26), 108–109, 1994.
- [25] M. J. Riezenman, Engineering the EV future. *IEEE Spectr.*, 35, 11, 18–20, Nov. 1998, <https://doi.org/10.1109/6.730515>.
- [26] Z. J. B. Plater, R. H. Abrams, R. L. Graham, L. Heinzerling, D. A. Wirth, and N. D. Hall, *Environmental law and policy: nature, law, and society*, Fifth edition. New York: Wolters Kluwer, New York, 2016.
- [27] A. Bain and W. D. Van Vorst, The Hindenburg tragedy revisited: The fatal flaw found. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(5), 399–403, 1999.
- [28] R. Edwards, A tank of the cold stuff, *New Scientist* (London), 152, 2057, 41–43, Nov. 1996.
- [29] R. Moradi and K. M. Groth, Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>.
- [30] Energy Sector Management Assistance Program, *Green Hydrogen in Developing Countries*. World Bank, 2020.
- [31] T. Nejat Veziroglu, Quarter century of hydrogen movement 1974–2000. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(12), 1143–1150, Dec. 2000, [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00038-0).
- [32] Fast Facts, *Energy Independence Now*. <https://einow.org/talking-points> Accessed: Oct. 27, 2020.
- [33] T. N. Veziroglu, 21st Century's Energy: Hydrogen Energy System, in *Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development*, J. W. Sheffield and Ç. Sheffield, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, 9–31.
- [34] D. Cecere, E. Giacomazzi, and A. Ingenito, A review on hydrogen industrial aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10731–10747, Jul. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.126>.
- [35] J. Van Mierlo, G. Maggetto, and Ph. Lataire, Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 47(17), 2748–2760, Oct. 2006, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.004>.
- [36] S. T. Thompson et al., Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. *Journal of Power Sources*, 399, 304–313, Sep. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100>.
- [37] R. Choudhury et al., GM Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems-A European study, Ottobrunn, September, 2002.
- [38] T. N. Veziroglu, *Environmental Problems And Solutions*, CRC Press, Florida, USA, 1990.
- [39] H. F. Coward and G. W. Jones, Limits of flammability of gases and vapors. [Tables and graphs for organic and inorganic materials and mixtures; bibliography; indexes], 1952, <https://doi.org/10.2172/7355338>.
- [40] T. Tanaka, T. Azuma, J. Evans, P. Cronin, D. Johnson, and R. Cleaver, Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2162–2170, Sep. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.019>.
- [41] F. Markert, S. Nielsen, J. Paulsen, and V. Andersen, Safety aspects of future infrastructure scenarios with hydrogen refuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2227–2234, Sep. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.011>.
- [42] M. Hirayama, H. Shinozaki, N. Kasai, and T. Otaki, Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(27), 12584–12594, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.003>.
- [43] E. Gallego et al., An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(13), 2235–2245, Sep. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.009>.
- [44] J. Finegold and W. D. Van Vorst, Crash test of a liquid hydrogen automobile, Corpus ID: 109295284, 1976.

