

ULAŞIM SEKTÖRÜNDE HİDROJEN

Hüseyin Turan Arat¹
Mustafa Kaan Baltacıoğlu²
Meryem Gizem Sürer³

1. GİRİŞ

Dünya üzerindeki en önemli sektörlerden biri ulaşım sektörüdür. İki nokta arasında belli bir kütlenin taşınması işlemi, ulaşımın en basit tanımıdır. 10 trilyon dolar küresel sektör hacmi ve Dünya genelinde %28 toplam gaz salımını yapan olarak, Dünya sektör raporlarında ilk 10 sırada bulunan bu çok büyük sektör; canlılığı, dinamikliği ve bitmek bilmeyen gelişimiyle, hızla büyümektedir. Artan nüfus yoğunluğu ve enerjiye duyulan gereksinimle doğrudan bağlantılı olan bu sektör, son yıllarda birtakım değişimlerle kimlik değiştirmiş, yeni bir oluşuma geçiş yapmıştır. Pandemi, savaşlar, azalan fosil yakıt rezervle-

ri ve artan sera gazı salımları, sektörde değişime neden olan başlıca etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. İster insan ister yük olsun, ulaşım sektörü; hava, deniz, kara ve demiryolu taşımacılığı olarak dört ana başlıkta incelenebilmektedir.

Ulaşım ve taşımacılık işleminde araçlar kullanılmaktadır. Sınıflandırılmaları farklı farklı olan yüzlerce taşıt (araç) vardır. Bu araçların temel amacı; ulaşımı gerçekleştirmek yani bir kütleyi bir noktadan diğerine taşımaktır. Gelişen teknolojilere bağlı olarak değişmekle birlikte, yüzyıllardır çeşitli lojistik ve ulaşım ağları kullanılmış ve taşıt seçimleri yapılmıştır. Hava, kara, deniz ve demiryolu taşımacı-

¹ Doç. Dr. Mak. Yük. Müh., Sinop Ün., Makine Mühendisliği Bölümü - htarat@sinop.edu.tr

² Doç. Dr. Mak. Yük. Müh., İskenderun Teknik Ün. Mekatronik Mühendisliği Bölümü - mkaan.baltacioglu@iste.edu.tr

³ Mak. Müh., İskenderun Teknik Ün. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü - meryemsurer.mf17@iste.edu.tr

liğında kullanılan araçlar hareket edebilmek için enerjiye gereksinim duyarlar. Bu enerji, buhar enerjisi, kimyasal enerji, elektrik enerjisi ve nükleer enerji ile sağlanabilir. Bu enerji kaynakları ile hareket enerjisinin oluşturulması ve bunun hareket organlarına taşınması için birçok makine ve aparat kullanılmaktadır.

Taşıtlar hareket enerjisini elde edebilmek için yakıtlardan yararlanırlar. Fizikokimyasal yapısında yaşanan değişimle birlikte ortaya ısı/enerji çıkaran her türlü maddeye, kısaca yakıt denmektedir. Tablo 1’de ulaşım sektöründe kullanılan yakıtlar ve bazı teknik özellikleri verilmiştir.

Hava, kara ve deniz taşıtlarında hareket iletimi için gerekli olan enerji, yanma tepkimesi veya elektrifikasyon ile gerçekleştirilmektedir. Yanma işleminde, piston-silindir ikilisi ile sıkıştırılan yakıt hava karışımı, buji ile yakıt tutuş-

turulur ve yanma sonucu oluşan kimyasal enerjiyle artan basınç yine piston-silindir ikilisiyle hareket enerjisine dönüştürülür. Bu mekanik enerji, son hareket uzvuna (tekerlek, ray, palet, pervane gibi) iletilerek hareket sağlanır. Elektrifikasyonda ise; araç içindeki elektrik enerjisi (batarya, kapasitör gibi) elektrik motorları aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülerek hareket yeteneği oluşturulur. Bu işlemler sırasında, güç/ağırlık/yakıt tüketimi verimliliklerinin en iyi duruma getirilmesi (optimizasyonu) gerekmektedir.

Ulaşım araçlarında hareket için gereken enerjinin kaynağı, en önemli konudur. Son 20 yıl öncesine kadar, ulaşım sektöründe genellikle en küçük araçlardan en büyük araçlara kadar içten yanmalı/tepkimeli motorlar kullanılmıştır. Bir motor, motosiklette de, trende de, büyük bir yük ge-

Tablo 1. Bazı Yakıtların Karşılaştırmalı -Özellikleri [1]

	Benzin	Dizel	Biodizel	Propan	Doğal gaz	Ethanol	M e t h a - nol	Hidrojen	Elektrik
Kimyasal yapı	$C_4 - C_{12}$	$C_8 - C_{25}$	Metil ester ($C_{12} - C_{22}$) yağ asitleri	C_3H_8 ve az miktar ile C_4H_{10}	CH_4	CH_3CH_2OH	CH_3OH	H_2	-
Ham madde	Ham Petrol	Ham Petrol	Katı, sıvı, bitkisel yağlar	Petrol rafinasyonu ve doğal gaz	Yer altı rezervleri ve yenilenebilir biyo-gaz	Mısır, tahıl, selüloz	Doğalgaz, kömür, biyokütle	Doğalgaz, metanol, suyun elektrolizi	Doğalgaz, rüzgar, güneş, nükleer, hidro elektrik, jeotermal, biyokütle
Benzin eşdeğeri	1	1,12	1,05	0,74	0,19	0,67	0,50	1	1kWh:0,03
Alt ısı değeri (MJ/kg)	43,4	42,6	37,5	46,4	47,1	26,7	19,9	120	11,64
Fiziksel faz	Sıvı	Sıvı	Sıvı	Basınçlı sıvı	Gaz-sıvı	Sıvı	Sıvı	Gaz-Sıvı	Elektrik
Parlama noktası (°C)	-43	73	132	-85	-185	13	11	-	-
Kendi kendine tutuşabilme sıcaklığı (°C)	258	315	149	483	540	423	480	577	-

misinde de aynı ilkelerle çalışan içten yanmalı motorlarla hareket eder. Uzay ve hava araçları da tepkisel motorları (jet/turbofan tepkimeli) kullanarak ivmelenmişlerdir. 1900'lü yılların başlarında her ne kadar içten yanmalı motorlar seri üretime geçmiş olsalar da, o dönemlerde bile elektrikli araçların kavramsal tasarım çalışmaları da yapılmıştır [2].

Bu çalışmada; Hidrojen'in ulaşım sektöründeki durumu hakkında güncel bilgilerin kısa bir özeti verilerek, hidrojenin taşıma sektörü için önemine vurgu yapmak amaçlanmıştır. Özellikle ilk kullanımı, önemi, üstünlükleri/olumsuz yanları, hava, kara ve deniz araçlarında kullanımı, yakıt olarak içten yanmalı motorlar ve yakıt hücrelerinde kullanımı, hidrojen altyapısı- sağlanması, dolum istasyonları, güncel araç örnekleri ve özellikleri kısa şekilde verilmiştir. Özellikle son on yılda teknolojinin gelişimi ve karbon-nötr/iklim anlaşmaları sonucunda önemi ve yeri herkes tarafından özümşenen hidrojenin, gelecek yıllarda daha da önemli bir enerji/yakıt paydaşı olacağı açıktır.

2. TAŞITLARDA HİDROJEN YAKITI

Yakın gelecekte hedeflenen karbon azaltım ve hatta sıfıra indirgeme yansıtımları, en yaygın kullanım alanı olan hidrokarbonlara, karbon bileşiklerinden bağımsız olarak yalnızca "hidro"nun, diğer bir deyişle sadece hidrojenin kullanımını kaçınılmaz duruma getirmektedir. Sektör bazlı küresel sera gazı salımları incelendiğinde ulaştırma sektörünün payı %28 olup, bu oran motorlu taşıtların ve/veya diğer ulaşım araçlarının üretiminden kaynaklanan salımları içermemektedir [3].

Nicelik bakımından çok büyük bir pazar olan ulaşım sektörü, son yıllarda elektrikli araçlara yönelmekte ancak bu eğilim, atmosfere salınan karbon oranını doğrudan ve büyük ölçekte etkilememektedir. Bu etkinin ve salımın azaltılmasında öncelikle yapılması gerekenlerin başında devlet politikalarının belirlenmesi gelmektedir. Yetkili kurum ve kurullar düzenleyici, sınırlayıcı ve değişim sürecini destekleyici kararlar alarak süreci hızlandırabilirler. 2021 yılının Temmuz ayında Avrupa Komisyonu tarafından açıklanan "Fit for 55" paketinin beş ana başlığından ikisi doğrudan, üçü dolaylı olarak, düşük salımlı ulaşım türlerini destekleyen altyapı ve yakıtlara yöneliktir. 2019 yılında duyurulan Avrupa Yeşil Mutabakatının stratejik vizyonu sıfır salımlı araçların piyasaya sunulması, elekt-

rikli araç altyapısının geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasını kapsamaktadır. Türkiye'de 16.07.2021 tarihinde Resmî Gazete'de yayımlanan 2021/15 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi'nde, sürdürülebilir akıllı ulaşım özel yer ayrılmıştır [4].

Yakıt olarak kullanımı 1950'lerde başlamış olsa da, gerek çevre koruma koşulları, gerekse enerji arz güvenliği bakımından doğada serbest halde bulunamamasına karşın birçok farklı kaynaktan elde edilebilen hidrojen, her geçen gün daha da önemli bir konuma gelmektedir. Uzay endüstrisi ve askeri teknolojilerde kullanımları yaygınlaşma evreleri tamamlanmış olan hidrojen, adım adım günlük hayata girmeye başlamıştır. Bunun en doğal sonuçlarından birisi de ulaşım sektöründe ve pazarındaki artan payı ve hidrojene artan istek olmuştur. Önem sırası uzay, havacılık, deniz ve kara taşıtlarında farklılık göstermekle birlikte, kullanılan yakıtların öngörülen hedeflere ulaşabilmeleri için olabildiğince hafif ve az yer kaplaması gerekmektedir. Bu durum, yakıt tahrik faktörü (YTF) olarak adlandırılan boyutsuz bir değer ile tanımlanmaktadır [5].

$$YTF (\phi) = \frac{(E/M)(E/V)^{2/3}}{(E_h/M_h)(E_h/V_h)^{2/3}} \quad (1)$$

Yakıtın enerjisi E, kütlesi M, hacmi V, hidrojen ise h alt simgesi ile gösterilmiştir. YTF ile yakıtın niteliği doğru orantılıdır. Eşitlik 1 kullanılarak yapılan yakıt tahrik faktörü hesaplamalarında, hem sıvı hem de gaz formundaki hidrojen, diğer yakıtlardan daha yüksek değere sahiptir. Diğer taraftan en büyük olumsuz yanı, Dünya üzerinde moleküler hidrojen olmamasıdır. Bu yüzden hidrojen madenciliği yapılamaz, ancak sonraki sürecin belirleyicisi olacak herhangi bir çeşit enerji kullanılarak üretilebilir [6].

Dünya çapında bilim insanları ve ticari kuruluşlar, hidrojenin farklı kullanım alanlarını araştırmaya özellikle son çeyrek asırda hız vermiş ve bütçe ayırmışlardır. Bu ilginin önümüzdeki yüzyılda artarak süreceği açık şekilde ortadadır. Hidrojen kullanımının ulaştırma sektöründe kullanımının artması için en önemli iki unsur üretim maliyetlerinin azaltılması ve erişimin kolaylaştırılması olarak sıralanabilir. Diğer taraftan hiçbir yeni teknoloji, eski teknolojiyi tamamen ortadan kaldırarak bir anda çığır açıcı şekilde kendine yer bulmaz. Bu süreç, ara geçiş teknolojileri, hibrit sistemler gibi çeşitli aşamaları geçerek

olgunlaşır. Bu gelişim süreciyle ilgili olarak ulaştırma sektöründen verilebilecek örneklerden biri de 21. yüzyılın ilk yıllarında hızla kabul gören ve yaygınlaşmaya başlayan benzinli motorların, LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) kullanımını ile taşıtların çift yakıtlı kullanımlarıdır. Hızlı yaygınlaşma, yukarıda bahsedilen iki unsurun, maliyet ve erişim kolaylığı ile doğru orantılı olarak aşama aşama gerçekleşmiştir. Sıvı ve gaz yakıtların bir arada kullanımından doğan üstünlükler, sonraki süreçlerde LPG yerine hidrojen kullanımı üzerine yapılan araştırmalara evrilmiştir. Henüz ülkemizde yeterince yaygınlaşmamış olsa da, yapılabilecek yüzeysel bir internet araştırması, daha sonra ayrıntılı olarak açıklanacak olan kuru hücre tarafından üretilen hidroksi (HHO) gazının, emisyon yayılımlarını azaltırken, motor veriminden özveride bulunmadan yakıt ekonomisi sağlayabildiğini kanıtlamaktadır.

3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJEN KULLANIMI

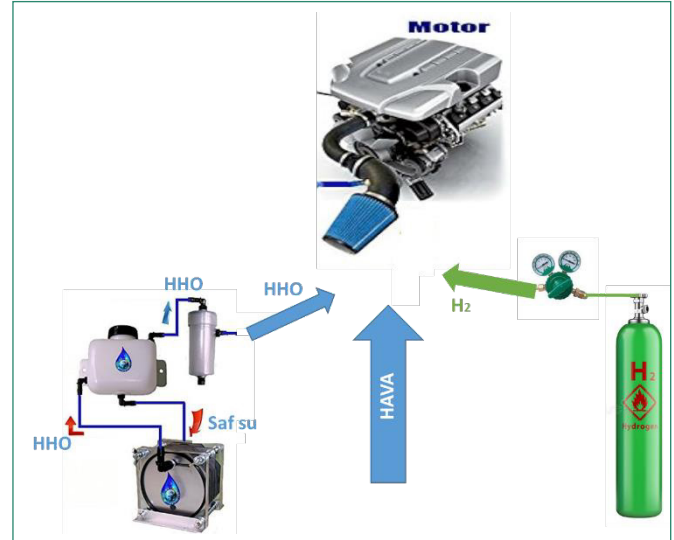
Yakıt olarak kullanılan hidrojenin üstünlüklerinin yanı sıra, olumsuz yanları da bulunur. Sıfır salım ile sudan üretilmesi, yakıt hücrelerinde yüksek enerji dönüşüm etkinliği olması, evrende bol miktarda bulunması, farklı formlarda depolanabilmesi, özellikle katı (örn. Metalhidrürler) ve sıvı (örn. Amonyak ve saf su) formda güvenli şekilde uzun mesafeli taşımaya elverişli olması, yüksek ısı değeri olması üstünlüklerinin başlıcalarıdır. Diğer taraftan, üretiminin görece pahalı olması, daha büyük hacimlere gereksinim duyması nedeniyle depolama zorluğu olması, yeni altyapı yatırımlarına gereksinim duyması ve en ucuz üretim yöntemlerinin hâlâ fosil yakıtlara bağlı olması ise olumsuz yanlarının başlıcalarıdır.

Hidrojen, içten yanmalı motorlarda yakıt olarak iki şekilde kullanılabilir. Birincisi, motoru yalnız hidrojenle çalışmaya uygun duruma getirerek "hidrojen motorlu araç" yapmaktır. Bu teknolojinin çalışmaları prototip olarak sürmektedir (BMW, Cummins, gibi).

Hidrojenin içerdiği yüksek enerji, alevlenme noktası ve yanma aralıklarının geniş olması, enjektör basıncının uygun şartlara getirilememesi ve gaz formundaki hidrojenin güvenlik çekinceleri gibi bir takım nedenlerden dolayı tamamen hidrojen motoru yapımı çalışmalarının sürmesine yol açmıştır.

İkincil hidrojen kullanımı ise, doğrudan saf hidrojenin veya hidroksi gazının emme manifoldundan zenginleştir-

mesi ile gerçekleşir. Her iki yöntem de taşıtlara sonradan eklenebilmektedir. En önemli üstünlüğü, verimi düşürmeden salım değerlerinde ciddi düşümlere, özellikle CO₂ düşümü sağlamasıdır. Hidroksi gaz ve saf hidrojenin, içten yanmalı motora bağlantı aparatları ve şeması aşağıda Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Hidroksi ve Saf Hidrojen Gaz Yakıtlarının İçten Yanmalı Motorda Kullanım Şeması

Ulaşım sektöründe hizmet veren ve kullanımda olan çoğu taşıt içten yanmalı motorludur. Hidrojenin en verimli şekilde elektrik veya dolaylı yoldan mekanik enerjiye dönüşümünü sağlayan yakıt hücrelerinin maliyeti, dolun istasyonu ölçeği, olgunlaşmamış teknolojisi (araçlarda kullanım açısından) gibi olumsuz yanlarından dolayı henüz pazarda tam anlamıyla yaygınlaşmamıştır. LPG-benzin çift yakıt örneğinde olduğu gibi hidrojenin ek yakıt olarak İYM (içten yanmalı motor) da doğrudan yanma yöntemi ile kullanımı, geçiş sürecini hızlandırabilecektir. Bu konuda yapılan çalışmalar, motorda herhangi bir yapısal değişikliğe gerek duyulmadan iki farklı şekilde yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Birinci yöntem kriyojenik tanklardan regülatör yardımı ile sıvı hidrojenin basıncını atmosfer basıncına indirmek ve emme manifoldundan hava ile karıştırarak yanma odasına göndermek; ikincisi ise taşıtlarda bulunan akünün potansiyel farkından faydalanarak atmosfer basıncında suyun elektrolizi ile %66 hidrojen %33 oksijenden oluşan hidroksi gazını yanma odasında aynı yöntemle yakmaktır. Hidrojenin, geleneksel sıvı yakıtlara göre daha yüksek ısı değeri ve alev hızı vardır. Yukarıda belirtilen iki farklı yöntemin

de İYM'da CO (karbonmonoksit), CO₂ (karbon dioksit), PM (partikül madde) ve yanmamış yakıt miktarlarını iyileştirdiği bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır [7].

3. YAKIT HÜCRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA HİDROJEN KULLANIMI

“Yakıt hücresi”, bir yakıttaki kimyasal enerjiyi tek adımda doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir aygıttır. Yakıt hücreleri ve bataryalar benzerlik gösterirler. Her ikisi de, bir elektroliti saran ve kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için süreçte iç oksidasyon-redüksiyon tepkimelerini kullanan, iki elektrotlu elektrokimyasal hücrelerden oluşması nedeniyle oldukça benzerdir. Ancak, batarya kapalı bir enerji deposu olduğundan, dışarıdan bir elektrik kaynağı ile şarj/deşarj yapılarak elektrokimyasal tepkimenin gerçekleştirilmesi zorunludur. Öte yandan bir yakıt hücresi, dış bir kimyasal enerji kaynağı kullandığından, bir hidrojen kaynağı ve bir oksijen kaynağı ile süresiz olarak çalışabilmektedir. Ayrıca, geliştirilmiş şarj edilebilir piller, modül düzeyinde 150 Wh/kg enerji yoğunluğuna ulaşabilirken, tazeleyici (rejeneratif) yakıt hücreleri sistem düzeyinde >800 Wh/kg ve rejeneratif olmayan yakıt hücreleri >1000Wh/kg enerji yoğunluğuna ulaşmaktadır” [4]. Yüksek verimli ve çevreye zararsız elektrokimyasal tepkimeler sonucu üretilen doğru akım (DC), elektrik motorları ile mekanik enerjiye dönüştürülür ve ulaşım sektöründe hava, kara ve deniz

taşıtlarında kullanılır. Günümüz ulaşım sektöründe en fazla yeğlenen ve çalışma sıcaklığı açısından en uygun olan; Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)'nin temel özellikleri ve şematik örneği Tablo 2'de verilmiştir.

Yakıt hücreli elektrikli araçların, normal elektrikli araçlara göre bazı üstünlükleri ile olumsuz /zayıf yönleri vardır. En önemli üstünlüğü, daha uzun menzil, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi şartıyla daha çevreci, daha kısa şarj/dolum süresi (5-7 dakikada hidrojen tankı dolumu) ve daha zorlu iklim koşullarında bataryalardan daha verimli olmaları olarak sıralanabilir. Zayıf yönleri ise; batarya/elektrik motoru ikilisi kadar otomotiv dünyasında olgunlaşmamış teknoloji, hidrojen dolum tesisi/alt yapısının ayrı bir parasal yükü, hidrojen üretiminin de ek parasal yük gerektirmesi, yakıt pili malzeme ve üretiminin getirdiği zorluklar, binek araç sınıfında sektörü elektrikli araçların domine etmesi olarak sıralanabilir.

Bu üstünlükler ve zayıf noktalar göz önünde bulundurulduğunda, ulaşım sektöründe genel eğilim, daha fazla güç gerektirecek, hacimce daha büyük araçlarda yakıt hücresi kullanımının önünün daha açık olacağı yönündedir. Sonuçta, aynı gücü elde etmek için kapasitesi ve buna bağlı boyutları büyüyecek bir batarya takımından çok, hidrojen tüpü ile güç/ağırlık/yakıt tüketiminin en iyi duruma getirilmesi çok daha önemlidir.

Bu konuda hazırlanmış ayrıntılı teknik rapor [4] ile hava,

Tablo 2. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)'nin Temel Özellikleri ve Şematik Örneği [4]

Yakıt	Hidrojen
Çalışma sıcaklığı (°C)	30-100
Verim (%)	40-60
Yığın güç yoğunluğu (W kg ⁻¹)	>500
Sistem güç yoğunluğu (W kg ⁻¹)	>150
Tepkime	Anot: H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ Katot: ½ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Elektrolitteki yük taşıyıcısı	H ⁺
Elektrolit	Polimerik H ⁺ iyon değişim membranı

PEMYH



Şekil 2. Yakıt Hücreli Araç Örnekleri

kara ve deniz araçları için yapılan analize, araç örneklerine ve firmalara ulaşılabilir. Bununla birlikte, sektörün her alanında ilgi toplayan yakıt hücreli araçların bazılarının örneklendirmeleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Hidrojenin taşıtlarda kullanılmasında ivedilikle çözülmesi gerekli olan iki ana unsur; hidrojen dolum tesislerinin yaygınlaşmamış olması ve dolum güvenlik risklerinin göreceli olarak az olduğunun kullanıcılara aktarılmasındaki başarısızlıktır.

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) şirketinin verilerine göre 2022 yılı sonunda Dünyada toplam 814 Hidrojen Dolum İstasyonu bulunmakta ve 315'i için fizibilite raporlarının oluşturulmaya başlandığı bildirilmektedir [8]. Kurt J. ve çalışma ekibinin 2019 yılında yayınladıkları araştırmaya göre bir hidrojen dolum istasyonunun maliyeti 1-4 milyon Euro kadardır [9]. Bu rakamın daha iyi bir değere indirilebilmesi için, üretim maliyetinin, kontrol ve bakım maliyetlerinin de önemli ölçüde düşürülmesi gerekmektedir.

Güvenlik konusunda, diğer tüm yakıtlar kadar masum olan hidrojenin; ne yazık ki bu konuda kötü bir ünü bu-

lunmaktadır. Zeplin patlaması, nükleer bombadan sonra hidrojen bombasının iddiası, hidrojenin güvenilirliğini zedelemektedir. Aslında kroyojenik basınçlı tüpler içinde belli bir basınç altında bulunsun da, insanların genel kanılarında değişimin gelişebilmesi için hidrojene olan güvenin artması gerekmektedir. Bu güvenin desteklenmesi için her ülkenin araç ve dolum istasyonlarının denetiminde kullanacak oldukları standartların oluşturulması ve uygulamaların denetlenmesi gerekmektedir.

5. SONUÇLAR

Artan nüfus yoğunluğu ve enerji gereksinimi nedeniyle yaygın olarak kullanılanlara seçenек olabilecek enerji kaynaklarının kullanımı, son dönemde tüm ülkeler tarafından benimsenmiştir. Bu yeni seçenekler, üzerinde yoğunlukla çalışılan iklim değişikliği ve karbon üretiminin yarattığı sorunların çözümünde en hızlı uygulanabilecek yollardandır. Hidrojen, bu seçenekler içerisinde öne çıkmayı sürdürmektedir. Hidrojen, evrenin yakıtı konumunda olup, fizikokimyasal ve mühendislik özellikleri açısından bu amaca (karbonsuzlaşma) hizmet eden çok önemli elementlerin başında gelmektedir. Özellikle Dünyadaki

emisyona salınımının %28'lik bir kısmında payı olan ulaşım sektöründe, hidrojen gibi bir yakıtın kullanım olasılığının bulunması büyük bir şans olarak görülmektedir.

1950'li yıllardan günümüze kadar, hidrojen enerjisinden yararlanılarak taşıtların hareketi sağlanmaktadır. Özellikle son 20 yıldır, salım yönetmelikleri ve Paris Antlaşması gibi yaptırımlarla birlikte, içinde karbon bulundurmayan tek yakıt olan hidrojene, taşıt sektörünün ilgisi, gün geçtikçe artmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda hidrojen, hava yakıt karışımına emme manifoldundan zenginleştirme ile veya doğrudan hidrojen motoru ile yakıt olarak giriş yapabilmektedir. Her yakıt gibi kendine özgü üstünlük ve zayıflıkları bulunan bu yakıtın ulaşım sektöründeki yeri ve önemi; bu değerlendirme yazısında ele alınmıştır.

Bu yazıda; hidrojenin ilk yakıt olarak kullanımı, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin diğer yakıtlarla karşılaştırması, ulaşım sektöründe hangi şartlarda kullanılırsa verimi artırabileceği, salımın en aza indirilmesinde ne kadar kilit role sahip olduğu, içten yanmalı motorlarda nasıl kullanıldığı, yakıt hücreli elektrikli araçlarda nasıl kullanıldığı, bataryalı elektrikli araçlara göre üstün ve zayıf yönleri, hava/kara/deniz araçlarından örneklemeler ve hidrojen dolum istasyonlarının öneminden ayrıntılı olarak söz edilmiş hidrojen güvenliğini konularına kısmen değinilmiştir.

Özellikle yeşil hidrojen üretimi ile birlikte elde edilen hidrojenin, yakıt hücreli elektrikli araçlarda kullanılması ve bununla ilgili tüm teknolojinin hızlı ve emin adımlarla atılması gerekmektedir. Güç/ağırlık/yakıt tüketimi görece fazla olan ağır tip araçlarda (kamyon, tır, uçak, gemi, tren) hidrojen enerjisinin kullanılması özellikle önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, ülkemizde hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmalarından ötürü, "Hidrojen Teknolojileri Derneği"ne ve tüm üyelerine teşekkürlerini sunar.

KAYNAKÇA

1. **Dincer, I.** 1. ABD Enerji Bakanlığı, 2023, Alternative Fuels Data Center, Fuel Properties Comparison, https://afdc.energy.gov/fuels/properties_notes.html , Son Erişim tarihi: 23.12.2023
2. **Arat, H. T., Baltacıoğlu, M. K. ve Conker, C.** 2022. Electric vehicles and future of transport sector. In Handbook of Energy Transitions (pp. 151-165). CRC Press.
3. **Tanç, B., Arat, H. T., Conker, Ç., Baltacıoğlu, E. ve Aydın, K.** 2023. Energy distribution analyses of an additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle. International Journal of Hydrogen Energy, 45(49), 26344–26356,
4. **Arat, H. T., Baltacıoğlu, M. K. ve Süreç M.G.**, -2023. Ulaşım Sektörü için Hidrojen ile Çalışan Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar, Teknik Rapor, ISBN: 978-605-70717-4-3, Hidrojen Teknolojileri Derneği, İstanbul.
5. **Veziroğlu, A.** 2021. Hidrojen neden potansiyel bir ulaşım yakıtı olarak seçilmelidir?. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 404-411.
6. Hydrogen as a Future Energy Carrier (Eds.: A. Züttel, A. Borgschulte, L. Schlapbach), Wiley-VCH, Weinheim, 2008, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527622894>, Son Erişim Tarihi: 24.02.2024
7. **Baltacıoğlu, M. K., Arat, H. T., Özcanlı, M. ve Aydın, K.** 2016. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. International Journal of Hydrogen Energy, 41(19), 8347-8353.
8. Hydrogen Refueling Stations, 2023, <https://www.h2stations.org/statistics/> , Son Erişim Tarihi: 23.12.2023
9. **Kurtz, J., Sprick, S. ve Bradley, T. H.** 2019. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. International Journal of Hydrogen Energy, 44(23), 12010-12023.