

ARGE DERGİSİ

FİGES İLERİ MÜHENDİSLİK VE ARGE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

2021 - 1 / Sayı: 29

YEŞİL HİDROJEN

konusu ile tüm merak
ettikleriniz özel sayımızda!



<04

HİDROJEN
ÇAĞININ
GETİRDİĞİ
YENİLİKLER

<14

HİDROJEN
TEKNOLOJİLERİ
DERNEĞİ BAŞKANI
PROF. DR.
İBRAHİM DİNÇER
İLE ÖZEL
RÖPORTAJ

<24

ASPİLSAN ENERJİ
AR-GE BİRİM
MÜDÜRÜ
EMRE ATA İLE
ÖZEL RÖPORTAJ

<40

HİDROJEN DEĞER
ZİNCİRİ ÜZERİNE
MARMARA
ARAŞTIRMA
MERKEZİ ENERJİ
ENSTİTÜSÜ
ÇALIŞMALARI

<52

SABANCI
ÜNİVERSİTESİ
PROF. DR.
SERHAT
YEŞİLYURT
İLE ÖZEL
RÖPORTAJ

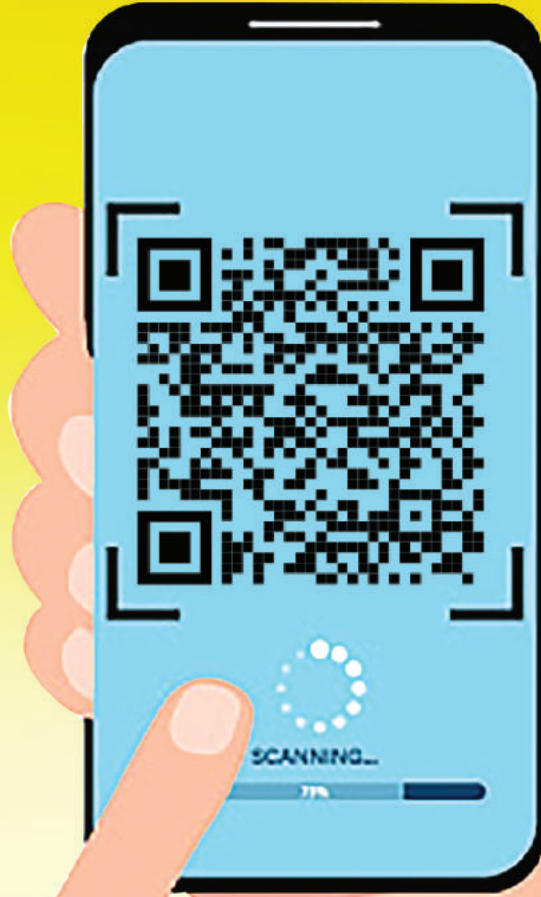
ARGE DERGİSİ Değerli Okurları;

Dergimizin gelişimine sizler de katkı sağlamak ister misiniz?

1. Sizlere daha iyi hizmet verebilmek için oluşturduğumuz forma ulaşmak için karekodu okutup,

2. Açılan **ARGE DERGİSİ Geri Bildirim** formunu doldurmanızı rica ederiz.

Katkıda bulunan tüm değerli okuyucularımıza **TEŞEKKÜR EDERİZ.**





Değerli ARGE DERGİSİ okurları,

Gelecek nesillere yaşanabilir bir doğa bırakmanın, tüm insanlığın en başta gelen görevi olduğunu hepimiz idrak etmiş durumdayız. Evlerimizde, arabalarımızda ve sanayide kullanmakta olduğumuz hidrokarbon içerikli yakıtlar yüzünden karbondioksit salımı ve dolayısıyla “karbon ayak izi”miz sürekli artmaktadır. Bu süreç ise küresel ısınmaya, kuraklığa ve dolayısıyla çölleşmeye yol açmaktadır. Ülkemiz, mevcut bitki örtüsü ve içinde bulunduğu iklim kuşağı bakımından bu olumsuz süreçten en fazla etkilenen ülkelerden birisi konumundadır. Bundan dolayı yaşamımızda hidrokarbonları olabildiğince azaltıp yerine elektrik enerjisi kullanarak doğamızı korumak zorundayız. Konunun son derece hassas ve önemli olmasını dikkate alarak dergimizin geçen sayısını “Elektrifikasyon” konusuna ayırmıştık.

Elektrik enerjisi ile ilgili olarak önümüze iki sorun çıkmaktadır. Birincisi, bu enerjiyi “temiz” üretebilmek; ikincisi ise talep fazlası enerjiyi büyük miktarlarda verimli olarak depolayabilmektir. Temiz elektrik enerjisi üretimi, bir başka deyişle karbon ayak izi mümkün olduğu kadar düşük elektrik üretimi, yenilenebilir enerji kaynaklarını ve/veya nükleer enerjiyi kullanarak mümkündür. Üretilen elektrik enerjisi günün çeşitli saatlerinde ve yılın çeşitli zaman aralıklarında farklı miktarlarda tüketildiğinden talebin yüksek olduğu zamanlarda ihtiyacı karşılamak için depolanması zorunludur. Aksi halde tüketimin düşük olduğu zamanlarda üretilen enerji yok olup gitmektedir. Ayrıca elektrikli taşıt araçlarında kullanım için de bu enerjiyi depolamak gerekmektedir.

Elektrik enerjisini depolamak için ise bugün itibarıyla ağırlıklı olarak elektrokimyasal prensibe dayanan pil teknolojileri kullanılmaktadır. Motorlu taşıt araçlarında kurşunlu pillerin kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. Özellikle son yıllarda yaygınlaşan lityum iyon pilleri; dizüstü bilgisayarları, cep telefonları

ve elektrikli taşıt araçlarının “olmazsa olmazı” durumundadır. Ancak, elektrik enerjisini büyük çapta çevre dostu ve verimli olarak depolayabilmenin yolu hidrojen gazını kullanmaktan geçmektedir. Hidrojenin doğada bileşik olarak bol miktarda bulunması, oksijenle tepkimeye girdiğinde sadece ısı enerjisi ve su ortaya çıkması, yani çevre için zararlı olabilecek maddelerin ortaya çıkmaması ve yakıt hücrelerinde elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi bu elementi rakipsiz kılmaktadır. Bundan dolayı hidrojen için geleceğin yakıtı denmektedir. Hidrojen aslında bir pil gibi enerji taşıyıcısıdır, ancak literatürde yakıt olarak da adlandırıldığını belirtmek istiyorum.

Hidrojen elementi periyodik cetvelin birinci elementidir. Bir proton ve bir elektrona sahip olup nötronu bulunmamaktadır. Büyük Patlama (Big Bang) esnasında ilk ortaya çıkan element hidrojendir. Evrenin yaklaşık olarak %75’i hidrojenden oluşmaktadır. Hidrojen, periyodik sistemin en hafif elementi olduğundan ilginç özelliklere sahiptir. Yoğunluğu, havanın yoğunluğunun 14’te 1’idir. Bu bakımdan dünya yer çekimi alanından kolayca kurtulup uzaya firar edebildiğinden atmosferde hemen hemen hiç bulunmaz. Hidrojen, atom yarıçapı çok küçük olduğundan içinde bulunduğu kabın malzemesinin atomları arasından kolayca dışarıya sızabilir. Oksijen gibi çelik tüplerde depolanması mümkün olmadığından özel malzemelerden oluşan kaplarda taşınması gerekmektedir.

Ülkemizde hidrojenin önemini anlayıp ilk atılımı yapan Prof. Dr. Nejat Veziroğlu olmuş, ancak çeşitli sebeplerle gecikmeler yaşanmıştır. Bugün geldiğimiz noktada TÜBİTAK’tan ASPİLSAN’a Üniversitelerimiz de dâhil olmak üzere teknik ve bilimsel kuruluşlarımızın hidrojen konusuna ciddi bir şekilde eğildiğini görmekten memnunluk duyuyoruz.

Ancak hidrojen gazını da çevreyi kirletmeden, yani mümkün olduğu kadar düşük karbondioksit salımı ile üretmek büyük önem arz etmektedir. Böyle üretilen hidrojen için Yeşil Hidrojen (Green Hydrogen) kavramı da kullanılmaktadır. Dergimizin bu sayısında geleceğin yakıtı olan hidrojeni daha yakından tanıma imkânı bulacaksınız.

Keyifli okumalar.

Dr. Tarık Öğüt

İLERİ MÜHENDİSLİK VE ARGE TEKNOJİLERİ DERGİSİ

2021 - 1 / Sayı: 29

(Ocak - Şubat - Mart) ISSN: 2147-9550

FİGES AŞ. Adına Sahibi

Yönetim Kurulu Başkanı
Dr. Tarık ÖGÜT

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Esra SEVİNÇ
esra.durmus@figes.com.tr

Yayına Hazırlayanlar

Esra SEVİNÇ

Yönetim Yeri:

Odunluk Mahallesi Akpınar Caddesi
Green White Plaza No: 5/7
16110 Nilüfer/Bursa

Telefon : 224 4428585

Faks : 224 4428586

www.figes.com.tr

TEKNİK HİZMETLER

Yayına Hazırlama ve Tasarım
FİGES A.Ş. Esra SEVİNÇ

Basım Yeri:

Everest Basım Matbaa Hiz. San.Tic.Ltd.Şti.
Sancaktepe Mah. 914. Sk.No:2/1 34200
Bağcılar / İSTANBUL
Tel :+90 212 434 51 34

Yayın Türü:

Yerel süreli Türkçe ve İngilizce Bilimsel Yayın

3 ayda bir yayımlanır

Dergide yayımlanan Yazı, Fotoğraf, Harita, İllüstrasyon ve Konuların Her Hakkı Saklıdır. Kaynak Gösterilmek Şartıyla Alıntı Yapılabilir. Yayımlanan Eserlerin Sorumluluğu Eser Sahiplerine Aittir.

Aksi Gösterilmedikçe Tüm Görseller:
ANSYS, MATHWORKS ve FİGES

Para ile satılmaz

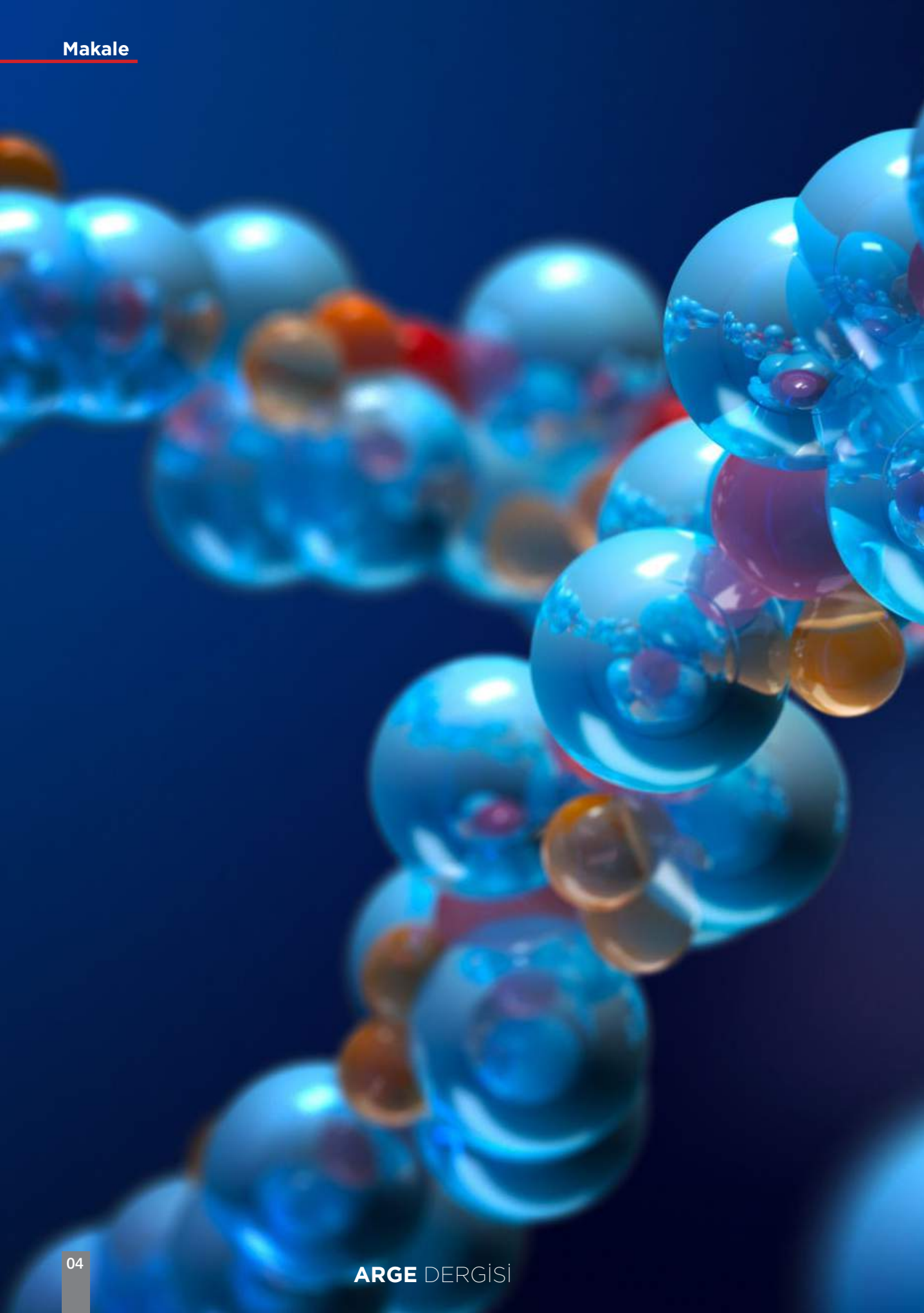


İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER

- 04** HİDROJEN ÇAĞININ GETİRDİĞİ YENİLİKLER
- 14** HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ DERNEĞİ BAŞKANI
PROF. DR. İBRAHİM DİNÇER İLE ÖZEL RÖPORTAJ
- 18** İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELEDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ
KAYNAĞI: NÜKLEER'DEN HİDROJEN
- 24** ASPİLSAN ENERJİ Ar-Ge BİRİM MÜDÜRÜ EMRE ATA İLE
ÖZEL RÖPORTAJ
- 32** HİDROJENİN TEMİZ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ, DEPOLANMASI
VE KULLANIM UYGULAMALARI
- 40** HİDROJEN DEĞER ZİNCİRİ ÜZERİNE MARMARA ARAŞTIRMA
MERKEZİ ENERJİ ENSTİTÜSÜ ÇALIŞMALARI
- 48** HYDROGEN FUEL CELLS REDUCE CO₂ EMISSIONS
ELECTRIFYING COMMERCIAL VEHICLES WITH HYDROGEN
FUEL CELLS
- 52** SABANCI ÜNİVERSİTESİ PROF. DR. SERHAT YEŞİLYURT
İLE ÖZEL RÖPORTAJ
- 56** SIEMENS ENERGY İLE AIR LIQUIDE, SÜRDÜREBİLİR HİDROJEN
ÜRETİMİ İÇİN BÜYÜK ÖLÇEKLİ BİR ELEKTROLİZ ORTAKLIĞI
GERÇEKLEŞTİRECEK





HİDROJEN ÇAĞININ GETİRDİĞİ YENİLİKLER



Prof. Dr. İnci Eroğlu

ieroglu@metu.edu.tr

Hidrojen Teknolojileri Derneği KYK Üyesi

ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü

(Emekli Öğretim Üyesi)

GİRİŞ

Yeni Milenyuma girerken gelişmiş ülkeler alternatif enerji arayışını programlandırmak ve yeni bir strateji oluşturmak gayreti içindeydi [1]. İşte 2000'li yılların başlarında ülkemizde de bu stratejide yer almak, katkıda bulunmak, Avrupa Birliği Çerçeve Programlarında pay ve söz sahibi olmak için, TÜBİTAK aracılığıyla önemli hamlelerde bulunuldu. Strateji planının tartışıldığı Brüksel'deki toplantıya TÜBİTAK'ın desteğiyle ODTÜ'den Prof. Dr. Tayfur Öztürk ve ben katıldım. Aslında hidrojen enerjisiyle tanışmam çok daha öncedir; 1987 yılında Prof. Dr. Nejat Veziroğlu'nun düzenlediği Alternatif Enerji kongresinde hocamızın beni ve birlikte biyomimetik enerji sistemleri konusunda araştırdığımız Prof. Dr. Meral Yücel'i biyolojik hidrojen üretimi konusunda araştırdığımızı teşvik etmesidir.

Prof. Dr. Nejat Veziroğlu 1970'li yıllarda oluşan petrol krizine çözüm getirmek amacıyla Miami Üniversitesi Temiz Enerji Enstitüsü'nde hidrojen enerjisi konusunda araştırmalar başlattı ve birbirini takip eden yıllarda Alternatif Enerji ve Dünya Hidrojen Enerjisi Kongrelerini düzenlemeye başladı. Aynı yıllarda Uluslararası Hidrojen Enerjisi Derneği (International Association of Hydrogen Energy, IAHE) Prof. Dr. Nejat Veziroğlu ve değişik ülkelerden 12 profesörle birlikte kuruldu. Bu kurucu ekip bugün Hidrojen Romantikleri [2] olarak anılmaktadır. Hidrojen Enerjisi konusundaki araştırmaların teşvik edilmesinde, yaygınlaştırılmasında, güncel, özgün ve doğru kaynaklara ulaşılmasında önemli bir yer tutan Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi (International Hydrogen Energy Journal) bu yıllarda yayına başladı. Prof. Dr. Nejat Veziroğlu bu derginin Baş Editörlüğünü 2018 yılına kadar üstlendi. Oğlu Emre Veziroğlu halen bu görevi sürdürmektedir. Elli yılı aşan bu inanç ve emek Hidrojen Enerjisinin anlaşılması, kabullenilmesi, benimsenmesi ve birçok araştırmacının katkısıyla ileri götürülmesini sağladı. Bu birikim 21. Yüzyıla Hidrojen Çağı adının verilmesine vesile oldu.

2020 yılı dünyamızı etkileyen covid-19 salgını nedeniyle alternatif enerji arayışında Hidrojen Enerjisinin önemini hatırlamamızda ve strateji planlarının bu konuyu dikkate alarak revize edilmesinde etkilidir [3]. Yinelenen strateji planlarında 2030 ve 2050 yıllarına kadar yapılan plan ve stratejiler birçok ülke tarafından yayınlandı [1,4,5]. Biz bilim insanları temel bilimler ve mühendislik konusunda buluşlar yapar, yeni projeler üretir, uygulamalarla prototipler üretiriz.

Bizlerin motivasyonu yeni keşfetmek, insanlığa yararlı olacak yeni teknolojiler geliştirmektir. Bilimin ülkesi yoktur. Bilim insanlığa mal olmalıdır. Dolayısıyla herhangi bir Üniversite laboratuvarında, Enstitüde, ARGE Merkezinde geliştirilen teknoloji insanların kullanımına er geç ulaşacaktır. ARGE projelerinin desteklenmesi, sonuçlarından toplumun istifade etmesi, ulaşımın sağlanması, özet olarak stratejinin tatbikatı önemli ölçüde yöneticilere, politik seçim ve önceliklere yer verilmesine bağlıdır.

Türkiye Cumhuriyeti'nin de kurucu üyesi olduğu Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency, IEA) Hidrojen Uygulama Anlaşması Görev Grupları (Hydrogen Implementing Agreement, HIA TASKs) oluşması projelerini desteklemiştir. Uluslararası işbirliği COST Projeleriyle de gerçekleşmektedir [6]. Bu Görev Gruplarının yararını ve önemini burada vurgulamak isterim. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Araştırma Merkezi (UNIDO-ICHET) Birleşmiş Milletler desteğiyle İstanbul'da 2002'de kurulmuştur. Prof. Dr. Nejat Veziroğlu bu merkezin kurucu başkanı olarak görev almıştır. Hidrojen enerjisi araştırmalarını hızlandırmak için bir çok önemli proje desteklenmiştir [7]. Ülkemizde hidrojen enerjisi konusunda TÜBİTAK ve Üniversitelerin desteklediği münferit projeler gerçekleşmiştir.

Araştırmaların teşviki ve bilimsel platformda paylaşılabilmesi için 2015 yılında Hidrojen Teknolojileri Derneği kurulmuştur. Dernek her yıl uluslararası bir kongre düzenlemektedir. Çevrimiçi Ulusal Hidrojen Çalıştay ve Paneli 25 Ağustos 2020'de gerçekleştirilmiştir [8]. Ocak 2021'den bu yana Derneğin düzenlediği Hidrojen Sohbetleri yine çevrim içi yayınlanmaktadır [9]. Uluslararası Hidrojen Teknolojileri Kongresi IHTEC2021, 26-28 Mayıs 2021'de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi tarafından düzenlenmektedir[8]. Hidrojen Teknolojileri Derneği önümüzdeki yıl 26-30 Haziran 2022'de İstanbul'da yapılacak olan 23. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Kongresi'ni (WHEC2022) organize etmektedir. Dünyadaki gelişmelere paralel olarak Hidrojen Enerjisi ARGE çalışmalarına zemin temin etmek amacıyla Hidrojen Teknolojileri Derneği "Türkiye için Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası" raporunu [10] yayınladı. Birçok teknik konuya değinilen bu raporun araştırmacı ve yöneticilere yararlı olmasını umuyoruz. Ülkemizde böyle çalışmaların artması doğru bilgilendirme, strateji oluşturmada önemli kaynak olacaktır.

HİDROJEN ENERJİSİ NEDİR?

Hidrojen Periyodik Tablo'nun 1 numaralı en küçük elementidir. İki atom hidrojen ve bir atom oksijen bir su molekülünü oluşturur. Dolayısıyla suyu ayrıştırarak hidrojen ve oksijen elde edebiliriz veya hidrojen ve oksijeni birleştirerek su elde edebiliriz. İki yüzyıl önce Jules Verne Aya Yolculuk romanında yakıt olarak suyu önermişti. Su bir yakıt değildir, bilakis suyu ayrıştırmak önemli miktarda enerji gerektirir, yakıt olan hidrojendir. Zira hidrojen ve oksijenin tepkimeye girmesiyle su oluşurken önemli miktarda enerji açığa çıkar. Doğrudan yanma ile bu enerji ısı olarak kullanıldığı gibi bu tepkimenin özel tasarımı elektrokimyasal bir hücrede gerçekleştirilmesiyle ısı ile birlikte hidrojen ve oksijen arasındaki elektron transferinin hücre dışı iletişimle sağlanmasıyla doğru akım elde edilir. Bu cihazları yakıt hücresi olarak adlandırıyoruz. Konvansiyonel elektrik üretiminde önce kimyasal enerji ısıya dönüşmekte, ısı mekanik enerjiye çevrilmekte ve mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşmektedir. Bu çevrimlerdeki verim Carnot döngüsüyle %30'u geçmemektedir. Halbuki hidrojen ve oksijen/hava, yakıt hücrelerinde (yakıt pili olarak da adlandırılmaktadır) birleştiğinde kimyasal enerji ısı ve elektriğe doğrudan dönüşmektedir. Kojenerasyonla açığa çıkan ısıdan da yararlanılan sistemlerde verim %80'i bulur. Isıdan yararlanılmazsa verim %60 civarındadır. Yakıt hücrelerinin geliştirilmesi hidrojen enerji sistemlerinin kullanımının önünü açmıştır. Benzer bir durum taşıtlarda hidrojen yakıtlı içten yanmalı motor kullanımı ile hidrojen yakıt hücresiyle bağlantılı elektrik motorlu taşıtların karşılaştırılmasında da görülmektedir. Yakıt hücreli araçlar daha yüksek bir verimle çalışmaktadır.

Hidrojen Enerji Sistemleri'ni hidrojenin üretimi, depolanması ve yakıt hücreleriyle elektrik elde edilmesi olarak üç ana başlıkta ele alabiliriz.

HİDROJEN GAZI ÜRETİMİ

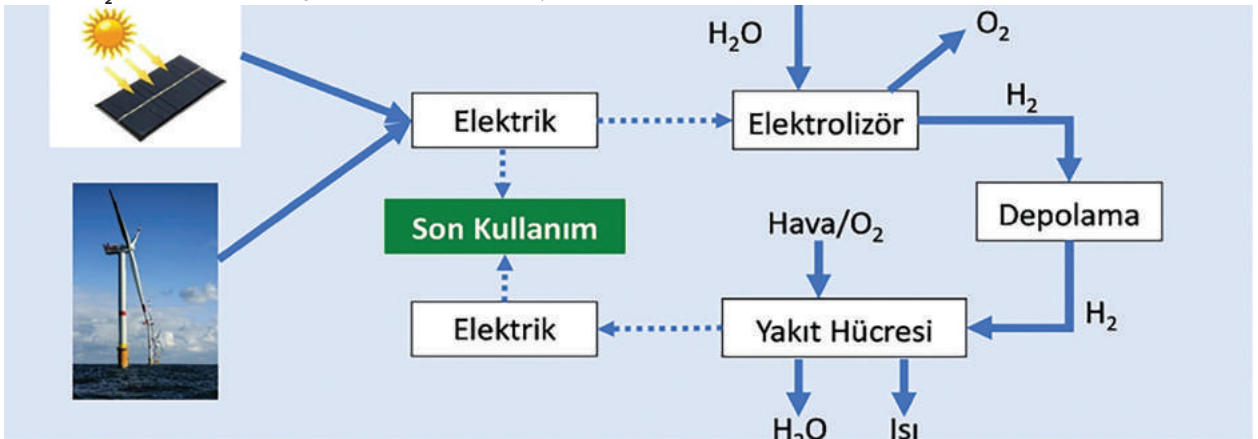
Dünyada hidrojen gazı doğal olarak bulunmamaktadır ama kainatta ve güneşte en çok bulunan element hidrojendir. Kömürün gazlaştırılmasıyla elde edilen havagazı (%50 hidrojen içermekte) yakıt olarak ev ve işyerlerinde 19. ve 20. yüzyılda, özellikle büyük şehirlerde, 230 yıl kullanılmıştır [11]. Doğal gazın yaygınlaşmasıyla havagazı kullanımı 1990'da sonlanmıştır. Havagazı boru hatları doğal gaza uygun olmadığı için boru hatları yeniden döşenmiştir.

Bugün dünyada hidrojen üretiminin %95'i doğal gazın buharla reformasyonu (DBR) teknolojisi ile üretilmektedir. Hidrojenin fiyatı değişmekle birlikte doğal gazı olan ülkelerde bir kilogramı 4 ABD doları civarındadır. Hidrojen üretim metodları Tablo 1'de gösterilmektedir [10]. Siyah olarak gösterilenler fosil yakıtlardan hidrojen üretimini, yeşil renkle gösterilenler yenilenebilir enerji kaynaklarından ve biyokütleden elde edilen "yeşil hidrojen" (green hydrogen) üretim metodlarını işaret etmektedir. Bu metodlarla üretilen hidrojen maliyetleri DBR teknolojisiyle karşılaştırılmaktadır. Suyun elektrolizi teknolojisiyle hidrojen üretimi elektrik maliyeti ile değişmektedir. Bu yöntem özellikle küçük ve orta kapasitede saf hidrojen üretimi için tercih edilen teknolojidir. Bugün dünyada hidrojenin yaklaşık %5'i bu yöntemle üretilmektedir. Güneş ve rüzgar enerji santrallerinden (GES ve RES) elde edilecek elektrik maliyeti azaldıkça elektrolizle hidrojen üretimi maliyetinin azalması beklenmektedir. Yenilenebilir enerji potansiyelinin yüksek olduğu ülkemizde bu kaynakların kullanımını sürekli kılabilen olan elektrokimyasal hidrojen enerji sistemidir (Şekil 1). Bu sistemde sarfiyat fazlası olan elektrik elektrolizle sudan hidrojen eldesi için kullanılır, hidrojen sıvı veya basınçlı gaz olarak depolanabilir, tankerlerle ya da borularla kullanım istasyonlarına taşınabilir. Yakıt hücreleriyle istenildiği zaman elektriğe dönüştürülebilir. Yakın zamanda ülkemizde güneş enerji santrallerinden elde edilen elektrikle üretilen hidrojenin doğal gaz hatlarına verilmesi konusu araştırılmaktadır [12].

Tablo 1. Hidrojen üretim metodlarının karşılaştırılması [10]

Yöntem	Enerji (kWh/Nm ³)		Teknolojideki son durum	Verim (%)	Maliyet DBR oranı
	Teorik	Pratik			
Doğalgazın Buharlı Reformasyonu (DBR)	0,78	2-2,5	olgun	70-80	1
Metan/Doğal Gaz Piroлиз			ArGe	72-54	0,9
H ₂ S Metan Reformasyonu	1,5	-	ArGe	50	<1
Kuru Gaz Reformasyonu			ArGe	47-58	-1
Kısmi Oksidasyon	0,94	4,9	olgun	70	1,8
Nafta Reformasyonu			olgun		
Atık Petrolün Buharlı Reformasyonu			ArGe	75	<1
Kömür Gazlaştırma	1,01	8,6	olgun	60	1,4-2,6
Kömürün Kısmi Oksidasyonu			olgun	55	
Buhar-Demir işlemi			ArGe	46	1,9
Kloralkali Elektrolizi			olgun		
Suyun Elektrolizi (Elektrik)	3,54	4,9	olgun	62-82	3-10
Suyun Elektrolizi (Güneş)			ArGe	10	>3
Suyun Yüksek sıcaklıkta Elektrolizi			ArGe	48	2,2
Termokimyasal Su Ayrışımı			ArGe	35-45	6
Biyokütle Gazlaştırma			olgun	45-50	2,0-2,4
Fermentasyon			ArGe	20-60*	
Fotofermentasyon			ArGe	24-46*	
Karanlık+Foto Fermentasyon	1,2-3		ArGe	30-48*	
Su Fotolizi			Ön ArGe	<10	
Suyun Fotoelektrokimyasal Ayrışımı			Ön ArGe	0,5-12	
Suyun Fotokatalitik Ayrışımı			Ön ArGe		

*Teorik H₂ üretim veriminin yüzdesi olarak verilmiştir [13].

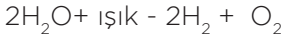


Şekil 1. Elektrokimyasal Hidrojen Enerji Sistemi

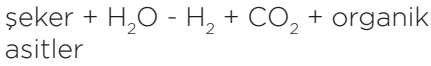
Şekil 2’de suyun elektroliziyle hidrojen üretiminde kullanılan elektrolizör türleri gösterilmektedir. Alkali elektrolizörler sıvı elektrolit ihtiva eder, orta ve büyük kapasitede en gelişmiş teknolojidir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Alkali elektrolizörlerin kapasitesini arttırmaya yönelik olarak çalışılmaktadır. PEM elektrolizörler katı elektrolitlidir. Küçük kapasitede üretilmekte, yüksek basınçlı hidrojen (40-70 bar) üreten prototipleri geliştirilmektedir [14]. Katı oksit elektrolizörler henüz ön arge seviyesindedir. Yüksek verimle çalışması beklenmektedir.

Şekil 3’te biyokütleden termokimyasal veya havasız bozunma ile yakıt gazı üretimi, yakıt gazının (örneğin metan gazı) yakılarak motor/türbinle elektrığe dönüştürülmesi ya da reformingle hidrojen eldesi şematik olarak gösterilmektedir. Biyokütle gazlaştırması olgun bir teknolojidir. Birçok çöp tesisinde ve evsel ve hayvansal atıkların değerlendirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır.

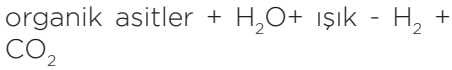
Alg ve siyano bakteriler direkt biyo-fotoliz yaparak suyu hidrojen ve oksijene ayırıştırır. Bu yöntem ön araştırma safhasındadır.



Biyokütleden fermentasyon ile hidrojen üretimi iki şekilde olmaktadır. Fermentatif bakteriler glikoz /sakkoroz gibi şekerleri fermente ederek karbondioksit, hidrojen ve organik asitlere dönüştürür:



Organik asitler fotosentetik bakterilerle ışık enerjisini kullanarak hidrojen ve karbondioksit dönüşür. Bu işleme fotofermentasyon denir.

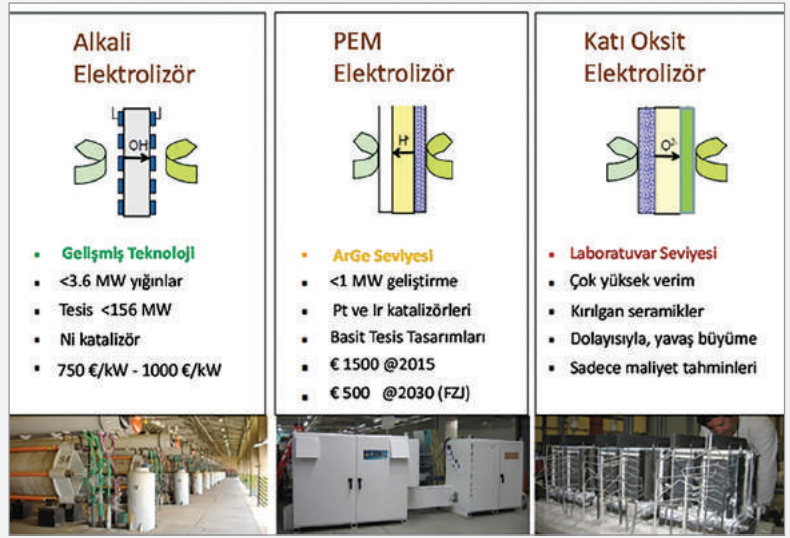


Şekil 4’te “Biyokütleden termal olmayan yöntemle saf hidrojen üretimi” Avrupa Birliği 6. Çerçeve SES6-019825, HYVOLUTION PROJESİ (2006-2010) tanıtılmaktadır. Bu projede ODTÜ Biyohidrojen ekibi (Şekil 5) karanlık fermentasyon sıvısından fotofermentasyon ile hidrojen üretimi teknolojisini geliştirmişlerdir [13].

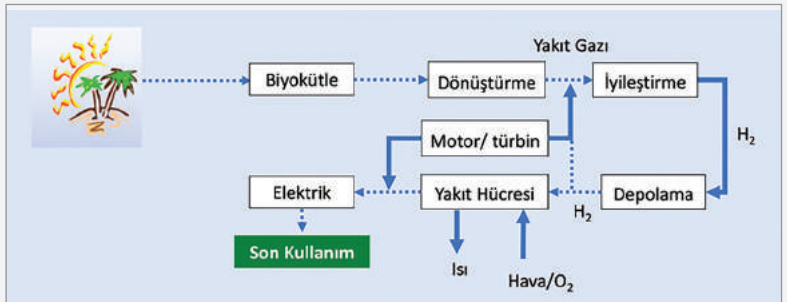
Bu projeye 11 Avrupa Birliği üyesi, Türkiye, Rusya ve Güney Afrika Cumhuriyeti’nden bilim insanları katılmıştır. Şeker pancarı yan ürünü olan melas ve koyu şerbeti bu teknolojinin gelişmesinde en yüksek potansiyele sahiptir. Projede ayrıca patates kabuğu, arpa samanı gibi atıklardan fermentatif hidrojen üretimi araştırılmıştır. Bu konudaki araştırmalar dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde devam etmektedir.

HİDROJEN VE OKSİJENDEN YAKIT HÜCRELERİNDE ELEKTRİK ELDESİ

Yakıt hücreleri çoğunlukla kullanılan elektrolitin cinsine göre sınıflandırılırlar. Şekil 6’da reaktan olarak hidrojen-oksijen ile elektrik elde edilen polimer değişim zarlı (PEM), alkali, fosforik asit,



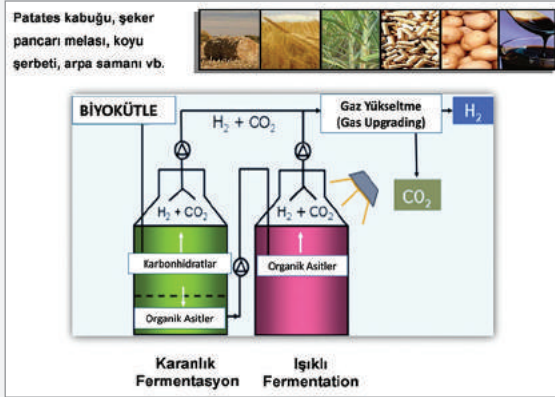
Şekil 2. Suyun Elektroliziyle Hidrojen Üretimi İçin Geliştirilen Elektrolizör Türleri



Şekil 3. Biyolojik -Termokimyasal / havasız bozunma ile Hidrojen ve elektrik üretimi

eriyik karbonat ve katı oksit yakıt hücreleri gösterilmektedir. Kullanılan elektrolite göre meydana gelen reaksiyonlar, kullanılan elektrotlar, yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı ve kullanılan yakıt değişmektedir. Sıvı yakıtla çalışan doğrudan metanol yakıt hücresi bazı uygulamalarda özellikle tercih edilmektedir. Son yıllarda doğrudan sodyum bor hidrür yakıt hücreleri ülkemizde geliştirilmektedir. Yakıt pillerinin çalışma prensipleri birbirine benzerlik gösterse de, kullanılan malzemeler, çalışma koşulları ve uygulama alanları oldukça farklıdır.

Bu makalede ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü Yakıt Pili Teknoloji Laboratuvarı'nda geliştirdiğimiz PEM yakıt hücreleri ve STAK prototiplerine yer vereceğim. Şekil 7'de PEM yakıt hücresinin bileşenleri ve çalışma prensibi gösterilmektedir. Membran Elektrot Atacı MEA olarak adlandırdığımız çoklu tabaka, proton iletken zarın iki tarafındaki anot ve katot elektrotlarıyla üç katmanlı olarak oluşur. MEA'nın iki yanında gaz diffüzyon tabakaları ve en dışta akım toplayıcı ve gaz kanallarının olduğu iletken tabaka bulunur. Şekil 8'de MEA 5'li katmanlarının fiziksel



Şekil 4. "Biyokütleden termal olmayan yöntemle saf hidrojen üretimi" Avrupa Birliği 6.Çerçeve SES6-019825, HYVOLUTION PROJESİ (2006-2010).

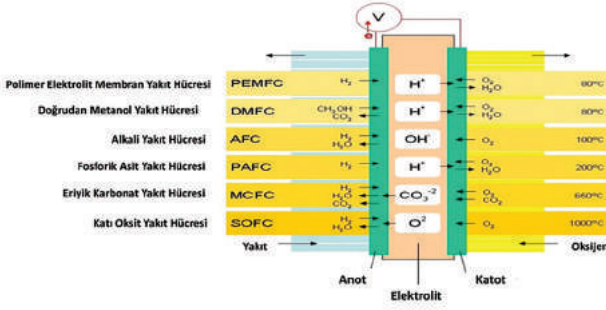


Şekil 5. ODTÜ Biyohidrojen Araştırma Ekibi. Soldan sağa: Endam Özkan, Dr. Gülşah Pekgöz, Burcu Özsoy, Pelin Sevinç, Dr. Dominic Deo Androga, Dr. Ebru Özgür, Prof. Dr. Meral Yücel, Efe Boran, Prof. Dr. Ufuk Gündüz, Dr. Gökçe Avcıoğlu, Prof. Dr. İnci Eroğlu, Dr. Nilüfer Afşar, Dr. Muazzez Gürkan.

soğutma kanallı iletken grafit plakaların imalatı ve sızdırmazlığı sağlayan uygun conta seçimidir. Şekil 11'de ODTÜ'de geliştirilen taşınabilir 100W'lık PEMYH STAK'in resmi, tasarım ve çalışma esnasındaki performans değerleri verilmektedir. STAK, 20 PEMYH seri bağlanarak 12V'da 100W güç alınacak şekilde tasarlanmıştır. Performans kayıpları nedeniyle çalışma esnasında 12V'da 5.5 A akım çekilmiş ve 60 W güç alınmıştır. Her bir yakıt hücresinden ölçülen açık devre voltajı (Şekil 11'de gri renkle gösterilmektedir) değişkenlik göstermiştir. STAK'e farklı güç çekimi uygulandığında hücrelerden farklı (Şekil 11 koyu gri ve siyah ile gösterilmektedir) voltaj değerleri ölçülmektedir. Bu fark giriş ve çıkış hücrelerinde daha barizdir. Resimde (Şekil 12) ODTÜ PEM yakıt hücresi gelişmelerinde kilit rol oynayan araştırma ekibi görülmektedir. Bu ekip TÜBİTAK, DPT ve ODTÜ Araştırma projelerinde yer almıştır. Halen değişik üniversitelerde ve kendi firmalarında PEMYH ARGE faaliyetlerini sürdürmektedirler.

özellikleri ve yerleşimi gösterilmektedir. Önceki araştırmalarımızda MEA yapımında basınçlı tabancalı püskürtme yöntemini kullandık [15]. Daha sonra Ultrasonik Kaplama Tekniğiyle Membran Elektrot Atacı İmalatı teknolojisini geliştirdik (Şekil 9). Ultrasonik kaplama tekniğinin en önemli avantajı, kısa sürede, tekrarlanabilir özelliklere sahip, ticari boyutlarda MEA üretimidir [16,17]. Bu teknikle katalizör kaybı ihmal edilebilecek düzeyde azaltılarak PEM yakıt hücresi katalizör maliyeti yarıya inmekte, katalizörün yüzeye homojen ve çok ince dağılması nedeniyle PEMYH gücü önemli ölçüde artmaktadır. Yüzde 20, 40, 50 ve 70 platin içeren katalizörlerle yapılan deneyler platin yüzdesinin artmasıyla 0,6 V'da elde edilen akım ve dolayısıyla güç yoğunluğunun arttığını göstermiştir (Şekil 10).

Tek bir yakıt pilinden 0.7 V ve 1-400 W gibi elektrot alanıyla sınırlı güç elde edilmektedir. Daha yüksek güç ve voltaj gerektiğinde MEA ve çift akış kanallı plakalar seri bağlanarak STAK yapılır. Taşınabilir uygulamalar için 12, 24, 48 V ve 50-500 W, ulaşım vasıtalarında 80-250 kW PEMYH yığını (STAK) yapılabilir. Laboratuvarımızda geliştirdiğimiz teknolojiyle 400 cm² alana sahip MEA üretebildik. STAK yapımında diğer kritik faktörler çift cidarlı gaz ve

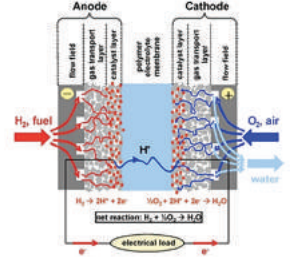


Şekil 6. Yakıt Hücresi Türleri

Membran Elektrot Atacı MEA

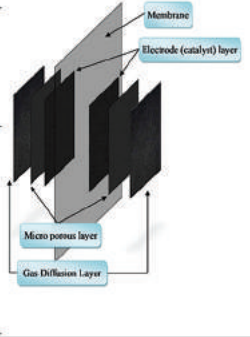
MEA Yapısı

- Proton iletken membran
- Katalizör tabakası
- Gas diffüzyon tabakası
- İletken ve gaz akışı kanallı plakalar



Şekil 7. PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri

Kataliz tabakası (CL)	Mikro gözenekli tabaka (MPL)	Gaz tabakası (GDL)	
Gözeneklilik	20-30%	50%	70-80%
Ortalama Gözenek Çapı	0.05 µm	0.5 µm	10 µm
Kalınlık, L	10-50 µm	10-100 µm	200-400 µm



Şekil 8. Membran Elektrot Atacı MEA Bileşenlerinin Özellikleri [18]

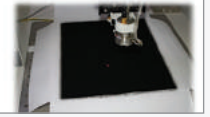
Katalizör mükrekkebi akış hızı	0.3 ml/dk
Sprey hızı	20 mm/sn
Sprey genişliği	5 mm
Döngüler arası bekleme süresi (tabakanın kuruması için)	5 sn

Katalizör mükrekkebi içeriği:

- % 20, 40, 50 veya 70 Pt/C katalizör
- Kütlece %30 Nafion (kuru ölçekte)
- 1:7 oranında su, 2-propanol



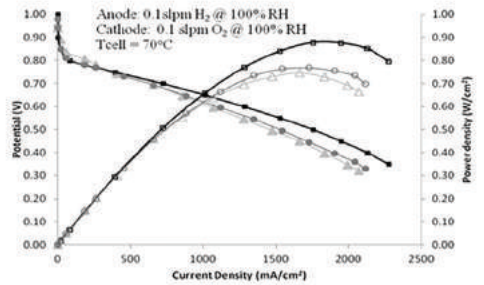
Ultrasonik Kaplama Cihazı



Şekil 9. ODTÜ Kimya Mühendisliği Yakıt Pili Teknolojisi Laboratuvarı'nda Geliştirilen Ultrasonik Kaplama Tekniğiyle Membran Elektrot Atacı MEA İmalatı [16,17]

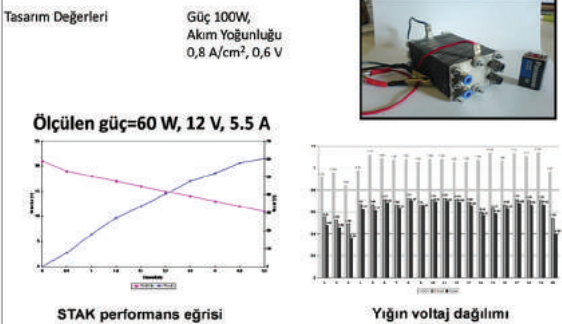


Yakıt Hücresi Test İstasyonu

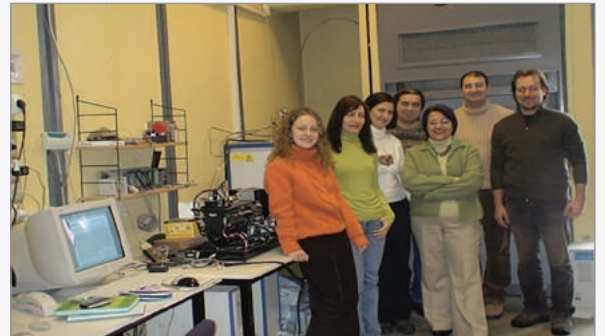


Pt yüklemesi: 0,4 mgPt/cm²

Şekil 10. Tekli PEMYH Performans Testleri [16]

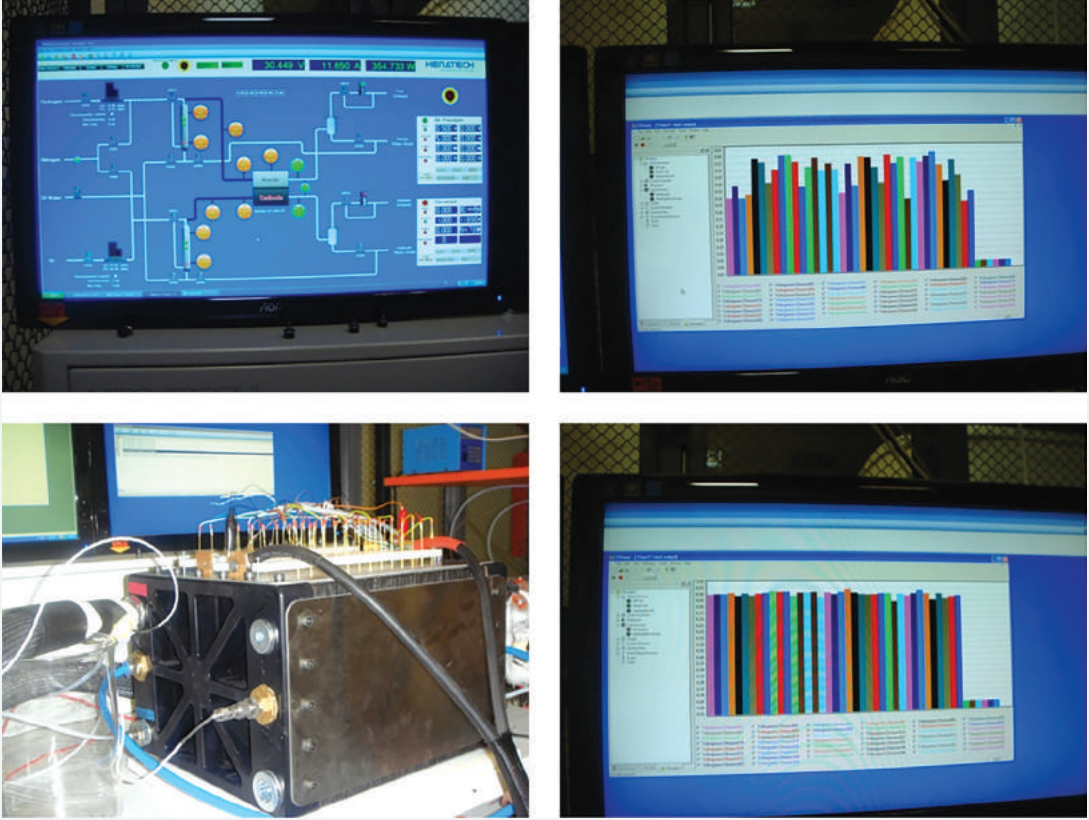


Şekil 11. ODTÜ'de geliştirilen taşınabilir 100W'lık PEM yakıt hücreleri yığını performans testleri [16,17]



Şekil 12. ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü Yakıt Pili Teknolojisi Laboratuvarı Araştırma Ekibi: Soldan sağa Dilek Ergün Erkan, Prof. Dr. Ayşe Bayrakçeken, Prof. Dr. Yılsır Devrim, Dr. Berker Fiçıcılar, Prof. Dr. İnci Eroğlu, Dr. Serdar Erkan, Dr. Gültekin Akay.

Yüksek güçlere çıktığında üretilen ısının artması sebebiyle, PEM yakıt hücrelerinin soğutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi 100-1500 W gibi düşük güçlerde hava ile yapılırken 3-5 kW gibi daha yüksek güçlerde su ve radyatörle, yüksek sıcaklık PEM yakıt hücrelerinde ise termoyağlar ile yapılmaktadır. Dolayısıyla yüksek güçlerdeki yakıt hücresi yığınlarından elde edilen ısıdan aynı zamanda kojenerasyon ısıtma sistemlerinde de yararlanılabilir. UNIDO-ICHET tarafından 2010-2012 yıllarında desteklenen "Prototip 3 kW'lık PEM Yakıt Pili Geliştirme Projesi" ile geliştirilen STAK'in test resimleri Şekil 13'te, test ekibinin resimleri ise Şekil 14'te verilmektedir [19-20]. Bu projede Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Atatürk Üniversitesi ve Yeditepe Üniversitesi, ODTÜ Teknokent şirketleri TEKSİS, MINOVA ve PUNTO'dan akademisyen ve araştırmacılar görev almıştır. Ülkemizde yapılan PEM yakıt hücresi prototip projeleriyle önemli bir bilgi birikimi sağlanmıştır.



Şekil 13. 3 kW'lık PEM Yakıt Hücreleri Yığını Prototipi Geliştirilmesi Projesi UNIDO-ICHET tarafından desteklenmiştir [7]. Üst soldaki resimde PEMYH Yığını çalışma testi esnasında Test istasyonu sol ekranında görüldüğü gibi 30,5 V ve 11,65 A akım çekilerek 355W güç elde edilmiştir; alt soldaki resimde Prototip PEM yakıt hücresi testi; üst sağdaki resimde Prototip PEMYH yığından 355W'lık güç çekimi esnasında her bir hücrede ölçülen voltaj değerleri; alt sağdaki resimde Prototip PEMYH Yığnında her hücrede ölçülen açık devre potansiyeli değerleri görülmektedir.



Şekil 14. Prototip 3 kW PEM Yakıt Hücreleri Yığını Geliştirme Projesi Test Ekibi. Soldan sağa: Semih Altunay, Ogeday Çapar, Prof. Dr. İnci Eroğlu, Dr. Yasemin Saygılı, Dr. Gökçe Avcıoğlu, Prof. Dr. Ayşe Bayrakçeken, Hüseyin Devrim, Prof. Dr. Yılser Devrim.

ÖNERİLER

- Güneş ve Rüzgar Santrallerinden iyi bir elektrik üretimi ve talebi dengesi elde etmek için tahmin ve düzenleme süreçlerine odaklanmalıyız.
- Yenilenebilir Hidrojen Enerji Sistemi, güneş panelleri, elektrolizör, yakıt hücreleri, batarya ve invertörleri entegre ederek oluşturulabilir.
- GES ve RES elektrik üretimi kesiklidir. Elektrolizle elde edilen H₂ depolanabilir, bolarlarla taşınabilir, yakıt hücreleriyle her an elektriğe dönüşebilir. Bu süreklilik sağlayacaktır.
- PEMYH teknolojisi gelişmiştir. Hedef odaklı H₂ güç sistemi tasarımına ve imalatına ihtiyacımız var: Ulaşım, taşınabilir uygulama, denizaltı, İHA vb.
- Alkali elektrolizörler ticarileşmiştir. PEM elektrolizörler gelişme aşamasındadır. Daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.
- Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengindir: Güneş, Rüzgar, Biyokütle
- Yenilenebilir elektrik üretimini artırmak için geleceğe yönelik hedeflerimizi belirlemeliyiz.
- Farklı jeneratörlere sahip hibrit enerji santrallerinin geliştirilmesi çok önemlidir.
- Güneş, rüzgar, biyogaz (CHP) elektrik santralleri, elektrik üretiminde yurt dışına bağımlılığınızı önemli ölçüde azaltacaktır.

BEKLENTİLER

- 2021-2030 yıllarında ülkemizde hidrojenin üretimi, taşınması, dağıtımı ve kullanımı konusunda yapılacak temel, uygulamalı araştırma ve tatbikata yönelik çalışmaların ve ARGE'nin teşvik edilmesi gerekmektedir.
 - 2030 ile 2050 arasında yenilenebilir hidrojen enerji sistemlerinin ve yakıt hücrelerinin büyük ölçekte ticarileştirilmesi, hidrojen üretimi, taşınması, depolanması ve buna paralel olarak yakıt hücrelerinin sabit, seyyar ve portatif uygulamalarındaki pazarın yaygınlaştırılması planlanmalıdır.
 - Böylece, dünyadaki diğer gelişmiş ülkelerle birlikte 2050'de hidrojene dayalı bir ekonomi gerçekleştirilebilir.
- "Türkiye için Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası"*
[10] raporunda öneriler ve beklentiler daha detaylı olarak açıklanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] EU Commission. "A Hydrogen Strategy for a Climate Neutral Europe" and "Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration" Brussels, 8.7.2020; "Blue Print for hydrogen implementation plan" www.hydrogeneurope.eu
- [2] A. Veziroğlu, Hidrojen Romantigi. 2016, Hydrogen Romantic 2021, <https://www.xlibris.com/en/bookstore/bookdetails/759083-hydrogen-romantic>

[3] İ. Dinçer, "Covid-19 coronavirus: Closing carbon age, but opening hydrogen age", International Journal of Energy Research, c. 44, sy 8, ss. 6093-6097, Haz. 2020, doi: 10.1002/er.5569

[4] US Department of Energy. A Hydrogen Strategy Enabling a Low Carbon Economy, 2020.

[5] D. Saygın ve E Gencer, "Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelikli Alanları" 2021.

[6] İ. Eroğlu; U. Gündüz; W. R. Hagen; L. Türker, L; M. Yücel, editors. Special issue International journal of hydrogen energy. 2006, Vol 31, (IHEC-2005 International Hydrogen Energy Congress. COST Action-841 closing symposium Biological and Biochemical Diversity of Hydrogen Metabolism (Istanbul 2005-07-13)

[7]] I. Eroglu, "Development of a 3 kW PEM Fuel Cell System", UNIDO-ICHET Project Reports Contract No:16002179, 2012.

[8] 5. Uluslararası Hidrojen Teknolojileri Kongresi (IHTEC-2021), <https://ihtec2021.org/> <https://www.hidrojenteknolojileri.org/blog/hidrojen-web-calistayi-25-agustos-2020/>

[9] <https://www.hidrojenteknolojileri.org/blog/category/hidrojen-sohbetleri/>

[10] İ. Dinçer, İ. Eroğlu, M. Öztürk, "Türkiye için Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası", 2021, https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf

[11] City Gas PTE, "Handbook on Gas Supply," May 2017. [Online]. Available: https://www.citygas.com.sg/wp-content/uploads/2017/12/City-Gas-Handbook-on-Gas-Supply-_22-May-2017_.pdf.

[12] M. Ozturk ve I. Dincer, "Development of renewable energy system integrated with hydrogen and natural gas subsystems for cleaner combustion", Journal of Natural Gas Science and Engineering, c. 83, s. 103583, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2020.103583.

[13] E. Özgür vd., "Potential use of thermophilic dark fermentation effluents in photofermentative hydrogen production by Rhodobacter capsulatus", Journal of Cleaner Production, c. 18, ss. S23-S28, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.02.020.

[14] F. Marangio vd., "Concept of a high pressure PEM electrolyser prototype" International Journal of Hydrogen Energy, c. 36 sy 13, ss. 7807-7815, Tem. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.091

[15] A. Bayrakçeken vd., "Effects of membrane electrode assembly components on proton exchange membrane fuel cell performance" International Journal of Hydrogen Energy, c. 33, sy 1, ss. 165-170, Ocak 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.021

[16] S. Erkan, (2011). Development of 100W portable fuel cell system working with sodium borohydride. (Doktora tezi, ODTÜ, Ankara)

[17] S. Erkan ve I. Eroglu, "Ultrasonic Spray Coating Technique for High-Performance PEM Fuel Cell Electrode Manufacturing", içinde Progress in Clean Energy, Volume 2, I. Dincer, C.

O. Colpan, O. Kizilkan, ve M. A. Ezan, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2015, ss. 481-492.

[18] B. Fıçıcılar, (2011). Electrocatalyst development and modeling of nonisothermal two-phase flow for PEM fuel cells. (Doktora tezi, ODTÜ, Ankara)

[19] Y. Saygılı, I. Eroglu, ve S. Kincal, "Model based temperature controller development for water cooled PEM fuel cell systems", International Journal of Hydrogen Energy, c. 40, sy 1, ss. 615-622, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.047.

[20] Y. Saygılı, S. Kincal, ve I. Eroglu, "Development and modeling for process control purposes in PEMs", International Journal of Hydrogen Energy, c. 40, sy 24, ss. 7886-7894, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.10.116.



**HİDROJEN
TEKNOLOJİLERİ
DERNEĞİ
YOL HARİTASI'nı
detaylı incelemek
için lütfen, aşağıdaki
qr kodu okutunuz.**





Prof. Dr. İbrahim DİNÇER

Hidrojen Teknolojileri Derneği Başkanı

HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ DERNEĞİ

HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ DERNEĞİ BAŞKANI PROF. DR. İBRAHİM DİNÇER İLE ÖZEL RÖPORTAJ

◆ **ARGE DERGİSİ : Prof. Dr. İbrahim Dinçer ile Söyleşi Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritasını hazırlayarak yayınladınız. Covid-19 salgını ile karbon çağının kapanıp hidrojen çağının başladığını savunuyorsunuz. Bu konu hakkında bizi bilgilendirebilir misiniz?**

Prof. Dr. İbrahim DİNÇER : Hidrojen Teknolojileri Derneği olarak bu yol haritasını hazırlamaktaki temel hedefimiz, bir nevi önümüzdeki süreçlere yönelik hem bilgilendirici hem de doğru bir hamle ile bu süreçlerin modellenmesine imkân verecek bir teknik doküman oluşturmaktır. Böylece bu doküman ile kurumsal olarak sorumluluklarımızı yerine getirip ülkemizin ileriye yönelik enerji hedeflerine doğru zamanda ve teknolojik olarak mantıklı bir açılım yaparak katkı sağlamayı hedeflemekteyiz. COVID-19 salgını ile hidrojen çağının başladığını savunuyorum. Hidrojen ile ilgili çalışmalar özellikle 2000'li yılların başlarında önce hızlandı, sonrasında ise tüm dünyada tekrar bir geriye itilme süreçleri yaşandı. Bu durumun başlıca nedeni ise yenilenebilir enerji sistemlerinin ön plana çıkmasıdır. Yenilenebilir enerjilerin ön plana çıkışıyla birlikte hidrojene olan eğilim, araştırma ve teknoloji geliştirme hızında düşüşler yaşandı. Ancak COVID-19 bir dönüm noktası oldu. Çünkü COVID-19 ile birlikte temiz hava, temiz su, temiz gıda ve temiz enerjiye daha fazla ihtiyacımız olduğunu anlamış olduk. Öncelikli olarak insanın bağışıklık sisteminin daha güçlü olması gerektiğini gördük. Bağışıklık sisteminin daha güçlü olabilmesi için de insanların sağlıklı bir ortamda sağlıklı bir şekilde beslenmesi ve temiz enerji kaynaklarını kullanması, hem gıdanın hem suyun hem de havanın temiz kalmasını sağlaması gerekmektedir. Dolayısıyla 2020 yılının mayıs ayında yazdığım makale ile bunu bir dönüm noktası, aynı zamanda karbon çağının resmen kapanışı ve hidrojen çağının açılışı olarak yorumladım. Sonrasında takip eden süreçlerde en büyük atılım Avrupa Topluluğu tarafından gerçekleştirildi. Temmuz ayının ilk haftasında "Green Hydrogen Deal" ile yeşil hidrojene, yani temiz kaynaklardan elde edilen hidrojenin kullanımına öncelik vererek üretimden kullanıma tüm süreçlerin hayata geçirilmesi planlandı. Bu konu Türkiye için de oldukça önemlidir. Ülkemiz güneşten rüzgâra, jeotermale ve biyokütleyle kadar farklı yenilenebilir enerji yelpazesine sahip ve bu kaynakların potansiyelinin yüksek olduğu bir coğrafyadadır. Örneğin; Almanya ile karşılaştırıldığında ülkemizin çok daha yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bu yüksek potansiyelden faydalanarak hidrojen üretmek de mümkündür.

◆ **A.D. : Türkiye'de hidrojen ekonomisine geçiş için çıkarılan yol haritasında yer alan hidrojenin üretiminden dağıtımına kadar geçirdiği süreçten ve hidrojen çiftliklerinden bahsedebilir misiniz?**

İ.D. : Türkiye'de hidrojen ekonomisine geçiş için çıkarılan yol haritasında yer alan hidrojenin üretiminden dağıtımına kadar geçirdiği süreç ve hidrojen çiftliklerine bakacak olursak, artık küçük sistemler yerine çok daha büyük ölçekli yenilenebilir sistemler tercih edildiği için rüzgâr çiftlikleri ve güneş çiftlikleri kavramı mevcuttur. Burada önemli bir nokta ortaya çıkmaktadır. Yüksek miktarlarda hidrojenin üretilebileceği yenilenebilir enerji kaynaklı çiftlikler kurmak mümkündür. Yüksek miktarlarda hidrojenin üretilip depolanması ve iletilmesi ile hidrojen çiftliği kavramı hayata geçirilebilir. Diğer konu ise hidrojen çiftliklerinin nereye kurulacağı ile ilgilidir. Güneş ve rüzgâr çiftlikleri güneş radyasyonunun ve rüzgâr hızının yoğun olduğu yerlere kurulmaktadır. Ancak bazen üretim ve tüketim arasında dengesizlik olmakta ve ihtiyaçtan daha fazla elektrik elde edilmektedir. Bu durumda depolamaktan başka çare bulunmamaktadır. Bu noktada hidrojen çiftliklerinin kurulması ile bu fazla elektriğin depolanması mümkün olacaktır. Hidroelektrik santraller de hidrojen üretimi açısından ciddi bir fırsattır. Elektrik ihtiyacı olmadığı durumda santral kapatılmakta ve su

tutulmaktadır. Suyun tutulması ise çevre için olumsuz bir durumu ortaya çıkarmaktadır. Hidrojen üretim seçenekleri ile bütünleştirildiğinde HES'lerin sürekli çalışmasına imkân verilecek, ihtiyaç fazlası elektrik hidrojen olarak depolanacaktır. Böylece çevreye verilen olumsuz etkiler azalacak ve küçük HES projelerinin de hayata geçirilmesine imkân sağlanacaktır. Önümüzdeki süreçlerde petrol rafineleri yerine bu öne sürdüğüm hidrojen çiftlikleri faaliyete geçecektir. Doğru modellenirse ülkemiz için her bir çiftlik bir yenilenebilir rafineri olacaktır. Dolayısıyla bu durum teknolojik anlamda çok önemlidir ve ülkemizin olmazsa olmazıdır. Buradan katma değer üretme fırsatını değerlendirmek gerekmektedir.

◆ **A.D. : Yeşil hidrojen nedir? Yenilenebilir enerji üretiminde hidrojenin önemi nedir?**

İ.D. : Yeşil hidrojen; kahverengi, gri ve mavi hidrojene göre daha önemli bir yerdedir. Fosil kaynaklar kullanılarak kahverengi, gri veya mavi hidrojen elde etmek bir anlam ifade etmemektedir. Zaten ülkemizde mevcut olmadığı için dışardan yüksek miktarlarda döviz ödeyerek getirdiğimiz fosil kaynaklı yakıtların kullanılmasının bir anlamı olmamaktadır. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynaklı yeşil hidrojen üretimini ülkemizin her yerinde yaygınlaştırmamız gerekmektedir. Ülkemizin her yerinde yeterli güneş olmaması gibi durumlar olabilir ancak güneşin olmadığı yerlerde rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve atıklar da dikkate alınmalı ve bu bir ekosistem olarak görülmelidir. Katma değer bu şekilde üretilebilir. Hidrojen bu noktada çok önemlidir. Hidrojen sadece bir yakıt değil aynı zamanda bir enerji taşıyıcısıdır. Aynı zamanda geleceğin de hammaddesidir. Karbon tutulması ile birlikte karbon dioksit ve karbon monoksitle hidrojen sentezi neticesinde birçok farklı kimyasalın ve yakıtların üretilmesine imkân doğacaktır.

◆ **A.D. : Türkiye, yenilenebilir kaynaklardan enerji üretme (yeşil hidrojen) konusunda ne gibi avantajlara sahiptir?**

İ.D. : Türkiye, yenilenebilir kaynaklardan enerji üretme konusunda, hem güneşlenme süresi, hem jeotermal kaynak, hem de rüzgâr hızı dikkate alındığında yenilenebilir enerji konusunda avantajlı bir konumdadır. Bunun yanında atıklar, biyokütle, akarsular ve denizler de dikkate alınmalıdır. Tüm bu kaynaklar doğru değerlendirildiğinde yeşil hidrojen de çok avantajlı bir konumda olacağız. Türkiye yenilenebilir enerji potansiyelinin sadece %10-15'ini kullansa bile bu, sektörün ihtiyaç duyduğu hidrojenin üretilmesi için yeterli olacaktır. Araştırmacılarıma Türkiye'nin potansiyelinden yola çıkarak hidrojen üretme ve bunun depolanması, dağıtımı ve kullanım imkânlarının araştırıldığı bir çalışma yaptırıyorum. Bu çalışma yakın zamanda yayınlanacak. Hidrojenin üretiminden son kullanım yerine kadar taşınması ve iletilmesi konusunda bir takım problemler olduğu biliniyor. Farklı hidrojen depolama seçenekleri ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Özellikle sıkıştırılmış gaz olarak tüplerde depolanan hidrojen pek çok sektörde kullanılmaktadır. Buna yönelik bir dağıtım zinciri de mevcuttur. Sadece burada yapılması gereken yeşil hidrojene gidilmesi yani yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen elde edilip, elde edilen hidrojenin son kullanıcıya ulaştırılması ile bir nevi bunun lojistiğinin kurulmasıdır. Buna hidrojen dolum istasyonlarının geliştirilmesi, modellenmesi ve kurulum ağının oluşturulması eklenebilir. Halen bu konuda eksiklikler ve iyileştirmeler için yapılması gerekenler bulunmaktadır. Pek çok ülkede çalışmalar devam etmektedir. Bunun yanında yenilenebilir enerjideki birçok problem, yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerin hayatımıza girmesi ile birlikte çözülmüştür, halen iyileştirmeler de devam etmektedir. O yüzden hidrojen ile ilgili her problem çözülsün, tüm sıkıntılar giderilsin yaklaşımı doğru değildir. Hidrojen de iyileştirme ve geliştirmeler bugün de devam ediyor ve yarın da devam edecektir. Önemli olan burada Türkiye'nin oldukça büyük yenilenebilir enerji potansiyeline, akarsulara ve denizlere sahip olması ve hidrojenin de hem sudan (elektroliz ile) hem de atıklardan (gazlaştırma ile) elde edilebilir olmasıdır.

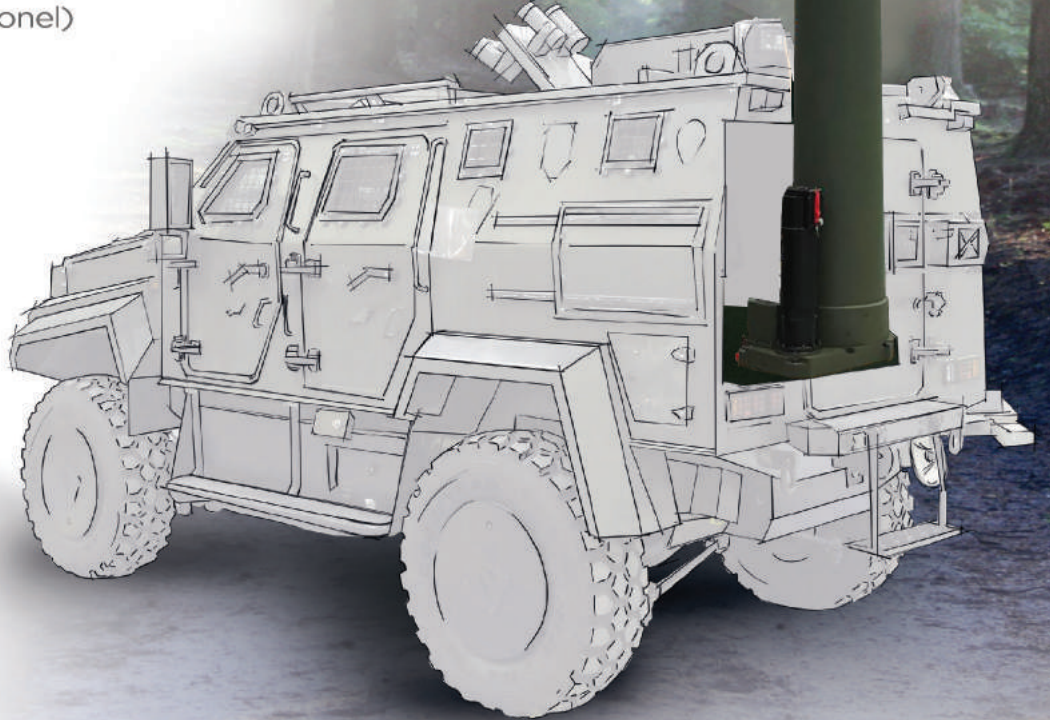
**YENİ
ürün**

FOM SERİSİ

Yükseltilebilir Direk

TEMEL ÖZELLİKLER

- ▶ Karbonfiber Kompozit Gövde
- ▶ 120 kg - 230 kg arası Yük Taşıma
- ▶ 2.5 m'den 6 m'ye kadar tasarlanmış 4 Farklı Model
- ▶ Hafif ve Kompakt Tasarım
- ▶ Sessiz Çalışma Kabiliyeti
- ▶ Araç içi Kontrol
- ▶ Uzaktan Kumanda (opsiyonel)
- ▶ Dijital Ekranlı Kontrol Paneli ve Kumanda (Opsiyonel)





İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELEDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ KAYNAĞI: NÜKLEER'DEN HİDROJEN



Dr. Reşat Uzmen

resat.uzmen@figes.com.tr

Nükleer Teknoloji Geliştirme Direktörü

FIGES A.Ş.

NEDEN HİDROJEN?

Hidrojen dünyada ve evrende en bol bulunan elementtir. Hava ile %4 ile %75 hacim oranında karıştığında yanıcı bir gaz olarak ortaya çıkar. Ama dünyada serbest (elementer) hâlde hidrojene rastlamak pek mümkün değildir. Bilindiği üzere hidrojen suyun bileşiminde (H_2O) bulunur; ne var ki kovalent bağları çok güçlü olan su molekülünden hidrojen ve oksijenin doğrudan ayrılması için yüksek enerji kullanmak gerekir. Bu bakımdan tuz, yüksek sıcaklık, katalizörler ve elektrik enerjisi kullanmak suretiyle suyu bileşenlerine ayırmak mümkün olabilmektedir. Hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanılması dünyamızı tehdit eden iki önemli enerji bağlantılı soruna karşı bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Birincisi yanma sırasında ortaya çıkan 120 MJ/kg'lık enerji yoğunluğu, bilinen bütün yakıtlardan (benzin (~45 MJ/kg), metan (~50 MJ/kg) ve enerji kaynağı Li-iyon bataryalardan (0.9-3.6 MJ/kg) çok daha yüksektir. İkincisi yanma sırasında atık olarak sadece su çıkmasıdır. Böylece hidrojen kullanımı giderek azalan fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltacak ve bu arada hem hava kirliliğini hem de sera gazları çıkışını önleyecek olan ciddi bir alternatif olarak gözükmemektedir.

Hidrojenin enerji üretiminin yanı sıra kimyasal özellikleri de sanayide üretim ekonomisini önemli ölçüde etkileyecek düzeydedir. Dünyada yıllık 1,8 milyar tonu bulan çelik üretiminden dolayı yılda 3,2 milyar ton CO_2 havaya salınmaktadır. Hidrojen 600-800 °C sıcaklıkta oksitlenmiş demir alaşımlarından veya demir cevherlerinden, fosil yakıt kullanmadan, indirgeme ile demir üretiminde “temiz” bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca, şu anda yılda üretilen 50 milyon ton (Mt) hidrojenin 28 Mt'u (%56'sı) amonyak üretiminde kullanılmaktadır. Amonyakın ise önemli bir miktarı tarımda kullanılan azotlu gübre yapımına harcanmaktadır.

Taşıma ve depolama ile ilişkili bazı zorlukların zamanla çözümlenmesiyle hidrojenin en büyük kullanım alanı olarak ortaya çıkan “yakıt hücreli” bataryalarda elektrik üretimi ve dolayısıyla taşıtlarda elektrik gücünün yaygınlaşmasıyla fosil yakıtların payını azaltmada oynayacağı roldür. Aynı şekilde şarjlı Li-iyon bataryalar yerine hidrojen kullanan “yakıt hücreli” elektrikli araçlar artan bir rağbet görmektedir.

HİDROJEN ÜRETİM YOLLARI

G

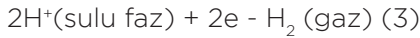
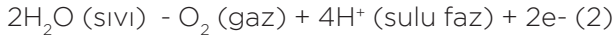
ünümüzde hidrojen üretim yollarının başında doğal gazdan (metan, CH₄) "reforming" işlemiyle, bir başka ifadeyle su (buhar)

ile tepkimeye giren metanın ayrışmasıyla hidrojen üretimidir:



Bu yöntem bilinen en eski ve en ucuz hidrojen üretim yöntemidir. Ancak kimyasal denklemden de görüldüğü gibi metandan kaynaklanan ve bir sera gazı olan karbondioksit gazının çıkışı söz konusudur. Dolayısıyla metandan hidrojen üretimi, eğer çıkan karbondioksit yakalanıp depolanmıyorsa, sera gazı salımları bakımından hiç de anlamlı olmamaktadır.

Bir başka hidrojen üretim yöntemi de içine bir elektrolit (NaOH, NaCl gibi) katılmış suyun özel hücrelerde elektrolizidir. Burada giren öğeler elektrik enerjisi ve sudur. Çıkan ürünler ise hidrojen ve oksijendir.



Dolayısıyla çevreyi etkileyecek herhangi bir girdi veya çıktı söz konusu değildir. Ancak karbon ayak izi hesaplanması bakımından kullanılan elektriğin fosil kaynaklı olmaması gerekir.

2015 fiyatlarıyla, üretim fazlası elektriğin kullanılması şartıyla elektrolizden üretilen hidrojenin maliyet değeri 3,90 USD/kg H₂'dir (ABD). Yenilenebilir kaynaklardan (rüzgâr + güneş PV) gelen elektrikle yapılan elektrolizle üretilen hidrojenin ise 2,5 USD/kg H₂ dolayında bir maliyet göstermektedir. Ne var ki, elektroliz sırasında oluşan hidrojen gaz kabarcıkları elektrolizin verimini düşürmektedir³.

Gittikçe yaygınlaşan bir diğer hidrojen üretim yolu da termokimyasal ayrıştırma'dır. Kapalı çevrimde ısı kullanımı ile gerçekleştirilen termokimyasal çevrimlerin büyük avantajı, dışarı çıkan çevreyi etkileyici bir ürün olmaması, görece düşük sıcaklıklarda (<1000 °C) gerçekleşmesi ve elektrolize göre daha yük-

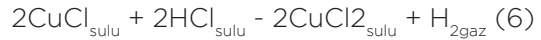
sek verime sahip olmasıdır. İşlem kimyada çok geçerli olan redoks (indirgeme-yükseltgeme) tepkimeleriyle gerçekleşir. Genel olarak şöyle formüle edilir:



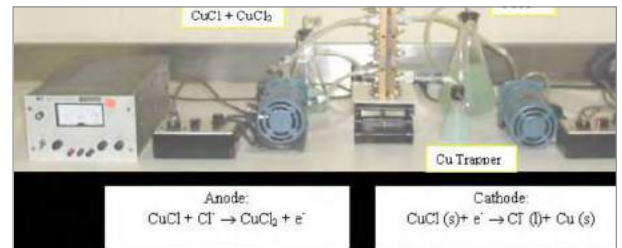
[M, metali; "yük" eki yükseltgenmiş; "ind" eki indirgenmiş; O oksijeni temsil etmektedir.]

Çok eskiden beri kullanılan yöntemler arasında kükürt-iyot çevrimi; demir oksit; seryum-seryum oksit; çinko-çinko oksit sayılabilir. Genellikle 800 °C'a varan sıcaklıklarda ısı enerjisi gerektirir.

Değişik termokimyasal yöntemler arasında son 15 yıldır dikkat çeken, özellikle IV. nesil nükleer reaktörlerde üretilen yüksek sıcaklıkta ısıdan yararlanmaya imkân tanıması bakımından Cu-Cl (bakır-klor) çevrimini kullanan yöntemdir. Kanada Atom Enerjisi Şirketi laboratuvarlarında Cu-Cl çevriminden hidrojen üretimi deneyleri başarıyla sürdürülmektedir. En basit şekliyle toplu tepkime şöyle gösterilmektedir:



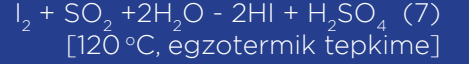
Cu-Cl çevriminde kullanılan ısı sıcaklığı en fazla 500 °C dolayındadır. Bu çevrimin verimi elektrot malzemesine, düşük gerilimde hidrojen üretebilme durumuna, membranların performansına ve elektrolit çözeltisine bağlıdır. Son zamanlarda geliştirilen seramik karbon elektrotlarla 0,5 V gibi düşük gerilim altında hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1 Cu-Cl çevrimi laboratuvar deneme düzeneği [Michael Lewis, et al., Sam Suppiah, et al., Study of the Hybrid Cu-Cl Nuclear Hydrogen Production; Third Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen, Oarai, Japan, 5-7 October 2015]

Demir oksit, seryum oksit, çinko oksit gibi çevrimler kullanan diğer termokimyasal yöntemlerde 800 °C'ın üzerinde sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır.

Hidrojen üretim teknolojileri arsasında önemli bir yer edinen bir diğer termokimyasal yöntem de I-S (iyot-kükürt) çevrimidir. Birinci adımda iyot ve kükürt dioksit (SO₂) su yanında tepkimeye girer:



İkinci adımda sülfürik asit kükürt dioksit ve suya ayrışır:



Üçüncü adımda hidroiyodik asit (HI) termal bozunmaya uğrayarak hidrojen açığa çıkar: $2HI \rightarrow I_2 + H_2$

Bu işlemin en büyük özelliği çevrim sırasında giren ve çıkan bütün ürünlerin sıvı veya gaz olması, dolayısıyla katı maddelerin taşınmasına gerek olmamasıdır. En önemli engeli ancak nükleer reaktörler veya konsantre güneş enerjisi gibi sistemleri gerektiren yüksek sıcaklıklarda çalışmasıdır.

S-I çevrimin bir diğer alternatifi de Hibrit Kükürt (HyS) çevrimidir. S-I çevriminden farkı iki adımda işlemin tamamlanmasıdır. Ama gene 800 °C dolayında ısıl enerji gerektirmektedir. Ayrıca tepkimeleri hızlandırmak için çeşitli metal oksitler kullanılmaya başlanmıştır.

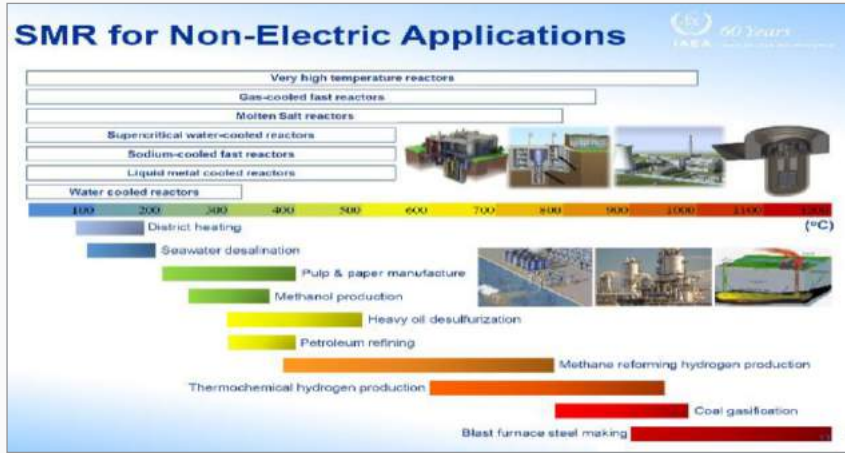


IV. NESİL NÜKLEER REAKTÖRLERİN HİDROJEN ÜRETİMİNDE ÖNEMİ

Yüksek sıcaklık termokimyasal prosesler ile yüksek sıcaklık buhar elektrolizi gibi hidrojen üretim teknolojileri önemli miktarda ve yüksek sıcaklıkta ısı kullanımını gerektirmektedir. Geleneksel nükleer reaktörler sürekli ve güvenilir elektrik üretimi sağlasa da çıkan ısının sıcaklığının (300 °C dolayında) söz konusu çevrimler için yeterli olmayacağı açıktır (bkz. Şekil 2). Bu bakımdan özellikle IV. Nesil nükleer reaktörler sınıfına giren gaz soğutmalı, ergimiş tuz soğutmalı, sıvı metal soğutmalı reaktörler hidrojen üretim teknikleriyle uyum içinde görülmektedir.

Hidrojen üretim sistemlerinin yüksek sıcaklıkta çalışan yeni nesil reaktörler ile başarılı eşleşmesi için en önemli ister reaktör korundan ısının hidrojen üretimi için termokimyasal tesise belirlenen özel şartlarda aktarılmasıdır. Bunu sağlayabilecek yeni nesil reaktörler içinde Türkiye'nin de yakından ilgilendiği Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR) yer almaktadır.

Günümüzde kullanılan reaktörler ile yeni nesil ileri reaktörlerin topluca ısıl üretimleri ve olası kullanım alanları aşağıdaki görselde özetlenmiştir.



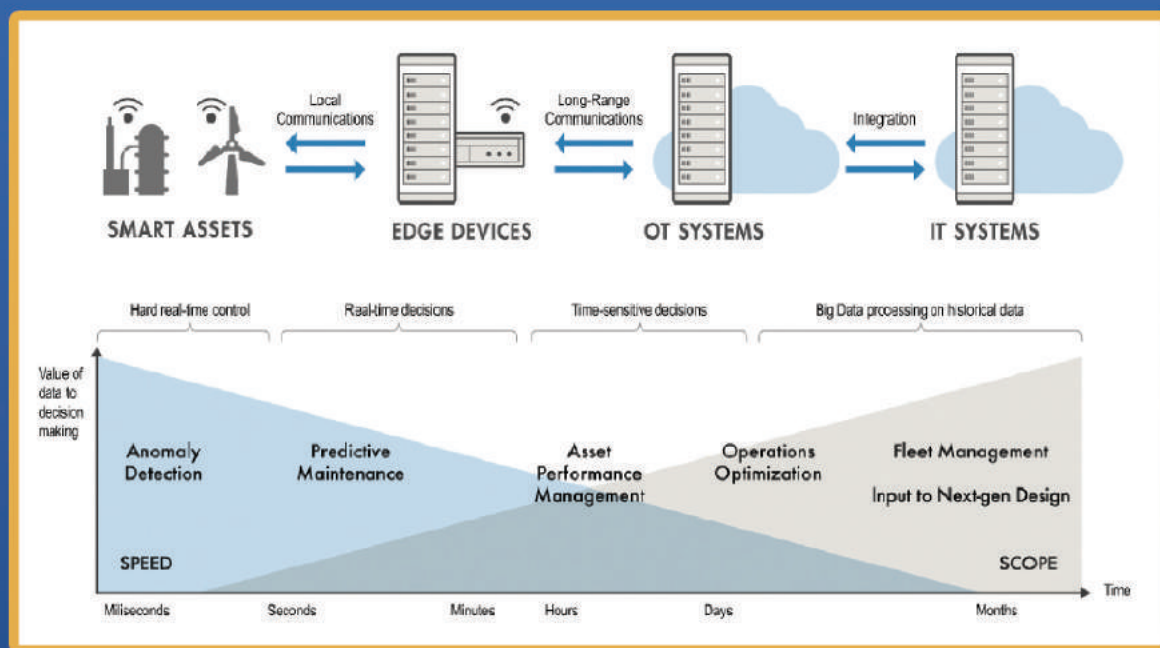
Şekil 2 Küçük reaktörler kullanım alanları [F. Rayment, Executive Director NIRO; Nuclear Energy in the UK and the Role of Advanced Nuclear Technology, GIF, October 2018, Paris, France]

KAYNAKLAR

1. O.A. Jianu 1, G.F. Naterer 2, M.A. Rosen, Hydrogen cogeneration with Generation IV nuclear power plants, Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, 2016.
2. G. Naterera*, et al., Recent Canadian advances in nuclear-based hydrogen production and the thermochemical Cu-Cl cycle, International Journal of hydrogen energy, 34 (2009) 2901-2917
3. Zhaolin Wang, Kamiel Gabriel, Thermochemical Process Heat Requirements of the Copper-Chlorine Cycle for Nuclear-Based Hydrogen Production, 29th Conference of the Canadian Nuclear Society, Toronto, Ontario, Canada, June 1 - 4, 2008.

MATLAB and Simulink for the Utilities and Energy Industry

Design, simulate, and deploy tomorrow's utility and energy infrastructure



● Digital Twin for physical assets and systems

Use MATLAB and Simulink to create digital replicas or digital image (DI) of your physical assets and systems. Use it to perform predictive maintenance, optimize operations, perform electrical, hydraulic system simulation, and model cyber-physical systems.

● Renewables and DER Integration Studies

Evaluate the performance of a system that has high penetration of distributed energy resources (DER) such as renewables, storage, and EVs with Simscape Electrical™. Model and run multiple operational scenarios in parallel and assess simulated responses against grid code.





Emre ATA

ASPİLSAN ENERJİ Ar-Ge Birim Müdürü

ASPİLSAN AŞ.

ASPIRSAN ENERJİ

Ar-Ge BİRİM MÜDÜRÜ

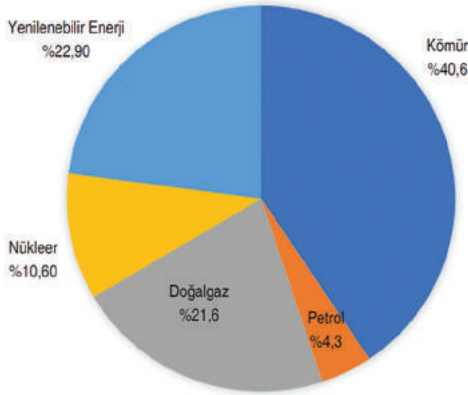
EMRE ATA İLE

ÖZEL RÖPORTAJ

◆ ARGE DERGİSİ : Yenilenebilir enerji ve enerji dönüşümü kavramından bahsedebilir misiniz?

Emre ATA: Hepimizin bildiği üzere enerji, hayatımızı her anlamda kuşatan, teknolojik kuramla birlikte sosyolojik, politik tüm kavramlarımızla doğrudan etkileşimi olan bir gerçeklik. Dolayısıyla enerjiden bahsederken genel geçer tanımlamalardan ziyade, hayatımıza ne kadar dokunduğuna dair sayıları kullanarak bir şeyleri göstermek daha doğru olabilir. Elimizdeki çeşitli resmî araştırma sonuçlarına göre, dünya çapında hâlihazırda kullanılmakta olan enerjinin yaklaşık %85'i halen fosil kaynaklardan elde edilmekte. Ayrıca %5 civarında da nükleer enerji kullanımı mevcut. Dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı istenilen seviyenin çok altında.

Şekil 1 Dünya genelinde birincil enerji kaynakları bazında elektrik enerjisi üretimi oranları [1]



[1]: Mühendis ve Makina cilt 59, sayı 692, s. 86-114, 2018 - Dünyada ve Türkiye'de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi

Yenilenebilir enerji, en bilinen tabiriyle doğal kaynaklardan daimî olarak elde edilebilen enerjiler olarak tanımlanıyor. Günümüzde yenilenebilir enerji denildiğinde bir çok insanın aklına güneş ve rüzgar enerjisi geliyor. Tabii bunların yanında jeotermal, biyokütle, hidrolik enerji gibi daha az bilinen enerji türleri de var. Bunların yanına, elde edilmiş şekline göre başka özel yenilenebilir enerji kaynakları eklemek de mümkün olduğu gibi, hidrojeni de elde edilmiş ve kullanım şekline göre bu listeye dahil etmek mümkün.


Bu kitabî bilgilerin ardından, enerji dönüşümünden bahsedebiliriz. Geleneksel, yani yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarını tükenme noktasına getiren, dünyayı bu kaynaklardan salınan çevreye

ve atmosfere zararlı emisyonlarla kirleten ülkeler, kötü gidişi görmüş ve tam olarak gerekli adımları atmamak üzere fikir birliğine varmanın ötesinde vites yükseltmiş durumdadır. Şimdi en büyük mesele karbon emisyonunu bitirmek. Dolayısıyla başta Avrupa olmak üzere, “çevreyi korumak” tematiği altında birçok politik düzenleme yapıldı. Tabii Kyoto Protokolü’nün ve Japonya’nın politika geliştirme ve bilinç oluşturma noktasında öncülerden olduğundan bahsetmemiz gerekir. ABD’de de eyaletler bazında bu konuda hassasiyet gösteren bölgeler bulunmaktadır. Yeni başkan Biden’ın bu konuda duyarlılığı bulunduğuna yönelik haberler okuduk. AB ülkelerinin özellikle güneş ve rüzgar santralleri kurma noktasında son 20 yılda çok mesafe kat ettiğini biliyoruz. AB’nin 2020 için belirlediği hedefi 20-20-20 olarak isimlendirilen sera gazlarının %20 azaltılması, enerji tüketimi içinde yenilenebilir enerjinin oranının %20’ye yükseltilmesi ve enerji verimliliğinin %20 artırılması idi. Bu hedefler 2030 ve 2050 için oranları yükseltilerek belirlenmiş. Diğer yandan kullanılan doğal gazın içerisinde belirli oranlarda hidrojen katılmasına yönelik çalışmalar AB ülkelerinde hızla devam etmekte, bazı ülkelerin 2025, 2030 gibi hedefleri arasında doğal gazın yerini tamamen hidrojene bırakması bulunuyor. Ülkemizde de bu yönde bir bilinç oluşmuş durumda ve 2050 için hedef, enerji ihtiyacının %100 oranında yenilenebilir enerjiden karşılanması. Enerji dönüşümü denilen kavram, aslında en yalın haliyle bu şekilde tanımlanabilir.



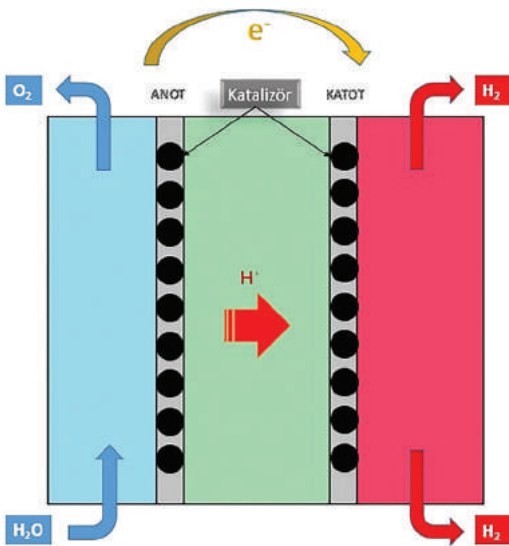
◆ A.D. : Hidrojenin yenilenebilir enerji kaynağı olarak (çevre açısından) yeri ve önemi nedir?

E. A. : Hidrojen özellikle elde ediliş yöntemi açısından uygun olduğu takdirde yenilenebilir enerji kaynakları ligine girebiliyor. Hidrojenin yanması ile, yani oksijen molekülü ile reaksiyona girmesi sonucunda, su molekülü açığa çıkıyor. Hidrojeni yakıt olarak kullanan bir yakıt pilinde de aynı şekilde son ürün su. Dolayısıyla hidrojen, yakıt olarak kullanıldığı durumlarda temizdir. Ancak hidrojenin nasıl elde edildiği önemli. Nitekim en yaygın hidrojen elde etme yöntemi hidrokarbonların parçalanmasıyla gerçekleştirilen buhar reformasyonudur ve bu yöntemde oldukça fazla CO₂ ve CO açığa çıkar. Hidrojen ancak temiz yöntemlerle elde edildiği takdirde temiz hidrojen olarak isimlendirilebilir.

Renk	Gri Hidrojen	Mavi Hidrojen	Turkuvaz Hidrojen	Yeşil Hidrojen
Süreç	SMR ya da Gazlaştırma	SMR ya da Karbon Yakalamayla Gazlaştırma	Piroliz	Elektroliz
Kaynak	Metan ya da Kömür 	Metan ya da Kömür 	Metan 	Yenilenebilir Enerji 

Şekil 2 Hidrojenin üretim yöntemine göre bazı renk kodları [2]

Çevrecilik teması bağlamında tahmin edileceği üzere, dünyada genel olarak yeşil hidrojene doğru bir eğilim var. Bu noktada elektrolizörler ön plana çıkıyor.



Şekil 3 Bir PEM elektrolizörün genel çalışma prensibi

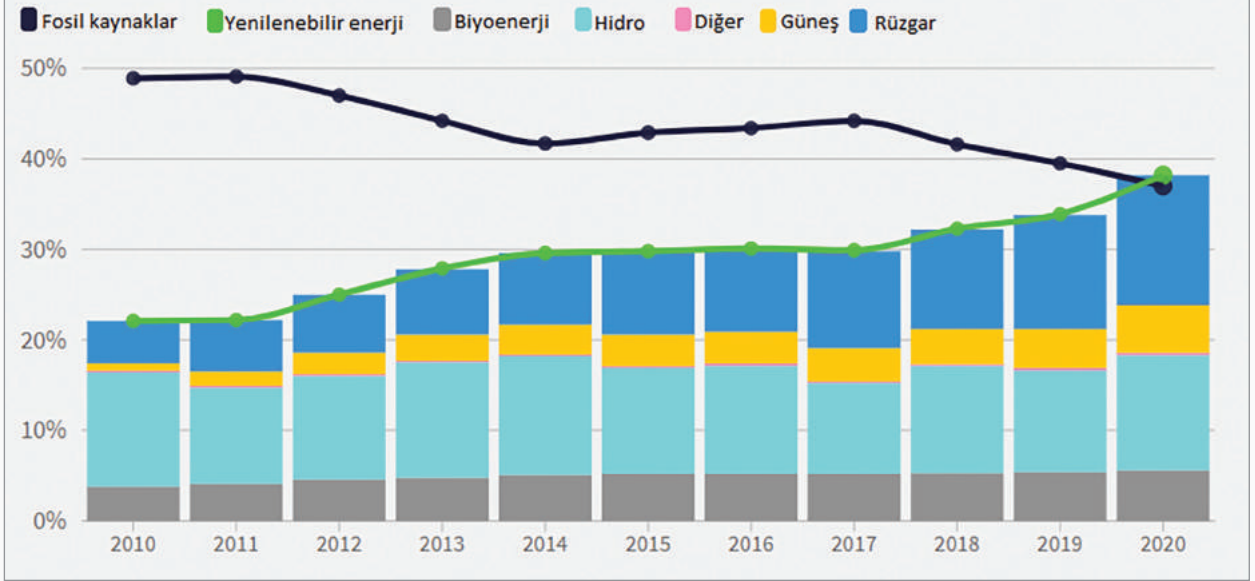
Değişik tiplerde elektrolizörler var ancak genel olarak temel prensip aynıdır. Suyun elektrolizinde sisteme elektrik ve su verirsiniz, oksijen ve hidrojen açığa çıkar. Başka bir yan ürün yok. Bu noktada tabii kullandığınız elektrik enerjisinin de nereden elde edildiği sorgulanmaya başlandı ki bence bu eğer temiz bir enerji ekosisteminden bahsedeceksek doğru bir sorgulamadır. Eğer elektrik elde etmek için kömür yakıp karbon salınımı yapıyorsanız, bu elektriği kullanarak hidrojen elde ettiğinizde temiz bir enerji depolama yaklaşımında bulunduğunuzu iddia edemezsiniz.

Yenilenebilir enerji dönüşümüne en çok önem veren ve bu konuda en çok yatırım yapan ülkelere baktığımızda, AB kuzey ülkelerini ilk sırada görüyoruz. Buralarda ve Almanya ve Fransa gibi önde gelen ülkelerde güneş ve rüzgar santralleri oldukça yaygınlaştı.

Rüzgar ve güneş öncülüğünde genişleyen yenilenebilir enerji payları

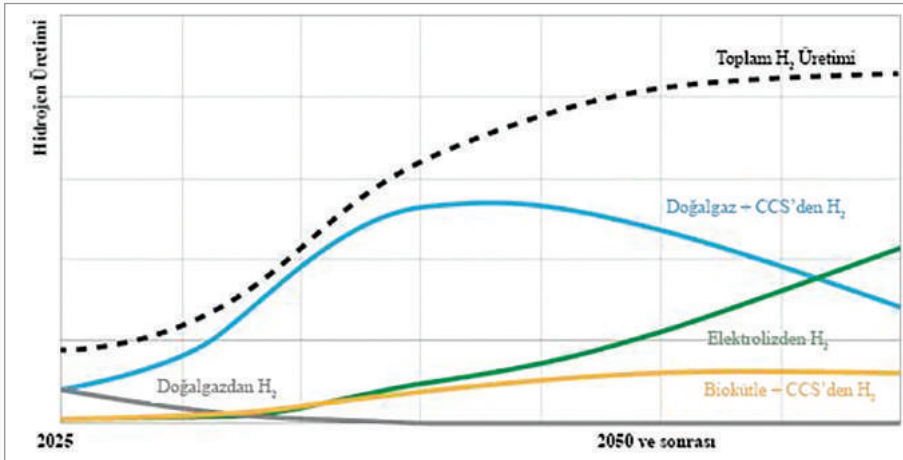
27 Avrupa Birliği ülkesinde elektrik üretimi içindeki % pay oranları

EMBER



Şekil 4 Ember ve Agora Energiewendekuruluşlarınca Ocak-2021'de yayınlanmış Avrupa elektrik üretimi hakkında infografik

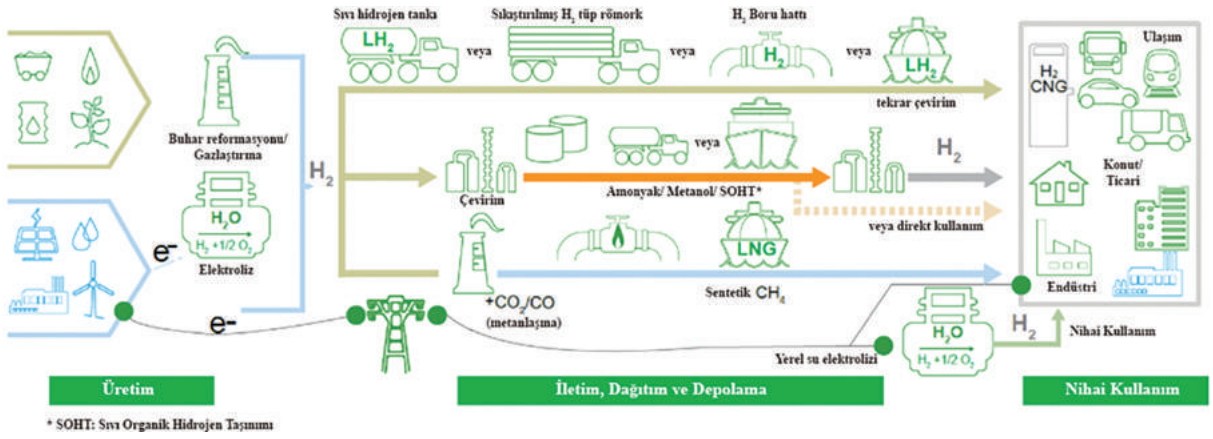
Rüzgar enerjisinin ve güneş enerjisinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda, enerji üretim sisteminizin üreteceği fazla enerji sorun oluşturuyor. Bu fazla enerjiyi depolayabilmek için başta batarya sistemleri olarak üzere bazı yaklaşımlar denenmiş ancak bunlar ekonomik açıdan yeterli olmamıştır. Hidrojen işte burada da devreye giriyor. Elinizdeki fazla enerjiyi kullanıyorsunuz ve suyun elektroliziyle hidrojen üretilip depoluyor, daha sonra ürettiğiniz hidrojeni kullanılabileceği yerlere taşıyabiliyorsunuz. Böylelikle enerji taşınabilir ve verimli bir formata kavuşuyor.



Şekil 5 Hidrojen üretimi için gelecek projeksiyonu

◆ A.D.: Hidrojen ekosistemi kavramını açıkla mısınız?

E. A.: Bilindiği üzere ekosistem, sistemin alt unsurlarının ekonomik yönünü de girdi ve çıktı olarak işleme alan sistemsel bütünlüğe deniyor. Aslında enerji dönüşümünün öncüsü ülkeler yenilenebilir enerji ekosistemlerini dizayn etmiş durumdadır ve önümüzdeki yıllar içerisinde tasavvur ettikleri ekosistemi gerçekleştirebilmek için büyük finansal kaynaklar ayırıyorlar. Geçtiğimiz yirmi yılda olgunlaşmış ve şekillenmiş olan bir yenilenebilir enerji ekosistemi kavramı mevcut. Hidrojen ekosistemi ise, yenilenebilir enerji ekosisteminin içerisine hidrojenin entegre edilmesiyle evrilen, bir anlamda yenilenebilir enerji ekosisteminin kan dolaşımının hidrojenle sağlandığı yeni versiyonudur diyebiliriz.



Şekil 6 Hidrojen ekosistemi

Hidrojen ekosistemi, hidrojenin üretimini ilgilendiren diğer yenilenebilir enerji üretim sistemleri ile hidrojen enerjisi üretim sistemlerinin alt bileşen ve malzeme tedarikinden, sanayi, konut ve taşımacılık gibi başlıca hidrojen son-kullanıcılarına varıncaya kadar hidrojenle ilgili tüm unsurları içeren ekosisteme verilen isim. Yeşil hidrojen için elektrolizör üreticileri, yakıt pili üretim sektörü, alt bileşen tedarikçileri, yakıt pilli otomotiv grubunu ilgilendiren tüm bileşenler, konutlarda hidrojen kullanımı ile birlikte oluşacak alt yapı değişiminden ötürü yerel yönetimler, rüzgar ve güneş enerjisi ekosistemi ve bunlardan başka bu alanın ekonomisiyle etkileşimde olabilecek bütün unsurlar, hidrojen ekosisteminin parçası olacaktır. Hidrojen ekosistemi olarak adlandırılan sistemde hidrojen, enerji taşıyıcısı olarak kullanılacağı yere iletilir ve hidrojen doğal gaz yerine yakıt olarak kullanılır. Aynı zamanda hidrojen, yakıt pillerinin yakıtı olarak beslenerek elektrik üretimi sağlar.

◆ A.D. : Türkiye’de hidrojen ekosistemine geçişe dair bilinç nasıldır?

E. A. : Hidrojen ekosistemi, beraberinde diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında, özellikle de rüzgar ve güneş enerjisi alanında da gelişmelerin gerçekleşmesini gerektiriyor. Türkiye olarak en çok takip ettiğimiz oluşum Avrupa Birliği (AB); bu sebeple AB bünyesinde atılan adımların bizim ülkemizdeki politikanın belirlenmesi açısından etkisi daha büyük. Nitekim şu anda tüketilen enerjinin %24’ünü karşılayan yenilenebilir enerji kaynaklarımızın 2023 yılının sonuna kadar %30’a çıkarılması hedeflenmekte. 2050 için bu hedef oranı %100. Bunun yanı sıra ülkemizde de AB ülkelerinde olduğu gibi doğal gaza hidrojen katılmasına yönelik çalışmalar başlamış durumda. Bu sevindirici bir gelişme ancak ilk etapta %2 oranında hidrojen doğal gaz şebekesine verilse dahi ortaya çıkacak hidrojen ihtiyacını karşılayabilmek için şu anda temiz hidrojen üretimi için yeterli kapasite bulunmuyor. Yani hidrojen ekosistemine geçtiğimizde de bizi yurt dışına bağımlılık tehlikesi bekliyor. Hidrojenin güvenilirliğine de vurgu yaparak hidrojen bilincinin artması için daha çok çalışma yapılması gerekiyor. Ülkemizde bu konuda değerli çalışmaları olan akademisyenler ve dernekler de bulunmakta. Hidrojen ekosistemini güçlendirebilecek teknik alt yapıya sahibiz ancak bu konuda daha fazla kaynak ayrılması kaçınılmaz bir gereklilik.

◆ A.D. : Güç üreten sistemler olarak hidrojenle çalışan yakıt pillerinin yenilenebilir enerji ekosisteminin içindeki yeri nedir?

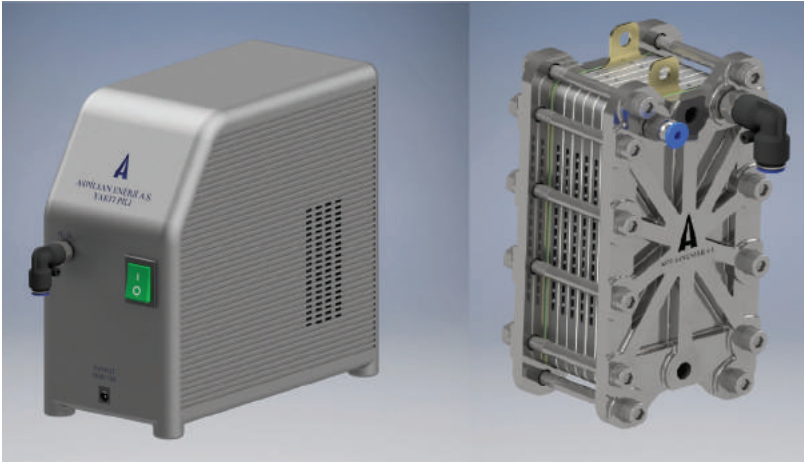
E. A. : Üzerinde konuştuğumuz yenilenebilir enerji ekosistemi, birbirini tamamlayan önemli unsurlardan oluşmakta. Burada yakıt pilleri, veya İngilizce jargondan direk çevrilmiş hali ile yakıt hücreleri, hidrojeni tüketen ve bunun karşılığında elektrik üreten, emisyon olarak yalnızca su çıkaran temiz ve sessiz, aynı zamanda oldukça verimli güç üreticileridir. Yakıt pilleri ekosistemin enerji tüketim tarafında düşük emisyonlu dönüşüm için gereklidir ancak hidrojenin tek kullanım yeri değil. Hidrojen ekosistemi yakıt pilleri olmadan da işleyebilir ancak yine de yakıt pilleri olmadan eksik olarak tanımlanacaktır. Şu da var ki, oturmuş bir hidrojen ekosisteminde, yakıt pilleri kendilerine kullanım alanı ve müşteriyi daha kolay bulacağı için kolaylıkla yaygınlaşacaktır.

PEM tipi yakıt pilleri, günümüzde kendilerini uzun soluklu çalışabilme yeteneği anlamında da yeterince ispatlamış durumda. Ticari olarak erişilebilen ürünlerde üreticiler 5 bin ilâ 20 bin saat

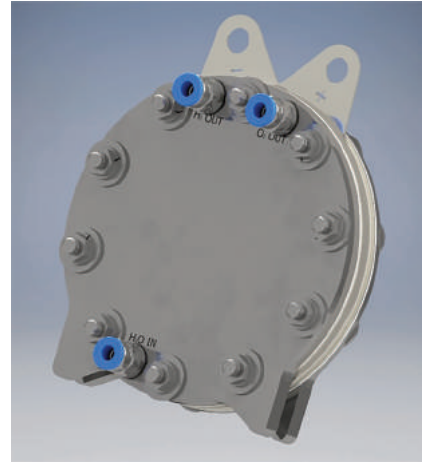
arasında çalışma süreleri vaat ediyorlar. Çalışma sürelerinin, yani ömrün arttırılmasına yönelik Ar-Ge çalışmaları yürütülmekte. Çalışmaların en önemli ayağı malzeme ve kimya disiplinlerine dayanıyor. İşte bu noktada yakıt pillerinin en büyük dezavantajı yüksek maliyetler olarak kendini gösteriyor. Yani hidrojen ekosisteminin en maliyetli unsurları, PEM elektrolizörlerle hidrojenin üretimi ve PEM yakıt pilleriyle hidrojenin tüketimi aşamaları olarak görünüyor. Bu taraflarda özellikle platin gibi değerli metallerin kullanımının düşürülmesi, membran, gaz difüzyon tabakası ve conta gibi bileşenlerin de daha ucuza mâl edilmesiyle genel maliyetlerin aşağıya çekilmesi mümkün olabilecek.

◆ **A.D.:** Aspilsan Enerji'nin İstanbul Ar-Ge merkezinde hidrojen ve yakıt pili üzerine özel çalışmalar yürüttüğünüzü biliyoruz. Bu çalışmalardan bahsedebilir misiniz?

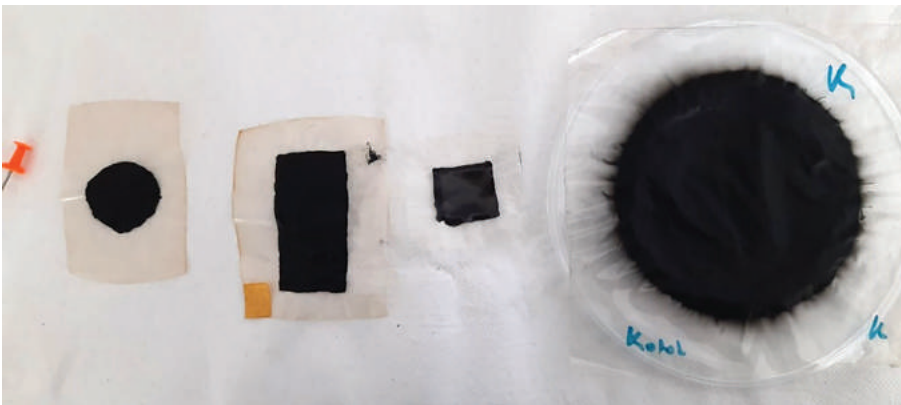
E.A.: İstanbul Ar-Ge Merkezi olarak 2018 yılından beri faaliyet göstermekteyiz. Ana hedefimiz hem sivil hem de askeri sektörlerde satılabilir ticari ürünler geliştirmek. Dolayısıyla odaklandığımız konulardan birisi hidrojen üretiminde günümüzde kritik bir konuma gelmiş olan PEM elektrolizörler. Diğer yandan güç üreten sistemler olarak hidrojenle çalışan PEM yakıt pilleri ile PEM'in alt türleri olan DMFC (Doğrudan Metanollü Yakıt Hücresi) ve DEFC (Doğrudan Etanollü Yakıt Hücresi) sistemleri geliştirmek üzere de çalışmalarımız mevcut. Ürün geliştirme odaklı çalışıyoruz ve haliyle derinlemesine Ar-Ge çalışmaları yapmaktan kaçınmaya çalışıyoruz. Ancak yine de bu çalışmalarda ilerleme kaydedebilmek ve özellikle yabancı rakiplere karşı ürün avantajı ortaya koyabilmek için Ar-Ge niteliği olan işler de oluşuyor. Üniversitelerle ve araştırma kurumlarıyla da iş birliklerimiz bulunuyor. Diğer yandan, doğrudan etanol yakıt hücresi sensörlü alkolmetrelerin dünya çapında yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte bizler de bu yönde bir çalışma başlattık. Alkolmetrenin sensör ve cihaz geliştirme çalışmaları hızla devam ediyor.



Şekil 7 150 W'lık PEM yakıt pili ve taşınabilir sistem tasarımlarımız



Şekil 8 PEM Elektrolizör prototipi tasarımlarımız



Şekil 9 PEM yakıt pili ve PEM elektrolizörde kullanılan hücreler



Şekil 10 Alkolmetre prototipi



◆ **A.D. : Aspilsan Enerji olarak, enerjinin üretimi kadar depolanmasının da büyük önem taşıdığını her zaman belirtiyorsunuz. Enerjinin depolanması konusundaki çalışmalarınız nelerdir?**

E. A. : Evet, enerjinin depolanması ihtiyacını gidermek için hidrojen kullanılmasından bahsediyoruz ancak hidrojenin kendisinin nasıl taşınacağı veya depolanacağı ile ilgili de alt konular mevcut. Öncelikle hidrojenin periyodik tablodaki en küçük boyutlu molekül olduğunu ve bu sebeple neredeyse her boşluktan kaçabilme yeteneğinin olduğunu altını çizmek gerek. Dolayısıyla hidrojenin gaz formundayken içine konulacağı ve taşınarak dağıtımının yapılacağı her materyalin içinden geçerek sızma olasılığı yüksek. Bunu önleyebilmek adına uzun yıllardır araştırma kurumlarında uygun kompozit malzeme geliştirilmesi için çalışmalar yapıldı ve yapılmaya devam ediliyor. Bu noktada özellikle 2000'li yıllardan itibaren malzeme ve imalat teknolojisindeki büyük ilerlemeler sayesinde hidrojen gaz formunda da güvenli sınırlar içinde kalmak suretiyle kompozit yapıda tanklarda depolanabiliyor ve hidrojene uyumlu özel valfler ile aktarma işlemleri güvenli şekilde yapılabilir. Hidrojenin sıvı formda tutulması da hiç kolay değil, nitekim hidrojenin atmosferik basınç altında sıvılaşabilmesi için

gerekli sıcaklık yaklaşık $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Hâl böyle olunca uzmanlarca değişik depolama teknikleri bulunması için çalışmalar yapılmış. Bazı alkali metaller ile yaptığı kimyasal bileşik sayesinde hidrojenin tutulması mümkün olabilmekte. Bor malzemesi üzerinde çokça durulmakta, nitekim borlu bileşikler hidrojeni oldukça yüksek oranda tutabiliyor. Bu tip yapılarda birleşim kimyasal olduğu için, hidrojenin bileşikten ayrılabilmesi için katalizör ve sıcaklık gibi faktörlerin uygulanması gerekiyor. Tabii bu sistemlerin kullanımıyla birlikte gelen, harici ekipman gerekliliği, reaksiyon kontrolünün zorluğu gibi çeşitli dezavantajlar bulunuyor. Bunların yanı sıra çeşitli metal hidrit depolama yöntemleri de geliştirilmiş. Ağırlıkça oldukça düşük hidrojenin depolanabildiği bu tür sistemler özellikle Almanya ve ABD'de geliştirilmiş durumda olmakla birlikte geliştirme çalışmaları devam ediyor. Bizler de PEM yakıt pilli taşınabilir sistemlerimizde muhtemel depolayıcı olarak metal hidritin kullanılmasına yönelik olarak çeşitli araştırma kurumlarıyla iş birliği yapıyoruz.



HİDROJENİN TEMİZ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ, DEPOLANMASI VE KULLANIM UYGULAMALARI



Dr. Hüseyin Ayhan

huseyin.ayhan@figes.com.tr

Nükleer Teknoloji Bölümü Müdürü

FIGES A.Ş.

ÖZET

Son yıllarda dünya genelinde baş gösteren küresel ısınma, karbon salımı ve hava kirliliği gibi sorunlar sebebiyle özellikle enerji üretimi ve ulaşım sektörlerinde mevcut tekniklerin ötesinde yeni nesil tekniklerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar hızlanmıştır. Enerji üretim ve ulaşım sektöründe günümüzde çoğunlukla fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu durum fosil yakıt rezervlerinin azalmasının yanında daha da önemlisi çevre kirliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu sebeple fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim mevcuttur. Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları doğrudan rol alabiliyorken, ulaşım sektöründe doğrudan kullanıma uygun olmaması sebebiyle bir enerji taşıyıcısına ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrojen bu görev için oldukça elverişli bir elementtir. Çünkü hidrojen kütle bazında yüksek enerji içeriğine sahip olup yakıldığında zehirli atığı bulunmamaktadır. Oksijen ile yakıldığında atık olarak sadece su buharı oluşturur. Fosil yakıtlarla kıyaslandığında, enerji verimliliği ve atık açısından hidrojenin üstünlüğü açıkça görülmektedir.

Hidrojen, hidrokarbonlu bileşiklerin gazlaştırılması, buhar reformasyonu (steam reforming), kısmi oksidasyon, suyun elektrolizi, ısıl ayrıştırma (cracking), piroliz, termoliz, fotoliz, termokimyasal ve biyolojik tepkime gibi birçok farklı teknik kullanılarak elde edilebilmektedir. Suyun elektrolizi ile de üretilebildiği için hidrojen, üretim tekniği açısından ekonomik ve sürdürülebilir bir yöntem ile sonsuz ve temiz bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Hidrojenin kimyasal özelliklerinin yanında fiziksel özellikleri bakımından da çevreye olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır.

GİRİŞ

Hidrojen ifadesi yunan dilinde sırasıyla “su” ve “oluşturan” anlamlarına karşılık gelen “hydro” ve “genes” sözcüklerinden türemiştir. Oksijen elementi ile birlikte suyu oluşturduğu için ve yer kürede bol miktarda su olduğu için, hidrojen yer yüzeyinde en bol bulunan elementlerdendir. Hidrojen ayrıca doğada birçok kimyasal bileşikte karbon ile bağ oluşturmuş şekilde de bulunur. Yer yüzeyinde en bol bulunan elementlerden olmasına karşın saf olarak bulunmamaktadır. Doğada farklı elementler ile birlikte oluşturduğu bileşik halinde (çoğunlukla oksijen ve karbon elementleri ile) veya gaz molekülü (H_2) halinde bulunmaktadır. Atmosferdeki hidrojen molekülü ise eser miktardadır. Soluduğumuz havanın sadece % 0,000055’lik kısmın H_2 molekülünden oluşur.

Hidrojen elementinin atom numarası (proton sayısı) 1'dir. Hidrojen elementinin bir protonunun yanında çekirdeğinde farklı miktarda nötron bulunan 7 tane izotopu (proton sayısı aynı, nötron sayısı farklı) bulunmaktadır (nötron sayısı: 0, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olabilmektedir). En yaygın izotopu "Hidrojen" olarak anılmaktadır. Genel ifadesinden ayrı kullanımı için bu izotop (n=0) "protium" olarak isimlendirilmektedir. Diğer yaygın kullanımı olan izotopları ise döteryum (n=1) ve trityum (n=2)'dur. Protium, döteryum ve trityum dışındaki izotoplar laboratuvar ortamında üretilen ve yüksek kararsızlığı bulunan izotoplardır. Protium doğada % 99,98 oranında, döteryum ise yaklaşık %0,02 oranında bulunan kararlı izotoplardır. Trityum ise radyoaktif bir izotoptur. Bu makalede protium izotopu yaygın kullanımı olan "Hidrojen" olarak anılacaktır.

Hidrojen elementinin fiziksel olarak rengi ve kokusu bulunmamaktadır. 0 °C sıcaklık ve 1 atm basınç altında gaz formundaki hidrojenin öz kütlesi yaklaşık 0,09 kg/m³ iken, -269 °C sıcaklıkta katı formdaki öz kütlesi yaklaşık 90 kg/m³tür [1]. Yani uygun sıcaklık ve basınç altında hidrojen elementi yaklaşık 1000 kat sıkıştırılarak gaz formundan katı forma getirilebilmektedir. Hidrojen havadan yaklaşık 14 kat daha hafiftir ve gazlar arasında en hızlı difüzyon özelliğine sahip olan gazdır. Yine ısı kapasitesi özelliği olarak da gazlar arasındaki en yüksek değere (14,4 kJ/kg-K) sahip olduğu bilinmektedir [2].

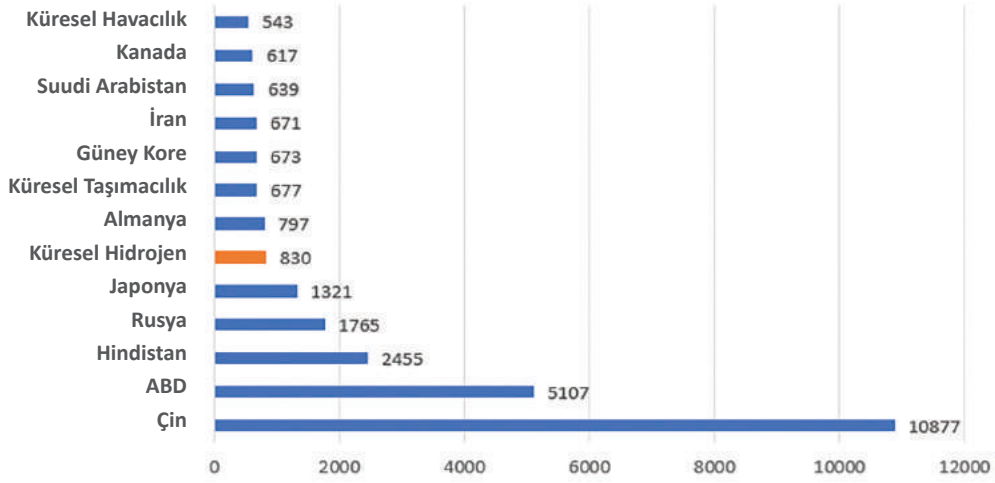
Hidrojen yakıldığında (oksijen ile) ürün olarak sadece su açığa çıkmaktadır. Bu yüzden çevresel atık olarak değerlendirildiğinde hidrojen yakıtı temiz ve sürdürülebilir bir kaynaktır. Ancak diğer taraftan hidrojen doğal bir yakıt değildir. Çünkü hidrojen kimyasal olarak çok tepkin bir atomdur ve doğada serbest olarak bulunmaz. Hidrojen, diğer atomlar veya kendisi ile iyonik veya kovalent bağ oluşturarak doğada bileşik halinde bulunur. Dolayısıyla hidrojen farklı hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. 2004 yılı verilerine göre dünya genelinde kullanılan saf hidrojenin yaklaşık % 48'si doğal gazdan, %30 petrolden, %18 kömürden, % 4'ü suyun elektrolizinden üretilmiştir [3] [4]. Günümüzde küresel kullanımdaki hidrojen miktarı yaklaşık 70 milyon tondur. Bu miktar ABD benzin tüketiminin neredeyse yarısına eşdeğer bir enerji içeriğine karşılık gelmektedir.

Bileşik halde bulunan hidrojeni atomik hidrojene ayırtırmak için önemli ölçüde enerjiye ve yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla hidrojeni, birincil enerji kaynaklarından türetilen ve enerjiyi depolamak ve iletmek için kullanılabilen bir enerji taşıyıcısı olarak tanımlamak mümkündür [2].

Her ne kadar atomik hidrojenin elde edilme yöntemleri maliyetli olsa da, gaz formdaki yakıtlar ve petrol türevi yakıtlar içerisinde enerji yoğunluğu en fazla olan (birim kütle başına en yüksek enerjiye sahip) yakıt hidrojendir. Hidrojen yakıtının enerji yoğunluğu diğer gaz yakıtlara göre 2-3 kat fazla ve yaklaşık 144 MJ/kg iken [5] bu değer nükleer yakıtlar için, koşullara bağlı olarak yaklaşık 80 TJ/kg mertebelerindedir [6]. Diğer taraftan hidrojenin öz kütlesinin diğer gaz yakıtlara göre çok düşük olmasından dolayı kullanımına yönelik depolama problemleri ile karşılaşabilmektedir. Hidrojenin enerji yoğunluğu depolama koşullarına göre de değişiklik göstermektedir. Sıvı ya da gaz halde bulunması ve hatta depolama basıncı enerji yoğunluğunu etkileyen parametrelerdendir.

Hidrojenin üretim yöntemlerine göre renklendirmesi yapılmaktadır. Günümüzde çoğunlukla yeşil, mavi ve gri hidrojen kavramları kullanılıyor olsa da, bu renk çeşitliliğini yeşil, turkuaz, sarı, mavi, pembe, gri, beyaz ve kahverengi olarak da çeşitlendiren tanımlamalar mevcuttur. Bu renkler, hidrojenin üretimi esnasında açığa çıkan karbondioksit (CO₂) miktarına veya oluşan karbondioksitin doğaya salınıp salınmadığına göre anlam ifade etmektedirler.

Hidrojenin yanması CO₂ oluşturmasa da, mevcut üretim süreçleri yoğun miktarda CO₂ oluşturabilmektedir. Şekil 1'de de görüldüğü gibi 2017 yılında küresel hidrojen üretiminden kaynaklanan CO₂ salımı 830 milyon ton olmuştur. Bu miktar, küresel fosil CO₂ salımlarının yüzde 2,2'sine eşittir ve Almanya'nın 2017 yılı CO₂ salımından daha fazladır [7].



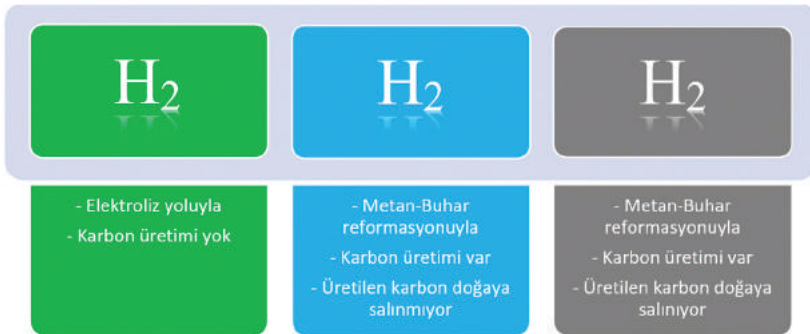
Kaynak: CO₂ and other Greenhouse Gas Emissions, Wood Mackenzie

Şekil 1: Ülkelere ve sektörlere göre 2017 yılı CO₂ salım miktarları (Mton CO₂/yıl)

Hidrojenin üretim şekline bağlı olarak farklı renkler ile anıldığını belirtmiştik. Renkleri çeşitlendirmek mümkündür ancak bu makalede hidrojen üretim şekilleri temel olarak 3 farklı renk ile ifade edilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından veya nükleer enerjiden üretilen elektrik enerjisi kullanılarak suyun elektrolizi ile elde edilen hidrojen “Yeşil Hidrojen”dir [8]. Çünkü bu işlemde ihtiyaç duyulan elektriğin üretiminde neredeyse hiç karbondioksit açığa çıkmamaktadır. Suyun elektrolizi ile üretimin dışındaki bir diğer yöntem ise yüksek sıcaklık ve basınç altında metan-buhar reformasyonu ($CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$) ile üretimdir. Ancak yenilenebilir enerji veya nükleer enerji gibi temiz kaynakların aksine, metan kullanarak yapılan üretim sonucunda karbondioksit açığa çıkmaktadır. Eğer açığa çıkan bu karbondioksit “Karbon Yakalama ve Depolama” teknikleri ile kontrol altına alınıp doğaya salınmıyor ise üretilen hidrojen “Mavi Hidrojen” olmaktadır. Şayet işlem sonucunda açığa çıkan karbondioksit herhangi bir işleme tabi olmayıp doğaya salınıyor ise üretilen hidrojen “Gri Hidrojen” olarak sınıflandırılmaktadır.

Şekil 2’de hidrojen üretim yöntemlerine ait 3 temel renk tanımlaması gösterilmiştir. Bu makaledeki sınıflandırmanın temel amacı üretim esnasında karbon üretilip üretilmediğine ve üretiliyorsa işlem yapıp yapılmadığına göre incelemektir. Elbette üretim yöntemi olarak farklı teknikler de kullanılmaktadır. Suyun elektrolizi ve buhar-metan reformasyonu haricinde, kısmi oksidasyon, gazlaştırma, ısıl ayrıştırma, piroliz, termoliz, fotoliz, termokimyasal ve biyolojik tepkime yöntemleri ile hidrojen üretimi de mümkündür.

Enerji kaynağı olarak da yenilenebilir enerji kaynakları (hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle), doğalgaz ve nükleer enerjinin dışında petrol, kömür ve elektrik şebekesi de kullanılabilir. Bu sebeple hem kullanılan kaynak hem de uygulanan teknik ele alındığında yeşil, mavi ve gri renkler dışında farklı renk tanımlamaları da ortaya çıkmaktadır. Ancak bu makalede, kullanılan tekniğe veya uygulanan yönteme göre değil, üretim sonucunda açığa karbondioksit çıkıp çıkmamasına veya açığa çıkıyorsa doğaya salınıp salınmamasına göre renklendirme ele alınmaktadır.



Şekil 2: Hidrojenin üretim yöntemlerine göre renk sınıflandırması

ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Üretim yöntemi olarak en temiz, ekonomik ve sürdürülebilir yol, temiz üretimle elde edilmiş enerji kullanılarak suyun elektrolizi ile olan üretilimdir. Bunun yanında yenilenebilir enerji kaynakları ile gerçekleştirilebilen fotoliz, termoliz, termokimyasal, piroliz, biyoloji tepkime veya gazlaştırma (biyokütleden) yöntemleri de temiz olmakla birlikte günümüzde çok da ekonomik veya sürdürülebilir değildir. Ancak mevcut hidrojen üretiminin sadece %5'inden daha azı suyun elektrolizinden karşılanmaktadır. Hidrojen üretiminin yüzde 95'inden fazlası ise metan-buhar reformasyonu veya kömürün gazlaştırılmasından elde edilmektedir. Bir başka deyişle üretimin %95'i gri (metan-buhar reformasyonu) veya kahverengi (kömürün gazlaştırılması) hidrojen sınıfındadır. Gri ve kahverengi hidrojen üretiminde CO₂ açığa çıkmaktadır ve doğrudan doğaya salınmaktadır. Karbondan arındırılmış hidrojene giden yol ise mavi hidrojenidir. Yani gri ve kahverengi hidrojeni üretim sürecine "Karbon Yakalama ve Depolama" (KYD) süreci eklenerek mavi hidrojene çevirmek mümkündür. Ancak diğer taraftan bu sürecin getirdiği maliyet oldukça fazladır. Üretim yöntemlerine göre olan maliyet karşılaştırması Tablo 1'de özetlenmiştir [9].

Tablo 1: Hidrojenin üretim yöntemlerine göre maliyetleri

Üretim Şekli	Minimum Maliyet (\$/GJ)	Maksimum Maliyet (\$/GJ)
Metan-buhar reformasyonu (KYKD* yok)	8,8	12,5
Metan-buhar reformasyonu (KYKD oranı %53)	11,0	14,7
Metan-buhar reformasyonu (KYKD oranı %89)	14,2	17,9
Yenilenebilir enerji kaynağı	40,0	69,0
Biyokütle	15,0	29,0
Gelişmiş nükleer santraller	8,8	13,8
Elektrik şebekesi (60-120 \$/MWh maliyetli)	16,7	33,3
Elektrik şebekesi (40-90 \$/MWh maliyetli)	11,1	25,0

*KYKD: Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama

Hidrojenin üretim aşamasındaki CO₂ salımlarının miktarı, ihtiyaç duyulan ısı veya elektriğin sağlandığı kaynağa bağlıdır. Bu süreçte kullanılacak elektrik veya ısı enerjisi sadece yenilenebilir kaynaklardan veya nükleer enerjiden geliyorsa, karbon üretimi olmaz. Diğer enerji kaynakları kullanılarak yapılan hidrojen üretiminde karbon açığa çıkmaktadır.

Günümüzde hidrojen üretmek için en az maliyetli enerji kaynağı doğal gazdır (metan). Ancak bu yöntem aynı zamanda hidrojen üretimindeki CO₂ salımı bakımından en kirli yöntemdir. Doğalgaz kullanılarak üretim yapılan sürece KYD süreci dahil edilerek temiz hidrojen elde edilebilir. Ancak bunun getirdiği maliyet de az değildir. Temiz üretim süreçleri arasında en az maliyetli olan enerji kaynağı ise nükleer enerji olmaktadır. Nükleer enerji haricinde, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla yeşil hidrojenin üretim maliyeti mavi hidrojenin üretim maliyetinin yaklaşık 2-3 katıdır.

DEPOLAMA UYGULAMALARI

Hidrojen ekonomisi ve yaygınlığının seviyesini belirleyecek önemli aşamalardan birisi de hiç şüphesiz ucuz ve kolay depolanması aşaması olacaktır. Elbette ki depolanarak kullanımının yanında hidrojenin doğrudan kullanımı da mümkündür. Depolamadaki temel problemler yüksek basınç, düşük sıcaklık veya gerekli hacmin büyük olmasıdır. Hidrojen gazı düşük yoğunlukta olduğundan sürdürülebilir bir kullanım için büyük tank hacimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin aynı miktar enerji verebilmek için, hidrojen petrole göre çok daha fazla hacim kaplamaktadır. Bu sebeple bu hacmin azaltılması için sıvı halde depolanması veya gaz fazındayken yüksek basınçta tutulması önem arz etmektedir.



Sıvı halde depolanması durumunda çok düşük sıcaklık ve hidrojenin girişkenliği dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır. Bu durumda ihtiyaç duyulacak tankın ve operasyonun maliyeti önemli ölçüde artacaktır. Hidrojenin erime sıcaklığı $-252,9$ °C olduğu için depolama tesisinin sürekli bu sıcaklıkta tutulması toplam verimi azaltan bir etmen olmaktadır. Hidrojen çok düşük sıcaklıkta depolanmak yerine yüksek basınç altında da depolanabilir. Bu durumda da tank maliyeti ve güvenlik sistemleri gereksinimleri artacaktır. Çünkü gaz halinde hidrojeni depolamak için yaklaşık 700 bar basınç altında tutmak gerekmektedir. Daha düşük basınçlardaki kullanımı da elbette mümkündür, ancak depolama basıncı düştükçe hidrojenin enerji yoğunluğu da düşmektedir.

Her hâlükârda özellikle taşıtlardaki kullanımı için depolama hacmi ve güvenlik gereksinimleri oldukça önemli bir maliyet kalemi olacaktır. Hidrojenin küçük molekül boyutu nedeniyle, tankın sızdırma riskinin azaltılması gereklidir. Bunun yanında, hidrojenin depolandığı ortamlarda veya taşındığı sistemlerde patlama riski açısından da ek güvenlik sistemleri gereklidir. Koku ve renginin olmaması ve kaza sonuçlarının tahrip edici olması sebebiyle, sızıntı tespiti için sensörler ve uyarı/ikaz sistemlerinin kullanılması da oldukça önemlidir.

Yüksek sıcaklıkta gaz fazında veya düşük sıcaklıkta sıvı fazında depolanmasının yanında,

ısıtıldığında hidrojen salımı yapabilen bileşikler halinde de hidrojeni depolamak mümkündür. Yani hidrojen katı fazda da depolanabilmektedir. Ancak buradaki katı fazdan kasıt saf halde hidrojen değil, farklı elementler ile oluşturduğu bileşiğin katı formda olması olarak anlaşılmalıdır. Katı bileşik olarak hidrit yapıda hidrojenin depolanabilmesi için kullanılacak malzemenin hidrojen depolama kapasitesinin ağırlıkça %5,5 olması ve çalışma sıcaklığının da -45 ila 85 °C arasında olması gerekmektedir [10]. Depolama kapasitesi kadar salım kapasitesi oldukça önemlidir.

Hidrojeni hidrit yapıda depolayabilmek için birçok bileşik üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ancak hem depolama kapasitesi hem salım kapasitesi hem de çalışma sıcaklığının uygun olması kriterleri düşünüldüğünde hiçbirisi henüz hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanılabilmesini sağlayacak performansa ulaşmış değildir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, hidrojen depolama kapasitesi kütleli olarak %5,5'ten daha yüksek olan malzemeler vardır ancak bu malzemelerin hidrojen salım kapasitesi düşüktür veya istenilen salım performansını yüksek sıcaklıkta yakalayabilmektedir. Buna karşılık oda sıcaklığında da hidrojen salabilen hidrit yapılar vardır, ancak bu yapıların da depolama kapasiteleri kütleli olarak %5,5'in altındadır.



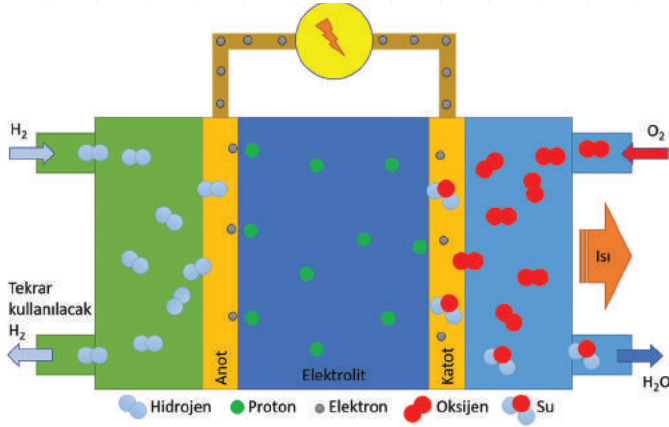
KULLANIM ALANLARI

Hidrojen yakıtının enerjiye dönüştürülmesinde bilinen en yaygın kullanım türü yakıt pilleridir. Yakıt pilleri, hidrojenin hava ile tepkimeye girerek elektrik, ısı ve saf su üretmesi mantığına dayalıdır ve elektroliz işleminin ters tepkimesi olarak çalışmaktadır. Yakıt pilinin anot tarafından hidrojen yakıtı, katot tarafından ise hava verilir. Hidrojen anot tarafında pozitif iyonuna (proton) ve elektrona ayrışır. Pozitif iyonlar elektrolitten geçerek katot ucuna ulaşır. Elektrolitten sadece pozitif yüklü iyonlar geçebildiği için anot ucunda kalan elektronlar tekrar pozitif yüklü iyonlarla birleşme eğilimine girerler. Elektronların bu hareketini sağlamak için harici bir devre kullanılır. Bu devre ile elektronlar katot tarafına akarlar. Harici devredeki bu elektron akışıyla elektrik üretilmiş olur. Katot tarafına geçen elektronlar burada pozitif iyonlar ve havadaki oksijen ile birleşerek saf su açığa çıkarılırlar. Yakıt pillerinin çalışma mekanizması Şekil 3'de gösterilmiştir.

Yakıt pillerinin performansları sistemin çalışma sıcaklığına ve kullanılan elektrolitin yapısına göre farklılık göstermektedir. Yakıt pilleri küçük veya orta ölçekte enerji üretimi için kullanılabilir. Taşınabilir elektronik cihazlardan evlerde elektrik ve ısı üretimine kadar

farklı uygulamaları mümkündür. Yakıt pillerinin taşınabilir elektronik cihazlarda kullanımının en büyük avantajlarından birisi şarj süresini ortadan kaldırmasıdır. Diğer taraftan hidrojenli yakıt pillerinin ulaşım araçlarında da kullanılması planlanmaktadır. Fosil yakıtlara alternatif olması bakımından gelecekte ulaşım sektöründe hidrojen yakıt pillerinin yaygın kullanımının olacağı öngörülmektedir. Otomobil, otobüs, tren, gemi, denizaltı, yolcu uçağı veya uzay araçlarında kullanımı için ön çalışmalar yapılmaktadır. Petrol yakıtlı sistemlere göre daha çevreci olması ve elektrikli araçlara göre de şarj/dolum süresinin kısa olması gibi nedenlerle gelecekte kullanımının yaygınlaşması hedeflenmektedir.

Hidrojen, yakıt pillerinde depolanmış halde kullanımının dışında doğrudan da kullanılabilir. Çalışma mantığı yine aynı mekanizmaya dayalı olacaktır. Depolanmış haldeki kullanımından farklı olarak, doğrudan kullanımda bir taraftan üretilirken diğer taraftan da tüketimi söz konusu olacaktır. Sürdürülebilir ve verimli bir mekanizma geliştirildiğinde depolama maliyeti ortadan kaldırılabilir. Ancak burada yine üretim tekniği ve oluşturduğu toplam kirlilik belirleyici olacaktır.



Şekil-3: Hidrojen yakıt pillerinin çalışma prensibi

DEĞERLENDİRME

Hidrojen her ne kadar temiz bir enerji taşıyıcısı olarak anılsa da hem üretiminde hem de depolanmasında karşı karşıya kaldığı birçok sorun bulunmaktadır. Öncelikle üretiminin temiz yolla olması oldukça önemlidir. Kullanımında atığı olmasa bile üretilirken doğayı kirlettiği zaman bütün avantajları kaybolacaktır. Temiz üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve daha ekonomik depolama yöntemlerinin bulunmasıyla,

hidrojen geleceğin yaygın kullanılan enerji yakıtı (taşıyıcısı) olmaya en büyük aday olarak gösterilecektir.

Elbette ki her teknolojik ürün gibi hidrojenin de bazı avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Kullanımında zararlı atığının olmaması, hareketli sistem ile çalışmadığı için (yakıt pilleri) bakım gereksiniminin

olmaması, enerji dönüşümünde kaybın az olması ve sessiz çalışma mekanizmasının olması en büyük avantajlarından. Aynı zamanda hidrojenin hem üretim hem de depolama teknikleri bakımında büyük ölçüde gelişim potansiyeli bulunmaktadır. Diğer taraftan dezavantajları da bulunmaktadır. Teknolojisinin henüz tam olgunlaşmamış olması, depolama maliyetinin yüksek olması ve henüz temiz üretiminde (yeşil veya mavi hidrojen) maliyetlerin ekonomik seviyede olmaması da bilindik dezavantajları arasındadır.

Üretim olarak incelendiğinde, yeşil hidrojen sınıfında en düşük maliyetli üretim nükleer enerji kullanılarak yapılan üretim olarak ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen yeşil hidrojenin maliyeti nükleer enerjiden üretilen yeşil hidrojene kıyasla 2-6 kat daha maliyetli olmaktadır. Mavi hidrojenin üretimindeki toplam maliyet hesabında KYKD sistemlerinin teknolojisi belirleyici olacaktır.

Ancak mavi hidrojenin ilk üretim bandı olan gri veya kahverengi hidrojenin üretim maliyetleri kıyaslandığında, en düşük maliyetli kaynak doğalgaz olmaktadır. Kömürden elde edilen hidrojenin maliyeti doğalgazdan üretilene göre 2-3 kat daha fazla olmaktadır. Her durumda da nükleer kaynaklı üretilen yeşil hidrojen tüm diğer sistemlerle kıyaslandığında en düşük maliyeti sunmasıyla ön plana çıkmaktadır.

Depolama açısından bakıldığında ise, gaz veya sıvı halde depolamanın maliyeti ve güvenlik gereklilikleri oldukça fazladır. Başka elementlerle bileşik oluşturularak katı formda depolanması için birçok çalışma yürütülmektedir. O kısımda da aşılması gereken problem hem yüksek depolama kapasitesi hem yüksek salım kapasitesi hem de düşük işletme sıcaklığına sahip uygun malzeme seçimi olmaktadır. Depolamadan doğrudan kullanımı için de yeterli teknolojik gelişim henüz sağlanmamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Godula-Jopek, W. Jehle ve J. Wellnitz, Hydrogen Storage Technologies: New Materials, Transport, and Infrastructure, Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.
- [2] R. Gupta, Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage (1st ed.), CRC Press. (<https://doi.org/10.1201/9781420045772>), 2008.
- [3] M. Balat, «Possible Methods for Hydrogen Production,» Energy Sources, Part A, cilt 31, pp. 39-50, 2009.
- [4] T. E. Lipman, «What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future Sources of Hydrogen Energy,» Institute of Transportation Studies-University of California, Davis, CA, 2004.
- [5] «webservice,» 2014. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>. [Erişildi: 2021].
- [6] «webservice,» 2021. [Çevrimiçi]. Available: <https://whatisnuclear.com/energy-density.html>. [Erişildi: 2021].
- [7] «The future for green hydrogen,» Wood Mackenzie, 25 October 2019. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/>. [Erişildi: 10 March 2021].
- [8] İ. Dinçer ve C. Zamfirescu, Sustainable Hydrogen Production, Elsevier, 2016.
- [9] J. Friedmann, Z. Fan ve K. Tang, «Low-Carbon Heat Solutions for Heavy Industry: Sources, Options and Cost Today,» Columbia University, Center on Global Energy Policy, New York, 2019.
- [10] US-DOE, «Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles,» US Department of Energy-USDRIVE, 2017.



HİDROJEN



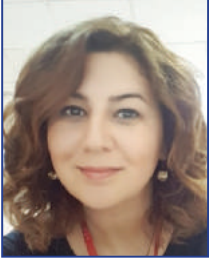
HİDROJEN DEĞER ZİNCİRİ ÜZERİNE MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ ENERJİ ENSTİTÜSÜ ÇALIŞMALARI



Doç. Dr. M. Suha Yazıcı
suha.yazici@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



Dr. Emin Okumuş
emin.okumus@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



Dr. Betül Erdör Türk
betul.turk@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



Dr. Çiğdem Karadağ
cigdem.karadag@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



Doç. Dr. F. Gül Boyacı San
fatmagul.boyaci@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



Dr. Hakan Karataş
hakan.karatas@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



Dr. Yeliz Durak Çetin
yeliz.durak@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü



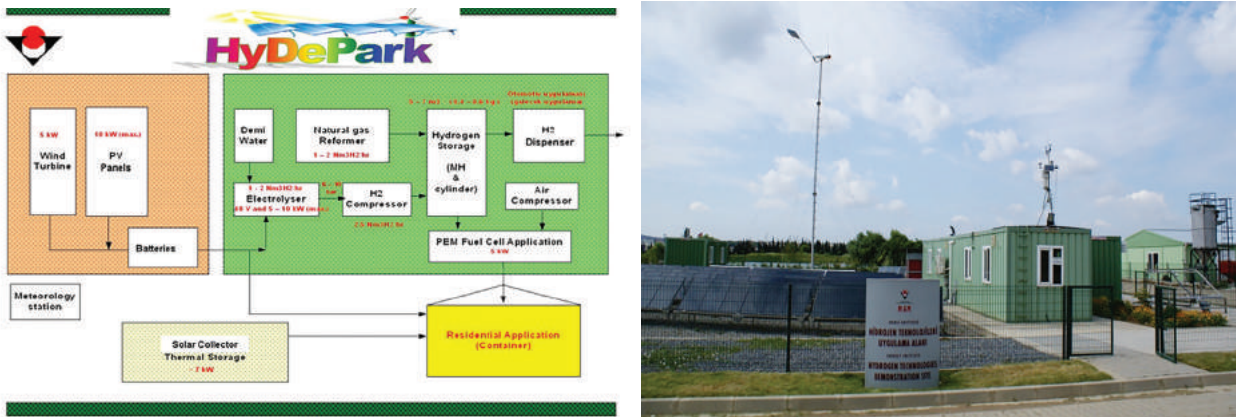
Doç. Dr. Fehmi Akgün
fehmi.alkun@tubitak.gov.tr
TÜBİTAK-MAM
Enerji Enstitüsü

21. yüzyılda çözülmesi gereken en önemli problemlerden biri artan küresel ısınma problemine karşın hızla artan enerji ve hammadde ihtiyacıdır. Bu sebeple hem fosil yakıtlardan kaynaklanan tehditlerin ortadan kaldırılması hem de fosil yakıtların tükenmelerine karşı alınacak bir önlem olması sebebiyle alternatif enerji kaynaklarının katma değeri artırılan ürünlere dönüştürülmesi büyük önem arz etmektedir. İklim değişikliğinin getirdiği etkiler daha fazla hissedilmeye başladıkça emisyonların (CO_2 , SO_x , NO_x vb) azaltılmasında alternatif enerji kaynakları ve proseslerin kullanımı üzerine yapılan araştırmalar artmıştır. Avrupa Komisyonunun sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar %55 azaltarak 2050 yılında nötral olma kararlılığı ile opsiyonlar arasında yer alan hidrojen üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Hidrojenin doğada serbest olarak bulunmuyor olması üretim, depolama ve kullanım alanlarının paralel olarak gelişmesine imkân sunmaktadır.

Ülkemizde hidrojen ve yakıt pilleri alanında TUBITAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) Enerji Enstitüsünde yapılan çalışmalar, Türkiye'yi dünya ile rekabetçi kılmaya amacı taşımaktadır.

HİDROJEN ÜRETİM ÇALIŞMALARI

Hidrojenin doğada serbest olarak bulunmaması, yapısında hidrojen içeren bileşenlerin parçalanması ile açığa çıkan hidrojeni kullanmayı zorunlu kılmaktadır. Alternatiflerine göre %50 den fazla ucuz olması sebebiyle, dünyada kullanılan hidrojenin %95 'ten fazlası doğal gazın (CH_4) parçalanması ile elde edilmektedir. CO_2 yakalama olmadığı durumlarda doğal gazdan hidrojen eldesi, emisyonları azaltma hedefine sınırlı katkı sağlamaktadır. Bu sebeple, Enerji Enstitüsünde uygulanan yaklaşım, üretilen hidrojenin doğrudan ısı ve elektrik üretimi için yakıt piline beslenmesi ile verimlilikleri % 90'ları geçen mikro kojenerasyon sisteminin işletilmesinde kullanımdır. Enerji Enstitüsü bünyesinde gerçekleştirilen Hydepark projesi ile konvansiyonel ve yenilenebilir enerji destekli hidrojen üretim teknolojileri birlikte değerlendirilmiş, doğal gazdan hidrojen üretimi reaktör sistemleri ve yardımcı alt üniteleri, PEM tipi yakıt pili sistemi (2.4 kW_e), yenilenebilir enerji ile hidrojen üretimi için PV panelleri (145 adet, 12 kW_e) ve kontrol üniteleri, rüzgâr türbini (5 kW_e) ve elektroliz ünitesi (1.5 Nm³H₂/h), hidrojen kompresörü (1.1 Nm³H₂/h) ve hidrojen depolama ünitelerinin (100 bar) birlikte entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. (Şekil 1).



Şekil 1. Hydepark projesi demostrasyon teknolojileri

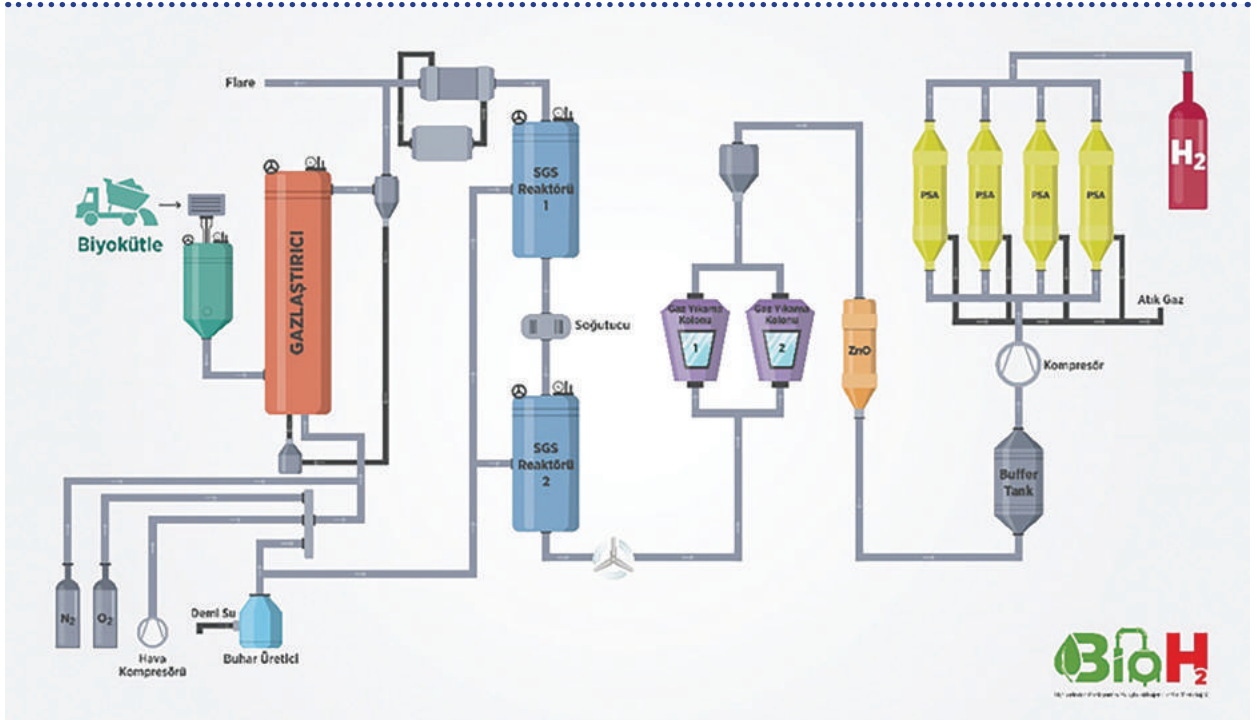
Umut vaat eden, hidrojenin üretim yöntemlerinden birisi de yenilenebilir kaynak kabul edilen biyokütleden hidrojen üretimidir. Biyokütle, önemli ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve lignoselülozik biyokütle doğada bol miktarda bulunmaktadır. Lignoselülozik biyokütle kaynakları orman, tarım ve meyve atıkları olmak üzere üç sınıfta toplanabilir. Bitkisel biyokütle kaynakları yetişirken, güneş enerjisini molekülleri arasındaki bağlarda muhafaza etmektedir. Bu enerji daha sonra; ısı, güç veya katı, sıvı, gaz yakıtlara dönüştürülerek sayısız enerji uygulaması için kullanılabilir. Biyokütle kaynakları, yenilenebilir olması ve yetişirken atmosferik CO_2 'i tüketmesi sebebiyle fosil yakıtlar ile karşılaştırıldığında CO_2 etkisi minimumdur. Biyokütleden hidrojen üretimi için alternatif olarak termokimyasal (piroliz ve

gazlaştırma) ve biyolojik (biyofotoliz, fermentasyon) prosesler uygulanabilmektedir [1]. Gazlaştırma teknolojisi, düşük kaliteli karbonlu hammaddeleri Fischer-Tropsch sıvıları, metanol, sentetik doğal gaz ve hidrojen gibi katma değeri yüksek ürünlere dönüştürmek için kullanılan teknolojilerden biridir. Bunun şematize edilmiş hali Şekil 2’de görülmektedir. Buna karşın geleneksel yakma teknolojileri ile sadece ısı ve elektrik elde edilebilmekte, ortama bol miktarda CO₂ ile birlikte çeşitli emisyonların salınımı söz konusu olmaktadır. Kömür ve petrol ürünlerinin gazlaştırılması yıllar önce ticarileşme safhasına gelmiş olmasına rağmen biyokütle gazlaştırma teknolojileri pazara girmek için yoğun çalışmaların sürdüğü, ülkemizde halen gelişmekte olan bir teknolojidir.



Şekil 2. Gazlaştırma Uygulamaları

H₂ elde etmek mümkündür. Sentez gazı üretimi esnasında yakmaya kıyasla daha az CO₂ üretilmekte, açığa çıkan CO₂'in sera gazı emisyonu etkisini azaltmak üzere çeşitli yöntemler ile tutularak değerlendirilmektedir. Örneğin proje kapsamında sentez gazından H₂ saflaştırma için kullanılan Basınç Salımlı Adsorpsiyon (PSA) ünitesinde CO₂'i tutmak mümkün olmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. BioH₂ projesinin akım şeması

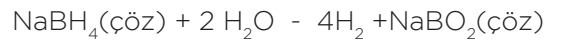
Biyokütlenin gazlaştırılması ile açığa çıkan en önemli sentez gazı kirleticisi katrandır. Katran, biyokütle hammaddelerinin yüksek uçucu madde içeriği sebebiyle oluşmaktadır. Proje kapsamında katran, gazlaştırıcı reaktör içine yerleştirilen katalitik mum filtreler ile giderilmektedir. Bu sayede katranın katalitik olarak parçalanmasıyla, katranın kirletici etkisi ortadan kalkmakta, sentez gazı içeriği artmaktadır. Gazlaştırıcı içine konumlandırılan mum filtreler ile partikül giderimi de sağlanmaktadır. Katran ve partikülünden arındırılmış olan sentez gazı, H₂/CO oranının artırılması için kükürde dayanıklı su-gaz dönüşüm reaksiyonu katalizörü ile yüklü reaktöre (Sur Gas Shift-SGS) girmektedir. SGS reaktörlerinin peşi sıra kullanılan gaz yıkama kolonları ile sentez gazı içeriğinde bulunan bir diğer kirletici olan H₂S'in giderilmesi sağlanmaktadır. Çinko oksit reaktörü ile son kükürt giderimi yapılan gaz, kirleticilerinden arınmış ve H₂/CO oranı ayarlanmış şekilde H₂'nin ayrılacağı aşama olan Basınç Salımlı Adsorpsiyon (PSA) sistemine girmeden önce sentez gazının basınçlandırılması amacıyla sentez gazı kompresörüne (booster) beslenmektedir. PSA sistemini oluşturan kolonlarda, H₂ dışındaki sentez gazı bileşenlerini (CO₂, CO, CH₄, N₂, H₂O) adsorplamaya yarayan adsorbent malzemeler (aktif karbon, Zeolit 13X, Zeolit 5A) yer almaktadır. Proje kapsamında geliştirilen pilot tesis sahası Şekil 4'te verilmiştir. Proje kapsamında; toplam 1 Doktora sonrası, 3 Doktora, 9 Yüksek Lisans öğrencisi Bursiyer olarak istihdam edilmiş, 15 adet SCI makale, 3 adet Ulusal Makale yayınlanmış ve çeşitli konferanslarda 14 adet sözlü, 1 adet poster sunum gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. BioH₂ projesi pilot tesis sahasından bir görüntü

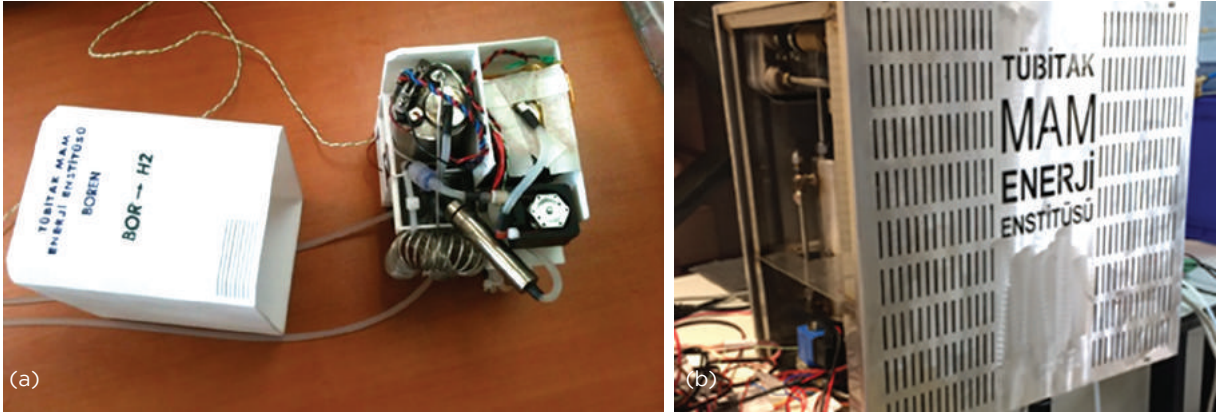
Söz konusu SCI makalelerden bir kısmı Kaynaklar kısmında verilmiştir [2-6]. Yapısında kimyasal olarak hidrojen bulduran bileşiklerin parçalanması ile de hidrojen üretilebilmektedir. Basınçlı kompozit tanklarda depolanan sıkıştırılmış hidrojen veya sıvı hidrojen, 50 kW üzeri araç uygulamaları için uygun olmakla birlikte taşınabilir cihazlar gibi daha düşük enerji ihtiyacı olan (<500 W) uygulamalarda yeterli depolama alanı olmaması nedeniyle uygun değildir. Hidrojen kaynağı olarak sodyum borhidürün (NaBH₄) kullanılması hidrojen depolamanın tüm risk ve zorlukları büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Enerji Enstitüsü, Türkiye'de bulunan bor kaynaklarının kullanım alanları arasında bulunan NABH₄'ün yapısındaki hidrojenin kullanımı üzerine çalışmalar yapmaktadır.

Sodyum borhidürden hidrojen üretim sisteminde sodyum borhidür su ile reaksiyona girerek hidrojen ve sodyum metabiorata dönüşür [7].



NABH₄ ün katalitik ortamda parçalanması reaksiyonunu esas alan, 200W'lık ve 5 kW'lık yakıt pillerini besleyecek şekilde tasarlanan 5 L/dk ve 100 L/dk hidrojen üretim sistemleri Şekil 5'te verilmiştir.

Sistemler, kullanılan katalizörün oldukça kararlı, yüksek performanslı ve düşük maliyetli olması, tekrar tekrar kullanılabilmesi, yakıt beslemesinin durdurulması durumunda ne atık tankında ne de reaktörde hidrojen üretiminin olmaması, sistemin otonom ve gömülü bir şekilde proses kontrolünün sağlanması, gerektiğinde hidrojen üretimine tekrar başlaması gibi avantajlar sunmaktadır.



Şekil 5. Sodyum borhidrürden hidrojen üretim sistemleri (a) 5L/dak, (b) 100L/dak

PROTOTİP ÇALIŞMALARİ

Otomobil, insansız hava aracı (İHA) gibi elektrikli araç platformlarının itki sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarının başında lityum tabanlı (li-iyon, li-polimer) bataryalar gelmektedir. Lityum iyon bataryaların sahip olduğu güç yoğunluğu seviyesi 500-2.800 W/kg aralığında iken, enerji yoğunluğu değeri 75-200 Wh/kg arasındadır ve bu değer aralığı tahrik sistemlerinin uzun süreli kullanımını sınırlamaktadır [8-10]. Uzun bir seyir süresinin sadece lityum tabanlı batarya ile sağlanması için ağırlıkça yüksek bir enerji depolama birimi gerekeceği açıktır ve bu durum araçların operasyonel maliyetlerini arttıracak bir unsurdur. Yakıt pilleri ise yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilmeleri, yakıt beslediği sürece kesintisiz ve sessiz çalışabilmeleri, yük ihtiyaçları doğrultusunda tasarlanabilme özellikleri nedeni ile elektrikli platformlar açısından iyi bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadırlar. Bu kapsamda dünyadaki Ar-Ge çalışmalarına paralel olarak TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsünde elektrikli araç ve İHA uygulamaları prototip olarak üretilmiş ve performans testleri gerçekleştirilmiştir.

Sabit Kanatlı İHA Uygulaması: Son yıllarda, pek çok araştırma kurumu ve teknoloji şirketi İHA uygulamalarında; yakıt pillerinin çevre dostu olması ve verimli bir enerji çevrim yapısına sahip olması gibi özelliklerini vurgula-

arak, farklı boyut ve güç kapasitelerinde yakıt pili tabanlı güç kaynakları ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmektedirler [11-12]. Hidrojen kaynağı olarak basınçlı gaz tankları, kimyasal hidrürler ve düşük basınçlı kriyojenik tanklar kullanılırken, yakıt pili olarak büyük çoğunlukla PEM yakıt pili kullanılmaktadır [13].

TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü Yakıt Pili Araştırma Grubu bu kapsamda 2013-2016 yılları arasında Ulusal Bor Enstitüsü (BOREN) tarafından desteklenen “İnsansız Hava Aracı İçin Bor Temelli Hidrojen ve Yakıt Pili Sistemi Geliştirilmesi” projesini yürütmüş ve projenin sonunda 4 kg ağırlık kaldırma kapasiteli, 2,5 metre kanat açıklığına sahip, sabit kanatlı, elektrik motorlu mini tip bir İHA'nın, sadece batarya kullanılarak gerçekleştirilen uçuş süresini uzatmaya yönelik olarak; 200 W PEM yakıt pili sistemi; Yakıt pilinin ihtiyacı olan hidrojeni uçuş esnasında kontrollü olarak üretebilen hidrojen üretim sistemi ve güç yönetim ve proses kontrol sistemi bileşenleri geliştirilmiş ve uçuş performans testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 6). İlgili testler sonucunda İHA platformu, aynı uçuş şartları ve aynı kalkış ağırlığı koşullarında konvansiyonel li-po batarya ile 25 dakikalık uçuş süresine sahipken, yakıt pilli sistem entegre edildiğinde bu süre 50 dakikaya uzamaktadır [14-15].



Şekil 6. TÜBİTAK MAM İHA platformunun yer ve uçuş görüntüleri

Menzil Artırılmış Araç: Sodyum borhidrürden üretilen hidrojenin ulaşım uygulamalarında kullanılabilirliğinin gösterimi için 12kW elektrik motoruna sahip konsept araç geliştirilmiştir (Şekil 7a). Araç içerisinde üretilen hidrojenin yakıt piline beslenmesi ile üretilen elektrik bataryaları şarj ederek aracın 80 km/saat hıza kadar kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu projede edinilen tecrübeler ile 36kWsaat'lik batarya içeren elektrikli bir SUV tipi araç, 100L/dak hidrojen üretim kapasitesine sahip sistem ve 5 kW kapasiteli yakıt pili ile entegre edilerek 20kWsaat'lik ek enerji ile menzile artırma konsepti test edilmiştir (Şekil 7b). Seyir esnasında sodyum borhidrürden H₂ üretim konsepti on-off şartlarında test edilmiş, araç şasi dinamometre testleri yol profili göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu proje ile hidrojen değer zincirinin hidrojen üretim (sodyum borhidrürden), depolama (sürekli besleme), elektrik üretim (yakıt pili sistemi), araç entegrasyonu ve test aşamaları gerçekleştirilmiştir.

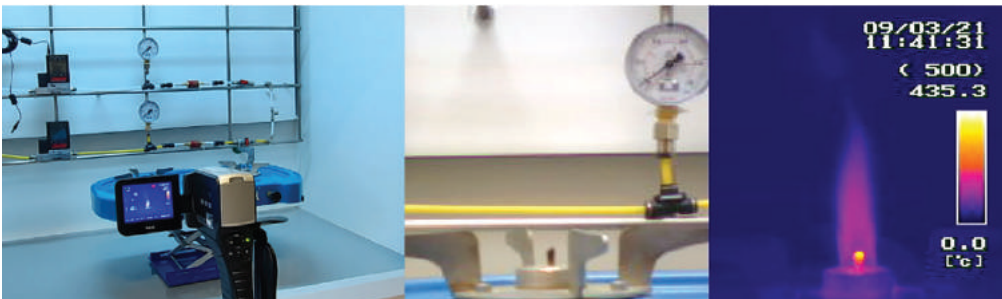
Mikro Kojenerasyon: Gelişmiş ülkeler, elektrik ihtiyaçlarının %11'ini, ısı ihtiyaçlarının ise %14'ünü kojenerasyon üzerinden elde etmektedir. Yakıt pilli mikro-kojenerasyon sistemleri üzerinde devam eden Ar-Ge çalışmaları sonucunda birçok ülkede ürünler kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerde verimler %90'ları geçerken, konutun elektrik ve ısınma maliyetleri %20-40 oranında azalmakta, emisyonlar %30'lara kadar gerilemektedir. Özellikle Japonya'da yüzbinlerce yakıt pilli kojenerasyon ünitesi (yaklaşık 0.7kWe ve 2kWth) evlerde kullanılmaya başlanmıştır. Avrupa da FP7 ve H2020 kapsamında binlerce ünite evlere kurulmuştur. Ülkemizde bu konuda ilk hayata geçirilen proje, müşteri kurumun Elektrik İşleri Etüt İdaresi olduğu "Yakıt Pili Mikro Kojenerasyon Sistemi" projesidir. TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projelerini Destekleme Programı (1007) kapsamında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü ve proje ortakları ile 2006-2010 yılları arasında tamamlanmıştır. Projede, evsel uygulamalar için doğal gazdan hidrojenin 5 kWe ve 30 kWt güç ölçeğinde bir mikro



Şekil 7. Sodyum borhidrürden hidrojen üretim sistemlerinin kullanıldığı yakıt pilli (a) Bor Mobil ve (b) SUV tipi araç.

kojenerasyon sistemi prototipi geliştirilmiştir. Proje sonrası uygulama planı çerçevesinde TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü bünyesinde "Yakıt Pili Mikrokojenerasyon Sistemi Saha Uygulaması Projesi" yürütülmektedir. Proje ile amaçlanan, 2 kWe PEM yakıt pili teknolojisine dayalı bir mikrokojenerasyon sistemi için katma değeri yüksek, ticarileşebilir bir prototip üretimi ve saha testlerinin gerçekleştirilmesidir.

Hidrojen Yakılması: Karbondioksit emisyonlarını azaltmak amacıyla sürdürülebilir yeşil yerleşim alanlarında sıfır emisyon/sıfır kirlilik ve pozitif enerjili binalara yönelik araştırmalarda yapılmaktadır. Bu kapsamda Avrupa Birliği tarafından da enerji ve kaynak verimli binalar konusunda araştırmalar desteklenmektedir. Binalarda hidrojenin doğrudan kullanımı kapsamında enstitümüzde saf hidrojen kullanan hidrojen cihazlar (ocak, sofben, kombi, kazan, mikrokojenerasyon vb.) üzerine deneyler yapılmaktadır. Şekil 8, %100 hidrojen yakılması sırasında termal kamera ile alev karakterizasyonu görüntülerini göstermektedir. Ülkemizdeki doğal gaz kullanan cihazların saf hidrojen kullanılabilir hale getirilebilmeleri için ArGe çalışmalarımız devam etmektedir.



Şekil 8. Termal kamera ile hidrojen ocağından alınan eşzamanlı görüntüler

SONUÇ

Dünyadaki düşük ve sıfır emisyon teknolojileri öne çıkaran kaygılar Türkiye'yi de etkilemekte, sayıdan ulaşım hidrojenin kullanımına yönelik ilgi oluşmaktadır. Ülkemiz konvansiyonel yakıtlar açısından zengin olmasa da, güneş ve rüzgar potansiyeli ile önümüzdeki yeşil dönüşüm sürecinde avantajlı bir konumda olacaktır. Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi ile, ulaşım ve sanayide düşük emisyon bir ülke konumuna gelmek mümkündür. Türkiye'nin öncelikli olarak endüstriyel proseslerde (çelik, çimento, vb.) hidrojenle tanışacağı ardından ulaşım sektöründe uygulamalar görüleceği öngörülmektedir. TUBITAK-MAM Enerji Enstitüsü bu amaç doğrultusunda teknolojik projeler ile çözümler üretmekte ve bunların ürün olarak toplumsal faydaya dönüşmesi için projeler yapmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ni M., Leung D.Y.C., Leung M.K.H., Sumathy K., An overview of hydrogen production from Biomass, *Fuel Processing Technology*, 2006, 87, 461-472.
- [2] H. Karataş, F. Akgün, Experimental results of gasification of walnut shell and pistachio shell in a bubbling fluidized bed gasifier under air and steam atmospheres, *Fuel*, 2018, February, Vol. 214, pp. 285-292.
- [3] A.Z. Turan, Y. Çetin, Ö. Tuna, A. Sarıoğlan, Development of calcium silicate-based catalytic filters for biomass fuel gas reforming, *International Journal of Energy Research*, 2019, March, Vol. 43, pp. 1217-1231.
- [4] A. Ersöz, Y. Durak Çetin, A. Sarıoğlan, A.Z. Turan, M.S. Mert, F. Yüksel, H.E. Figen, N.Ö. Güldal, M. Karaismailoğlu, S.Z. Baykara Investigation of a novel & integrated simulation model for hydrogen production from lingocellulosic biomass *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, January, Vol. 43 (2), pp. 1081-1093.
- [5] M.C. Acar, Y.E. Böke Simulation of biomass gasification in a BFBG using chemical equilibrium model and restricted chemical equilibrium method *Biomass and Bioenergy*, 2019, Vol. 125, pp.131-138.
- [6] Ö.Tuna, E.Bilgin Şimşek, A. Sarıoğlan, Y.Durak Çetin, Influence of the process conditions on the kinetic behaviour of zinc orthotitanate for syngas clean-up *Biomass and Bioenergy*, 2019, September, Vol. 128, 105326.
- [7] Hani Nasser Abdelhamid, A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 1, 2021, p 726-765
- [8] J.M. Krawczyk, A.M. Mazur, T. SA.W. Stoklosa, "Fuel cells as alternative power for unmanned aircraft systems-current situation and development trends," *Transactions of Institute of Aviation*, vol. 4, pp. 49-62, 2014.
- [9] S. Goriparti, E. Miele, F. D. Angelis, E. D. Fabrizio, R. P. Zaccaria, and C. Capiglia, "Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 257, pp. 421-443, 2014.
- [10] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009
- [11] N. Lapeña-Rey, J. Blanco, E. Ferreyra, J. Lemus, S. Pereira, and E. Serrot, "A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 10, pp. 6926-6940, 2017.
- [12] J. Renau, F. Sánchez, A. Lozano, J. Barroso, and F. Barreras, "Analysis of the performance of a passive hybrid powerplant to power a lightweight unmanned aerial vehicle for a high altitude mission," *Journal of Power Sources*, vol. 356, pp. 124-132, 2017.
- [13] T. H. Bradley, B. A. Moffitt, T. F. Fuller, D. N. Mavris, and D. E. Parekh, "Comparison of Design Methods for Fuel-Cell-Powered Unmanned Aerial Vehicles," *Journal of Aircraft*, vol. 46, no. 6, pp. 1945-1956, 2009.
- [14] E Okumus, FGB San, O Okur, BE Turk, E Cengelci vd.,Development of boron-based hydrogen and fuel cell system for small unmanned aerial vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017
- [15] B. Erdör Türk, M. H. Sarul, E. Çengelci, Ç. İyigün Karadağ, F. G. Boyacı San, M. Kılıç, E. Okumuş, and S. Yazıcı, "Integrated Process Control-Power Management System Design and Flight Performance Tests for Fuel Cell Powered Mini-Unmanned Aerial Vehicle," *Energy Technology*, vol. 9, no. 3, p. 2000879, 2021.



A Typical Port



53
CRANES



200
FORKLIFTS



107
CONTAINER
HANDLERS



308
STRADDLE
CARRIERS



471
YARD TRACTORS

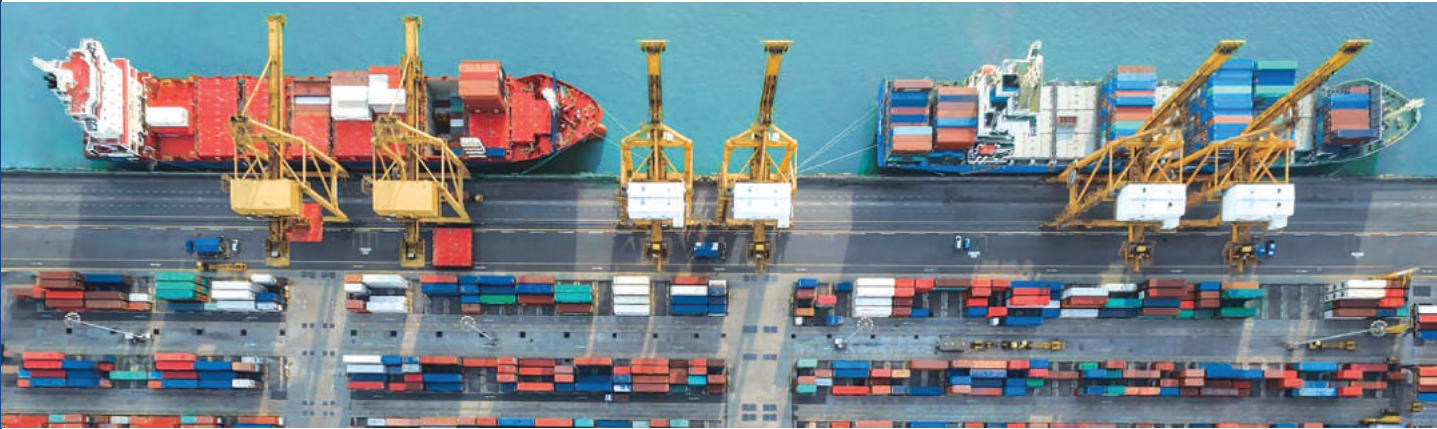
A major port like this emits over

110,000

METRIC TONS PER YEAR OF CARBON DIOXIDE

HYDROGEN FUEL CELLS REDUCE CO₂ EMISSIONS ELECTRIFYING COMMERCIAL VEHICLES WITH HYDROGEN FUEL CELLS

It is an excerpt from the link: <https://www.mathworks.com/>



Shipping and seaport infrastructure are significant sources of greenhouse gas (GHG) emissions. According to the International Maritime Organization, maritime transport creates over 900 million tons of CO₂ annually. Global economies rely on shipping to get their products to the consumer, with up to 90% of all foreign goods flowing through ports on container ships, but the toll on the environment is substantial. And those living near busy seaports are exposed to dangerous levels of air pollution caused by emissions from diesel engines on the commercial vehicles at the port.

For example, large industrial vehicles called container handlers load and unload the containers from the container ships. Each container handler emits up to 144 tons of CO₂ per year, and a large port can have hundreds of these machines on site. Swapping the diesel engine in just one container handler for a green alternative would have the same effect as removing 32 gas-powered passenger cars from our roads.

From passenger cars to long-haul trucks, locomotives, and heavy equipment, internal combustion engines (ICEs) are being replaced with greener alternatives. Battery-powered electric vehicles have captured much of the spotlight, with an increasing number of options available to consumers in both car models and charging locations. But at ports, the ICEs are diesel engines in heavy-duty industrial vehicles such as yard trucks, forklifts, and container handlers. Batteries and the required charging infrastructure don't work for many of these operations.

That's where fuel cells can help.

Enabling Electrification

Fuel cells are well-suited for locations with heavy equipment that must run for long shifts with minimal downtime for refueling. Refilling a hydrogen fuel cell takes about the same amount of time as it does to fill a similar-sized gas tank, whereas recharging a battery for heavy-duty e-vehicles would take hours. Fuel cells offer the power density and range needed for the vehicle to make it through an 8-hour shift. One company focusing on fuel cell technology for commercial vehicles is Nuvera.

“Fuel cells are better than batteries whenever long range is required, or when battery charging takes too long—making them good for boats, planes, trucks, buses, and emergency response vehicles,” says Gus Block, a founding employee and director of Nuvera Fuel Cells.

“They’re also needed when batteries are too large to fit on a vehicle or so heavy that they’d compromise payload,” says Block. “For example, the battery required for the electric container handler would be the size of a small elephant.”



One of Nuvera's E-Series Fuel Cell Engines. Image credit: Nuvera Fuel Cells.

An Electric Alternative That Doesn't Require Recharging

A fuel cell produces no exhaust other than heat and water. With no moving parts, its design is simple in principle: a membrane is sandwiched between two electrodes. When the hydrogen fuel meets the anode, it is split into a proton and an electron. The proton passes through the membrane to the cathode, where it meets oxygen. The electron takes a longer route between electrodes, traveling through an electrical circuit. The flow of electrons creates the power for the motor. At the cathode, the protons, electrons, and oxygen combine to form water.

Using modeling and real-time simulation enables Nuvera's engineers to iterate on their design quickly and allows for experimentation without putting a real engine at risk.

The science is simple, but perfecting the recipe for a high-performance power source is hard. Many factors govern the multiple reactions inside a fuel cell, and a software control system must account for them all to squeeze the most power and efficiency out of the device. The control system makes constant corrections based on feedback.

“One of the greatest design challenges is maintaining proper hydration to the cells,” says Pierre-François Quet, Nuvera’s chief engineer. “Not enough water and protons don’t pass through; too much and the cells flood.”

Their system manages hydration by changing the coolant temperature and by manipulating airflow to increase or decrease evaporation. To design the software that controls their fuel cell engine—which typically includes hundreds of fuel cells stacked together with coolant flowing between them, plus a coolant pump and an air compressor—Nuvera uses MATLAB® and Simulink®. A plant model of the fuel cell engine—which comprises equations governing the electrical and chemical reactions and the temperatures



Hyster® top-loading container handler. Image credit: Hyster-Yale Group

and pressures of water and gases and coolant—is also implemented in Simulink, Quet says. With this simulation in place, Nuvera writes algorithms to refine things like coolant flow in order to eke out the best performance. Once the algorithm is finalized, Simulink translates it into code that will run on a processor embedded in the actual fuel cell engine.

The control algorithms also account for many operating conditions. In simulation, Nuvera tests the system in low and high ambient temperatures, and in low- and high-humidity environments.

In order to experiment with their algorithms in a more realistic setting, Nuvera does hardware-in-the-loop testing: They load their engine model onto a custom computer made by Speedgoat that is tailored to have the same inputs and outputs as the physical engine, and can simulate its operation in real time. The same embedded computer that runs the fuel cell engine is connected to the Speedgoat box and is programmed from C code generated from Simulink.

This setup adds rigor while enabling Nuvera’s engineers to iterate on their design quickly. It also allows for experimentation without putting a real engine at risk.

A Different Kind of Hybrid

Virtually all fuel cell vehicles are electrically hybridized, powered by both fuel cells and batteries. In some cases, fuel cells provide a trickle charge to keep the battery charged, while in other configurations both the fuel cell and battery power the motors through an electrical bus. Batteries are also employed to accept a vehicle’s regenerated power, such as when a forklift brakes or lowers a load.

Quet’s team first had to build a model of the lithium-ion battery in Simulink, based on data provided by the manufacturer and collected in-house. They also wrote algorithms that could estimate the battery’s state of charge based on things they could measure—its voltage and current. They then used Simulink to program the control algorithm. The system needs to maintain an ideal level of battery charge, so there’s always enough energy for peak load and enough capacity to reabsorb energy. The Nuvera team also designed the optimal size for various system components by testing the algorithms in a range of simulated forklift and load scenarios.

Best of Both Worlds

Fuel cells share strengths with both batteries and ICEs. Like batteries, they’re scalable and quiet, and they don’t produce harmful emissions. But fuel cell vehicles also offer the long range and quick refueling time found in gasoline and diesel-powered ICE vehicles. Hydrogen can be stored at pressure in a fuel tank that enables it to contain much more energy than a battery of the same dimensions, so instead of stopping to recharge or swap out a battery, you can operate the vehicle for as long or longer than a battery-powered equivalent and spend a few minutes filling the fuel tank.

One use of Nuvera’s fuel cell engines is in forklifts made by their parent company, Hyster-Yale Group. Nuvera has also integrated two of its E-45 fuel cell engines into a Hyster® container handler that will be used at the Port of Los Angeles, similar to the model shown in the photograph. By replacing the diesel engine with a fuel cell-powered electric drivetrain in this vehicle alone, 128 metric tons of CO2 can be avoided annually. Diesel engines in commercial and industrial vehicles are a source of carbon emissions and criteria pollutants that diminish air quality. Nuvera works with other manufacturers to use fuel cells to electrify buses, trains, and specialty vehicles to help reduce their emissions significantly.



Hyster® fuel cell-powered forklift. Image credit: Hyster-Yale Group

Fuel cells are scalable and quiet, don't produce harmful emissions, and offer the long range and the short downtime found in gasoline and diesel-powered ICE vehicles.



**LEARN
MORE**



Prof. Dr. Serhat YEŞİLYURT

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

SABANCI ÜNİVERSİTESİ

SABANCI ÜNİVERSİTESİ

PROF. DR. SERHAT YEŞİLYURT

İLE ÖZEL RÖPORTAJ

◆ **ARGE DERGİSİ : Hidrojen teknolojisinin gelişiminin dünya ve çevre açısından önemi nedir?**

Prof. Dr. Serhat YEŞİLYURT : Küresel sıcaklık artışının bu yüzyıl içinde durdurulması ve endüstriyel devrim öncesine göre 1.5 °C'ın üstüne çıkmasını önlemek adına Paris Anlaşması kapsamında Avustralya, Japonya, Güney Kore, A.B. başta olmak üzere pek çok ülke ulusal hidrojen stratejilerini yayınlamışlardır. Özellikle Avrupa Komisyonu'nun kabul edip uygulamaya koyduğu Yeşil Mutabakat kapsamında, 2030'a kadar karbondioksit salınımının yarıya indirilmesi ve 2050'ye kadar da sıfırlanması için yeni bir ekonomik model ile hem karbon vergilendirmesi hem de karbon salınımını azaltan önlemlerin mükafatlandırılması konusunda çalışmalar yeşil hidrojeni ön plana çıkarmaktadır.

Endüstriyel kullanımının yanı sıra, enerji depolamada da kullanılabilir olan hidrojen, birim kütle başına en çok kimyasal enerji depolama imkânı veren maddedir. Benzin ve diğer fosil yakıtlara göre 3 kat daha fazla enerji içermektedir. Hidrojen doğada serbest olarak petrol ve doğal gaz yataklarında bulunmaktadır ancak bu yataklardan çıkarılıp depolanması ve dağıtılması yaygın değildir. Endüstride yaygın olarak kullanılan hidrojen gerektiğinde doğal gazdan üretilmektedir. Bu da hidrojen üretimi sonucu karbondioksit açığa çıkması anlamına gelmektedir. Öte yandan suda bulunan hidrojen elektrik enerjisi kullanılarak elektroliz yoluyla da elde edilebilir. Gerekli elektrik enerjisi temiz enerji kaynaklarından geldiğinde üretilen hidrojene de yeşil hidrojen adı verilmektedir.

Rüzgar ve güneş enerjisi sistemleri başta olmak üzere, jeotermal ya da henüz pek kullanılmayan dalga enerjisi gibi temiz enerji kaynakları talebe göre değil de rüzgar estiğinde ya da güneş olduğunda doğal olaylara bağlı olarak üretilebilmektedir. Bu nedenle kimi zaman talebin altında, kimi zaman da üstünde üretim olabilmektedir. Gelecekte de yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşmasıyla arz ve talep arasındaki farkın daha da belirgin olması beklenmektedir. Arz fazlası olduğunda enerjinin hidrojenle depolanması ve daha sonra yeterli rüzgâr esmediğinde ya da güneş olmadığında da kullanımı ile kömür ve doğal gazın payının iyice azaltılması hidrojenin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

◆ **A.D. : Sürdürülebilir enerji olarak hidrojenle faydalanabilir miyiz?**

S.Y. : Hidrojenle depolanan enerji yakıt hücreleri aracılığıyla %50'nin üstü bir verimle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir ya da diğer fosil yakıtlar gibi yakılması sonucu bu enerji ısı olarak açığa çıkartılabilir. Hidrojenle üretilen enerjinin açığa çıkması sonucunda ise ortaya yalnızca su buharı çıkmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıkta kullanılabildiği için fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan zararlı azot oksitlerin (NOx) açığa çıkması da söz konusu değildir. Bu nedenle temiz yakıt olarak kullanılabilir. Ancak yoğunluğu çok düşük olduğu için basınç altında ya da çok düşük sıcaklıklarda sıvılaştırılarak depolanması gerekir.

Hidrojenin sahip olduğu esnek kullanım potansiyeline rağmen şimdiye kadar yeterince yaygınlaşmamasında rol oynayan önemli engeller bulunmaktadır. Birincisi kütle olarak enerji yoğunluğu çok yüksek olmasına rağmen, hacimsel yoğunluğu çok düşüktür o nedenle yüksek basınç altında kullanılması gerekir. Örneğin araçlarda kullanılan hidrojen tankları 700 bar basınç

altındadır. Aynı şekilde doğal gaz hatlarında doğrudan hidrojene geçmek mümkün değildir. Aynı enerji yoğunluğuna ulaşmak için hatların daha yüksek basınçta kullanım için yenilenmesi gerekir. İkincisi yakıt hücreleri ile elektriğe dönüştürülmesinde kullanılan malzemeler hem maliyetlidir hem de hareket halinde olmayan durağan güç üretimi için yeterli olsa da otomotiv uygulamaları için yeterince dayanıklı değildir. Ancak bu konuda sürekli olarak ilerleme kaydedilmektedir.

◆ **A.D. : Yeşil hidrojen üretiminde dünyada ne tür gelişmeler olmaktadır?**

S.Y. : Paris Antlaşması'nda alınan kararlar doğrultusunda, yüzyılın ortasına kadar sıfır-net emisyon hedefine ulaşmak için başta Avrupa Birliği olmak üzere ülkeler bazında Kanada, Şili, Avustralya, Japonya, Güney Kore, Almanya, Norveç, Fransa, İspanya ve Portekiz hidrojen üretimini teşvik etmek üzere stratejik planlarını duyurmuşlardır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın verilerine göre dünyada toplam kapasitesi 200 MW'a ulaşan, 320 kadar yeşil hidrojen üretim pilot tesisi kurulmaktadır. Zengin fosil kaynakları bulunmayan ve nükleer enerjiyi terk etmek isteyen Japonya hidrojene çok büyük önem vermektedir. Reaktör kazasının olduğu Fukushima bölgesinde 20 MW'lık güneş enerjisi tesisinde 10MW'lık bir elektrolizör ile hidrojen üretimi yapan, hidrojen enerjisi araştırma alanı kurmaktadır. Bunun yanında Air Liquide gaz şirketi Kanada'da proton elektrolit membranlı (PEM) 20 MW'lık bir elektroliz tesisi; Norveç'in SINTEF firması Almanya'da 10 MW'lık bir PEM elektrolizörü; Avustralya'da, Infinite Blue Energy firması 2022'de devreye girecek olan 52.2 MW'lık hidrojen projesi inşa etmektedir. Paraguay'da ise 310 MW'lık alkalin elektrolizör teknolojisi ile biyo yakıt üretimi yapan bir tesis kurulmaktadır. Bu projeler vasıtasıyla hidrojen üretiminin 2\$/kg gibi bir maliyetle üretimini sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefe ulaşılmasında, elektrolizör teknolojisinde katalizör olarak kullanılan platin ve iridyum gibi değerli metallerin pahalı olması önemli engeller oluşturmaktadır.

◆ **A.D. : Hidrojen üretiminin ekonomiye ne tür katkıları olacaktır? Ve hangi alanlarda kullanılabilecektir?**

S. Y. : Gerek yüksek enerji depolama kapasitesi gerekse de hızlı dolun özelliğiyle kara araçlarında, trenlerde ve gemilerde yakıt hücreleri vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek, uçaklarda ise jet yakıtının yerine doğrudan yakılarak kullanılabilir. Son yıllarda hızla gelişen elektrikli araçlarla karşılaştırıldığında da hem menzil hem de hızlı dolun avantajları nedeniyle özellikle uzun menzilli otobüs ve kamyon gibi araçlarda tercih edilen yakıt olarak ön plana çıkabilir. Elektrik üretiminde yine yakıt hücreleri vasıtasıyla fosil yakıtların yerine kullanılabilir. Endüstriyel ısı gerektiren demir-çelik endüstrisi, çimento sanayi gibi teknolojilerde ve evsel ısı kaynağı olarak doğal gaz gibi fosil yakıtların yerini alabilir. Son olarak atmosferden çekilen karbondioksit ile birleştirilerek sentetik yakıt üretiminde de kullanılabilir.

◆ **A.D. : Nükleer enerji kullanarak (hem elektrik, hem ısı) hidrojen üretimi için ne düşünüyorsunuz?**

S. Y. : Nükleer enerji sürdürülebilir bir şekilde kullandığımız en yoğun enerjidir. Özellikle çok yüksek sıcaklıklara çıkılabildiği için termo-kimyasal dönüşümle suyun hidrojene dönüşmesi için özel reaktörler konseptleri 4. nesil reaktör konseptleri arasında bulunmaktadır. Ancak nükleer enerji popüler bir enerji kaynağı değildir ve kurulumu sırasında güvenlik açısından lisanslama faaliyetleri titizlikle yürütülmektedir. Bu da yatırım maliyetlerini oldukça artırmaktadır. Dolayısıyla son yıllarda maliyetleri hızla düşen rüzgar ve güneş enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarıyla rekabet etmesi iyice zorlaşmıştır.

● **A.D. :** Türkiye hidrojen üretimi konusunda hangi aşamada?
Bu konuda yapmış olduğunuz çalışmalardan bahseder misiniz?

S. Y. : Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği (GAZBİR) tarafından, dünyadaki benzerleri gibi hidrojenin doğal gaza enjekte edilerek kullanılması konusunda çalışmalara başlanmış ve Konya'da bir Ar-Ge merkezi kurulmuştur. Üniversitelerde de araştırmacılar hidrojenin depolanması, üretimi, yakılması ya da yakıt hücrelerinde kullanımı konusunda çalışmalar yapmaktadır. Kendi çalışmalarım da yakıt hücrelerinin maliyetinin düşürülmesi ve yıpranmalarının azaltılarak, araçlarda kullanımının yaygınlaşmasına katkıda bulunacak teknoloji geliştirmek üzerinedir.



SIEMENS ENERGY İLE AIR LIQUIDE, SÜRDÜRÜBİLİR HİDROJEN ÜRETİMİ İÇİN BÜYÜK ÖLÇEKLİ BİR ELEKTROLİZ ORTAKLIĞI GERÇEKLEŞTİRECEK

- Her iki şirket de elektroliz ve hidrojen teknolojisi için bir Avrupa ekosistemi başlatacak
- Fransız ve Alman Hükümetleri tarafından desteklenen Fransız-Alman işbirliği
- Endüstriyel ölçekli elektrolizör sistemlerine zemin hazırladığı belirlenen büyük hidrojen projeleri, bu fırsatlardan biri Fransa'daki 200 megavat (MW) kapasiteli Air Liquide-H2V Normandiya projesidir.
- Avrupa Birliği'nin Yeşil Anlaşması kapsamında büyük bir projenin finansmanı için ortak başvuru ve hidrojen için Alman IPCEI-planının ortak katılımı

Siemens Energy ve Air Liquide, PEM (Proton Exchange Membran) elektroliz teknolojisindeki uzmanlıklarını birleştirmek amacıyla bir Mutabakat Anlaşması imzaladı. Faaliyetlerini şu kilit alanlara odaklamayı planlıyorlar: müşterilerle işbirliği içinde büyük endüstriyel ölçekli hidrojen projelerinin birlikte oluşturulması, Avrupa'da, özellikle Almanya ve Fransa'da elektrolizörlerin toplu üretimi için zemin hazırlaması ve ortak geliştirme için Ar-Ge faaliyetleri yeni nesil elektrolizör teknolojileri.

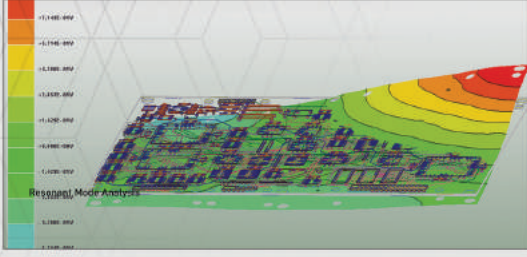
Hidrojen, Avrupa Birliği'nin CO₂ ve sera gazı emisyonunu azaltma hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayacaktır. Hızla artan talebi karşılamak ve maliyetleri düşürmek için, büyük ölçekli PEM elektrolizörleri aracılığıyla sürdürülebilir şekilde üretilen hidrojenin üretimini hızlandırmak çok önemlidir. Siemens Energy ve Air Liquide, işbirlikleri çerçevesinde, Fransız ve Alman hükümetleri tarafından finanse edilen AB'nin Yeşil Anlaşması ve Hidrojen için Önemli Ortak Avrupa Çıkarı Projesi (IPCEI) kapsamında büyük projelerin finansmanı için ortaklaşa başvuracak. IPCEI finansmanı, bu faaliyetlere hızlı bir şekilde başlamak ve Avrupa Yeşil Yeni Anlaşması, AB Hidrojen Stratejisi ve Fransız ve Almanya Ulusal Hidrojen Stratejileri tarafından belirlenen zorlu zaman çizelgesine uymak için gereklidir.

Bu işbirliği ile Siemens Energy ve Air Liquide, Avrupa'da sürdürülebilir bir hidrojen ekonomisinin ortaya çıkmasını sağlayan temel yetkinliklerini güçlendirecek ve diğer ortaklarla birlikte elektroliz ve hidrojen teknolojisi için bir Avrupa ekosistemi başlatacak. Ortaklar, hem Fransa, Almanya hem de diğer Avrupa ülkelerinde büyük ölçekli sürdürülebilir hidrojen projeleri için işbirliği fırsatlarını zaten belirlediler. Bu fırsatlardan biri, yenilenebilir enerjilerden hidrojen üretimi için Avrupa'nın en iddialı projelerinden biri olan 200 MW kapasiteli Fransa'daki Air Liquide-H₂V Normandiya projesidir.

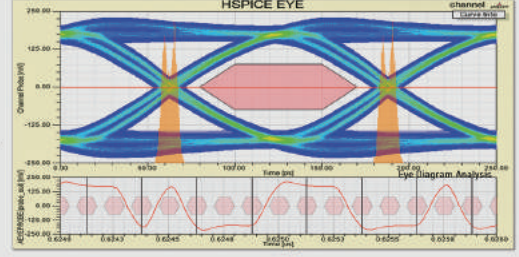
Siemens Energy CEO'su Christian Bruch şunları söyledi: "Sürdürülebilir bir hidrojen ekonomisi inşa etmek yine de enerji piyasasındaki çerçeve koşullarını değiştirmeyi gerektirecek. Ancak, bu pazarı şekillendirebileceğimiz ortaklıklar ve işbirliği yoluyla olacaktır. Air Liquide ile yenilikçi çözümleri birlikte yaratmaktan büyük mutluluk duyuyoruz. Teknolojiyi sanayileştirmek ve sürdürülebilir şekilde üretilen hidrojeni bir başarı öyküsü yapmak için önümüzde yatan zorlukların üstesinden topluca geleceğiz."

Air Liquide Yönetim Kurulu Başkanı ve CEO'su Benoît Potier şunları söyledi: "Hidrojen, enerji geçişinin kilit unsurlarından biridir. Avrupa'da hidrojen teknolojileri ve pazarlarında benzeri görülmemiş bir hızlanma bağlamında, ölçek büyütme zamanı, özellikle Fransa ve Almanya'da. Air Liquide ve Siemens Energy arasındaki ortaklık, rekabetçi fiyatlarla karbondan arındırılmış hidrojeni tedarik edebilen ve düşük karbonlu bir toplumun ortaya çıkmasını teşvik eden lider bir Avrupa ekosisteminin oluşturulmasının yolunu açıyor. Bu Fransız-Alman işbirliğini dört gözle bekliyoruz."

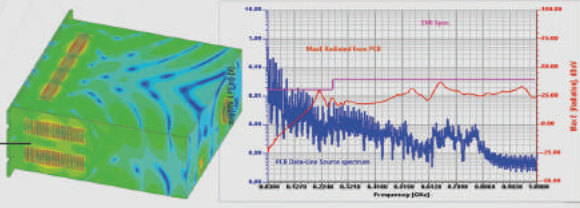
PCB Seviyesi Güç ve Sinyal Bütünlüğü, Elektrotermal ve EMI/EMC Analizleri



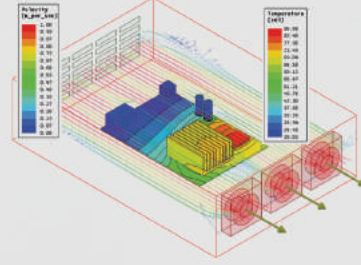
Güç Bütünlüğü



Sinyal Bütünlüğü



EMI/EMC



Elektrotermal

Hizmetlerimiz



Analiz Proje/
Danışmanlık



Yazılım Satış



Canlı Eğitim



Online Eğitim



Teknik Destek



Eğitim Portalı

numesys | LEARNING
PORTAL

Detaylar için linki ziyaret ediniz:
www.numesys.com.tr/elektromanyetik-alandaki-hizmetlerimiz

Daha fazla bilgi almak için bizimle iletişime geçin:
info@numesys.com.tr

MATLAB

R2021a

Yayında!

12 | ÖNEMLİ
YENİLİK

3 YENİ ÜRÜN

• DDS BLOCKSET

Veri Dağıtım Servisinin (DDS) ara uygulamalarına bağlanan ve yayınlayan modelleme ve simülasyon yazılım bloklarından oluşmaktadır.

• RADAR TOOLBOX

Çok işlevli radar sistemlerini tasarlamak, simüle etmek, analiz ve test etmek için algoritmalar ve araçları içerir.

• SATELLITE COMMUNICATIONS TOOLBOX

Uydu iletişim sistemleri ve bağlantılarını tasarlamak, simüle etmek ve doğrulamak için standartlara dayalı araç ve yazılımlar sağlar.



DDS Blockset

Satellite
Communication
Toolbox

Radar Toolbox