

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKIT PİLİ-BATARYA HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN PERFORMANSININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğr. Gör. Habip ŞAHİN

122135101

Anabilim Dalı: Enerji Sistemleri Mühendisliği

Programı: Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Danışman: Doç. Dr. Hikmet ESEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 22.12.2015

ARALIK-2015

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKIT PİLİ-BATARYA HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN PERFORMANSININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğr. Gör. Habip ŞAHİN

122135101

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.12.2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 08.01.2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hikmet ESEN (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü)

ARALIK-2015

ÖNSÖZ

Yüksek lisansa başlamamın en büyük sebebi olan, akademik kariyerime devam etmem için beni her daim teşvik eden babam Ali Osman ŞAHİN'e teşekkür ederim. Yüksek lisansa başladığım ilk andan bugüne kadar bana yol gösteren, takıldığım her engeli aşmamda yardımcı olan, bu sayede bana tekrardan akademik hayatı sevdiren, yüksek lisans tez çalışmamda beni destekleyen kıymetli hocam Doç. Dr. Hikmet ESEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Maddi manevi desteklerini büyük bir sabırla benden esirgemeyen aileme ve eşime de saygılarımı sunarım.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimi tarafından maddi olarak desteklenen TEKF.15.05 no'lu projemize katkıda bulunan bütün FÜBAP personeline de ayrıca teşekkür ederim.

Habip ŞAHİN
ELAZIĞ-2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. HİDROJEN ENERJİSİ	6
2.1 Hidrojenin Özellikleri	7
2.2 Hidrojen Üretimi	8
2.2.1 Buhar-Metan Reformasyon Yöntemiyle Hidrojen Üretimi	8
2.2.2 Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi	8
2.2.3 Buhar Elektrolizi Yöntemiyle Hidrojen Üretimi	9
2.2.4 Hidrojen Sülfür'den Hidrojen Üretimi	9
2.2.5 Güneş Enerjisinden Hidrojen Üretimi	9
2.2.6 Fotokimyasal Sistemler	10
2.2.7 Güneş Pili Sistemleri	10
2.2.8 Foto Biyolojik Sistemler	10
2.3 Hidrojenin Taşınması	11
2.4 Hidrojenin Depolanması	11
2.5 Hidrojen Kullanımında Güvenlik	12
3. YAKIT PİLLERİ	14
3.1 Yakıt Pillerinin Tarihçesi	14
3.2 Yakıt Pili'nin Özellikleri	16
3.3 Yakıt Pilleri Çalışma Prensipleri	18
3.4 Yakıt Pili Çeşitleri	19
3.4.1 Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (PEMFC)	22
3.4.2 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)	25
3.4.3 Alkali Yakıt Pilleri (AFC)	27

3.4.4	Fosforik Asit Yakıt Pilleri (PAFC)	28
3.4.5	Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (MCFC)	30
3.4.6	Katı Oksit Yakıt Pilleri (SOFC)	32
3.5	Yakıt Pili Uygulama Alanları	33
3.5.1	Uzay Çalışmaları ve Askeri Alanlar	35
3.5.2	Ulaşım ve Taşıma	37
3.5.3	Sabit Güç Santralleri	37
3.5.4.	Taşınabilir Uygulamalar	38
4.	BATARYALAR	39
4.1.	Kurşun Asit (Pb-Acid) Bataryalar	40
4.2.	Ni-Cd Bataryalar	40
4.3.	Ni-Zn Bataryalar	41
4.4.	Ni-MH Bataryalar	41
4.5.	Zn/Air Batarya	41
4.6.	Al/Air Batarya	42
4.7.	Na/S Batarya	42
4.8.	Na/NiCl ₂ Batarya	43
4.9.	Lityum-Polimer Bataryalar	43
4.10.	Lityum-İyon Bataryalar	43
5.	HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMA	45
5.1.	Hibrit Güç Sistemin Tanımı ve Gerekliliği	45
5.2.	Yakıt Pili-Batarya Hibrit Güç Sistemi	45
5.3.	Deney Ekipmanları	47
5.4.	Batarya-Yük Deneyi	53
5.5.	Yakıt Pili-Yük Deneyi	55
5.6.	Hibrit Güç Sistemi-Yük Deneyi	57
5.7.	Yakıt Pili ve Bataryanın Paralel Çalışma Deneyi	61
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	65
7.	KAYNAKLAR	66
	ÖZGEÇMİŞ	71

ÖZET

Son yıllarda fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanımının sebep olduğu sorunları belirleyebilmek ve üstesinden gelebilmek için birçok çaba sarf edilmektedir. Buna rağmen fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı kısa bir sürede sona erdiremeyeceğimiz kabul edilmelidir. Aslında bu durum, enerji alanındaki teknolojilerin yavaş bir dönüşümü ile uzun yıllar sürecektir. Bu geçiş döneminde, alternatif enerji kaynaklarına geçişi desteklemek için bunu sağlayacak teknolojiler arasında iletişim kurmaya tüm dünyanın ihtiyacı olacaktır. Bu nedenle enerji verimliliğini artırırken emisyon ve maliyetleri düşürmeyi vadeden hibrit güç sistemlerinin kabul görmesi bu desteğin ilk aşaması olacaktır.

Yakıt olarak hidrojen kullanan, proton değişim zarlı (PEM) yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi diğer geleneksel bataryalara göre daha yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bunun yanında en fazla gelecek vadeden, çevre dostu alternatif enerji kaynaklarından biridir. Bu tez çalışmasında bir PEM yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi tasarımının genel bir yöntemi ortaya konulacaktır.

Özellikle mobil güç uygulamalarında, düşük sıcaklık şartlarında çalışan PEM yakıt pilleri uygundur ama PEM yakıt pillerinin bağımsız çalışma konusunda bazı problemleri vardır. Öncelik arz eden kritik problemlerinin başında, artan güç talebiyle ani gerilim düşüşlerinin oluşması ve uzun tepki verme süresi gelmektedir. Fakat birçok elektronik cihaz kararlı bir güç ve hızlı tepkilere ihtiyaç duyar. Bu nedenle, değişen yük şartlarında düzenli ve hızlı tepkilere sahip bir güç sağlaması istenen sistemlerde, PEM yakıt pili ile birlikte çalışacak, hızlı şarj-deşarj özelliğine sahip bataryalara ve güç düzenleme cihazlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında da batarya, hibrit batarya şarj cihazı ve yakıt pilinden oluşan ve belirtilen şartlara sahip bir güç sistemi tasarlanmış ve performansı incelenmiştir. Batarya, hızlı tepki vermesi nedeniyle yakıt piline ek olarak yardımcı bir güç kaynağı olarak kullanılmış olup aynı zamanda yük gücünün nominal yakıt pili gücünden düşük olduğu durumlarda da fazla enerjiyi depolamaktadır. Hibrit batarya şarj cihazı hem batarya, yakıt pili ve yük arasındaki koordinasyonu sağlamakta hem de gerilimlerini regüle etmektedir. Böylece yakıt pili ve bataryanın dezavantajları elimine edilirken her ikisinin de avantajları korunmuş olur.

SUMMARY

Experimental Investigation of Fuel Cell-Battery Hybrid Power System Performance

Many efforts have been made in recent years to determine issues surrounding the use of fossil fuels for energy. However, it must be admitted that we can not finish our dependence on fossil fuels in a short time. Actually it is possible by a relatively slow migration of technologies over several years. During this transition period the world will need establishing connections between technologies to support in the transition to alternate energy sources. The first stage of this support is the acceptance of hybrid power systems which shows much promise in boosting energy efficiency while reducing emissions and costs.

A proton exchange membrane (PEM) fuel cell–battery power system using hydrogen as fuel has a higher energy and power density than conventional batteries, and it is one of the most up-and-coming environmentally friendly alternative energy sources. A general methodology of building of a PEM fuel cell–battery system is introduced in this thesis.

A PEM fuel cell that operates in low temperature conditions is suitable for the portable power applications. However, PEM fuel cells have some problems about working independently as a power system. A rapid voltage drop and a slow response to the load demand are the primary critical problems, as most electronic devices require stabilized power and fast transient response. Thus, energy storage devices, such as fast charge and discharge battery and power regulation devices are required to work with the PEM fuel cell to form a power system to provide regulated, fast-response power to a variable load. Such a system consisting a battery, a hybrid battery charger and a PEM fuel cell is designed and its performance is investigated in this thesis. Battery is used as an auxiliary power source addition to fuel cell for a fast response to the load demand and it also stores surplus energy in case of load power is lower than nominal fuel cell power. Coordination between fuel cell, battery and load is provided by hybrid battery charger and it also regulates voltages. Thus, designed system eliminates all disadvantages of fuel cell and battery while saving advantages of both.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi	6
Şekil 3.1. William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi	14
Şekil 3.2. Mond ve Langer'ın tasarladığı yakıt pili	15
Şekil 3.3. Geleneksel teknoloji ve yakıt pilinde enerji dönüşümü	17
Şekil 3.4. Yakıt pilinin çalışma prensibi	18
Şekil 3.5. Elektrolitlerine göre ayrılan yakıt pillerinde meydana gelen reaksiyonlar	21
Şekil 3.6. Proton değişim zarlı yakıt pili	22
Şekil 3.7. Proton değişim zarlı yakıt pillerinin çalışma prensibi	23
Şekil 3.8. Doğrudan metanol kullanılan yakıt pili	26
Şekil 3.9. Alkali yakıt pili	27
Şekil 3.10. Fosforik asit yakıt pili	29
Şekil 3.11. Erimiş karbonat yakıt pili (iç dönüşümlü)	30
Şekil 3.12. Erimiş karbonat yakıt pili (dış dönüşümlü)	31
Şekil 3.13. Katı oksit yakıt pili	33
Şekil 3.14. 2008-2012 yılları arasında yakıt pili endüstrisinin yıllık büyümesi	34
Şekil 3.15. 2008-2012 yılları arasında yakıt pili endüstrisinin bölgesel bazda büyümesi ..	35
Şekil 4.1. Bataryaların temel çalışma ilkesi	39
Şekil 5.1. Horizon Fuel Technologies firmasına ait H-100 serisi PEM yakıt pili	47
Şekil 5.2. H-100 serisi PEM yakıt pilinin gerilim akım karakteristiği	48
Şekil 5.3. H-100 serisi PEM yakıt pilinin çıkış gücüne bağlı olarak hidrojen tüketimi	49
Şekil 5.4. H-100 serisi PEM yakıt pilinin güç akım karakteristiği	49
Şekil 5.5. 12 V 20 Ah kurşun asit batarya	50
Şekil 5.6. 200 bar 50 L çelik hidrojen tüpü ve 1.5 bar çift kademeli regülatör	51
Şekil 5.7. HiOKi LR 8431-20 10 kanallı dataloggera	52
Şekil 5.8. Hibrit şarj kontrolörü	52
Şekil 5.9. Deney setinin genel görünümü	53
Şekil 5.10. Batarya-yük deney şeması	54
Şekil 5.11. Batarya akım-gerilim karakteristiği ve güç eğrisi	55
Şekil 5.12. Yakıt pili-yük deney şeması	56
Şekil 5.13. Yakıt pili akım-gerilim karakteristiği ve güç eğrisi	57
Şekil 5.14. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi prensip şeması	58
Şekil 5.15. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi akım değişimi	59
Şekil 5.16. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi güç eğrisi	60

Şekil 5.17. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi gerilim değişimi	61
Şekil 5.18. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma şeması	61
Şekil 5.19. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma akım değişimi	62
Şekil 5.20. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma güç eğrisi	63
Şekil 5.21. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma gerilim değişimi	64

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Yakıtların güvenilirliğinin kıyaslanması	13
Tablo 3.1. Yakıt pillerinin türleri, işletim sıcaklıkları ve önemli uygulamalar	20
Tablo 3.2. Yakıt pil türüne bağlı olarak gerçekleşen reaksiyonlar	21
Tablo 3.3. Membranlar ve özellikleri	24
Tablo 5.1. H-100 serisi 100W'lık PEM yakıt pili teknik özellikleri	48

SEMBOLLER LİSTESİ

- I_b** : Batarya akımı,
V_b : Batarya gerilimi,
P_b : Batarya gücü,
I_{fc} : Yakıt pili akımı,
V_{fc} : Yakıt pili gerilimi,
P_{fc} : Yakıt pili gücü,
I_y : Yük akımı,
V_y : Yük gerilimi,
P_y : Yük gücü,
I_{b-y} : Bataryadan yüke aktarılan akım,
I_{fc-b} : Yakıt pilinden bataryaya aktarılan akım,
P_{b-y} : Bataryadan yüke aktarılan güç,
P_{fc-b} : Yakıt pilinden bataryaya aktarılan güç,
V_{b-y} : Batarya-yük gerilimi.

KISALTMALAR LİSTESİ

HRES	: Hybrid Renewable Energy Systems: Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri,
DC	: Direct Current: Doğru Akım,
PEM	: Proton Exchange Membrane: Proton Değişim Zarı,
PEMFC	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili,
DMFC	: Direct Methanol Fuel Cell: Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pili,
AFC	: Alkaline Fuel Cell: Alkali Yakıt Pili,
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell: Fosforik Asitli Yakıt Pili,
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell: Erimiş Karbonat Yakıt Pili,
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell: Katı Oksit Yakıt Pili,
VRLA	: Valve Regulated Lead-Acid: Valf Regüleli Kurşun-Asit,
HESS	: Hybrid Energy Storage Systems: Hibrit Enerji Depolama Sistemleri.

1. GİRİŞ

Enerji insanlık tarihinde, insanoğlunun varoluşundan günümüze kadar çok önemli bir yere sahiptir. Enerjinin insanlık tarihine girişi ateşin bulunması ile olmuş ve gün geçtikçe önemi artmıştır. İnsanoğlu medeniyetler kurma ve geliştirmede her zaman çeşitli enerji türlerinden yararlanmıştır. Özellikle enerji çeşitleri arasındaki dönüşümlerden faydalanarak hayatlarını kolaylaştıracak çok çeşitli buluşlar gerçekleştirmiştir. Şüphesiz ki bunların en büyüğü Sanayi Devriminin de temelini oluşturan buhar gücüdür. Buhar gücünün çeşitli makinelerde kullanımıyla çok büyük zaman ve iş gücü gerektiren işlemler çok daha kısa sürede kolaylıkla gerçekleştirilebilmiştir. Tatbikî bu gelişmeler enerjiye olan gereksinimi tahmin edilemez seviyelere getirmiş olup enerji kaynaklarına olan talep aşırı derecede artmıştır. İlk olarak bu enerji gereksinimi kömür ve türevlerinden elde edilmekle birlikte daha sonraları yine bir fosil yakıt türü olan petrolle birlikte enerjiye olan ihtiyaç giderilmeye çalışılmıştır. Devletlerin gelişmesi ile enerji ihtiyaçları artmış bu ihtiyaçlarını sağlayacak kaynaklar elde ettikçe de gelişmeleri hızlanmıştır. Bu sebeple enerji medeniyetlerin gelişmişlik ölçülerinden biri hatta en önemlisi olmuştur. Bu enerji gereksinimi karşılamak ve daha fazla enerji kaynağını ele geçirmek isteği I. ve II. Dünya Savaşlarının önemli nedenleri arasında sıralanmıştır.

İçten yanmalı motorların kullanım alanının genişlemesi, elektrik enerjisinin kullanılmaya başlanması ve elektrik üretiminde kömür, petrol ve doğalgaz kullanımı çok büyük bir hızla artmıştır. Böylece fosil yakıtlar (kömür, doğal gaz, petrol vb.) endüstri ve yaşam için en önemli ham madde olmuştur. Özellikle elektrik enerjisi ile birlikte, enerji nerede üretilirse üretilsin çok rahat bir şekilde tüketim noktasına ulaştırılmaya başlanmıştır. Enerjinin bu şekilde kolay ulaşılabilir olması yine tüketiminin artması ile sonuçlanmıştır. Elektrik enerjisi ile birlikte insanoğlu enerji ile tamamen iç içe girmiş ve tamamen enerjiye bağımlı hale gelmiştir. Bu durum, herhangi bir elektrik kesintisinde hayatın neredeyse durma noktasına gelmesinden kolaylıkla anlaşılabilir. Zamanla enerji denildiğinde insanların aklına ilk gelen şey elektrik olmuş, elektriğin üretiminde kullanılan birincil enerji kaynakları yani fosil yakıtlar geri planda kalmıştır. Bu nedenle de fosil yakıtların ölçsüzce kullanımının getirdiği problemler göz ardı edilmiştir.

Bu problemlerin en önemlilerinden biri ve tüm dünyayı etkileyeni sera gazı salınımıdır. Sera gazı salınımı ile birlikte tüm dünya iklim değişikliği korkusu altındadır. Gelişmiş ülkeler bu problemi daha öncelikli olarak kavrayıp önlemler alma konusunda daha ciddi

adımlar atsalar dahi gelişmekte olan ülkeler sadece problemin farkında olma aşamasında olup gelişmemiş ülkelerde ise daha öncelikli problemleri nedeniyle durumun farkına dahi varamamışlardır. Buna ek olarak iklim değişikliğinin doğuracağı sonuçları tam olarak saptayacak kapsamlı bir yaklaşım kimse tarafından gerçekleştirilememiştir. Bu problemi, enerji kaynaklarını kontrol edebilme isteği ve bu nedenle de özellikle bu kaynaklar açısından zengin bölgeler üzerinde söz sahibi olabilmek için devletlerin birbirleriyle verdikleri politik ve askeri çatışmalar izlemektedir. Bu çatışmanın bir sonucu olarak dünyamızın yakıt istasyonu konumundaki Ortadoğu barut fıçısına dönmüş durumdadır.

Yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü son yıllarda dünyadaki enerji senaryolarında artan enerji talebiyle önemli bir değişim görülmektedir. Enerji verimliliğindeki gelişmeler ve enerji depolama yöntemleriyle her ne kadar bu talep hafifletilebilse de tamamen karşılanamamaktadır. Birincil enerji kaynakları olan kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıt rezervlerinin kısıtlı olması ve hızla tükenmesi bilim ve siyaset çevrelerini alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Ülkeler doğal kaynaklarına bağlı olarak, dünyadaki yeni enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ve yeni enerji teknolojilerinin geliştirilmesi yönündeki çalışmalarına hız vermişlerdir. Bu iki gerçek, enerji üretimindeki büyük bir artışın gerekliliği ve fosil yakıtlara olan bağımlılıktan kurtulma, yenilenebilir enerji kaynaklarının, tüketilen enerji miktarına büyük bir katkı sağlamasını zorunlu kılmaktadır.

Küresel insan kaynaklı karbon dioksit (CO₂) emisyonunu azaltmak ve yerel (kentsel) hava kalitesini artırmak, enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamak ve ekonomik refahımız için yeni bir endüstriyel ve teknolojik enerji tabanı oluşturmak için hidrojen, karbon temelli yakıtlara çok cazip bir alternatif durumundadır. Hidrojeni cazip kılan ise hem su, rüzgâr, güneş, biyokütle, jeotermal gibi yenilenebilir hem de kömür, doğal gaz, nükleer gibi yenilenemeyen çok çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesidir. Daha sonra ise yakıt pilleri gibi yüksek verimli güç üretim sistemlerinde, hem araçlar hem de yerel elektrik santrallerinde kullanılabilir. Yakıt pilleri, düşük sıcaklıklı elektrokimyasal işlemlerle hidrojen veya hidrojen zengin yakıtları bir oksidant (genellikle saf oksijen veya hava içeriğindeki oksijen) ile doğrudan elektriğe çeviriler. Hidrojen veya hidrojen zengin yakıtları işleyen yakıt pilleri, gelecekte düşük karbondioksit emisyonlu sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte katalizör etkisi gösterecek ana faktörlerden biri olma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle de bu tür gelişmelere verilen önem hızla artmaktadır. Günümüzde çoğu

ülke, yakıt pili ve hidrojen teknolojileri geliştirebilmek için belirledikleri sayısal hedeflere ulaşabilmek için yol haritaları oluşturmaktadır.

Teknolojik gelişmelerin olgunlaşmış bir seviyeye ulaşması geleneksel yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin fotovoltaik, biokütle ve rüzgâr) gelecek enerji senaryolarında fosil yakıtların aşamalı olarak yerini alabilmesini mümkün kılabilir. Bu aşamalı değişimin ekonomik olarak sürdürülebilir olması, bu gibi teknolojilerin fiyatlarının yüksek olması nedeniyle biraz daha karmaşık bir hal alabilir. Fakat ekonomik ölçekteki maliyet problemi yenilenebilir enerji sistemlerinin üretimindeki artış ve fosil yakıtlardaki fiyat artışı ile biraz hafifleyebilir. Temel olarak yenilenebilir enerjinin yeterli miktarda nüfuz etmesinin önündeki ana problem, bu enerji kaynaklarının özellikle şebekeden bağımsız uygulamalar ve bunun yanında şebeke bağlantılı sistemlerdeki uygulanabilirliğine bağlıdır. Bu uygulanabilirlik problemine muhtemel çözüm ise birçok yenilenebilir enerji kaynağının bir hibrit sistemde birleştirilmesini veya bu hibrit sistemlere enerji depolama sistemlerinin eklenmesi gibi bütüncül sistemleri içerebilir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri (HRES) bir yenilenebilir ve bir geleneksel enerji kaynağından oluşan veya birden fazla yenilenebilir kaynak ile geleneksel herhangi bir enerji sistemi olması veya olmaması durumunu içeren sistemlerden oluşabilir. HRES, yenilenebilir enerji teknolojileri ve ona bağlı güç elektroniğindeki gelişmelerle birlikte önem kazanmaktadır. İki veya daha fazla yenilenebilir sistemi birleştirerek, her birinin güvenilirlik problemi ortadan kaldırılabilceği gibi her birinin ayrı kullanıldığı eş değer sistemlere kıyasla sistemin toplam enerji veriminde gelişmeler elde edilebilir. Özetle HRES, yakıt esnekliği, güvenilirliği ve ekonomisi açısından yenilenebilir enerjinin kısıtlamalarını iyileştirebilir.

Bu tezin amacı ise yakıt pili ve batarya kullanarak bu şekilde bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi kurmak ve bu sistemin çeşitli parametrelerini incelemektir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıt pili ile yüksek güç yoğunluğuna sahip batarya birlikte kullanılarak her ikisinin de avantajlarına sahip olan bir sistem gerçekleştirilecektir. Oluşturulacak bu hibrit güç kaynağının değişken yükler altında gerilim, akım ve güç değerleri incelenecektir. Oluşturmaya çalıştığımız sistem ilk olarak prototip bir yedek (back up) güç kaynağı olsa da günümüz elektrikli araçların temel sorunlarından olan güç kaynağı probleminin çözümünün de temelini oluşturacaktır. Çünkü yakıt pilleri yakıt sağlanması süresince elektrik üretmeye devam edecektir ama değişken çıkış güçlerinde tepki süreleri bataryalara göre daha uzundur. Bataryaların ise verebilecekleri elektrik enerjileri depolama kapasiteleriyle sınırlıdır. Yakıt pillerinin sabit yüklerle çalıştırılması verimliliğini de olumlu yönde etkilemektedir.

Kurulacak sistemle artan yüklerle çıkış gücünde istenilen artış batarya grubu tarafından hızlıca sağlanabilecektir. Çıkış gücünün düşük olduğu durumda ise yakıt pili batarya grubunu şarj edecektir. Böylece hem yakıt pilinin çıkış gücü sabit tutulmaya çalışılmış olacak hem de yük durumundaki değişimlere gerekli tepkiler hızlıca verilebilecektir. Gerekli güç yakıt pili ve batarya arasında bölüştürülebileceğinden her ikisinin gücü istenen maksimum çıkış gücünde olmasına gerek kalmayıp daha düşük değerlerde seçilebilecektir. Böylece hem maliyet hem de gerekli hacim ve ağırlık olarak daha avantajlı bir sistem elde edilecektir.

Duarte ve arkadaşları, hibrit yakıt pili sistemleri için üç girişli, çift yönlü konvertör tasarlamışlardır. Bu tasarım ile kurşun-asit batarya ile yakıt pili içeren hibrit bir sistemin güç analizi yapılarak güç akışı için gerekli kontrol ünitesi oluşturulmuştur [1].

Tao ve arkadaşları, yakıt pili sistemleri için DC-link ve manyetik kuplajı birleştiren çok girişli DC-DC konvertör tasarımı yapmışlardır. Bu çalışma ile değişik kontrol yöntemleri uygulayabildikleri ve bu kontrol yöntemleri ile güç yönetimini sağlayabildikleri bir topolojiyi deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir [2].

Napoli ve arkadaşları, yakıt pilli hibrit araçlar için çok girişli DC-DC güç konvertörü tasarlamışlardır. Bu çalışmada yakıt pili ultra kondansatör ve batarya birlikte güç kaynağı veya deposu olarak kullanılmıştır. Özellikle kullanılan ultra kondansatörün optimizasyon kriterleri üzerine çalışılmıştır [3].

Piumsomboon ve arkadaşları, elektrikli motoru PEM yakıt pili ile beslenen üç tekerlekli bir aracın yakıt pili ile beraber kurşun-asit batarya olması ve olmaması durumu için performansını deneysel olarak incelemiştir. Tasarlanan prototip aracın yol testleri yapılarak sadece yakıt pili, sadece batarya ve her ikisi birlikte kullanıldığı durumlar için performans analizi yapılarak hibrit sistemin üstünlükleri vurgulanmıştır [4].

Tolj ve arkadaşları, yakıt pili-kurşun-asit batarya hibrit güçlü hafif elektrikli araçlarda (golf arabaları gibi) özellikle yakıt pilinin aracın sürüş performansına olan etkileri incelenmiştir [5].

Blackwelder ve Doughal, yakıt pili-batarya hibrit güç kaynakları için ticari güç kontrol devreleriyle güç koordinasyonunu sağlamayı amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kurdukları sistemi sadece yakıt pili ve hibrit olarak deneyerek her iki durumun analizi yapılmıştır [6].

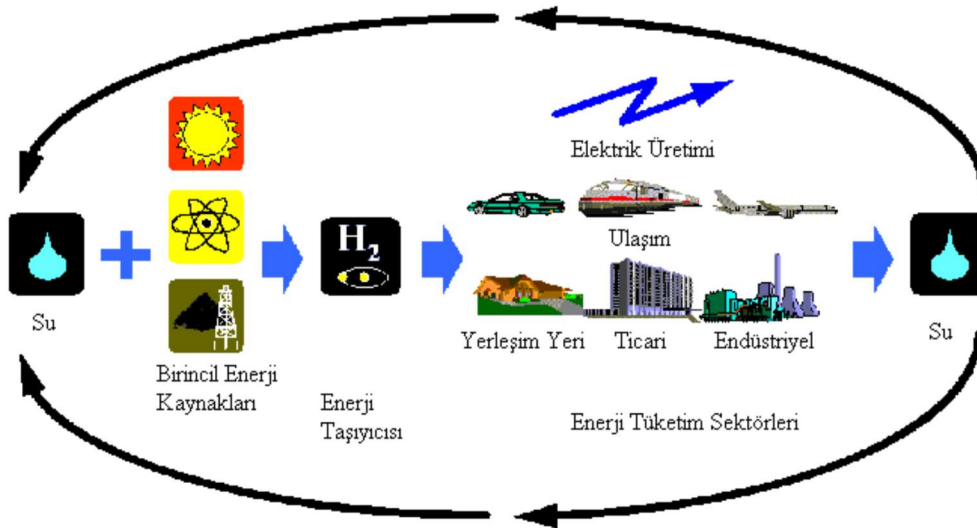
Wang ve Wang, PEM yakıt pilinin değişken yük altında çalışma dinamiğini incelemişlerdir. Bu çalışma ile değişik membran tiplerinde yakıt pilinin tepki süresi iyileştirilmeye çalışılmıştır [7].

Yue Cao ve arkadaşları aynı araç için hem sadece batarya hem de yakıt pili-batarya hibrit sistemi ile çalışacak şekilde bir tasarım gerçekleştirip her iki durumu için aracın performansını karşılaştırmışlardır [8].

2. HİDROJEN ENERJİSİ

Enerjinin son tüketiciye ulaştırılması ya yakıt ya da elektrik yoluyla olmaktadır. Özellikle elektriğin kullanımı büyük avantajlar getirmekle beraber elektrik üretim teknolojileri birincil enerji kaynakları olan yakıtları da önemli hale getirmektedir. Yani genel enerji tüketimimizin büyük çoğunluğu ısı formunda olmaktadır. Birincil enerji kaynaklarının sahip oldukları kimyasal enerji ısı enerjisine daha sonra çeşitli dönüşümlerle ikincil enerji kaynaklarına yani enerji taşıyıcılarına çevrilir. 20. yüzyıl ve günümüzün en önemli enerji taşıyıcısı elektrik olsa da gelecekteki enerji taşıyıcısının hidrojen olması kaçınılmazdır.

Hidrojen enerjisinin kullanımını zorunlu kılan sebeplerden birincisi fosil yakıtlardan ısı enerjisi eldesinde çevreye verilen zarar, ikincisi bu yakıtların rezervlerinin sınırlı olması ve çok uzak olmayan bir tarihte tükenecek olmasıdır. Fosil yakıtlara en makul alternatif olan ve doğal bir yakıt olmayan hidrojen, geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik kaynaklardan üretilen yapay bir yakıttır [9]. Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi

2.1. Hidrojenin Özellikleri

1500'lü yıllarda, keşfedilen hidrojenin yanıcı özelliği ise 17. yüzyılda fark edilmiştir. Renksiz, kokusuz, havadan 14.4 kez daha hafif ve zehirleyici olmayan hidrojen, evrendeki en basit ve en çok bulunan elementtir ve evrenin temel enerji kaynağıdır [10].

Periyodik cetvelin birinci elementi olan hidrojenin sembolü H'tır. Atom ağırlığı 1.00797, yoğunluğu 0.0899 g/L, kaynama noktası -252.76 °C ve erime noktası -259.06 °C'dir. Sıvı hidrojenin yoğunluğu 0.070 g/cm³, kristal halindeki yoğunluk ise 0.088 g/cm³'tür. Periyodik tabloda 1A (alkali metaller) grubunda olmasına rağmen halojenlere benzer özellikler gösteren bir ametaldir. Bileşiklerinde +1 ve -1 değerlilik alabilir ve -1 değerlilikli durumuna hidrür denir. Üç farklı izotopu bulunan hidrojenin doğada en çok bulunanı kütle numarası 1 olan ve protiyum olarak adlandırılan (1H) izotopudur. Bir proton ve bir elektrondan oluşan hidrojen nötronu olmayan tek elementtir [11].

Hidrojenin sıvı haldeki hacmi gaz halindeki hacminin 1/700'ü kadardır. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Hidrojen gazı 2.016 moleküler ağırlığı ile de en hafif kimyasal moleküldür. Sıvı hidrojenin birim kütesinin ısı değeri 141.9 MJ/kg olup, 1 kg hidrojen 2.8 kg doğal gaz veya 3.2 kg petrolünkine eşdeğer enerjiye sahiptir. Hidrojen doğada bileşikler halinde bulunur ve en çok bilinen bileşiği sudur. Sudaki üç atomdan ikisi hidrojendir. Bu nedenle okyanuslar, göller ve nehirler birer hidrojen rezervi konumundadır [12].

Hidrojen; alevsiz yanma (katalitik yanma) ve alevli yanma ile direkt buhar üretme, hidritleşme ile kimyasal dönüşüme ve yakıt hücresiyle elektrik dönüşümüne uygun bir yakıt iken, fosil yakıtlar yalnızca alevli yanmaya uygundur. Hidrojen alevli yanma özelliği ile gaz türbinlerinde, içten yanmalı motorlarda ve ocaklarda yakıt olarak kullanılabilir. Direkt buhara dönüşüm özelliği ile buhar türbinleri uygulamasında kolaylık sağlayan hidrojen bu özelliği ile endüstriyel buhar üretimini de kolaylaştırmaktadır. Hidrojen katalitik yanma özelliğinden mutfak ocakları, su ısıtıcıları ve sobalarda yararlanılmaktadır. Hidritleşme, yani hidrojenin bir organik molekülle depolanması özelliği de hidrojen depolanması açısından önemlidir. Ayrıca kimyasal reaksiyonlarla yakıt pillerinde direk elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

Hidrojenin en önemli özelliği ise, üretiminde (elektrik ve güneş enerjisinden), taşınmasında, depolanmasında veya tüketiminde çevreye zarar vermez. Hidrojenin yanması veya yakıt hücrelerinde kullanılması sonucu sadece saf su oluşur.

2.2. Hidrojen Üretimi

Üretiminde hemen hemen tüm enerji kaynaklarının kullanılabildiği hidrojenin hammaddeleri ise su, kömür, doğal gaz gibi yapısında hidrojen bulunduran tüm bileşikler sayılabilir. Ancak fosil yakıt sınırlı olup gerek birincil enerji kaynağı, gerekse hidrojen üretimde kullanılması çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojenin sudan üretilmesi en doğru yöntemdir. Hidrojen günümüzde suni gübre sanayisi, bitkisel yağ üretimi, petrokimya endüstrisi ve roket yakıtı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

2.2.1. Buhar-Metan Reformasyon Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

İki adımdan oluşan ve günümüzde hidrojen üretimi için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. İlk adımda yüksek sıcaklıkta (392 °C) doğal gaz buhara tabi tutularak hidrojen ve karbonmonoksit elde edilip diğer adımda ise karbonmonoksit buhara tabi tutularak hidrojen ve karbondioksit elde edilir. Hidrojen ürün miktarı %70–%90 arasında olan bu yöntem hidrojen üretmek için en verimli olanıdır. Son adımda CO₂ açığa çıkarması büyük bir dezavantajdır. Uygulanan yöntemin kimyasal formülü aşağıda verilmiştir [13].



Günümüzde ABD’de kullanılan hidrojenin yaklaşık olarak %95’i bu yöntemle üretilmektedir [14].

2.2.2. Elektroliz Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

Elektroliz doğru akım kullanılarak suyu yapı taşları olan hidrojen ve oksijene ayrıştırma işlemidir. En basit hidrojen üretim yöntemidir. Bir elektroliz hücresi iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, sıvı bir elektrolitten oluşmaktadır. Elektroliz ile su moleküllerindeki hidrojen ve oksijen atomları arasındaki kimyasal bağ kırılır. Oluşan pozitif yüklü hidrojen iyonu negatif elektrotta toplanır, negatif yüklü oksijen ise pozitif elektrota doğru hareket eder. Elektrik direnci oldukça yüksek (100 ohm/cm) olan saf suyun ya sıcaklığı 700–1000 °C’ye çıkarılmalı veya içine tuz gibi iletkenliği arttırıcı maddeler eklenmelidir. Suyun iletkenliğinin artmasıyla elektrolizin de verimliliği artar. Suyun, 25 °C sıcaklık ve 1 atm

basınçta elektrolizi için 1.24 V gerilim gereklidir. Bir mol suyun elektrolizi için gerekli minimum enerji miktarı 65.3 Wh olup 1 m³ hidrojen üretimi için ise gerekli minimum enerji miktarı 4.8 kWh'tır.

2.2.3. Buhar Elektrolizi Yöntemiyle Hidrojen Üretimi

Elektroliz yönteminin bir çeşididir. Bu yöntemde, suyun elektrolizi için gerekli olan enerjinin bir kısmının sisteme ısı olarak verilmesiyle sistemin verimi yükseltilmiş olur. Su moleküllerindeki hidrojen ve oksijen 2500 °C sıcaklıkta serbest hale geçer. Bu yöntemde karşılaşılan en büyük problem ise reaksiyonun tersinir olmasıdır. Hidrojen üretimi bu yöntemde bir değil de birkaç basamakta gerçekleştirilir.

2.2.4. Hidrojen Sülfür'den Hidrojen Üretimi

Hidrojen sülfür (H₂S) bileşiği önemli bir hidrojen rezervidir ve Karadeniz'in dip sularında yüksek miktarda bulunmaktadır. 150 metre derinlikten itibaren bulunmaya başlayan hidrojen sülfür derinlikle doğru orantılı olarak artış gösterir. 1000 metre derinlikte 8 mL/L deniz suyu, 2000 metrede 8.5 mL/L deniz suyu ve tabana yakın kısımlarda 13.5 mL/L deniz suyu oranlarına sahip olan Karadeniz'in toplamda 4857 milyar ton hidrojen sülfür içerdiği tahmin edilmektedir. 1500–2000 metre derinlikleri arası toplam hidrojen potansiyelinin en yüksek olduğu tabakadır. Hidrojenin hidrojen sülfürden ayrıştırılması da elektroliz yöntemiyle gerçekleştirilir ve kullanılan enerji suya göre 3.235 kat daha azdır [15].

2.2.5. Güneş Enerjisinden Hidrojen Üretimi

Hidrojenin güneş enerjisi kullanılarak üretilmesi, hem çevre yönünden hem de ekonomik yönden büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Güneş-hidrojen sistemi son derece temiz ve güvenli bir enerji üretim yoludur.

Güneş enerjisinden, ısı (termal) ve fotonsal olarak iki şekilde yararlanılır. Işık fotonları kullanılarak hidrojen elde etmek için fotokimyasal sistemler, güneş pili sistemleri veya foto biyolojik sistemlerden biri kullanılır [16].

2.2.6. Fotokimyasal Sistemler

Bu yöntemde suyun elektrolizi için doğrudan güneş enerjisinin morötesi bölgesi kullanıldığından yüksek sıcaklık ve elektriğe ihtiyaç duyulmamaktadır. Hidrojen üretmek için birisi katalizör olarak çözünebilir metal bileşikleri kullanan diğeri yarı iletkenlerden faydalanan iki elektrokimyasal sistem kullanılır. Fotosentez olayının taklit edildiği bu yöntemde su moleküllerinin parçalanma işlemi çözünebilir metal bileşiğinin çözülmesi sırasında bileşiğin güneş enerjisini soğurup bir elektrik şarjı oluşturması ile sağlanır. Diğer yöntemde ise yarı iletken elektrotlar bu işlemi gerçekleştirir. Herhangi bir hareketli aksam veya cihaz kullanılmadığından diğer yöntemlere göre maliyeti düşük ve verimi yüksektir.

2.2.7. Güneş Pili Sistemleri

Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve birden çok fotovoltaiik hücreden meydana gelen yarı iletken panellerden oluşur. Bu sistemlerde hidrojenin güneş enerjisi ile üretiminin sağlanabilmesi için ilk olarak güneş pilleri ile doğru akım üretilir ve daha sonra bu doğru akım ile suyun elektrolizi gerçekleştirilir. Elde edilen oksijen ve hidrojen ayrı ayrı depolanabilir. Aslında bir batarya yardımıyla depolanabilecek olan elektrik enerjisi bu yöntemle daha sonra tekrar elektriğe dönüştürülmek üzere hidrojen olarak depolanmış olur. Dünyanın 2/3'nün sularla kaplı olduğu ve her gün dünya üzerine düşen güneş enerjisinin bir yılda kullanılan enerjiden daha fazla olduğu göz önünde bulundurulursa, ortaya çıkan enerji potansiyelin boyutu kayda değerdir.

2.2.8. Foto Biyolojik Sistemler

Fotosentetik organizmalar, güneş enerjisini çok büyük miktarda depolayabilen mekanizmalara sahiptirler. Fotosentetik sistemler karbondioksiti karbonhidratlara indirger, ama doğrudan hidrojen üretmezler. Bu nedenle foto fermentasyon sonunda uygun organik bileşikler ortama verildiğinde ve oksijensiz ortamda büyütüldüklerinde fotosentetik bakteriler, hidrojen üretebilmektedirler. Yeşil alg ve *cyanor-bakteria* gibi alglerin hidrojen üretebilen en verimli foto biyolojik sistemler olduğu anlaşılmış ve uygun şartlarda yeşil alglerin % 10 verimle hidrojen ürettiği saptanmıştır [16].

2.3. Hidrojenin Taşınması

Hidrojen gazı borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak iletilebilirler. İlerleyen yıllarda doğal gaz için kullanılan yeraltı boru dağıtım ağı az bir değişiklikle hidrojen için de kullanılabilir. Bunun için gerekli cihazların değiştirilmesi ve basıncın artırılması yeterli olacaktır. Hidrojen ayrıca basınçlı gaz olarak veya sıvılaştırılarak da taşınabilir.

Texas'da petrol sanayi tarafından kullanılan 80 km'lik ve Almanya'da 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün Ruhr havzasında hidrojen taşımaya devam eden 204 km'lik boru hatları hidrojenin boru ile taşınma uygulamasının örnekleridir. Prototip hidrojenli araçlar da ise hidrojen, yüksek basınçlı çelik tüpler veya son yıllarda geliştirilen metal hidrür tüplerde depolanabilmektedir [17].

2.4. Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin en önemli özelliklerinden biri de depolanabilmesidir. Hem sabit hem de taşınabilir uygulamalar için hidrojen etkin ve güvenilir olarak depolanabilmelidir. Taşınabilir uygulamalar için depolama ünitesinin ayrıca hafifliği de önemlidir. Hidrojen; tanklarda gaz veya sıvı olarak saf halde, fiziksel olarak nanotüplerde ve kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir. Hidrür şeklinde depolama; katı halde metallerde ve alanatlarda olabileceği gibi, sodyum bor bileşiğinde olduğu gibi sıvı halde de olabilmektedir [18].

Orta ve küçük ölçekte sıvılaştırılmış hidrojenin yüksek basınç altında çelik tüpler içinde tutulması depolama için en çok kullanılan yöntemdir ama büyük ölçekli depolama için pahalı bir yöntemdir. Bu probleme çözüm olarak uygun şartlarda sıvı hidrojen düşük sıcaklıktaki tanklarda saklanabilir. Uzay programlarında, roket yakıtı olarak sürekli şekilde kullanılan sıvı hidrojen bu yöntemle depolanmaktadır. Dünyadaki en büyük sıvı hidrojen tankı Kennedy Uzay Merkezinde olup 3400 m³ sıvı hidrojen alabilmektedir ki yakıt olarak değeri 29 MJ veya 8 milyon kWh'e karşılık gelmektedir.

Metal hidrürler hidrojen depolamak için çok uygun bir yöntem olmasına karşın, ağırlıkları ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Son yıllarda alüminyum ve bor içeren kompleks hidrürler yüksek depolama kapasiteleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Çeşitli firmalar tarafından 30W a kadar yakıt pillerini sürebilecek küçük boyutlu metal hidrür hidrojen tüpler

ticari olarak üretilmektedir. Bu tüpler uygun elektroliz  nitesi veya yüksek basıncılı tüpler yardımıyla tekrar tekrar doldurulup kullanılabilir. Bor içeren kompleks hidrürler ise sıvı koşullarda kullanılması nedeni ile de önem taşımaktadır. Sodyum bor hidrürün (NaBH_4) esas alındığı sistemler katı halde ağırlıkça %10.5 hidrojen içermektedir. Sodyum bor hidrür, sodyum metaborata dönüşürken hidrojen açığa çıkarır. Depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesi ve geri alımın katalizör yardımı ile kolaylıkla kontrol edilebilmesi sodyum bor hidr rde hidrojen depolamanın en önemli avantajıdır. Oluşan metaboratın tekrar NaBH_4 d n   t r lmesi bu yöntemin en önemli problemidir.

Hidrojenin dağıtım sisteminde depolanması gaz şekilde de olabilir. Hidrojenin diğer gazlara göre sızma özelliği daha çok olmasına karşın doğal gazın tükendiği yeraltı ma aralarında ya da petrol  bitmiş petrol kuyularında depolanmasında sızıntı problemi oluşmamaktadır. Şehir gazının (hidrojen içeren karışım) mağarada başarı ile depolandığı Fransa bu depolama yöntemine başarılı bir örnek olarak gösterilebilir. Bu yöntemde gazın mağara içerisine ve sonra da ma aradan dışarıya pompalanması için kullanılan enerji önem taşımaktadır [19].

2.5. Hidrojen Kullanımında Güvenlik

Diğer yakıtlardan daha farklı güvenlik donanımı ve prosedürü gerektirse de hidrojen bu yakıtlardan daha tehlikeli değildir. Günümüzde petrol ve kimya endüstrisinde veya başka yerlerde hidrojen güvenle kullanılmaktadır. Hidrojenin güvenlik karakteri fiziksel özelliklerinden dolayı diğer yakıtlardan farklıdır. Hidrojenin yoğunluğunun havanın yo unlu undan düşük olması sebebiyle sızıntı durumunda yer seviyesinde birikmeyip yükselerek, dağılır. Bu nedenle iyi bir havalandırma sistemi ile güvenlik artırılabilir. Düşük yoğunluklu olması düşük hacimsel enerji yo unlu una sahip olması anlamına da gelir ki nedenle belirli bir hacimde patlayan diğer yakıtlardan daha az enerji açığa çıkacaktır. Ayrıca hidrojen gazının molekül kütlesinin düşük olması nedeniyle hareketi daha hızlıdır ve diğer yakıtlardan daha hızlı yayılır ve böylece tehlike seviyesi de daha azalmış olur. Hidrojenin patlama yapması için benzin veya doğal gaz ile karşılaştırıldığında, havada daha yüksek derişimde bulunması gerekir. Yakıtlar içerisinde hidrojen birim depolanan enerji başına en düşük patlama enerjisine sahiptir. Belirli bir hacimdeki hidrojen aynı hacimdeki benzin buharından 22 kat daha az patlama enerjisine sahiptir.

Hidrojen sızıntısını, renksiz ve kokusuz olduğu için, benzin veya diğer yakıtlara göre fark etmek daha zordur. Öyle ki yanan hidrojenin alevini fark etmek bile pek kolay değildir. Bu nedenle sızıntı belirleme teknikleri geliştirilmiştir.

Yakıtların güvenilirliğini Tablo 2.1’de mukayese edilmiştir. Her bir yakıt türüne toksit eleman ve yanma zararı karakteristiklerini derecelendirmek için 1’den 3’e kadar, 1. en çok güvenli, 3. en az güvenli olduğunu gösterecek şekilde değerler verilmiştir. Bu değerlerin her bir yakıt için toplanması ile yakıtların güvenlik derecesinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen en düşük değer en güvenli olanı belirtmekle birlikte baz alınarak diğerlerinin güvenlik faktörleri de belirlenmiştir. Sonuç olarak hidrojen en güvenli yakıt olurken metan ona yakın bir güvenliğe sahip olup benzin ise tehlikeli yakıt olmuştur.

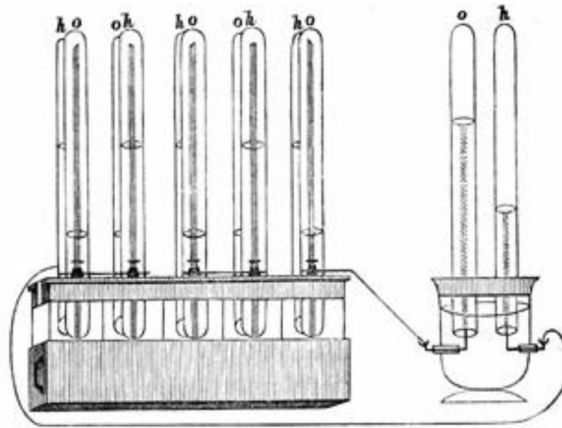
Tablo 2.1. Yakıtların güvenilirliğinin kıyaslanması [20].

Yakıt Güvenirliği			
Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yakıtın Zehirliliği	3	2	1
Yanma Zehirliliği	3	2	1
Yoğunluk	3	2	1
Difüzyon Katsayısı	3	2	1
Özgül Isı	3	2	1
Tutuşma Limiti	1	2	3
Tutuşma Enerjisi	2	1	3
Tutuşma Sıcaklığı	3	2	1
Yanma Sıcaklığı	3	1	2
Patlama Enerjisi	3	2	1
Yanma Yayılımı	3	2	1
Toplam	30	20	16
Güvenlik faktörü	0.53	0.80	1.00

3. YAKIT PİLLERİ

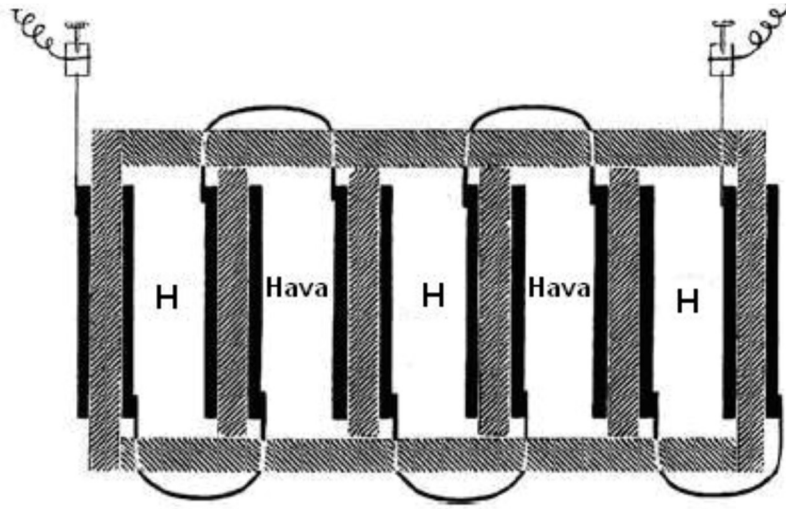
3.1. Yakıt Pillerinin Tarihçesi

Yakıt pilleri ilk olarak 19. yüzyıl sonlarında geliştirilmiş olup pratikte ise yakıt pili ilk olarak Apollo uzay programı için 1960'larda kullanılmıştır. Günümüz uzay teknolojilerinde elektriğin üretimi için yakıt pilleri kullanılmaktadır. Yakıt hücrelerinin temel çalışma prensibi olarak tanımlanabilecek suyun elektrolizinin tersine çevrilmesiyle hidrojen ve oksijenden elektrik enerjisinin üretimi 1838 yılında William Robert Grove tarafından başarılmıştır. Çinko sülfat içerisinde çinko elektrot ve nitrik asit içerisinde platin elektrot daldırılarak oluşturulmuş olan “Grove hücresi” yaklaşık 1.8 V civarında gerilim ve 12 A akım üretmiştir. Grove, elektrotlardan biri sülfürik asit kabına diğeri oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrotundan sabit bir akım akacağını keşfetmiştir. Kapların sızdırmazlığı sağlanarak açığa çıkan su ve gazlar biriktirilebilmiştir ve böylece akım aktıkça açığa çıkan su miktarının da arttığını gözlemleyebilmiştir. İngiliz bilim adamları Willam Nicolas ve Anthoney Carlisle 1800 yılında her ne kadar elektrik yardımıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ortaya koymuşlarsa da iki gazın birleştirip su ve elektrik üretilebileceğini keşfedememişlerdir. Grove, birkaç elektrotu seri bağlayıp bileşimini ayarlamak suretiyle suyun ayrıştırılma hızını ve miktarını etkileyebileceğini gözlemlemiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk yakıt pili olarak tanımlayabileceğimiz Şekil 3.1’de gösterilen aygıtla başarmıştır [21].



Şekil 3.1. William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi

Grove'den sonra yakıt pili geliştirmek için birçok bilim adamı gayret sarf etmiş ve Lord Rayleigh tarafından 1882 yılında platin elektrotların verimini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Katı elektrot, gaz ve sıvı arasındaki etkileşimi arttırabilmek için temas yüzeyini arttırmış ayrıca hidrojenin yanı sıra kömür gazı da kullanmıştır. Grove'un çalışmaları 1889'da kimyager Ludwing Mond ve Carl Langer tarafından tekrarlanarak; hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazı, oksijen kaynağı olarak hava kullanılarak 1.5 W güç üreten ve %50 verimle çalışan bir yakıt pili geliştirilmiştir. Yakıt pilinden 1.47 V gerilim elde edilmesi beklenmiş ancak bu değer 0.97 V olarak ölçülmüştür. şekil 3.2'de Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili görülmektedir.



şekil 3.2. Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili

1894'de Wilhelm Oswalt kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır. 1932 yılına gelindiğinde ise Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt pilini geliştirmeyi, hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit kullanarak başarmıştır. Bu projenin önemini kavrayan Partt&Whitney şirketi bu projeye lisans vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır. Aldıkları bu destekle 1959'da Bacon ve arkadaşları 5 kW güce sahip bir yakıt pili yapmışlardır. Aynı yılın sonunda ise Harry Karl Ihring 15 kW'lık yakıt piliyle çalışan bir traktör tasarlamıştır ve bu tasarım günümüzde yakıt piliyle çalışan makinelerin ilham kaynağı olmuştur [21].

1950 ve 1960'lı yıllarda NASA yakıt hücresi teknolojisine ciddi yatırımlar yapmıştır. Yakıt hücrelerinin uzay uygulamaları için tercih edilmelerinde, hafıf olmaları ve yan ürün

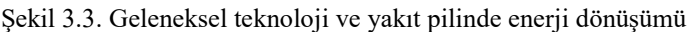
olarak su üretmeleri büyük rol oynamıştır. Bunun yanında yakıt hücrelerinin kullanılması; yüksek verim ve enerji yoğunluğu, düşük gürültü ve titreme gibi avantajlar sağlamaktadır. İlk olarak General Elektrik tarafından üretilen proton değişim zarlı yakıt hücresi Gemini uzay aracında kullanılmıştır.

General Motor 1970’li yıllarda “Elektrovan” adlı yakıt hücresiyle çalışan bir araç geliştirmiştir. 1970’li yıllarda devlet desteği ile Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarları yakıt hücresi araştırmaları yapılmak üzere kurulmuştur. Son yıllarda, büyük otomobil üreticileri yakıt hücreli otomobiller için yine bazı uluslararası firmalar da diğer uygulamalarda kullanılmak üzere yakıt hücresi teknolojileri geliştirmeye çalışmaktadırlar. Yakın gelecekte yakıt hücrelerinin geleneksel güç kaynaklarının yerinin alması beklenmekte ve cep telefonlarında kullanılabilecek mikro yakıt hücrelerinden her türlü taşıtta kullanılabilecek boyutta yığın yakıt hücrelerine kadar geniş bir yelpazede farklı yakıtlar kullanan değişik teknolojilere sahip yakıt pilleri geliştirilmektedir.

3.2. Yakıt Pili Özelliikleri

Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yapılardır. Yakıt pili, yakıtların yakılması yerine, yakıt ile oksijenin elektro-kimyasal reaksiyonu sonucunda enerji üretmesini sağlayan ve genellikle yakıt olarak hidrojen kullanan bir tür batarya çeşididir. Yakıt pillerinin enerji dönüşüm cihazı olarak kullanılmalarının getirdiği birçok avantaj vardır ki bunların en önemli iki tanesi yüksek verime sahip olmaları ve çevresel zararlara sebebiyet vermemeleridir.

Yakıt pilleri, geleneksel yöntemlerin aksine Carnot çevriminin sınırlarından bağımsız olarak doğrudan elektrik eldesi sağlar. Klasik çevrimde, yakıtın sahip olduğu kimyasal enerji yanma reaksiyonu ile ısıya, elde edilen bu ısı da Carnot çevrimi ile mekanik enerjiye dönüştürülerek elektrik üretimi için bir jeneratörün tahrik edilmesi sağlanmaktadır. Bu dönüşüm sırasında hem Carnot çevrimi sınırı aşılammakta, hem de mekanik enerji jeneratörle elektriğe dönüştürülmesi işleminde yeni kayıplara sebep olmakta ve böylece sistemin veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Yakıt pillerinde ise Şekil 3.3’te görüldüğü gibi kimyasal enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [22].



Avantajları;

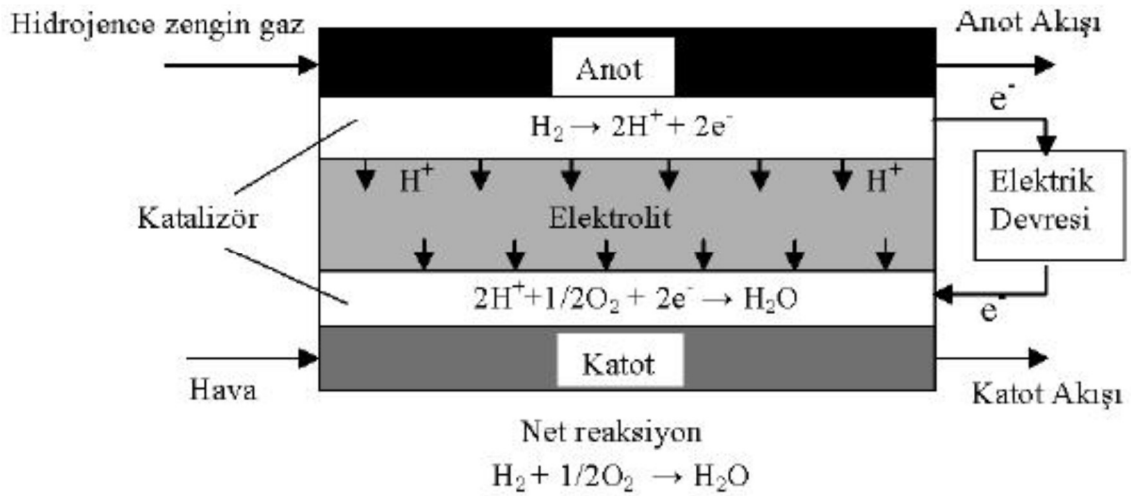
- ### Dezavantajları;

- Maliyetlerinin yüksek oluşu,
- Yüksek sıcaklıkta çalışan türlerinin güvenilirliğinin tam olarak sağlanamaması,

- Güç üretim endüstrisi içerisinde yeni bir teknoloji olması ve kabul görmesinin zaman gerektirmesi,
- Bazı yakıt türleri için (hidrojen, metanol vb.) bir dağıtım altyapısının bulunmaması.

3.3. Yakıt Pilleri Çalışma Prensibi

Yakıt pillerinin çalışma prensibi bataryalara, kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe çevirme yönüyle benzerdir. Aralarındaki en büyük fark ise bataryalarda, elde edilebilecek elektrik enerjisi kimyasal enerji olarak depolanmış olup bu miktar ile sınırlıdır, yakıt pillerinde ise yakıt sağlandığı sürece elektrik üretimine devam edilebilir. Yakıt pilinde saf hidrojen yerine, hidrojen içeren hidrokarbonlar da kullanılabilir. Fakat hem verimi düşürdüğü hem de zararlı gaz emisyonuna neden olduğu için tercih edilmemektedir. Şekil 3.4’de yakıt pili çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.4. Yakıt pilinin çalışma prensibi

Yakıt pilinde anottaki hidrojenin katalitik oksidasyonu ve katottaki oksijenin indirgenmesi elektrotlar arasında potansiyel fark yaratır. Eğer elektrotlar arasında yalıtım sağlayan elektrolit, iyonik kütle ve şarj aktarımına izin verirse, bu potansiyel farkı dış bir devrede kullanılabilir. Sonuçta ürün olarak su elde edilir ve bu reaksiyonda kimyasal enerji kutuplaşma ile elektrik ve direnç kayıpları dolayısı ile de ısı enerjisine dönüşür. Yakıt pilinin iki elektrotu arasına bağlanan iletkenlerle, oluşan DC karakterli elektrik kullanılmak üzere yakıt pilinden alınır. Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen gazı, doğal gaz, metanol veya

etanol; oksidan olarak oksijen gazı veya hava kullanılabilir. Eğer yakıt olarak saf hidrojen ve oksidan olarak oksijen kullanılırsa yan ürün olarak saf su elde edilir. Yakıt pillerinin hareketli parçalarının olmaması, gürültü ve titreşim seviyesinin düşük olmasına, kullanım ömürlerinin uzamasına, güvenilirliğinin artmasına ve ürün maliyetinin azalmasına olanak sağlar [21].

3.4. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri çalışma sıcaklığı, elektrolit tipi veya yakıt tipine göre adlandırılırlar. 150 °C'den düşük çalışma sıcaklığına sahip yakıt piline, "düşük sıcaklık yakıt pili", 500–1000 °C arasında olana ise "yüksek sıcaklık yakıt pili" olarak adlandırılmaktadır. Düşük sıcaklık yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen, katalizör olarak platin gibi iyi ve pahalı malzemeler gerekirken, yüksek sıcaklık yakıt pillerinde hidrokarbon yakıtlar ve daha ucuz katalizörler kullanabilmektedir. Yakıt hücrelerinin çalışma prensipleri benzer olsa da, çalışma koşulları ve uygulama alanları farklılık gösterir. Yakıt pilleri kullanılan elektrolit çeşidine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılır.

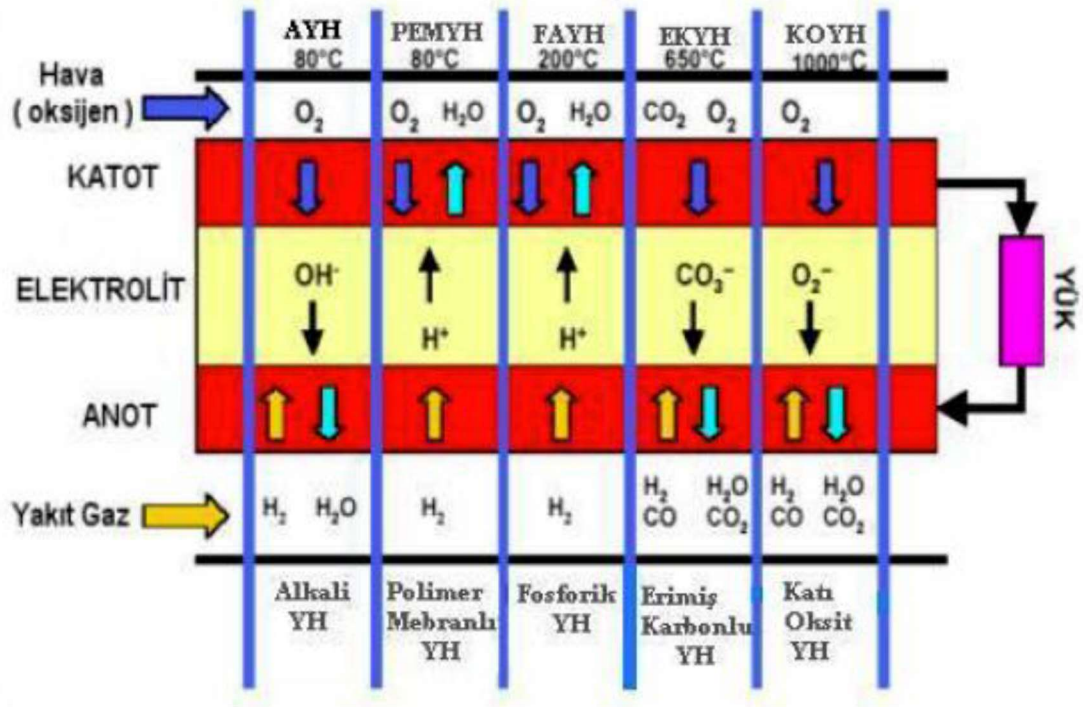
- Proton değişim zarlı yakıt pilleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC),
- Doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC),
- Alkali yakıt pilleri (Alkaline Fuel Cells, AFC),
- Fosforik asitli yakıt pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC),
- Erimiş karbonat yakıt pilleri (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC),
- Katı oksit yakıt pilleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC).

Yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı ve çalışma ömürleri, pilin yapısında kullanılan malzemelerin fizikokimyasal ve termomekaniksel özelliklerine bağlıdır. Düşük sıcaklık yakıt pillerinde kimyasal reaksiyon çok yavaş gerçekleştiğinden reaksiyonu hızlandırmak ve pil verimini arttırmak için pahalı bir element olan platin katalizör olarak kullanılır. Bu da pil maliyetinin artmasına neden olur. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde çalışma sıcaklığı reaksiyonu hızlandırmak için yeterli olduğundan bu olumsuzluk kendiliğinden giderilmiş olur. Bu nedenle de yüksek sıcaklık yakıt pillerinde katalizör olarak daha ucuz malzemeler kullanılabilir. Yakıt pillerinin türleri, işletim sıcaklıkları ve kullanıldıkları önemli uygulamalar Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Yakıt pillerinin türleri, işletim sıcaklıkları ve önemli uygulamalar [23].

Yakıt pili	Elektrolit	İşletim sıcaklığı [°C]	Güç verimi [%]	Sistem verimi [%]	Güç yoğunluğu [mW/cm ²]	Önemli uygulamaları
Alkali (AYP)	Potasyum hidroksit	50-100	40-50	26-31	100-200	Uzay, standby gücü
Proton Değişim Zarlı (PEMFC)	Katı polimer	50-125	40-50	32-40	350	Uzay, taşıma, standby gücü
Fosforik asit (FAYP)	Ortofosforik asit	180-210	40-45	36-45	100	Kojenerasyon, sabit güç, taşıma
Erimiş karbonat (EKYP)	Lityum-potasyum karbonat	630-650	50-60	43-55	100	Kojenerasyon, sabit güç
Katı oksitli (KOYP)	Kararlı hale getirilmiş zirkon	900-1000	50-60	43-55	240	Kojenerasyon, sabit güç
Doğrudan metanol (DMYP)	Sülfürik asit veya polimer	50-120	30-40	40	40	Taşıma, bilgisayar, cep telefonu

Şekil 3.5’de farklı yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları, yakıt çeşitleri, anot ve katottaki iyonlar ve hareket yönleri şematize edilmiştir. Tablo 3.2’de ise meydana gelen reaksiyonlar gösterilmiştir.



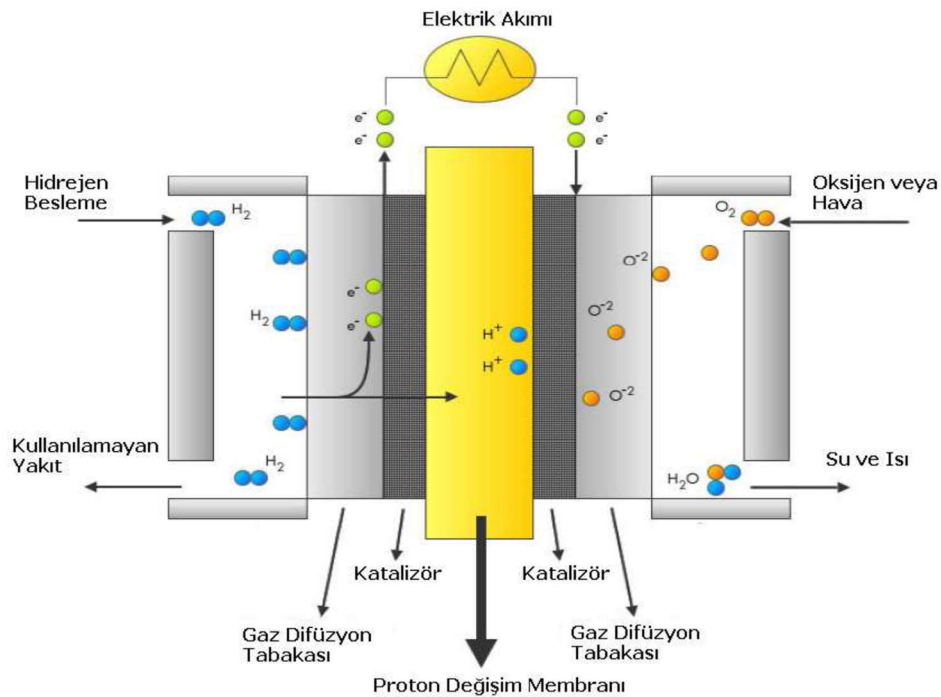
Şekil 3.5. Elektrolitlerine göre ayrılan yakıt pillerinde meydana gelen reaksiyonlar [22].

Tablo 3.2. Yakıt pil türüne bağlı olarak gerçekleşen reaksiyonlar [22].

Yakıt pili	Anot reaksiyonu	Katot reaksiyonu
PEMYP	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
DMYP	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
AYP	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$
FAYP	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
EKYP	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
KOYP	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

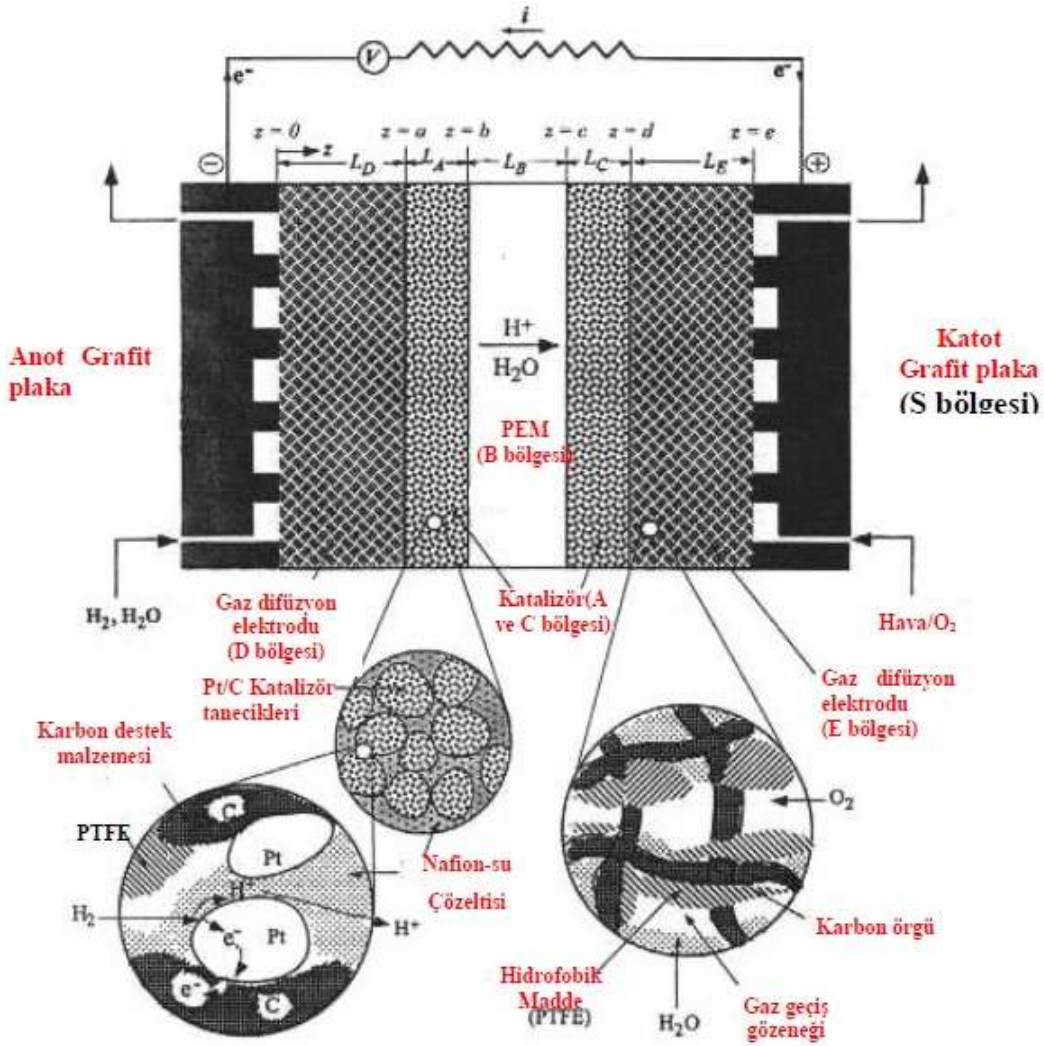
3.4.1. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (PEMFC)

Elektrolitinde polimer madde kullanılan bu pillere “polimer elektrolit yakıt pili” denilmektedir. Yakıt olarak hidrojen kullanılan bu yakıt pillerinde oksitleyici olarak da havadaki oksijen kullanılır. PEM yakıt pillerinde ince, geçirgen bir karbon yapılı polimer elektrolit kullanılır. Elektrotu oluşturan katalizör ve karbon destekleyici madde, maksimum gaz ve su geçişini sağlamak için çok incedir. Polimer zar küçük ve hafif olup geçirgen zar da denilmektedir ve proton değişim zarlı yakıt pillerinin en önemli elemanı proton iletim özelliğine sahip polimer zardır. Bu tip yakıt pilleri oda sıcaklığı ile 105 °C arasında sıcaklıklarda, atmosfer basıncı veya daha yüksek basınçlarda çalışabilir [24]. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi anot tarafına verilen hidrojen atomları burada iyonize olurlar. Pozitif yüklü protonlar membrandan (polimer zar) geçerek katoda yönelirler. Anottan katoda harici bir yoldan ilerleyen elektronlar bir elektrik akımı oluştururlar. Katotta bir araya gelen elektronlar, hidrojen protonları ve havadan alınan oksijen reaksiyona girerek su meydana getirirler. Bu işlem esnasında membran elektron ve diğer gazların katoda direk geçişini engellemelidir aksi durumda yakıt pili düzgün çalışmamış olur. Anot ve katot elektrotları bir kenarından katalizör görevi yapan ince platin tabakası ile örtülmüştür böylece ortamda kimyasal reaksiyonlar için yeterli sıcaklık olmadan da çalışılabilir.



Şekil 3.6. Proton değişim zarlı yakıt pili

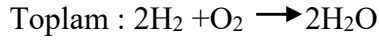
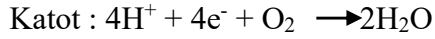
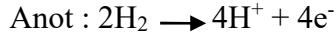
Proton değişim zarlı yakıt pillerinin çalışması esnasından katot, anot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir. Toplam reaksiyonda görüldüğü gibi çıkış ürünü sadece sudur. Proton değişim zarlı yakıt pillerinin çalışmasını daha ayrıntılı olarak incelenmesi şekil 3.7’de gösterilmiştir.



şekil 3.7. Proton değişim zarlı yakıt pillerinin çalışma prensibi [25].

Membran-elektrot birimi iki bipolar plaka (akım kollektörleri) arasında bulunmaktadır. Bu plakalar girdi gazları elektroda dağıtacak bir yapıya ve üretilen akımı bitişik hücreye geçirmeye yetecek kadar elektrik iletkenliğine sahiptir. Gaz difüzyon tabakaları, şekil 3.7’de gösterilen D ve E bölgesi, elektronları toplar ve sıvı su ile reaksiyon gazlarının geçişine olanak tanır.

Hücrede gerçekleşen reaksiyonlar ise aşağıda verilmektedir:



Membranın elektrolit olarak birinci görevi anot ile katot arasındaki iyonik iletişimi sağlamak, ikinci görevi ise reaksiyona giren iki birbirinden ayrı tutmaktır. Su yönetimi ve membranın proton, su aktarım özellikleri yakıt pilinin verimini etkileyen önemli kriterlerdir. Membranın kuruması proton iletkenliğini düşürmekte, fazla su ise gaz difüzyon tabakalarının su ile dolmasına ve hidrojen ile oksijenin katalizör tabakasına taşınmasına mani olmaktadır. Bu da yakıt pil performansını düşürmektedir. Ayrıca reaksiyon sonucunda açığa çıkan ısının uzaklaştırılıp modül içindeki sıcaklığın sabit tutulması da önemlidir. Çalışmalarda genellikle kullanılan elektrolitler perfluorokarbon esaslı iyon değiştirici membranlardır. Çalışmalarda yaygın olarak kullanılan üç çeşit membran bulunmaktadır. Bu membran çeşitleri Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Membranlar ve özellikleri [25].

Membran	Eşdeğer ağırlık, [g/molSO ₃ ⁻]	Kuru kalınlık, [μm]	Su içeriği, [%]	İletkenlik, [Ω ⁻¹ cm ⁻¹]
XUS 13204.10*	800	125	54	0.114
Aciplex-S**	1 000	120	43	0.108
Nafion-115***	1 100	100	34	0.059

*Dow Chemical Corp.; ** Asahi Chem Ind. Co.; *** DuPont.

Proton değişim zarlı yakıt pillerinin en önemli elemanı proton iletim özelliğine sahip polimer zardır bu nedenle polimer zarların geliştirilmesi yakıt hücreleriyle ilgili yapılan çalışmaların en başında gelmektedir. Polimer zarların yüksek verimlilikte çalışabilmesi için su ile tamamen doyurulmuş olmaları gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda zarın tam doygun olduğu zaman yüksek iyonik iletkenliğe ulaşıldığı görülmüştür [26].

Membranın yüksek verimliliğe ulaşması için istenilen özellikler aşağıda sıralandığı gibidir [27];

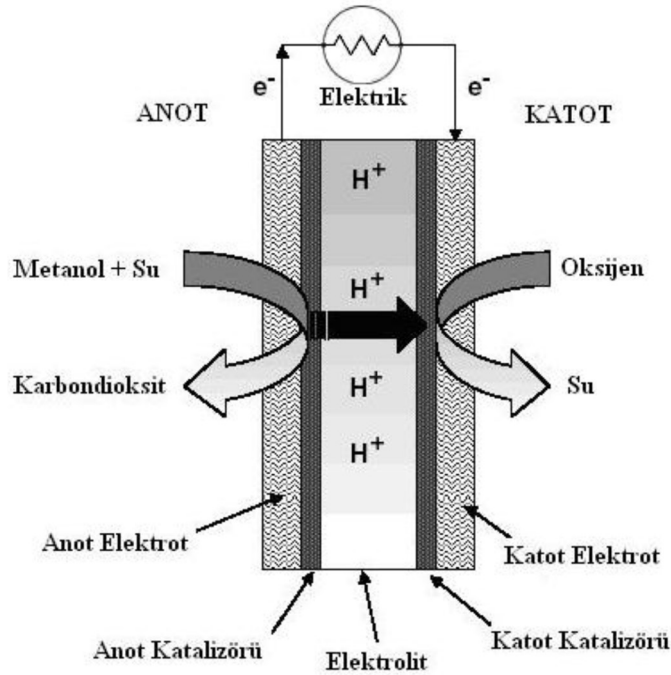
- İyi film özelliği göstermesi,
- Elektrotlara iyi temas edebilmesi,
- Elektron iletkenliğinin olmaması,

- Yüksek proton iletkenliğine sahip olması
- Yakıt pili çalışma koşullarında yüksek oksidatif ve hidrolitik kararlılığa sahip olması,
- Gaz ya da sıvı yakıtları geçirmemesi,
- Yakıt pili çalışma koşullarında ısıl ve yapısal kararlılığa sahip olması,
- Çalışma koşulları altında kimyasal ve elektrokimyasal kararlılığa sahip olması,
- Nem kontrolü yapılabilir olması,
- Yaygın kullanılabilmesi için maliyetinin düşük olması.

Membranların ucuza mal edilmesi direkt olarak PEMFC'lerinin maliyetini düşürecek olup bu da kullanım potansiyelini artıracaktır. Ayrıca daha düşük dirence sahip daha ince membranlar da yakıt pillerinin güç yoğunluğunun arttırılmasını sağlayacaktır. Son yıllarda PEMYP'nin hem maliyetinde hem de performansında iyileşme sağlayacak çalışmalarda ciddi başarılar elde edilmiştir. Gelişmeler ticari pazarlar için güç uygulamalarının kabul edilebilir maliyetlerle başarılabileceği bir noktaya ulaşmıştır.

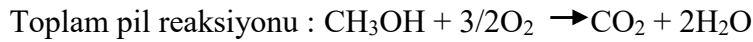
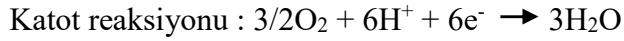
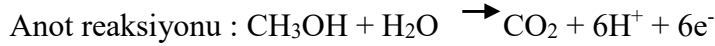
3.4.2. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)

Doğrudan metanol kullanan yakıt pili, özellikleri ve çalışma prensipleri itibariyle proton değişim zarlı yakıt piline benzemektedir. Tek farklılık pilde yakıt olarak saf hidrojen değil de hidrojen elde edilebilen metanol kullanmasıdır. Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak, proton değişim zarlı yakıt pilindeki polimer zar kullanılmaktadır. Ancak doğrudan metanol kullanılan bu tip pillerde hidrojen doğrudan sıvı metanolden elde edilmekte, böylece yakıt yakarak hidrojen elde etme ünitesine gerek kalmamaktadır. Yakıt pilinde teorik olarak gerçekleşmesi beklenen reaksiyonlar şu şekildedir; katot üzerinde oluşan su ile sisteme doğrudan beslenen metanol-su karışımı anot üzerinde elektrokimyasal bir reaksiyon meydana getirerek metanolün parçalanması sonucu protonlar, elektronlar ve karbondioksit meydana gelmektedir. Oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip polimer elektrolit zarından geçerek katoda hareket etmektedir ve katot üzerinde beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek suyu oluşturmaktadır (Şekil 3.8). Bu reaksiyonlar sonucu meydana gelen termodinamik potansiyeller, oluşturulan dış devre bağlantısıyla gerilim oluşmasını ve elektrik üretilmesini sağlanmaktadır [28].



Şekil 3.8. Doğrudan metanol kullanılan yakıt pili

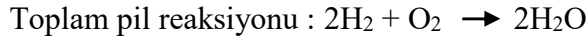
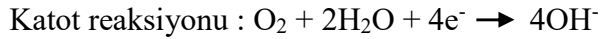
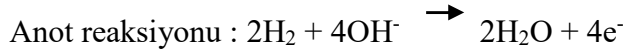
Doğrudan metanol kullanılan yakıt pilinin çalışması esnasında katot, anot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir.



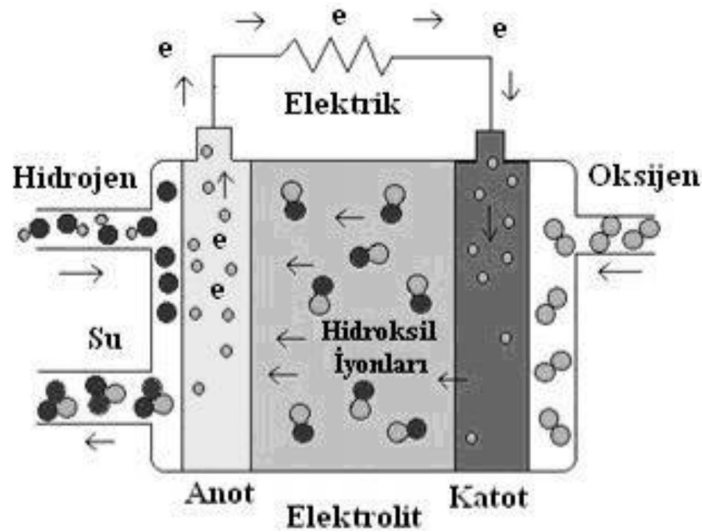
Toplam reaksiyonda görüldüğü gibi pil yan ürün olarak dışarıya karbondioksit ve su vermektedir. Bu pillerin verimleri % 40 civarındadır ve çalışma sıcaklıkları 50–100 °C arasındadır. Metanolün (CH₃OH) düşük sıcaklıkta karbondioksit ve hidrojene dönüşümü, PEM yakıt pillerinden farklı olarak, daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Platin katalizörün miktarındaki artış, fiyatta artışa neden olmakta ve bu özellik DMFC için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Sıvı yakıt kullanımına imkân sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olmaları ise önemli avantajlarıdır. Geliştirme aşamasında olan DMFC teknolojisi, gelecekte cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar ve taşınabilir güç kaynakları için potansiyel bir güç kaynağı olarak görülmekte ve bu tip yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar hızla devam etmektedir [29].

3.4.3. Alkali Yakıt Pili (AFC)

Bu tip yakıt hücrelerinde sulandırılmış sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) elektrolit olarak kullanılmaktadır. Yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak da oksijen veya hava kullanılmaktadır. Bu tip yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı 80 °C'dir. Çalışma basıncı normal atmosfer basıncıdır. Elektrotlar karbon ve nikel gibi metallere yapılmaktadır. Bu tipte yakıt pillerinde hidroksil iyonları (OH⁻) katottan anoda doğru ilerlerler. Anotta hidrojen gazı OH⁻ iyonlarıyla reaksiyona girer ve su oluşurken elektronlar da açığa çıkar. Anotta açığa çıkan bu elektronlar harici bir devreye elektrik enerjisi sağladıktan sonra katoda dönerler. Burada elektronlar oksijen ve suyla reaksiyon gösterir ve böylece elektrolit içinde çözünmüş daha çok hidroksil iyonu üretilir. Bu hidroksil iyonları elektrolit üzerinden difüzyon vasıtasıyla tekrar anoda aktarılır ve reaksiyon devam eder (Şekil 3.9). Yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



Kimyasal reaksiyonlarda da görüldüğü gibi yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığında katottan gelen hidroksil iyonları hidrojenle birleşip yan ürün olan saf suyu oluşturmaktadır. Alkali yakıt pilinde yan ürün olarak kirlenici çıkışı söz konusu değildir.

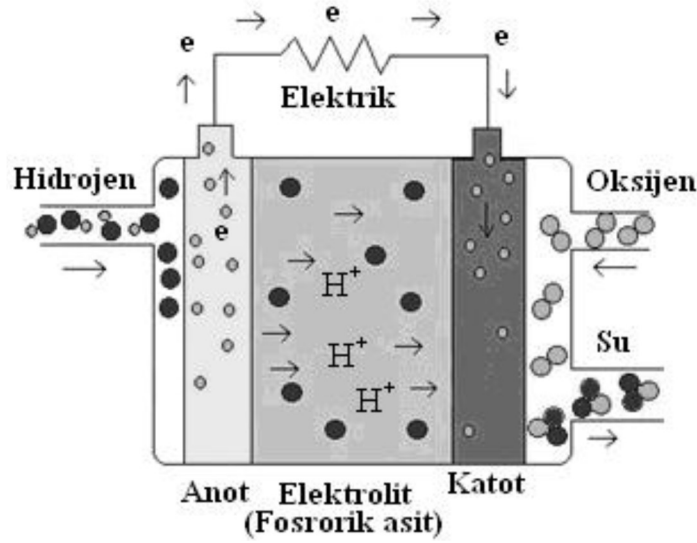


Şekil 3.9. Alkali yakıt pili

Alkali yakıt pillerinin verimi %70 civarındadır. Ürettikleri elektrik enerjisinin yanında kullanılabilir su da meydana getirdiklerinden uzay araçları için çok mantıklı seçim haline gelmişlerdir. Bu avantajlarının yanında, alkali yakıt pilleri çok saf halde hidrojene ihtiyaç duymaktadır. Aksi halde pil içerisinde istenmeyen kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Elektrolit olarak kullanılan potasyum hidroksit (KOH) bazik özellik içermektedir. Karbondioksit de bazik ortamda kimyasal reaksiyona girerek karbonatı oluşturduğundan dolayı yakıt ve oksitleyici olarak kullanılan hava içinde CO₂ olmamalıdır. Aksi durumda çok az miktardaki karbondioksit bile, KHO ile reaksiyona girerek potasyum karbonat (K₂CO₃) oluşur ve bu da elektrolitin yapısını değiştirdiğinden pil çalışmaz duruma gelir. Yakıt pili teknolojisinde bu olaya CO₂ zehirlenmesi denilir. Alkali yakıt pilleri çalışma ömürlerinin uzun olduğundan, uzay araçlarındaki uygulamalarda ve NASA'nın diğer uygulamalarında en eski ve en çok kullanılan yakıt pili çeşididir. Bunun yanı sıra elektrikli araçlarda ve denizaltılarda da kullanılmaktadır. AFC'ler yüksek güç yoğunluğu ve soğukta çalışabilmesinden dolayı ulaştırma sektöründeki uygulamalarda avantajları olması yanında, saf H₂ depolama ve teminindeki zorluklar, CO₂'e karşı çok hassas olmaları dezavantajlı yönlerini oluşturmaktadır. Kullanılan pahalı katalizörlerden, hidrojenin sıvılaştırılması ve sıkıştırılması için ekstra enerji tüketiminden ve saf hidrojenin pahalı olmasından dolayı pil maliyetini arttırmaktadır [30].

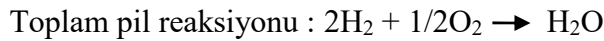
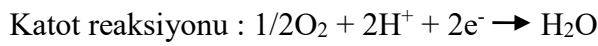
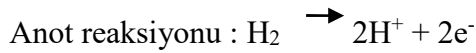
3.4.4. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)

Adından da anlaşıldığı gibi elektrolit olarak fosforik asit (H₃PO₄) kullanılmaktadır. Anot elektrotuna verilen yakıt proton ve elektronlarına ayrılır. Pozitif yüklü hidrojen iyonları elektrolitten geçerek anottan katoda ilerlerler. Anotta üretilen elektronlar ise harici bir yoldan devrelerini tamamlayarak elektrik enerjisi üretirler ve katoda dönerler. Burada elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijen su meydana gelmesini sağlarlar (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Fosforik asit yakıt pili

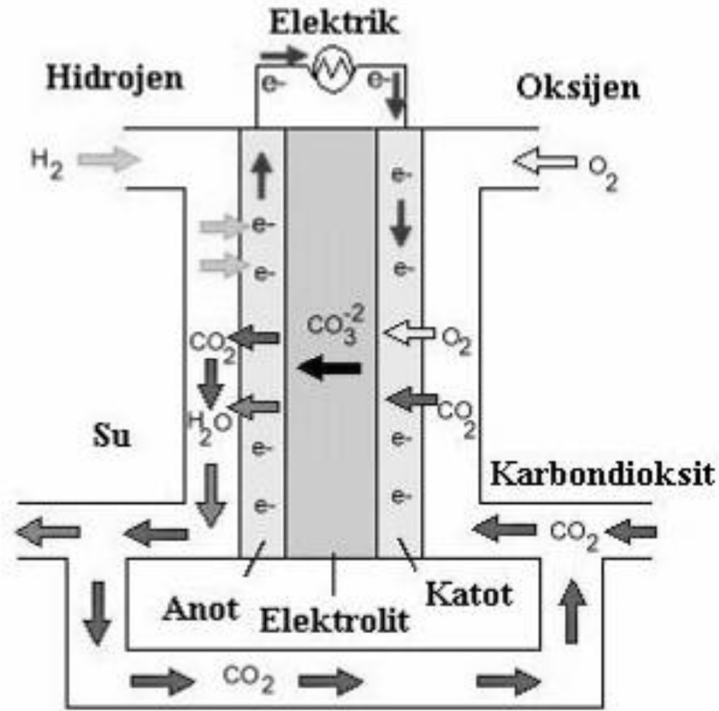
Pilde elektrolit olarak kullanılan fosforik asit kararlı bir asittir ve temel metallerle çok çabuk reaksiyona girer. Bunun sonucu olarak, sadece platin ve platin alaşımları katalizör olarak kullanılabilir. PAFC'lerin avantajı, doğal gaz veya kömür gazına dayanan yakıtların, elektrotu zehirlemeden kullanılabilmesidir. Bu hücreler karbondioksit içeren hava ile de çalışabilirler. Ancak platin zehirlenmesini önlemek için karbonmonoksit dönüştürülmeli veya tamamen kaldırılmalıdır. Fosforik asitli yakıt pilleri 150–200 °C çalışma sıcaklığında faaliyet gösterirler. Fosforik asitli yakıt pillerinin bir avantajı 200 °C de çalışırken bu yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı katalizörlerin karbonmonoksit ile zehirlenmesini azaltması ve % 1.5 oranında bir karbonmonoksit konsantrasyonuna izin vermeleridir. Bir başka avantajları ise fosforik asit elektrolitin suyun kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda da görevini yapabilesidir. Düşük sıcaklıklar fosforik asidin iletkenliğinin az olmasından dolayı tercih edilmez. Asidik ortamda meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [21].



Fosforik asitli yakıt pillerinin verimi % 40–50 civarındadır. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılırsa verim % 80'i bulabilir. Kojenerasyon kısaca, enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemden beraberce üretilmesidir. Bu tip pilleri 200 °C'lik çalışma sıcaklığıyla kojenerasyon için uygun yakıt pili tipidir. Fosforik asitli yakıt pillerinin ulaşım araçlarında kullanımı en uygun seçenek olarak gözükmemektedir [30].

3.4.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

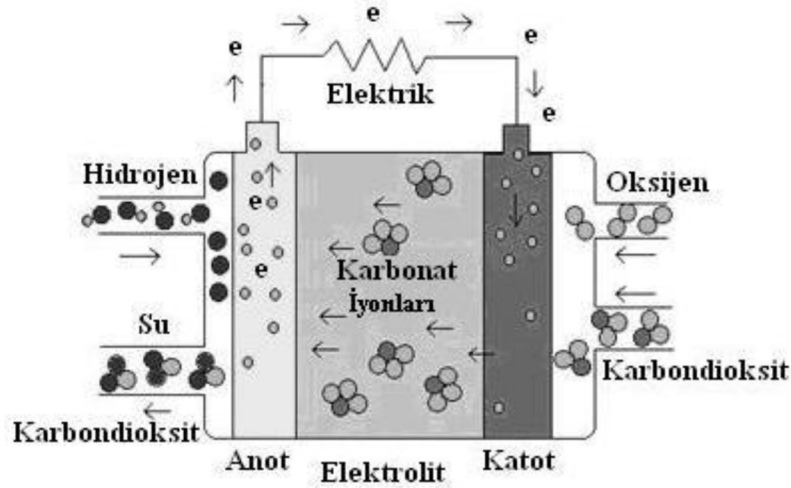
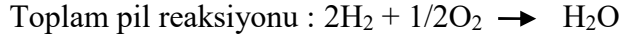
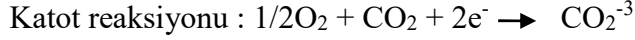
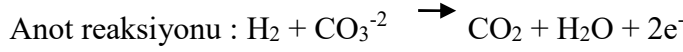
Erimiş karbonat yakıt pilleri diğer yakıt pillerinden çok farklı bir işletim sistemine sahiptir. Elektrolit olarak, poroz lityum-aliminyum matris içinde tutulan erimiş alkali potasyum lityum karbonat kullanılmaktadır. Bu elektrolit 650°C çalışma sıcaklığına sahiptir ve karbonat iyonları iletimi sağlamaktadır. MCFC katot tarafından oksijen ve karbondioksit gazı ile beslenir. Bu şekilde karbonat (CO_3^{2-}) oluşumunu sağlar ki iyonların iletimini sağlayan bu karbonat iyonudur. CO_3^{2-} iyonları elektrolit içinden anoda geçer ve burada hidrojenle reaksiyona girerek su, karbondioksit ve elektronları açığa çıkarır. Elektronlar harici bir devreyi izleyerek elektrik enerjisini meydana getirir ve katoda geri döner. Katotta havadan alınan oksijen ve anotta açığa çıkan karbondioksit elektronlarla reaksiyona girerek karbonat iyonları meydana getirir ve bu iyonlar daha önce boşalan elektroliti tekrar doldurur (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Erimiş karbonat yakıt pili (iç dönüşümlü)

Erimiş karbonat yakıt pilinde anotta meydana gelen karbondioksit gazı bir sistemle tekrar katot elektrotuna gönderiliyor ve geri çevrimle tekrar sisteme sokuluyor ise buna iç dönüşümlü (Şekil 3.11), eğer karbondioksit gazı direkt atmosfere veriliyor ise buna da dış

dönüşümlü (Şekil 3.12) yakıt pili denilmektedir [21]. Bu tip yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.12. Erimiş karbonat yakıt pili (dış dönüşümlü)

Yüksek sıcaklıkta çalışan erimiş karbonat yakıt pilleri, ihtiyaç duydukları hidrojeni dahili veya harici bir kaynaktan alabilir. Bu kaynak hidrojeni açığa çıkarmak için değişik yakıtlar kullanabilir. Düşük sıcaklıktaki erimiş karbonat yakıt pilleri ise hidrojeni daha çok kömür bazlı yakıtlardan elde ederler. Bu yüzden bunlar çevreye daha zararlı olurlar. Erimiş karbonat yakıt pilleri, platinden çok daha ucuz olan nikelden yapılmış katalizörlerle oldukça iyi performans verir. Ayrıca sıcaklığın çok yüksek olmasından dolayı pilde kullanılacak malzeme yüksek sıcaklığa dayanıklı olmalıdır. Anotta nikel, katotta ise nikel oksit elektrot kullanılabilir [21].

Erimiş karbonat yakıt pilinde çalışma sıcaklığı 600–700 °C arasındadır. Verimleri yaklaşık olarak % 60 seviyesindedir. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılırsa verim % 80'i bulabilir. Erimiş karbonat yakıt pilleri çok yüksek çalışma sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit, büyük santrallerde yerleşimleri mümkün olmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısının kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır. Bu ısı, ısıtmada, buhar üretiminde, endüstriyel olarak veya daha çok elektrik üretmek için kullanılabilir.

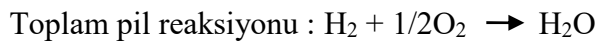
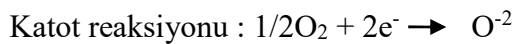
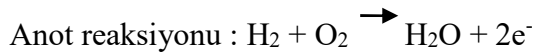
Erimiş karbonat yakıt pillerinin iki önemli dezavantajı vardır. Dezavantajlarından birincisi katı yerine sıvı bir elektrolitle çalışmanın yarattığı zorluk, ikincisi ise karbonat iyonlarının anot reaksiyonunda harcanması nedeniyle sürekli katoda karbondioksit enjeksiyonu gerektirmesidir [28].

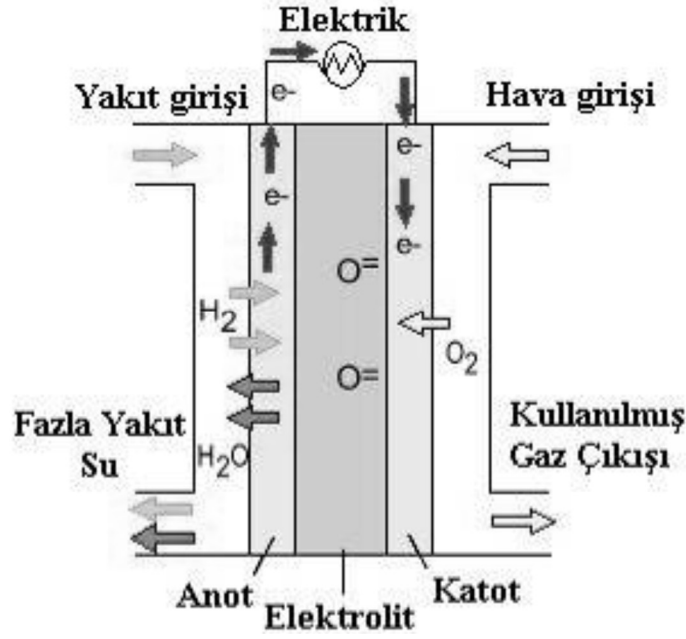
3.4.6. Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

Katı oksit yakıt pilleri tamamen katı yapıda olup, elektrolit olarak, yüksek sıcaklıkta oksijen iyonlarını (O^{2-}) katottan anoda aktaran katı yitra dengeli zirkonyum materyaller kullanılır. Bu, gözeneksiz bir katı metaloksittir. Bu nedenle katı oksit yakıt pilleri diğer yakıt pili tiplerine nazaran yapı bakımından daha basittir. Çünkü yakıt pili yapısında sadece iki faz (gaz ve katı) söz konusudur. Hem elektrotlar hem de elektrolit seramik malzemedendir. Çalışma sıcaklıkları $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve verimleri % 60-70 civarındadır. Katı oksit yakıt pilinde yakıt anot tarafına verildiğinde katot tarafında bulunan oksijen iyonları elektrolit içinden geçerek anotta hidrojenle reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda elektronlar ayrılır ve anot katot arasına bağlı dış devre iletkeninden geçerek elektrik enerjisini oluşturup katoda geri döner. Reaksiyona giren hidrojen, oksijen ve karbonmonoksit çıkış ürünü olarak su ve karbondioksiti üretir (Şekil 3.13).

Katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojenin yanı sıra doğal gaz da kullanılabilir. Pili yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı doğalgaz kolaylıkla hidrojene dönüşebilmektedir ve bu dönüşüm yakıt hücresinde gerçekleşir. Bu tip yakıt pillerinde karşılaşılan en büyük sorun, saf hidrojen dışında kullanılan yakıtlar ile birlikte oluşan kükürt kirliliğidir. Yüksek çalışma sıcaklığına bağlı olarak elektrotlardaki reaksiyon hızları çok yüksektir [31].

Katı oksit yakıt pillerinde anot, katot ve toplam pilde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.





Şekil 3.13. Katı oksit yakıt pili

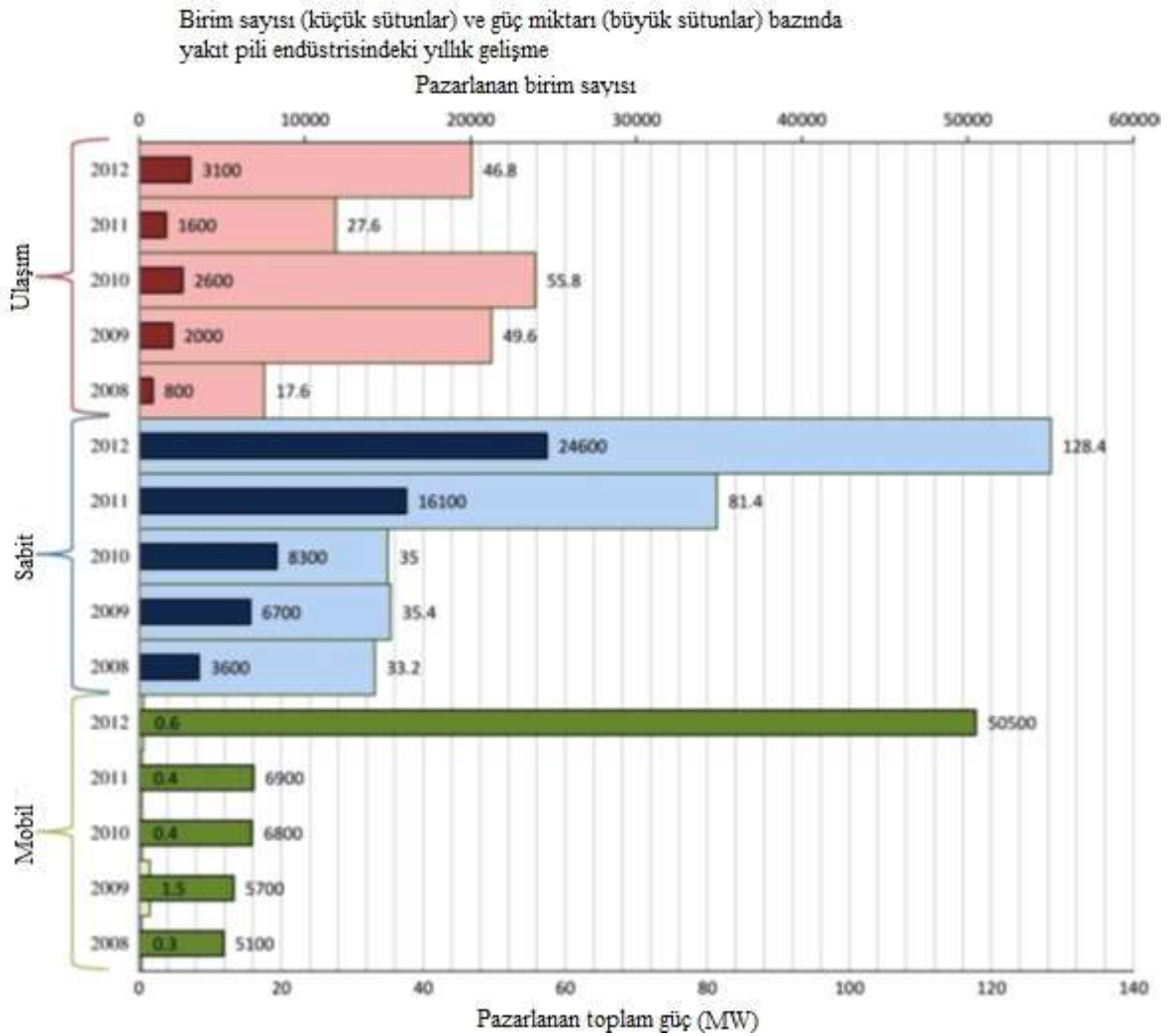
Katı oksit yakıt pilleri, erimiş karbonat yakıt pilleri gibi çok yüksek sıcaklıklarda faaliyet göstermektedir ve bunlar da genelde büyük sabit santrallerde kurulur. Yine yüksek sıcaklıktan dolayı açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılmaya uygundur. Yakıt pilinden çıkan ısının buhar türbinlerinde kullanılması da mümkündür. Katı oksit yakıt pilleri konusundaki çalışmalarını sürdüren Siemens-Westinghouse 2002 yılı itibariyle toplam 1 MW kapasiteli yakıt pili ve kojenerasyon tesisini kullanıma açmıştır. Küçük ve büyük ölçekte enerji üretimi için geliştirilen katı oksit yakıt pili ile ilgili BMW, hidrojen/benzin yakıtı ile beslenen katı oksit yakıt pilli aracı prototip olarak üretmiş olup, Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

3.5. Yakıt Pili Uygulama Alanları

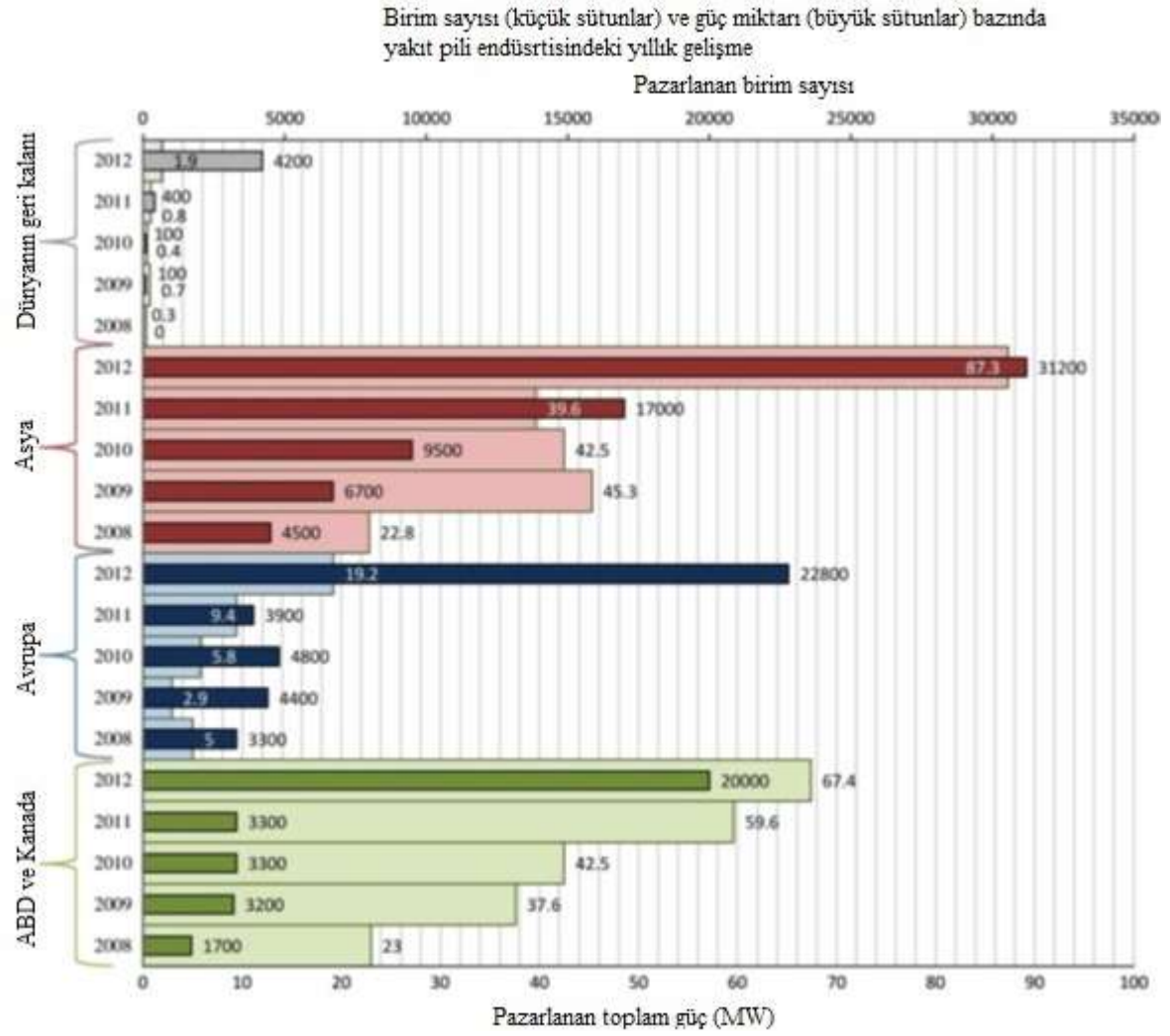
Yakıt pilleri geniş uygulama alanı sayesinde birçok pazarda rekabetçi bir alternatif olma potansiyeline sahiptir. Yüksek modülerite, geniş bir skaladaki güç değerleri ve değişik tiplerinin sahip olduğu farklı özellik çeşitliliği sayesinde, yakıt pilleri küçük araçlardan büyük kojenerasyon güç santrallerine kadar değişik enerji ihtiyacını karşılayabilecek seviyededir. Taşınabilir elektronik aletler, sabit güç santralleri ve ulaşım sektörlerinde yakıt pillerinin ticarileşmesi hızla sürmektedir [32]. Dünya genelinde yakıt pili sevkiyatı, yakıt

pillerinin telekomünikasyonda yedek güç kaynağı [33], malzeme işlemede [34, 35] ve havaalanı yer destek ekipmanlarında [36] 2008 ile 2011 yılları arasında %214 artmıştır. Global yakıt pili endüstrisinin 2020 yılında 19.2 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir [37]. Dünya genelinde yakıt pili endüstrisindeki satışlarının 2010 ile 2014 yılları arasında %104 büyüyeceği, kurulu gücün ise yıllık olarak artarak 2014 sonu itibari ile 1.5 GW'ı aşacağı tahmin edilmektedir [38].

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de yakıt pillerinin, 2008 ile 2012 yılları arasında, kullanım alanlarına göre ve bölgesel bazda gösterdiği artış gösterilmiştir.



Şekil 3.14. 2008-2012 yılları arasında yakıt pili endüstrisinin yıllık büyümesi [39].



Şekil 3.15. 2008-2012 yılları arasında yakıt pili endüstrisinin bölgesel bazda büyümesi [39].

Tüm bu gelişmeler sonucunda yakıt pili teknolojisinin çok farklı alanlarda kullanımı yayılmaktadır. Uygulama alanlarını dört ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar uzay çalışmaları ve askeri alanlar, ulaşım ve taşıma, sabit güç sistemleri ve taşınabilir uygulamalardır.

3.5.1. Uzay Çalışmaları ve Askeri Alanlar

Yakıt pillerinin ilk uygulanma alanı, uzay çalışmalarıdır. ABD’de NASA’nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde H_2-O_2 yakıt pili birbirine bağlı 3 ünite olarak kullanılmıştır. Toplamda 93 adet olmak üzere her üniteye 31 adet yakıt pili kullanılmıştır. Toplam üretilen güç 1.4 kW ve gerilim 27–31 voltur. Pillerin ağırlığı 111

kg'dır. 1995 saatlik uçuş süresince 450 kg su ve 325 kWh'lik enerji üretilmiştir. Gemini gemisinde ise farklı olarak PEM tipi yakıt pili kullanılmıştır. Her ünite de 32 adet pil bulunmakta ve 1 kW güç sağlanmaktadır. Bu üç gemide de 2 ünite ihtiyacı karşılamak için yapılırken, 3. ünite acil ve özel görev için hazırda tutulmuştur.

Konvansiyonel denizaltılar dizel-elektrikli tahrik sistemi ile teçhiz edilmişlerdir. Bu yöntemle üretilen enerji, asitli kurşun bataryalara yüklenmekte ve denizaltının dalma operasyonu ve personelin ihtiyacı karşılanmaktadır. Denizaltının su altında kalma zamanını bataryaların kapasitesi ile sınırlı olup su üstü operasyonu ile dizel jeneratörle bataryaların tekrar şarj edilmesi sağlanmaktadır. Denizaltının su üstü periyodunda iken düşman tarafından tespit edilme riski oldukça yüksektir. Bütün bu nedenlerden dolayı denizaltı sistemlerinin su üstü periyoduna geçmeden atmosfere kapalı bir tahrik sistemi ile teçhiz edilmesi ve daha fazla su altında kalması araştırılmıştır. Bu hedefe ulaşmak için Almanlar tarafından geliştirilen kapalı devre dizel motoru, stirling motoru, kapalı çevrimli gaz-buhar türbinleri ve yakıt pilleri gibi tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Fakat yakıt pilleri diğer sistemlere göre;

- Uzun periyotlarda su yüzeyine çıkmadan çalışma sağladığı,
- Çalışırken düşük ses seviyense sahip olduğu,
- Düşük manyetik özelliğe sahip oldukları için,
- Deniz suyuna az miktarda ısı transferi sağlaması gibi

daha avantajlı yanlarının olmasından dolayı diğer enerji kaynaklarına göre daha çok tercih edilmektedir. 1980'de ilk defa yakıt pillerinin denizaltılara uygulanması ile ilgili Howaltswerke- Deutsch Werft AG (HDW), Ingenieurkontrol Lubeck (IKL) ve Ferrostaal tarafından bir şirketler birliği oluşturmuştur. İlk araştırmalarda Polimer elektrolitli yakıt pillerinin denizaltı sistemlere uygulanması ile ilgili büyük gelişme kaydedilmiştir. Daha sonra Siemens tarafından 16 modülden oluşan 6.2 kW'lık yakıt pilleri geliştirilmiştir. HDW tarafından üretilen ve 212 Tip olarak adlandırılan denizaltılarda yakıt pillerinin enerji çıktısı 300 kW'a kadar ulaşmıştır. Sistemin güvenli bir ortamda çalışabilmesi için tüm modüller basınca dayanıklı kompartımanlarda tutulmaktadır. 212 Tip denizaltılar için standart üretilen yakıt pilleri 30–50 kW'lık modüllerden oluşmaktayken daha sonra modül gücü 120 kW'a kadar Siemens tarafından geliştirilmiştir [40].

3.5.2. Ulaşım ve Taşıma

Yakıt pillerinin uygulandığı ve gelecekte de daha fazla yer bulacağı alan otomotiv sektörüdür. Yakıt pilleri, otobüs, kamyon, otomobil ve her türlü taşıt için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahiptir. Yakıt pilli araçlar, benzin ve dizel ile çalışan araçlara göre daha temiz ve enerji bakımından daha verimli bir uygulamadır. Günümüzde taşıt emisyonlarının çevre kirliliği üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, yakıt pili ile çalışan araçlar çevre dostu ve karlı bir seçimdir. Otomotiv sektöründe hedef, içten yanmalı motorların yerine 75 kW gücünde yakıt hücre sistemlerini yerleştirmektir [41].

Güç kaynağı olarak yakıt pillerinin kullanıldığı taşıtların kısımları temel olarak; yakıt pili, elektrik motoru, elektronik güç kontrolü ve yakıt tankından oluşmaktadır. 1990'lı yılların başında hemen hemen bütün büyük otomobil şirketleri yakıt pilleriyle çalışan otomobillere yönelik araştırma programı başlatmışlardır. Bu şirketlerden Daimler-Benz ve Toyota ürettikleri projelerle diğer şirketlerin önüne geçmişler ve ortak bir çalışma grubu oluşturmuşlardır.

Konuyla ilgili daha küçük çaplı araştırmalarda mevcut olup olmanın güneş pili ve hidrojen yakıt pilinden beslenen küçük elektrikli araçlar için (golf arabaları gibi) batarya şarj sistemleri de tasarlanmaya başlanmıştır [42]. Yine yakıt pili ile çalışan bir aracın güç, sıcaklık, bağıl nem ve hızının anlık olarak izlenmesi ve bu büyüklüklerin kontrol edilmesi çok büyük bir önem kazanmaktadır [43].

3.5.3. Sabit Güç Santralleri

Sabit güç santralleri yakıt pili teknolojisi için en önemli pazar konumundadır. Dünyada şu anda 200'den fazla sabit güç kaynağı olarak kurulmuş yakıt pili istasyonları bulunmaktadır. Bu enerji üreteçleri, hastanelerde, otellerde, iş yerlerinde, okullarda, evlerde, güç istasyonlarında, havaalanlarında gerek elektrik, gerek ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri kullanan şirketlerin enerji harcamalarında % 20-40 arasında bir düşüş görülmektedir [44].

Pamukkale Üniversitesi'nde kurulan 5 kW'lık fotovoltaik sistem ve 2.4 kW'lık hidrojen-yakıt pili sistemi 2007 yılında kurulmuştur. Kurulan bu hibrit sistem ile güneşten elde edilen enerji güneşli saatlerde hem gerekli elektriği, bir inverter vasıtasıyla, sağlayıp tüketim

fazlasını ise, elektroliz yoluyla hidrojen elde edilip güneşin yeterli olmadığı zamanlarda yakıt pili ile tekrar elektrik üretiminde kullanılmak üzere, depolanmaktadır [45].

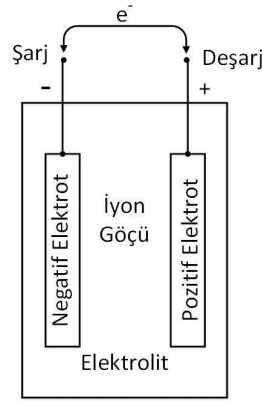
Küçük çaplı yerel uygulamalarda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri ise Fotovoltaik panel, rüzgâr türbini ve yakıt pili gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin ürettiği elektrik enerjisi, DC özellikte olması ve bu haliyle kullanılamamasıdır. Bu sorun göz önünde bulundurularak DC enerji dağıtım sistemlerinin hibrit enerji sistemlerinde kullanılabilirliği üzerine çalışmalarda yapılmaktadır [46].

3.5.4. Taşınabilir Uygulamalar

Taşınabilir uygulamalar az tanımlanmakla beraber oldukça büyük potansiyele sahiptir. Bu kategori genel olarak, enerji tüketimi ortalama 400 mW, bekleme konumunda 50 mW ve görüşme sırasında 1 mW olan cep telefonlarını ve enerji tüketimi ortalama 10 W olan dizüstü bilgisayarları içermektedir. Her iki uygulama da her gün büyüyen bir pazar payına sahiptir ve en büyük dezavantajları, kullanılacak bataryaların ömrünün kısa olmasıdır. Cep telefonu ve dizüstü bilgisayarlarda kullanılan piller içinde en verimli olan Li-İon bataryaların yaklaşık 160 Wh/kg'lık bir enerjisi vardır. Bu telefon için birkaç günlük, dizüstü bilgisayar için 3 saatlik bir enerji demektir. Günümüzde, tüketiciler bunun 3-5 kat daha fazlasını talep etmektedir. Fakat kullanılan bataryalar zaten şu anda ulaşabilecekleri tüm limitleri zorlamış durumdadır. Şu anda ayrıntılı bir şekilde üzerinde çalışılan çözüm, daha iyi enerji sağlayan, yakıt pili destekli şarj edilebilir, küçük boyutlu pillerdir. Bu durumda pilim ömrü sadece taşınan hidrojen veya metanol tankının büyüklüğü ile sınırlı kalacaktır. Kullanıcı cihazını sanki çakmağını veya dolmakalemini doldurmuş gibi birkaç saniyede dolduracak ve her dolum günümüz pillerinden 3–5 kat daha fazla enerji sağlayacaktır [44].

4. BATARYALAR

Bataryayı oluşturan en temel eleman elektrokimyasal hücredir. Bu hücrelerin bir miktarının seri bağlanarak bir araya getirilmesi ile bir batarya oluşturulur. Şekil 4.1 bir elektrokimyasal hücrenin veya bir bataryanın temel çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 4.1. Bataryaların temel çalışma ilkesi

Bataryanın pozitif ve negatif elektrotları bir elektrolit ile birbirinden ayrılmıştır. Deşarj olayı esnasında negatif elektrot, elektronları dış devreye sürecektir şekilde bir oksitlenme (oxidation) reaksiyonu meydana getirirken pozitif elektrotta ise bir indirgenme (reduction) reaksiyonu oluşmaktadır. Şarj esnasında, pozitif elektrotta oksidasyon meydana getirmek için elektronlar serbest bırakılırken negatif elektrotta ise indirgeme oluşturmak için elektron enjekte edilir. Elektrikli araç uygulamalarında en sık kullanılan enerji depolama aygıtı olup valf regüleli kurşun-asit (VRLA), nikel kadmiyum (Ni-Cd), Nikel Çinko (Ni-Zn), Nikel-metal hidrit (Ni-H), çinko/Hava (Zn/Air), Aliminyum/Hava (Al/Air), Sodyum/Sülfür (Na/S), Sodyum/ Nikelklorid (Na/NiCl₂), Lityum-Polimer (Li-Polymer) ve Lityum-İyon (Li-Ion) türleri bu tür uygulamalara daha uygundur. Bahsedilen bataryalar literatürde genellikle kurşun asit tabanlı, nikel tabanlı, çinko/halojen, metal/hava, sodyum-beta ve ortam sıcaklığındaki lityum bataryalar olarak sınıflandırılmıştır [47, 48].

4.1. Kurşun Asit (Pb-Acid) Bataryalar

1860 yılında icat edilen bu batarya asırlardır popüler bir ticari ürün olarak kullanılmaktadır. Çok yaygın bir kullanımının olmasının nedeni, basit teknolojisi ve düşük fiyatıdır. Bu bataryaların nominal hücre gerilimi 2 V, özgül enerjisi 35 Wh/kg, enerji yoğunluğu 70 Wh/L ve özgül güç yoğunluğu 200 Wh/kg'dır. Negatif elektrot olarak metal kurşun, pozitif elektrot olarak kurşun dioksit, elektrolit olarak ise sülfürik asit solüsyonu kullanılmaktadır. Bu bataryaların açık devre gerilimi sadece asit konsantrasyonuna bağlı olup, hücre içinde bulunan kurşun, kurşun-sülfat ve kurşun dioksitten bağımsızdır. Bu türdeki bataryaların avantajları: basit teknoloji, yüksek hücre gerilimi, elektrikli araçlarda iyi performans sağlaması, yüksek etkinlik ve çok çeşitli ölçü ve tasarımlarda bulunmasıdır. Öte yandan kurşun-asit batarya özgül enerjisinin ve enerji yoğunluğunun diğerlerine nazaran daha düşük olması, kendiliğinden deşarj süresinin diğerlerine nazaran yüksek olması (25°C'de günde %1), kullanım ömrünün düşük olması (500 şarj/deşarj), sülfür kullanımından doğan elektrot korozyonundan dolayı uzun ömürlü olmaması gibi dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajları gidererek elektrikli araçlarda daha etkin bir kullanım sağlamak için farklı teknolojiler geliştirilmektedir. VRLA bunlardan biri olup bir VRLA bataryanın özgül enerjisi 43 Wh/kg, enerji yoğunluğu 80 Wh/L'dir [47, 48].

4.2. Ni-Cd Bataryalar

Bu tip bataryalar ağır sanayide çok uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Ni-Cd bataryaların nominal parametreleri 1.2 V, 56 Wh/kg, 110 Wh/L ve 225 Wh/kg'dır. Aktif materyalleri negatif elektrot için metalik kadmiyum ve pozitif elektrot için nikel oksihidroksittir. Elektrolit olarak ise sıvı alkalın potasyum hidroksit kullanılmaktadır. Bu tür bataryaların önem kazanmasının nedeni yüksek özgül güce, yüksek ömürlü şarj/deşarj sayısına, mekanik ve elektriksel olarak zor şartlar altında çalışma özelliğine sahip olmasına, geniş deşarj akımı değişimine karşı sabit bir gerilim profiline sahip olmasına, kendiliğinden boşalma özelliğinin son derece az olmasına, korozyona uzun zaman dayanabilmesine olanak sağlamasından kaynaklanmaktadır. Dezavantajları ise maliyetinin yüksek olması, düşük hücre gerilimine sahip olması ve çevre için zararlı olmasıdır [47, 48].

4.3. Ni-Zn Bataryalar

Bu tip bataryalar kısa ömürlü çinko elektrot kullandığı için yeteri kadar ticari önem kazanamamıştır. Kullanım ömrünün arttırılması konusunda yapılan çalışmalar sayesinde, yüksek özgül enerjisi ve düşük materyal maliyeti nedeniyle ilerideki zamanlarda önem kazanabileceği değerlendirilmektedir. Ni-Zn bataryalar nominal olarak 1.6 V, 600 Wh/kg, 120 Wh/L ve 300 W/kg parametrelerine sahiptir. Ni-Zn bataryalarda, negatif elektrot olarak çinko, pozitif elektrot olarak nikel oksihidroksit, elektrolit olarak alkalin potasyum hidroksit solüsyonu kullanılmaktadır. Diğer nikel tabanlı bataryalar ile karşılaştırıldığında, yüksek özgül enerji ve güce sahip olması (60 Wh/kg, 200 W/kg), yüksek hücre gerilimi (1.6 V), düşük projelendirme maliyeti, zehirli olmaması, yüksek şarj ve deşarj oranlarında çalışmaya uygun olması ve geniş çalışma sıcak aralığı gibi avantajlara sahiptir. En temel dezavantajı ise kullanım ömrünün kısa oluşudur [47, 48].

4.4. Ni-MH Bataryalar

Karakteristikleri Ni-Cd bataryalara benzemektedir. Aralarındaki temel farklılık, bu tür bataryaların negatif elektrot olarak kadmiyum yerine metal içine absorbe ettirilmiş hidrojen kullanılmasıdır. Kadmiyum kullanmaması ve özgül enerjisinin Ni-Cd den daha iyi olması bu tür bataryaları Ni-Cd bataryalarından üstün kılmaktadır. Nominal çalışma parametreleri 1.2 V, 65 Wh/kg, 150 Wh/kg, 200 W/kg olarak belirtilmektedir. Aktif materyalleri negatif elektrotta metal hidrit formunda hidrojen, pozitif elektrotta nikel oksihidroksittir. Bataryada kullanılan metal hidrit sayesinde batarya şarj ve deşarj olurken hidrojen absorbe etmesine ve neşretmesine olanak sağlar. Elektrolit olarak kullanılan temel bileşen ise potasyum hidroksittir. Halen gelişmekte olan bu teknolojinin başlıca avantajları, yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğuna sahip olması, çevre dostu olması, düz bir deşarj profiline sahip olması, hızlı şarj edilebilir olması şeklinde özetlenebilir. Başlıca dezavantajları ise yüksek maliyet, hafıza etkisine sahip olabilmesi ve şarj durumunda ekzotermik olmasıdır [47, 48].

4.5. Zn/Air Batarya

Bu tür bataryalar hem elektriksel hem de mekanik olarak şarj edilebilir şekilde geliştirilmiştir. Her ikisine de yetkin olmasına rağmen elektrikli araç uygulamalarında

mekanik şarj tercih edilmektedir. Genellikler açık devre hücre gerilimi 1.2 V ve özgül enerjisi 180 Wh/kg, enerji yoğunluğu 160 Wh/L ve özgül gücü 95 Wh/kg civarında olmaktadır. Negatif elektrotta çinko parçacıkları, pozitif elektrotta hava elektrotlar kullanılır. Elektrolit olarak ise potasyum hidroksit kullanılmaktadır [47, 48].

4.6. Al/Air Batarya

Metal/Hava batarya geliştirme çalışmalarında en çok odaklanılan metal materyal doğada çok yaygın bulunmasından, düşük maliyetli olmasından ve kullanımının kolay olmasından dolayı alüminyumdur. Bu bataryanın açık devre hücre gerilimi 1.4 V'dur. Negatif elektrot olarak alüminyum pozitif elektrot olarak deşarj işlemi sırasında çalışacak tek fonksiyonlu (unifunctional) hava elektrot kullanılmaktadır. Elektrolit olarak tuzlu bir solüsyon ya da potasyum hidroksit solüsyonu kullanılmaktadır. Tuzlu elektrolit solüsyonu sadece düşük güç uygulamalarında ilgi çekicidir. Bu tür bataryalar yüksek özgül enerji (250 Wh/kg) ve enerji yoğunluğuna (200 Wh/L) sahiptir ve yüksek güç uygulamalarına uygundur. Ancak özgül güç bu bataryalar için 7 W/kg'a kadar düşmektedir. Özgül gücün aşırı düşük olması nedeniyle elektrikli araç uygulamalarında yalnız başına güç kaynağı olarak kullanılamaz. Çok yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğunu avantaj olarak kullanabilmek için diğer bir batarya ile birlikte kullanılarak elektrikli araçların menzilini artırmada kullanılabilir [47, 48].

4.7. Na/S Batarya

Söz konusu batarya 300-250°C sıcaklıkta çalışır, nominal hücre gerilimi 2 V, özgül enerjisi 170 Wh/kg, enerji yoğunluğu 250 Wh/L ve özgül gücü 360 W/kg'dır. Ancak batarya yapılandırmasına göre bu karakteristik değerler daha düşük bir değere de sahip olabilmektedir. Negatif elektrotta erimiş sodyum, pozitif elektrotta erimiş sülfür/sodyum polisülfid kullanılır. Beta-alümine seramik elektrolit katı ortam iyon iletici ve ergimiş elektrotlar arasında doğrudan deşarjı engelleyecek bir ayıraç ortamı oluşturmaktadır. Başlıca özellikleri, yüksek özgül güç, yüksek enerji etkinliği, geniş değerlerde değişim gösteren çalışma koşullarında esnek çalışabilme, çevresel koşullara duyarlı olmadan çalışabilmedir. Bunun yanında, güvenlik problemleri, termal düzenlemeye ihtiyaç duyulması gibi daha geliştirilmesi gereken kısıtlamaları ve dezavantajları da vardır [47, 48].

4.8. Na/NiCl₂ Batarya

Bu batarya türünde aktif materyaller negatif elektrot için ergimiş sodyum ve pozitif elektrot için katı nikel klorittir. Na/S bataryalarda kullanıldığı gibi beta-alümina seramik elektrolite ek olarak ikincil bir elektrolit (sodyum-alüminyum klorit) pozitif elektrotta kullanılmaktadır. İkincil elektrolit, birincil beta-alümina elektrottaki sodyum iyonlarını, katı nikel klorit pozitif elektrotlara iletiminde işlev gösterir. Çalışma sıcaklığı 250-350°C olup, nominal hücre gerilimi 2.5 voltur. Batarya yapılandırmasına dayanarak, özgül enerjisi 86 Wh/kg, enerji yoğunluğu 149 Wh/L ve özgül gücü ise 150 W/kg olmaktadır. Na/S ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir açık devre hücre gerilimine sahiptir. Daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Daha güvenlidir ancak maliyeti çok yüksektir [47, 48].

4.9. Lityum-Polimer Bataryalar

Bu tip bataryalar negatif elektrot olarak lityum metali ve pozitif elektrot olarak arasında oksit bulunduran bir geçiş metali kullanır. Bu geçiş metali şarj/deşarj esnasında içerisine lityum iyonlarının girebileceği ya dadeşarj esnasında iyonlarının uzaklaştırılabileceği katmanlı bir yapıya sahiptir. 3 voltluk bir nominal hücre gerilimine sahip olup, özgül enerjisi 155 Wh/kg, enerji yoğunluğu 220 Wh/L, özgül gücü 315 W/kg'dır. Yüksek hücre gerilimi, yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğu, çok düşük kendiliğindendeşarj olma oranı (ayda % 0.5), çok çeşitli ebatlarda ve şekillerde üretilebilmeleri ve güvenli oluşları başlıca avantajlarıdır. Bunun yanında, iyonik iletimden dolayı düşük sıcaklıklarda zayıf bir performans göstermesi başlıca dezavantajıdır [47, 48].

4.10. Lityum-İyon Bataryalar

Bu tip bataryalar ilk üretildiğinden beri en çok önem kazanan geleceğin umut vadeden yeniden şarj edilebilir bataryası olmuştur. Halen geliştirilmesine devam edilmesine rağmen, elektrikli araç uygulamalarında yaygın şekilde kabul görmüştür. Lityum-İyon bataryalar Li_xC lityumlandırılmış karbon metali negatif elektrot olarak kullanmakta olup, pozitif elektrot için ise lithiated transition metal exaltation oxide (Li-xM_yO_z) kullanılmaktadır.

Elektrolit için katı bir polimer ya da sıvı bir organik solüsyon kullanılmaktadır. Şarj ve deşarj işlemi esnasında lityum iyonları elektrolit içerisinde pozitif ve negatif elektrotlar arasında hareket etmektedir. Nikel tabanlı Li-iyon batarya 4 voltluk bir açık devre hücre gerilimine, 120 Wh/kg özgül enerjiye, 200 Wh/L enerji yoğunluğuna ve 260 W/kg özgül güce sahiptir. Kobalt tabanlı türleri daha yüksek değerli özgül enerji ve enerji yoğunluğu gösterirler ancak önemli derecede kendiliğinden deşarj olma oranına ve daha yüksek üretim maliyetini de beraberlerinde getirmektedirler. Manganez tabanlı tür en düşük maliyete sahiptir ve özgül enerjisi ve enerji yoğunluğu değeri, kobalt tabanlı ile nikel tabanlı türler arasındaki bir değere sahiptir. Li-iyon bataryanın geliştirilmesi sonucunda doğada çok bulunmasından, çevre dostu olmasından ve en önemlisi düşük maliyetli olmasından dolayı manganez tabanlı türe doğru yönelim olacağı düşünülmektedir. En yüksek değerli açık devre hücre gerilimine sahip oluşu, yüksek değerli özgül enerji ve enerji yoğunluğuna sahip olması, en güvenli tasarıma sahip oluşu, çok sayıda şarj/deşarj edilebilme özelliği bu tür bataryaların en önemli avantajlarıdır. Bununla birlikte bu tip bataryalar, ayda %10'luk bir kendiliğinden deşarj oranına sahip olmaları dezavantajına sahiptir [47, 48].

5. HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Hibrit Güç Sistemin Tanımı ve Gerekliliği

Hibrit güç sistemleri; iki veya daha fazla enerji dönüşüm cihazını birleştiren veya aynı cihazın iki veya daha fazla yakıtla çalışmasını sağlayan ve bunu her birinin avantajını koruyup, dezavantajlarını eleyerek yapan sistemlerdir. Bu nedenle hibrit sistemler yakıt esnekliği, verimlilik, güvenilirlik, emisyon değerleri ve ekonomik olma açısından tekil uygulamalarda karşılaşılan sınırlandırmaların üstesinden gelebilir. Isıtma, güç üretimi ve yüksek verimliliğe sahip cihazları bir arada barındıran hibrit sistemler bu şekilde sistemin genel verimini arttırarak her bir sistemin ayrı kullanımına kıyasla enerji tasarrufu sağlar. Bunların yanında hibrit sistemler üretilen gücün hem kalitesini hem de ulaşılabilirliğini eşzamanlı olarak arttırabilir ve tüm bunları yaparken yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımını arttırarak geleneksel fosil yakıtlı teknolojilere göre daha az emisyon salınımı yapan sistemlerin kurulumuna olanak sağlar. Bu saydığımız özellikleri ile hibrit sistemlerin enerji piyasasında kabul görmeleri için kabul edilebilir en düşük maliyetle dizayn edilmeleri gereklidir.

Bahsedilen avantajları nedeniyle teknolojik çalışmaların ilgi odağı olan hibrit güç sistemleri enerji alanındaki temel sorunların çözümünde öncü rol oynayacaktır.

5.2. Yakıt Pili-Batarya Hibrit Güç Sistemi

Yakıt olarak hidrojen kullanan, taşınabilir bir PEM yakıt pili- batarya güç sistemi diğer geleneksel bataryalara göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Yakıt pili- batarya güç sistemi en fazla gelecek vadeden, küçük ölçekli ve çevre dostu alternatif enerji kaynaklarından biridir. Bununla beraber hibrit enerji depolama sistemi (HESS) alanında da yenilikçi bir bakış açısı sunmaktadır. Bir HESS iki veya daha fazla enerji depolama teknolojisinin bütünleyici çalışma karakteristiği (örneğin, enerji ve güç yoğunluğu, deşarj oranı, verim ve kullanım ömrü gibi...) ile yararlı bir birliktelik oluşturması olarak karakterize edilebilir.

Yakıt pili ve bataryayı bir güç kaynağında birleştirmekle her iki cihazın avantajlarına sahip buna karşın dezavantajlarını ortadan kaldırmaya olanak sağlar. Yük dalgalanmalarına karşı yakıt pili yavaş bir dinamik tepki süresine sahipken batarya hızlı bir dinamik tepki

süresine sahiptir buna karşın yakıt pili yüksek enerji yoğunluğuna, batarya ise düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Hibrit güç kaynağının performansı yakıt pili ve bataryanın avantajlarını birleştirir. Batarya yükün bütün dinamik davranışını sönümler ve gerekli pik gücü sağlayarak yakıt pilinin ortalama gücü üretmesine olanak sağlar.

Bu tezde oluşturmaya çalışılan sistem ilk olarak prototip bir yedek (back up) güç kaynağı olsa da günümüz elektrikli araçların temel sorunlarından olan güç kaynağı probleminin çözümünün de temelini oluşturacaktır. Yakıt pili ile bataryayı ayrı ayrı düşündüğümüzde yakıt pilleri yakıt sağlanması süresince elektrik üretmeye devam edecektir ama değişken çıkış güçlerinde gerilim dalgalanmaları çok olup tepki süreleri uzundur. Bu da genellikle kararlı bir güç ve hızlı tepki süresi isteyen yüklerin beslenmesinde büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bataryaların ise verebilecekleri elektrik enerjileri depolama kapasiteleriyle sınırlı olup, değişken çıkış güçlerinde gerilim dalgalanmaları çok olmayıp, tepki süreleri de oldukça hızlıdır.

Yakıt pillerinin verimliliğini doğrudan etkileyen parametre ise sabit olarak nominal güçte çalışmasıdır. Kurulacak sistemle artan yüklerle çıkış gücünde istenilen artış batarya tarafından hızlıca sağlanabilecektir. Çıkış gücünün düşük olduğu durumda ise yakıt pili bataryayı şarj edecektir. Böylece hem yakıt pilinin çıkış gücü sabit kalmış olacak hem de yük durumundaki değişimlere gerekli tepkiler hızlıca verilebilecektir. Gerekli güç yakıt pili ve batarya arasında bölüştürülebileceğinden her ikisinin gücü istenen maksimum çıkış gücünde olmasına gerek kalmayıp daha düşük değerlerde seçilebilecektir. Böylece hem maliyet hem de gerekli hacim ve ağırlık olarak daha avantajlı bir sistem elde edilecektir. Gelişen teknolojiler, artan enerji gereksinimi ve mobil alanlarda elektrikli güç kaynağına olan talebin artması bu sistemin önemini arttırmaktadır. Özellikle günümüzde üzerine çokça çalışılan elektrikli otomobillerin en büyük sorunu tek şarjla elde edilen menzildir, bunun nedeni ise elektriğin yoğun olarak depolanmasının zorluklarıdır. Sadece bataryalarla çalışan orta sınıf elektrikli otomobillerde bu menzil ortalama 150 km civarında olup üst sınıflarda ise maksimum 450 km'yi bulmaktadır. Bu nedenle bazı otomobil üreticileri uzun süreli çalışabilen yakıt pilleri ile bu sorunu aşmaya çalışmaktadır ki bu alanda öncü olarak Toyota firması Mirai adlı orta sınıf bir araçta şimdiden 700 km menzil mesafesini yakalayabilmiştir. Menzil sorunu haricinde mobil uygulamalarda bataryaların ağırlığı da ayrı bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Her ne kadar bu ağırlık forklift gibi bazı iş makinelerinde avantaj olsa da birçok araç için artan ağırlık enerji tüketimini doğrudan arttırması nedeniyle istenilen bir durum değildir.

Bu tasarımda elde edilecek güç sisteminin hacmi ve ağırlığı küçültülerek daha uzun süreli güç sağlayacak bir hale getirilmek istenmektedir. Tabi ki bunu yaparken enerji kalitesinden de ödün verilmemek istenmektedir. Bu nedenle yakıt pili ile kendisine eşdeğer güçteki bir batarya birleştirilerek kaliteli ve sürekli bir enerji sağlanacaktır. Burada temel parametreler sistemin güç sağlama süresi, sağladığı gücün değişen yük şartlarında sabit kalabilmesi ve bu değişimlere zamanında tepki verebilmesidir. Bu nedenle eşzamanlı olarak yakıt pilinin ürettiği, elektriksel yükün tükettiği ve bu iki güç arasındaki dengeyi sağlayacak bataryanın güç verme veya depolaması gözlemlenecektir. Bu gözlem için yine yakıt pilinin, bataryanın ve yükün akım ve gerilim değerleri ölçülüp kaydedilerek grafik üzerinde incelenecektir.

5.3. Deney Ekipmanları

Bu deneyde yakıt pili olarak Şekil 5.1’de gösterilen Horizon Fuel Technologies firmasına ait H-100 serisi 100W’lık PEM yakıt pili kullanılmış olup yakıt piline ait teknik özellikler Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

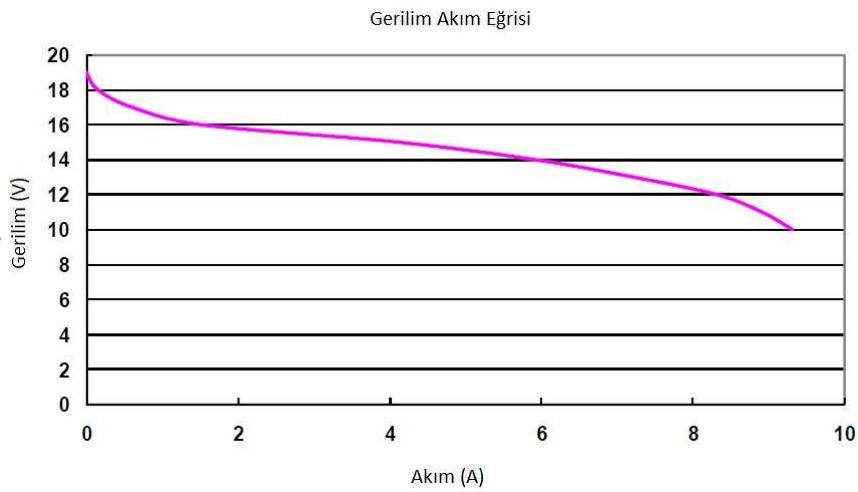


Şekil 5.1. Horizon Fuel Technologies firmasına ait H-100 serisi PEM yakıt pili

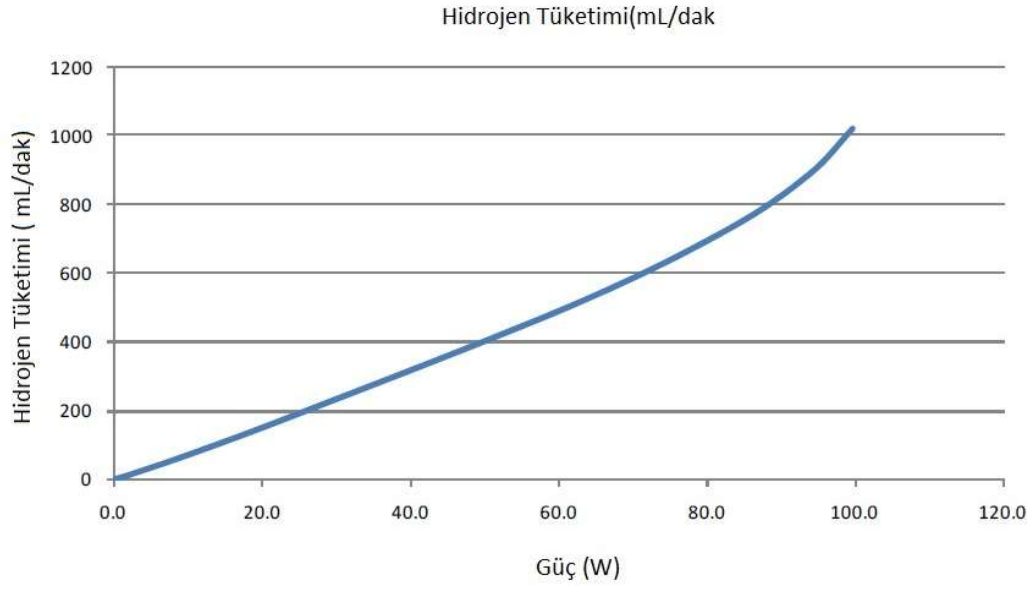
Tablo 5.1. H-100 serisi 100W'lık PEM yakıt pili teknik özellikleri

Yakıt Pili Tipi	PEM
Hücre Sayısı	20
Performans	100 W
Reaktantlar	Hidrojen ve Hava
Maksimum Yığın Sıcaklığı	65 °C
H ₂ Basıncı	0.45-0.55 Bar
Hidrojen Saflığı	≥99.995 Kuru H ₂
Nemlendirme	Kendinden Nemlendirmeli
Soğutma	Hava (Entegre Soğutucu Fan)
Yığın Ağırlığı (Fan Ve Gövde İle)	1290 g
Boyutlar	11.8 cm×10.4 cm×9.4 cm
Maksimum Çıkışta Hidrojen Akışı	1.3 L/dak
Başlama Süresi	≤ 30 s Oda Sıcaklığında
Yığın Verimliliği	% 40 @ 12 V
Düşük Gerilim Kapama	10 V
Aşırı Akım Kapama	12 A
Aşırı Sıcaklık Kapama	65 °C

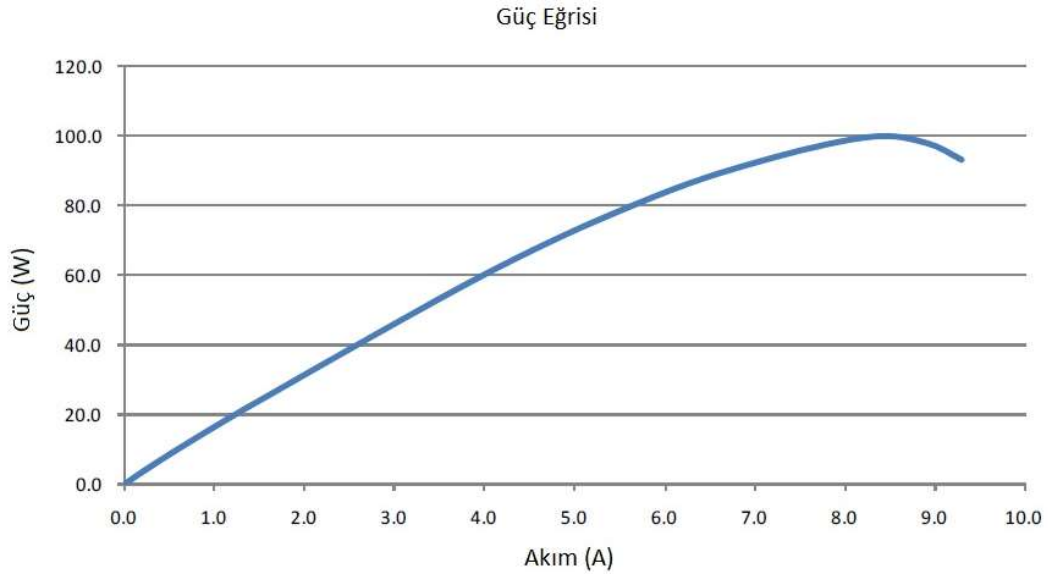
Yakıt piline ait performans karakteristikleri Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.2. H-100 serisi PEM yakıt pilinin gerilim akım karakteristiği



Şekil 5.3. H-100 serisi PEM yakıt pilinin çıkış gücüne bağlı olarak hidrojen tüketimi



Şekil 5.4. H-100 serisi PEM yakıt pilinin güç akım karakteristiği

Yakıt pili ile birlikte Şekil 5.5'te gösterilen 12 V 20 Ah kurşun asit batarya kullanılmıştır. Bu bataryaya ek olarak yakıt pilinin fanı ve tasfiye vanasını (purging valve) beslemek için 12 V 7 Ah'lık ikinci bir batarya kullanılmıştır.



Şekil 5.5. 12 V 20 Ah kurşun asit batarya

Hidrojen kaynağı olarak da Şekil 5.6'da gösterilen yüksek basınçlı çelik tüp kullanılmıştır. Çalışma basıncı olan 0.5 barı elde etmek için yine Şekil 5.6'da gösterilen çift kademeli bir hidrojen regülatörü kullanılmıştır. Bu regülatörün hassasiyeti yakıt pilinin düzgün çalışması ve zarar görmemesi açısından önemlidir. Bunlara ek olarak güvenlik açısından da seçiminde dikkatli olunması gerekmektedir. Basınç farkı çok fazla olduğundan ve hassas bir çalışma aralığımız (0.45-0.55 bar) olduğundan tek kademeli ve büyük skalalı regülatörler uygun olmamaktadır. Yakıt pilinin çalıştırılmasında karşılaşılan ilk ve en önemli problem hidrojen besleme basıncı olmaktadır. Eğer basınç gerekenden düşükse yeteri miktarda hidrojen membrandan geçememekte bu nedenle hücre gerilimi 0.7 voltun altında kalmakta ve yakıt pili çalışmasını sürdürememektedir. Ters bir durumda yani basınç gerekenden büyük olursa bu defa çok ince yapılı olan polimer zar zarar görebilmektedir.



Şekil 5.6. 200 bar 50 L çelik hidrojen tüpü ve 1.5 bar çift kademeli regülatör

Deney esnasında gerekli verilerin alınmasında Şekil 5.7’de gösterilen datalogger kullanılmıştır. Datalogger sadece 30 volta kadar gerilim bilgisi okuyabilmektedir. Bu nedenle gerilim bilgilerini direkt bağlantı ile alabilirken akım bilgisi için 20 amperlik akım trafoları kullanılmıştır. Akımı ölçülecek elemana seri olarak bağlanan bu akım trafoları ölçtükleri akımı gerilime çevirmektedir. 0 ile 20 A arasındaki akımı 0 ile 5 V arasında DC gerilime çeviren bu akım trafolarının çıkışından alınan gerilim bilgisi dataloggera verilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus ise dataloggerın hangi kanalından bu veri alınıyorsa bu kanalın çarpanı 4 olarak girilmelidir. Yine akım trafosunun beslemesi şebeke gerilimi üzerinden yapıldığından bağlantıların iyi yapılması gerekmektedir. Çünkü 220 V olan şebeke gerilimi bir arıza sonucu dataloggera kadar ulaşırsa cihaza zarar verebilir. Ayrıca yine şebeke gerilimindeki dalgalanmalar (özellikle laboratuvar gibi gerilimi etkileyebilecek birçok cihazın bulunduğu ortamlarda) yine ölçüm cihazlarına zarar verebileceğinden akım trafolarının beslemesi direk şebeke yerine izolasyon trafoları üzerinden yapılmıştır.



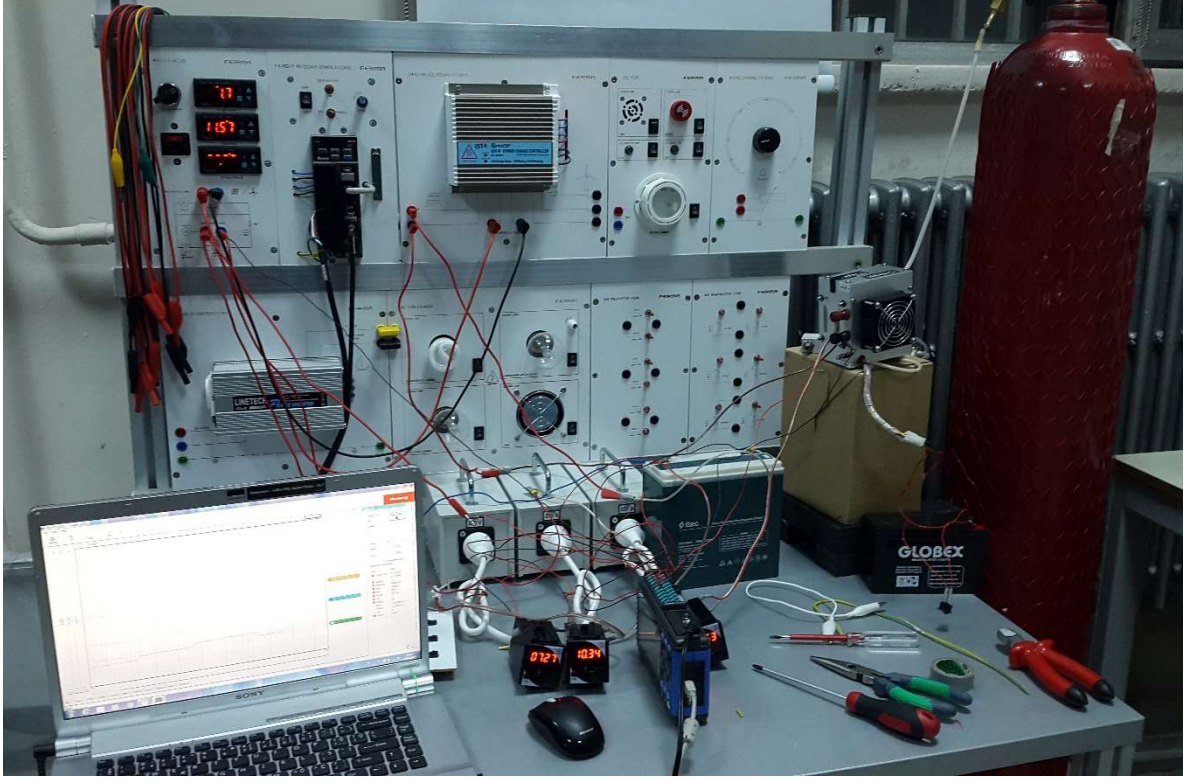
Şekil 5.7. HiOKi LR 8431-20 10 kanallı datalogger

Deneyde bataryanın şarj ve deşarjını kontrol etmek ve yakıt pilinin gerilimini regüle etmek için Şekil 5.8’de görülen hibrit şarj kontrolörü kullanılmıştır. Toplamda 650 W lık bir gücü kontrol edebilen bu hibrit kontrolör 500 W rüzgar türbini ve 150 W fotovoltaiik panel girişlerine sahiptir. Yakıt pilinin gerilim karakteristiği fotovoltaiik panellerle yakın olduğundan ve güç değeri de 150 wattı aşmadığından deneyde fotovoltaiik girişi kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Hibrit şarj kontrolörü

Deney setinin genel görünümü de Şekil 5.9’da verilmiştir.

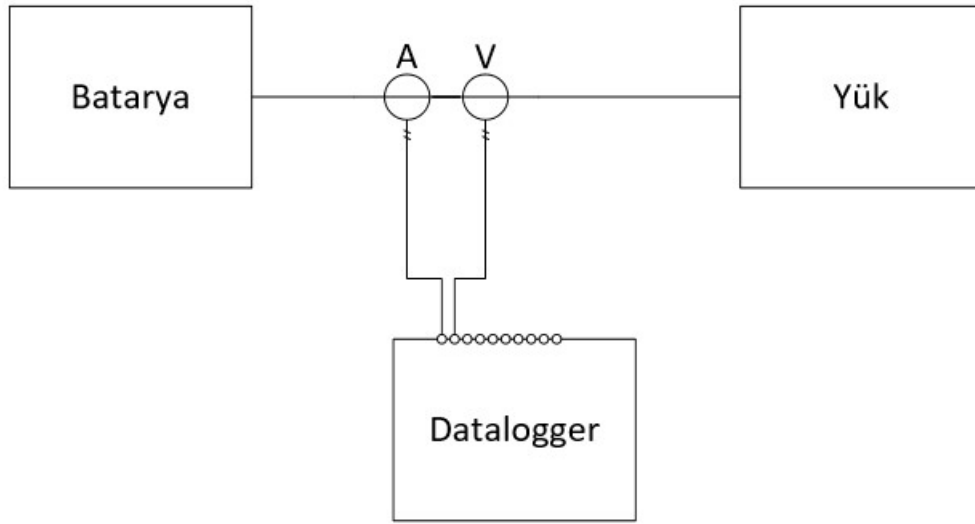


Şekil 5.9. Deney setini genel görünümü

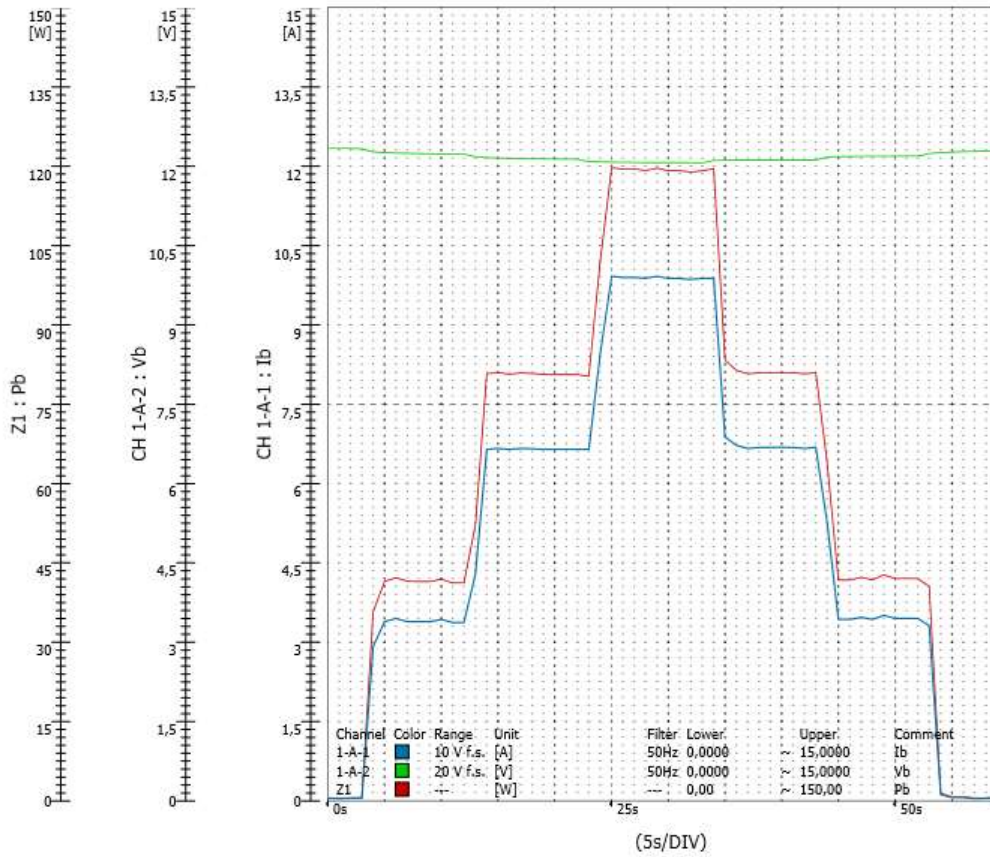
5.4. Batarya-Yük Deneyi

İlk olarak yükümüz sadece batarya üzerinden beslenerek (Şekil 5.10) bu durum için akım ve gerilim değerleri alınmış bu iki değerın anlık çarpımı ile de güç değeri belirlenmiştir (Şekil 5.11). Yük olarak bir birine paralel bağlı üç adet alüminyum direnç kullanılmıştır. Her bir direnç anahtar yardımıyla devreye alınıp devreden çıkarılmıştır. Başlangıçta üç direnç de devre dışı olduğundan açık devre çalışılmış ve bu durumda açık devre gerilimi 12.32 V olarak ölçülmüştür. 3. saniyede ilk direnç devreye alınmış ve batarya akımı 2 s boyunca artarak 5. saniyede sabitlenmiştir. Yani bataryamızın tepki süresi 2 s olmuştur ki bu değer çok iyi bir değer değildir. Bu değerin kısılgı kullanılan bataryanın çeşidi ve kalitesiyle doğrudan alakalı bir durumdur. Gerilim değeri ise 12.25 volta düşmüştür. İkinci direnç de devreye alındığında akımın istenilen değere ulaşması, bu gerekli gücünde sağlanabilmesi demek oluyor, yine 2 s sürmüştür. Gerilim ise 12.15 volta düşmüştür. Son olarak 3. direncinde devreye alınmasıyla bataryamızdan maksimum akımı çekmiş bulunuyoruz. Bu durumda bataryanın çıkış gücü 120 watta çok yakın bir değerdedir. Çekilen akımın maksimuma ulaşmasıyla batarya gerilimi de minimum değeri olan 12.05 volta düşmüştür.

Daha sonra dirençler tek tek devreden çıkarılmış ve bu durum için de yine akım ve gerilim değerleri gözlemlenmiştir. Gerekli güç artışı 2 s sürerken azalmanın sadece 1 s sürdüğü görülmüştür. Değişen yüklere karşın tepki süresinin çok iyi olmamasına rağmen gerekli gücün sağlandığı denge noktasında akımda ve gerilimde (hem yukarı hem de aşağı yönlü) aşırı bir dalgalanma gözükmemektedir. Bu da bataryanın kararlı bir çalışmaya sahip olduğunu göstermektedir. Batarya tam yükte çalıştırılmaya devam edecek olursa çekilen akımın 9.9 A ve batarya kapasitesinin 20 Ah olduğundan hareketle, tam dolu halde bu sistemi yaklaşık olarak 2 saat besleyebilir.



Şekil 5.10. Batarya-yük deney şeması

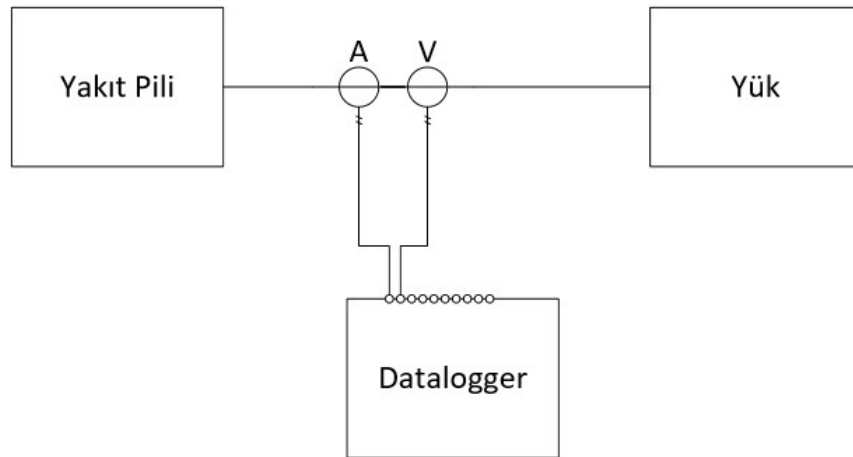


Şekil 5.11. Batarya akım-gerilim karakteristiği ve güç eğrisi

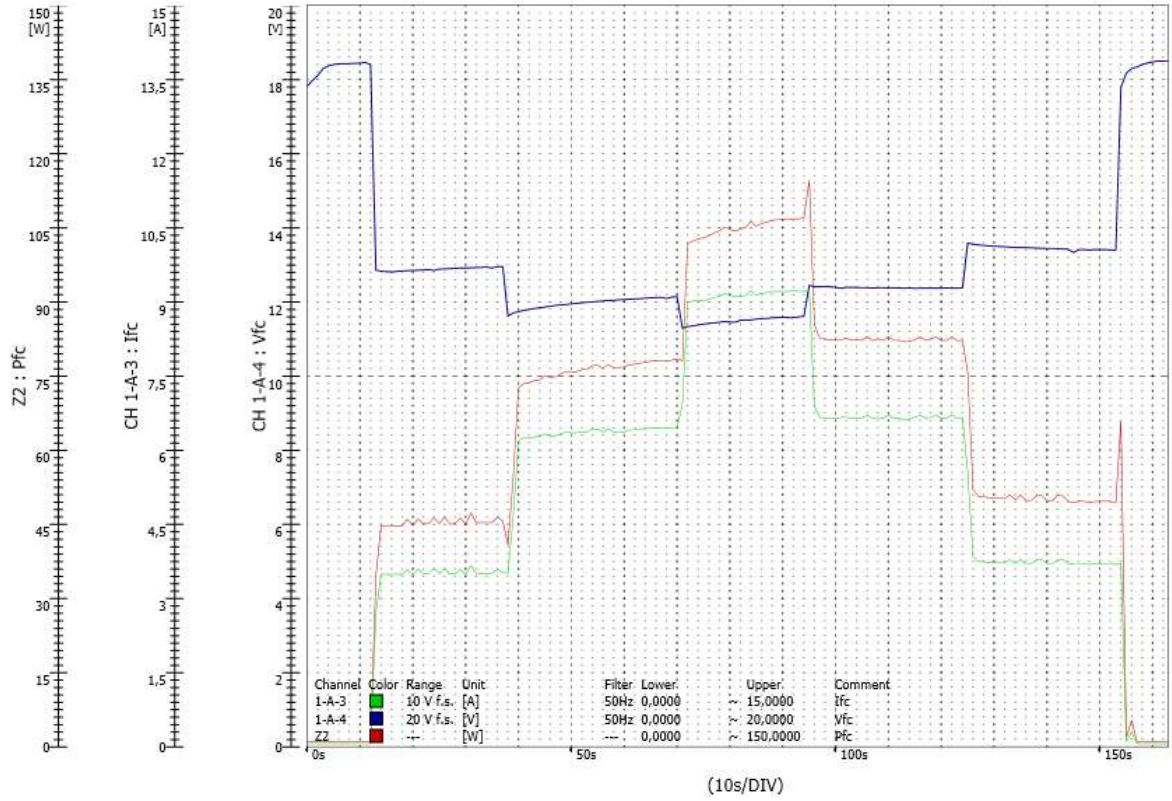
5.5. Yakıt Pili-Yük Deneyi

Yükü sadece batarya ile besledikten sonra aynı durumu yakıt pili ile tekrarlayarak (Şekil 5.12) hibrit güç sistemimizin iki bileşeninin tekil uygulamalardaki performansı gözlemlenmiştir. Dirençler yine teker teker devreye alınıp çıkarılmıştır (Şekil 5.13). Yakıt pili deneylerde kullanılmadan önce yaklaşık 15 dakika boşa çalıştırılarak hazır hale getirilmiştir. Böylece optimum sıcaklık ve nemlilik miktarına ulaşmıştır. Şekil 5.13'te görüldüğü gibi yakıt pil boşa çalışmada açık devre gerilimi dengeye ulaştığı bölgede 18.4 V olarak ölçülmüştür. İlk direncin devreye alınmasıyla gerilim 1 s içinde 12.8 volta düşmüş akım ise 2 s içerisinde gerekli değere ulaşmıştır. Görüldüğü gibi bataryadaki gerilim düşümü % 0.8 olurken bu düşüş yakıt pilinde % 30 olmaktadır. Ve talep edilen gücün sağlandığı denge durumunda (14-36. saniyeler arası) gerilimde küçük boyutlu dalgalanmalar devam etmekte bu nedenle akımda da dalgalanmalar olmaktadır. Akım ve gerilimdeki bu küçük dalgalanmalar her ikisinin çarpımı olan güçte daha belirgin bir halde görülmektedir. Bu

dalgalanmalar hidrojen akışının tamamen sabit olmamasından kaynaklanmakta olup özellikle tasfiye vanasının açılıp kapatıldığı 20. ve 30. saniyelerde daha fazla olmaktadır. İkinci direncin devreye alınmasıyla gerilim 11.6 volta kadar düşüp sonra 12 V civarına yükselmektedir. Gerilimdeki bu ikinci düşüş % 9’la sınırlı kalmaktadır ki bu değer batarya için sadece % 0.8 olarak ölçülmüştür. Üçüncü direncin de devreye alınmasıyla yakıt pili gerilimi minimum değeri olan 11.3 V değerini görüp daha sonra 11.6 volta kadar yükselmektedir. Son durumda yakıt pilinden çekilen akım ortalama 9.2 A olup güç ise 105 W civarındadır. Bu değer yakıt pilinin nominal güç değeri olan 100 wattın dahi üstünde bir değerdir. Burada en önemli nokta yakıt pilinin nominal güç ve bu güce yakın değerlerde gerilim dalgalanmasının çok olmaması ve kararlı bir şekilde çalışmasıdır. Yükler devreden çıkarıldığı anlarda gerilim aniden yükselmekte olup akımdaki düşüş biraz daha uzun sürmektedir. Bu durum talep edilen gücün azalmasına rağmen çıkış gücünde ani artışlara sebep olmaktadır. Kısa süreli bu artış önemsiz gibi gözükse de hız uygulamalarında hızın düşürülmek istendiği durumlarda ani hız artışlarına neden olabilecektir. Yakıt pili tam yük altında çalıştırılmaya devam edilirse dakikada 1.3 L hidrojen gazı tüketileceğinden (Şekil 5.3’de bu değer yaklaşık 1 L olmasına rağmen teknik özelliklerin gösterildiği Tablo 5.1’deki değer alınmıştır çünkü her ne kadar yakıt pili dakikada 1 L tüketse de içerisinden geçen miktar 1.3 L olup aradaki fark kullanılmadan dışarı atılmaktadır) ve elimizdeki tüpteki gazın (150 bar basınç durumu için) yakıt pili kullanım şartlarında yaklaşık 5000 litreye tekabül ettiği düşünülürse 80 saati aşkın bir süre kullanılabilir. Bu değer ise bataryanın kullanım süresinin 40 katına tekabül etmektedir.



Şekil 5.12. Yakıt pili-yük deney şeması

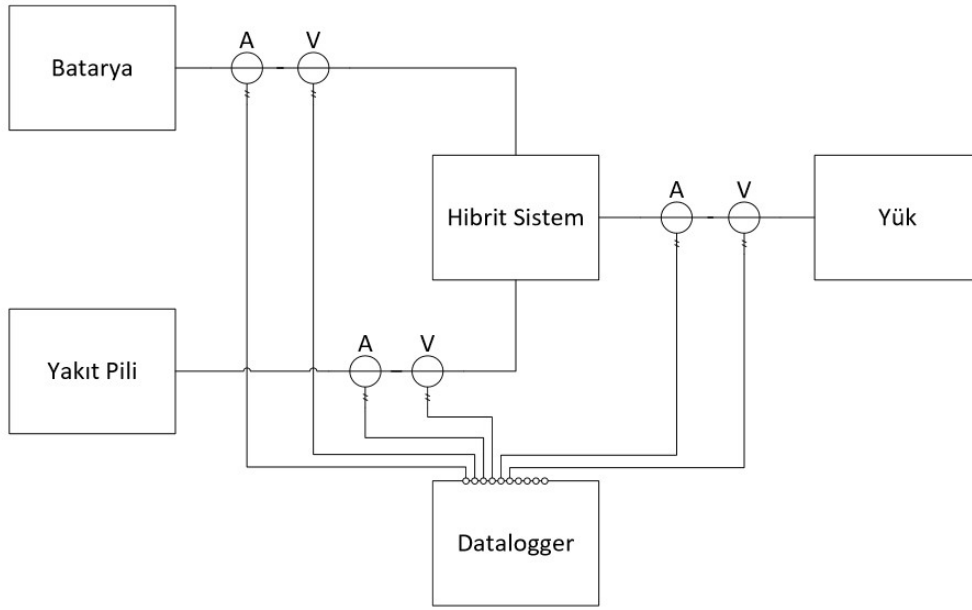


Şekil 5.13. Yakıt pili akım-gerilim karakteristiği ve güç eğrisi

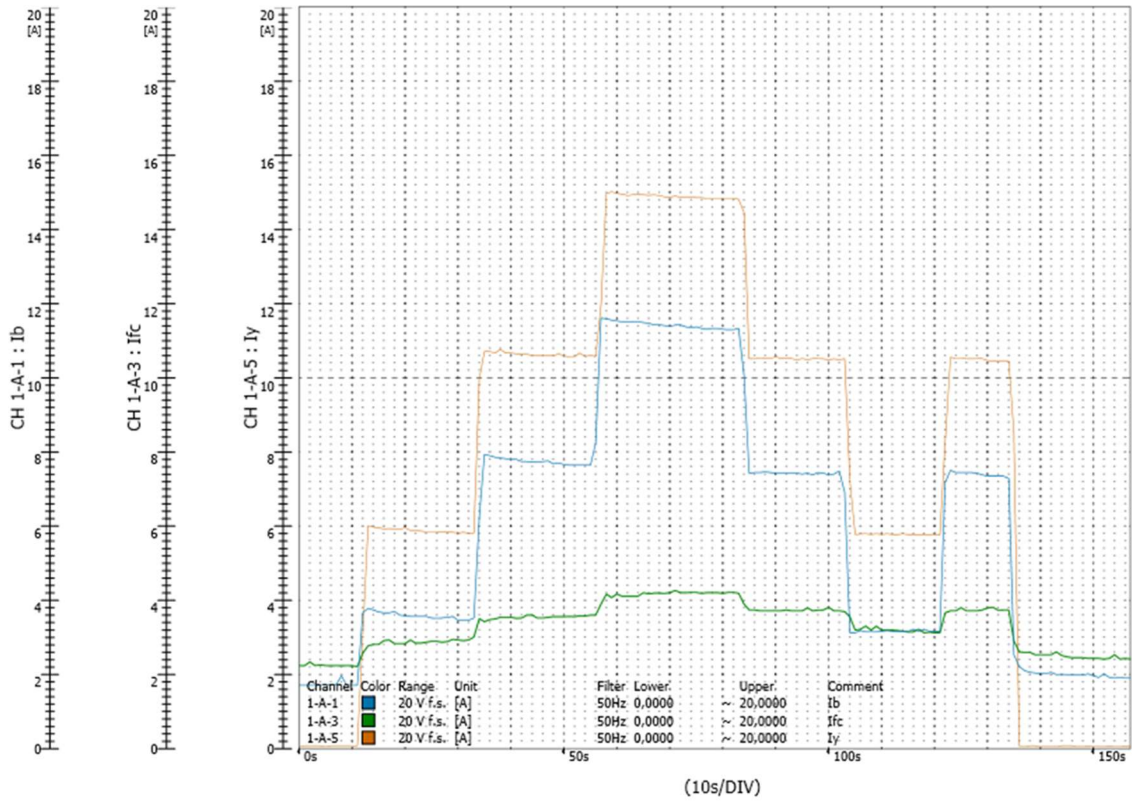
5.6. Hibrit Güç Sistemi-Yük Deneyi

Her birini ayrı ayrı incelediğimiz batarya ve yakıt pilini, hibrit sistemle birlikte kullanarak performans karakteristiklerini inceleyeceğiz. Yakıt pili-batarya hibrit güç sisteminin prensip şeması Şekil 5.14’te verilmiştir.

Sistem yük süz durumda olmasına yakıt pili çalışmasını sürdürüp yaklaşık olarak 2.2 amperlik bir akım üretmektedir ve bu akımın 0.4 amperlik kısmı hibrit sistemin ihtiyacını karşılamakta olup 1.8 amperi ise bataryayı şarj etmektedir (Şekil 5.15). Bu değer olması gerekeni yani yaklaşık olarak 8 amperlik bir akımla bataryayı şarj etme durumunu pek karşılayamamaktadır. Bunun nedeni yakıt pilimizin gerilim değerinin ilk yüklenmede aşırı bir düşüş göstermesidir. İlk durumda aslında batarya akımının negatif olması gerekmektedir çünkü yüksüz durumda akım üretmeyip tüketmektedir yani bir nevi yük konumdadır ama akım trafomuzun sadece skalar değer ölçmesi ve yön değişimini yansıtmamasından dolayı pozitif gözükmemektedir.



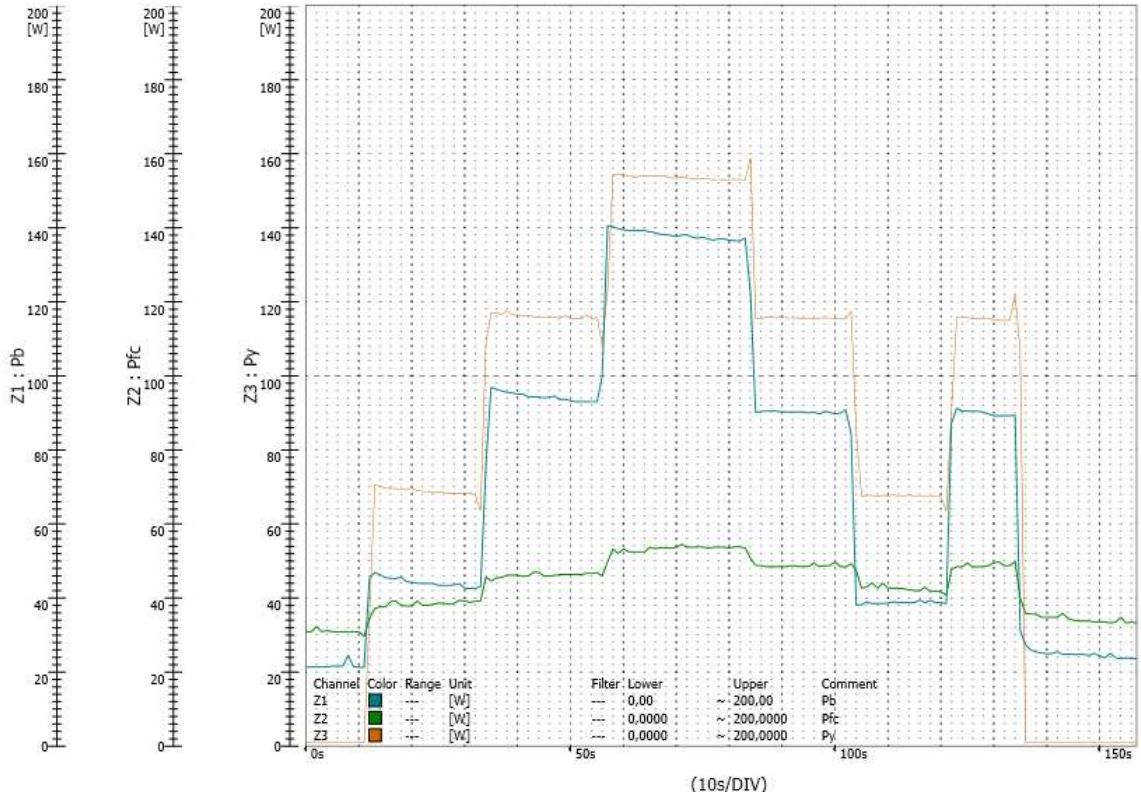
Şekil 5.14. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi prensip şeması



Şekil 5.15. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi akım değişimi

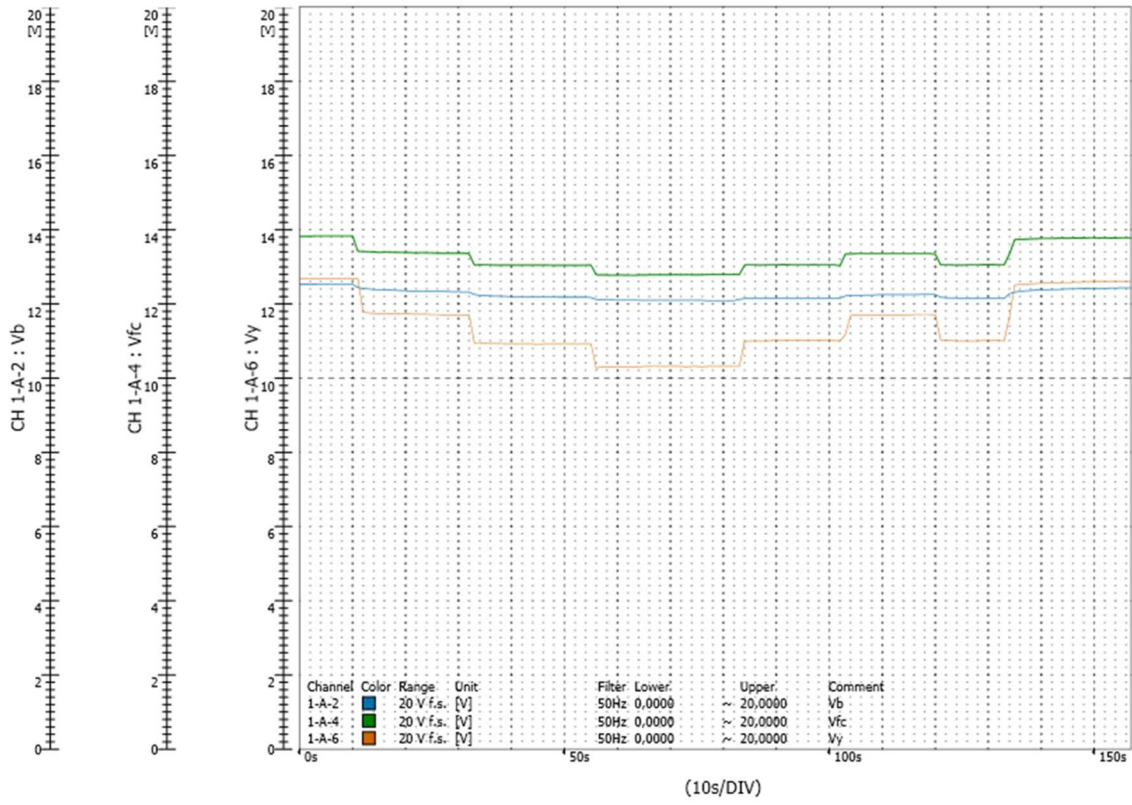
İlk direncin devreye alınmasıyla (11. s) başlangıç durumunda yakıt pilinin ürettiği akımın 2.8 A ve bataryanın ürettiği akımın 3.8 A, yükün çektiği akımın ise 6 A olduğu görülmektedir. Zaman geçtikçe yakıt pilinin akımının hafif bir artış göstererek bataryanın üretmesi gereken akımı düşürdüğü görülmüştür. Hibrit güç sisteminin güç gereksinimini ise 1 saniyede karşıladığı görülmüştür. Bu sonuç zaten hibrit sistemle ulaşılmak istenen bir durumdu. Böylece ayrı kullanımda geç olan tepki süresi hızlandırılarak bu olumsuzluğun üstesinden gelinmiştir. Yükleri kademeli olarak arttırdığımızda hem bataryanın hem de yakıt pilinin ürettiği akımda bir artış görülmektedir.

Hedeflenen sistem tam olarak gerçekleştirilebilseydi sadece ilk direnç devredeyken yakıt pili hem direnç için gerekli gücü sağlayıp hem de bataryayı aynı anda şarj etmesi gerekmekeydi. Çünkü Şekil 5.16'da görüldüğü gibi tek direncin devre olduğu durum için gerekli güç ortalama 70 W olup bu değer yakıt pilinin nominal gücü olan 100 wattın altındadır. Birincil güç kaynağı olması gereken yakıt pili ikincil konuma düşmüş durumdadır. Yine de tekil çalışmalarına göre toplam güç daha yüksek bir seviyeye çıkarılabilmıştır. Sadece bataryada güç değeri 120 W, yakıt pilinde 105 W iken hibrit sistemde yakıt pili 54 W, batarya 138 W toplamda 192 W gibi bir güç değerine ulaşılabilmiştir. Gerçi sistem kayıplarından dolayı sistem çıkışına verilebilen güç 154 W ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 5.16. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi güç eğrisi

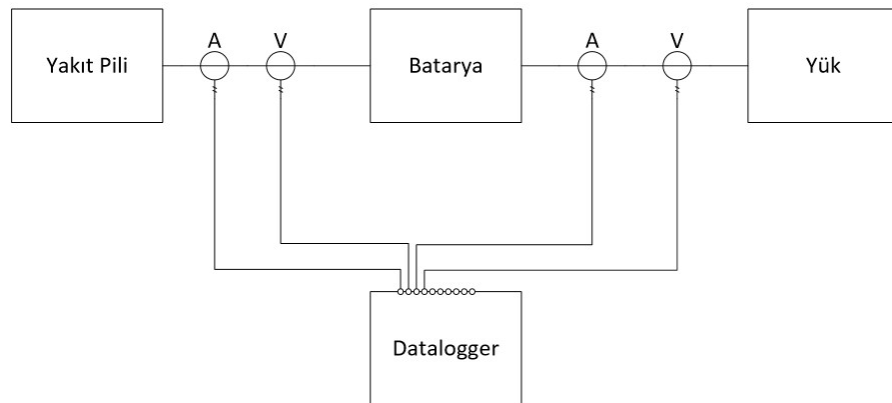
Şekil 5.17’de yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi gerilim grafiği görülmekte olup hem yakıt pili hem de batarya için değişen yük şartlarında gerilim değişiminin daha az olduğu görülmüştür. Bu avantaja rağmen hibrit sistemin direnci nedeniyle akım artışı ile birlikte yük geriliminde ciddi düşüşlere neden olmuştur. Bu beslenen yüke sağlanan gücün hem kalitesini hem de miktarını düşürmüştür.



Şekil 5.17. Yakıt pili-batarya hibrit güç sistemi gerilim değişimi

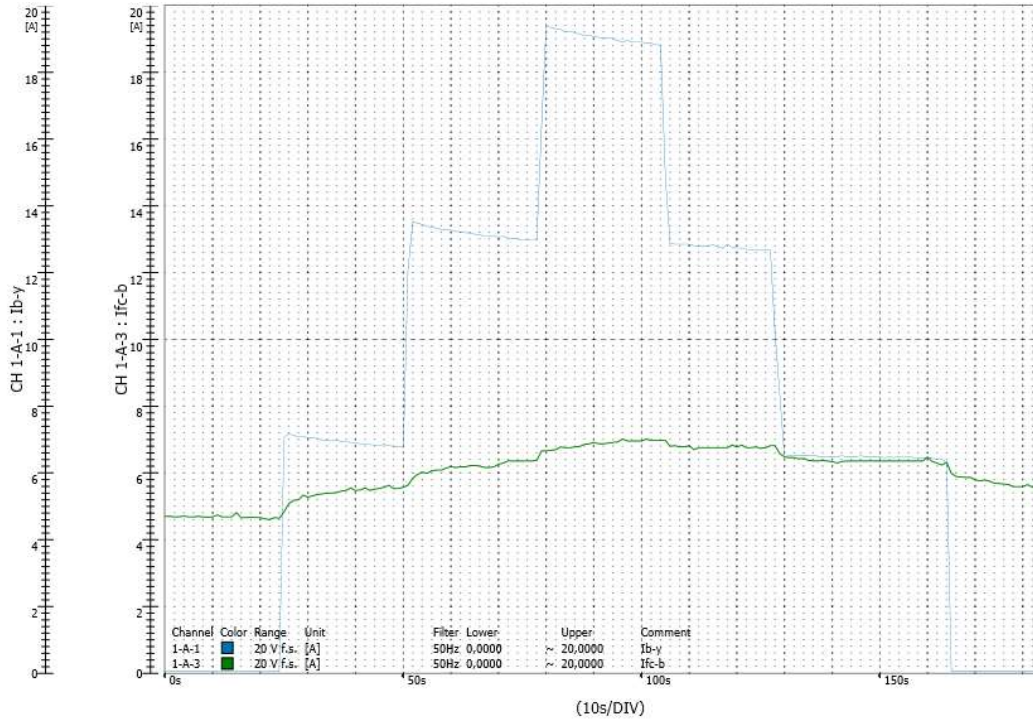
5.7. Yakıt Pili ve Bataryanın Paralel Çalışma Deneyi

Hibrit sistemimizin performansını mukayese edebilmek için aynı deney bir de yakıt pili ve bataryayı paralel bağlayarak aktif bir kontrol olmadan tekrarlanmıştır. Paralel çalışmaya ait şema Şekil 5.18’de verilmiştir.



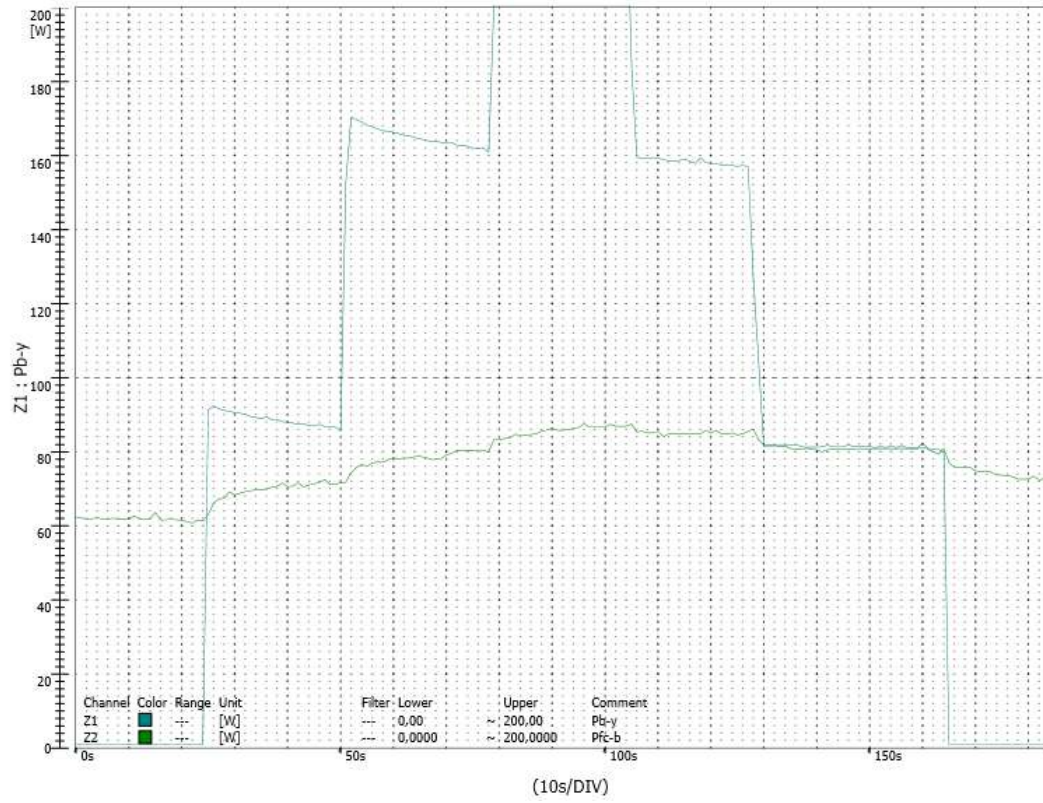
Şekil 5.18. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma şeması

Yüksüz durumda iken yakıt pili bataryayı 4.7 A ile şarj etmektedir (Şekil 5.19). Herhangi bir harici cihaza gerek duyulmadığından bir kayıp da söz konusu değildir. İlk direncin devreye alınması ile akım yine 1 saniyede istenilen değere ulaşmaktadır. Yükün çektiği ortalama 7 A akımın yaklaşık 5.5 amperini yakıt pili sağlarken geriye kalan kısmını batarya sağlamaktadır. Dirençlerin devreye alınması ile birlikte artan akım talebi çoğunlukla batarya tarafından karşılanıp yakıt pilinin de ürettiği akım daha yavaş bir şekilde artmaktadır.



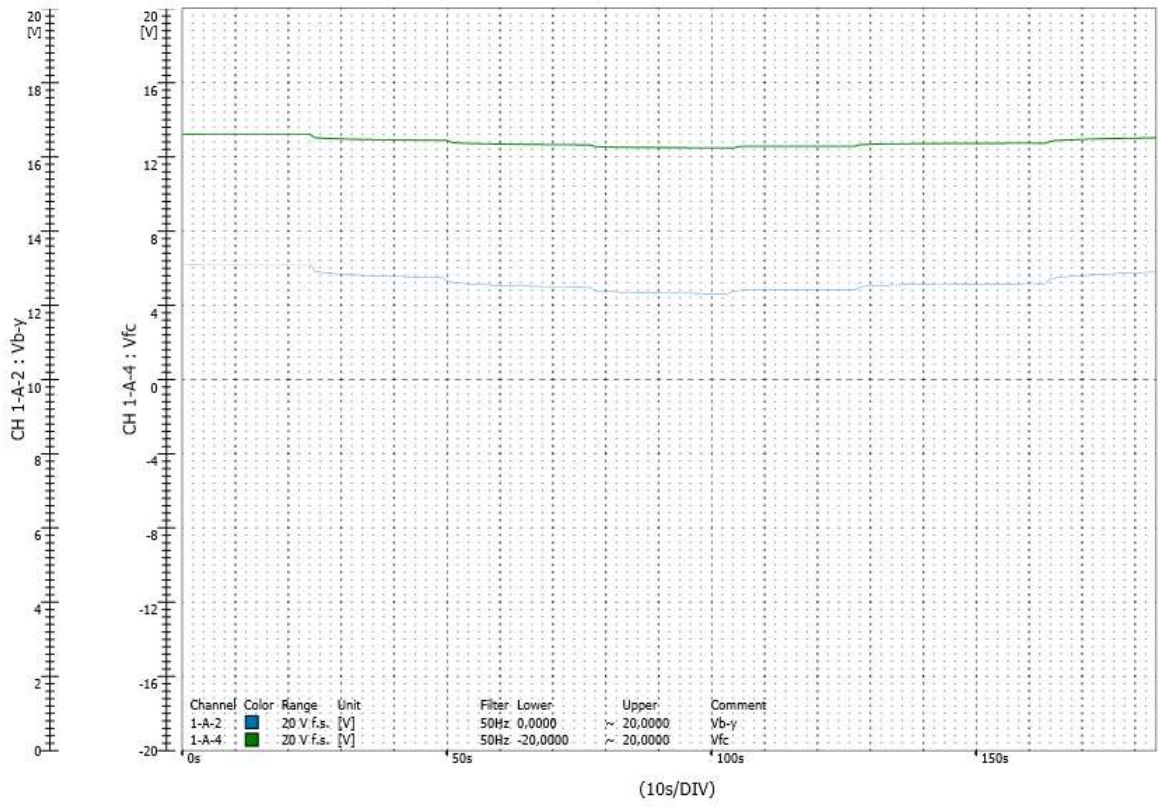
Şekil 5.19. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma akım değişimi

Paralel çalışma şartlarında yakıt pilinin çıkış gücü 62 ile 88 W arasında değişmektedir (Şekil 5.20). Bu hem nominal güce yakın hem de daha sınırlı bir aralıkta değişen güç demektir. Bu şekildeki bir çıkış gücü yakıt pilinin çalışma performansını da olumlu yönde etkilemektedir. Burada dikkat çeken bir husus da aşırı güçleri karşılayan batarya deşarj olmakla beraber çıkış gerilimi de azalmakta bu nedenle de yakıt pilinin bataryayı şarj etme miktarı artmaktadır. Bunu tüm dirençlerin devre dışı bırakıldığı 164. saniyeden sonra daha net gözlemleyebiliriz. İlk yüksüz çalışmada yakıt pil bataryaya 62 W güç verirken son çalışmada 72 W güç vermektedir. Bunun yanında sadece bataryada güç değeri 120 W, yakıt pilinde 105 W iken paralel çalışmada yakıt pili 86 W, batarya 146 W toplamda 232 W gibi bir güç değerine ulaşılabilmiştir.



Şekil 5.20. Yakıt pili batarya ve paralel çalışma güç eğrisi

Yakıt pili batarya paralel çalışma gerilim grafiği incelenecek olursa burada yakıt pilinin tekil ve hibrit çalışmasına kıyasla çok daha düzgün bir formda olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.21). Yine yakıt pili ile batarya paralel bağlı olduklarından çıkış gerilimleri de aynı kalmaktadır.



Şekil 5.21. Yakıt pili ve batarya paralel çalışma gerilim değişimi

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tezde günümüz en temel problemlerinden biri olan mobil uygulamalar için enerjinin depolanması ve kullanımı ile ilgili bir çözüm olan yakıt pili-batarya hibrit güç sistem tasarlanmaya çalışılmış ve bu tasarım deneysel olarak incelenmiştir.

Yapılan çalışmayla değişken yüklerde tepki süresi özellikle artan güç taleplerinde 2 s'den 1 s'ye düşürülerek iyileştirilmiş, yakıt pilinin daha sabit bir gerilim ve güçte çalışması sağlanarak verimliliği arttırılmıştır. Bu şekilde daha kararlı çalışması sağlanarak çalışma ömrü de uzatılmıştır. Batarya tarafında ise deşarjın tek çalışma durumuna göre daha sınırlı kalması ve sürekli şarj durumunda olmasından dolayı performans kaybı yaşanmamakla birlikte kullanım ömrü de uzamaktadır. Çalışma süresi olarak değerlendirilecek olursa bataryanın 2 saat, yakıt pilinin 80 saat ve hibrit sistemin de ikisinin toplamı olan 82 saat devreyi aynı yükte besleyebileceği görülmüştür. Hibrit sistem bataryaya nazaran çok daha uzun bir süre vaat ederken, yakıt pilinde süre oransal olarak pek bir avantaj sağlamazken, yükler açısından en önemli parametrelerden biri olan verilen gücün kalitesi, hem düzenlilik hem de tepki süresi olarak iyileştirilerek, arttırılmıştır. Genel olarak hibrit sistemde enerji yoğunluğu yüksek yakıt pili ile güç yoğunluğu yüksek batarya birleştirilerek hem enerji hem de güç yoğunluğu yüksek bir sistem tasarlanmıştır. Böylece her ikisinin avantajlarına sahip, dezavantajlarının ise aşıldığı bir sistem oluşturulmuştur.

Hibrit sistemin sağlıklı ve istenilen şekilde çalışabilmesi için kullanılan ekipmanların özellikleri büyük önem göstermektedir. Deneyde kurşun-asit bir batarya yerine lityum-iyon batarya türlerinden olan LiFePo_4 batarya kullanılırsa hem kurulan sistemin ağırlığı azaltılmış olur hem de değişken yüklerde tepki süresi daha kısaltılmış olur. Bunun yanında LiFePo_4 bataryaların şarj-deşarj çevrimi çok daha fazla olup daha uzun ömürlüdürler ve patlama riskleri çok daha düşüktür. Yakıt pilinin de nominal gerilim değeri bir miktar daha fazla olanı kullanılırsa yakıt pili hibrit güç sisteminde daha baskın bir hale gelip birincil güç kaynağı konumuna gelerek hem yüke hem de bataryaya daha fazla oranda güç sağlayabilecektir. Son olarak hidrojen kaynağı olarak yüksek basınçlı çelik tüp yerine bir metal hidrür tüp kullanılması hem güvenlik hem pratiklik hem de ağırlık açısından daha avantajlı bir sistem oluşturulmasına olanak sağlayabilir. Böylece tasarlanan sistem mobil bir güç kaynağı olarak daha kullanılabilir duruma gelebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] **Duarte, J.L., Hendrix, M., and Simões, M.G.,** 2007. Three-Port Bidirectional Converter for Hybrid Fuel Cell Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22**, 480-487.
- [2] **Tao, H., Kotsopoulos, A., Duarte, J.L., and Hendrix, M.A.M.,** 2005. Multi-Input Bidirectional DC-DC Converter Combining DC-Link and Magnetic-Coupling for Fuel Cell Systems, *Proc. IEEE 40th Industry Applications Society Conference*, Hong Kong, 2021-2028.
- [3] **Napoli, A.D., Crescimbeni, F., Rodo, S. and Solero, L.,** 2002. Multiple Input DC-DC Power Converter for Fuel-Cell Powered Hybrid Vehicles. *Power Electronics Specialists Conference*, Cairns Qld, 23-27 Haziran, 1685 – 1690.
- [4] **Piumsomboon, P., Pruksathorn, K., Hunsom, M., Tantavichet, N., Charutawai, K., Kittikiatsophon, W., Nakrumpai, B., Sripakagorn, A. and Damrongkijkarn, P.,** 2013. Road testing of a three-wheeler driven by a 5 kW PEM fuel cell in the absence and presence of batteries, *Renewable Energy*, **50**, 365-372.
- [5] **Tolj, I., Lototskyy, M.V., Davids, M.W., Pasupathi, S., Swart, G. and Pollet, B.G.,** 2013. Fuel cell-battery hybrid powered light electric vehicle (golf cart): Influence of fuel cell on the driving performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 10630-10639.
- [6] **Blackwelder, M.J. and Dougal, R.A.,** 2004. Power coordination in a fuel cell–battery hybrid power source using commercial power controller circuits, *Journal of Power Sources*, **134**, 139-147.
- [7] **Wang, Y. and Wang, C.Y.,** 2006. Dynamics of polymer electrolyte fuel cells undergoing load changes, *Electrochimica Acta*, **51**, 3924-3933.
- [8] **Cao, Y., Coplon, J., Ng, E. and Pickelsimer, M.,** 2010. Battery Electric Vehicle and Hybrid Fuel-cell/Battery Electric Vehicle for EPA P3 2011 Competition, *Senior Design Report*, University of Tennessee, Knoxville.
- [9] **Ün, Ü.T.,** 2003. Hidrojen Enerjisi: Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu, *Mühendis ve Makina*, **525**, Ekim 2003.

- [10] **Veziroğlu, T.N.**, 2004. Dünya Barışı İçin Türkiye Dünya Barışı İçin Hidrojen, Kaynak Yayınları, İstanbul.
- [11] **Hazer, B.** 2012. Genel Kimya (6. Baskı), Türkmen Kitabevi, İstanbul:
- [12] **Bockirs, J., Veziroğlu, T.N. and Smith, D.L.**, 2002. Geleceğin Enerjisi Güneş ve Hidrojen Kaynak Yayınları, İzmir.
- [13] **Öztürk, M., Özek, N. ve Yüksel, Y.E.**, 2010. Doğalgazdan Hidrojen Üretilmesi Ve Salınan Karbondioksitin Tutulması, *SDU International Technologic Sciences*, **2**, 1-13.
- [14] **Abderezak B., Khelidj B. and Abbes M.T.**, 2014. Modeling charge transfer in a PEM fuel cell using solar hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 1593-1603.
- [15] **Midilli, A., Ay, M., Kale, A. ve Veziroğlu, T.N.**, 2004. Karadeniz Dip Sularının Hidrojen Enerjisi Potansiyeli, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı, Cilt:2, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [16] **Koyunoğlu, S., Dindar, B. ve İçli, S.**, 2004. Fotokimyasal ve Fotobiyolojik Hidrojen Üretimi, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı, Cilt:2, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [17] http://www.eie.gov.tr/teknoloji/h_tasinmasi.aspx Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE), Hidrojen Enerjisi: Hidrojenin Taşınması. 10.09.2015
- [18] **Güvendir, M. ve Öztürk, T.**, 2003. Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama, *Mühendis ve Makine Dergisi*. Sayı: **523**.
- [19] **Kılıç, N.**, 2003. Geleceğin Enerjisi Olarak Adlandırılan “Hidrojen Enerjisi”, *AR&GE BÜLTEN*, Ekim 2009, 24-27.
- [20] **TÜSİAD**, 1998. 21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi: Hidrojen Enerjisi, Lebib Yalkın Yayınları, İstanbul.
- [21] **Bıyıkoglu, A.**, 2003. Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **16**, 523-542.
- [22] **Kordesch, K. and Simader G.**, 1996. Fuel Cells and Their Applications, VCH, Weinheim.
- [23] **Singh, R.**, 1999. “Will developing countries spur fuel cell surge?”, *Chemical Engineering Progress*, March 1999, 59-66.
- [24] **Larminie, J.**, 2003. Fuel Cell System Explained, J. Wiley, West Sussex.

- [25] **Seden M.G.**, 2013. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili Uygulamaları İçin Poli(Arilen Eter) Esaslı Membranların Hazırlanması, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Ji, M. and Wei Z.**, 2009. A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *Energies* 2009, **2**, 1057-1106.
- [27] **Smitha, B., Sridhar, S. and Khan, A.A.**, 2005. Solid polymer electrolyte membranes for fuel cell applications, *Journal Of Membrane Science*, **259**, 10-26.
- [28] **Scott, K. ve Xing L.**, 2012. Direct Methanol Fuel Cells, *Advances in Chemical Engineering*, **41**, 145-196.
- [29] **Manthiram, A., Zhao, X. and Li, W.**, 2012. Developments in membranes, catalysts and membrane electrode assemblies for direct methanol fuel cells (DMFCs), *Functional Materials for Sustainable Energy Applications 2012*, 312-369.
- [30] **Eapen, D.E., Suseendiran, S.R. and Rengaswamy, R.**, 2015. Compendium of Hydrogen Energy, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [31] **Esposito, V., Garbayo, I., Linderöth, S. and Pryds, N.**, 2015. Epitaxial Growth of Complex Metal Oxides, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [32] **Sharaf, O.Z. and Orhan M.F.**, 2014. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **32**, 810-853.
- [33] **Varkaraki E., Lymberopoulos N. and Zachariou A.**, 2003. Hydrogen Based Emergency Back-Up System For Telecommunication Applications. *J Power Sources*, **118**, 14–22.
- [34] **Elgowainy A., Gaines L., Wang M.**, 2009, Fuel-Cycle Analysis Of Early Market Applications Of Fuel Cells: Forklift Propulsion Systems And Distributed Power Generation, *Int J Hydrog Energy*, **34**, 3557–3570.
- [35] **Renquist J.V., Dickman B., Bradley T.H.**, 2012, Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered fork lifts. *Int J Hydrog Energy*, **37**, 12054–9.
- [36] Airport Cooperative Research Program, CDM Federal Programs Corporation, KB Environmental Sciences, Ricondo&Associates, 2012 Airport Ground Support Equipment(GSE): Emission Reduction Strategies, Inventory, and Tutorial. Transportation Research Board Of The National Academies Report 78, **ISBN 978-0-309-25862-3**.

- [37] **Tollefson J.**, (2009) US Congress Revives Hydrogen Vehicle Research *Nature*, **460**, 442–443.
- [38] US Department Of Energy, 2011. The Department Of Energy Hydrogen And Fuel Cells Program Plan: An Integrated Strategic Plan For The Research, Development, And Demonstration Of Hydrogen And Fuel Cell Technologies, Washington.
- [39] **Carter, D., Ryan, M. And Wing, J.**, 2012. The Fuel Cell Industry Review: Fuel Cell Today, Royston, UK.
- [40] **Bedir, F. ve Alniak, M.O.**, 2004. Yakıt Hücresi Sistemlerinin Çalışma Prensipleri ve Denizaltı Sistemlerdeki Tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3, 31-37.
- [41] **Yıldırım, M.**, 2004. Otomotiv Sektöründe Hidrojen Kullanımı ve Yakıt Pili Teknolojisi V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [42] **Altan, N.**, 2012. Güneş Pili Ve Hidrojen Yakıt Pilinden Beslenen Küçük Bir Elektrikli Araç İçin Batarya Şarj Sistemi Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [43] **Aydın, S., Gümü, R., Akçay, İ.H.**, 2013. Yakıt Pili ile Çalışan Elektrikli Bir Aracın Güç, Sıcaklık, Bağıl Nem ve Hızının Anlık Olarak İzlenmesi ve Kontrolü, *S.D.U. Teknik Bilimler Dergisi*, **2**, 7-12
- [44] **Yıldızbilir, F.**, 2006. Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [45] **Cetin, E., Yilanci, A., Oner, Y., Colak, M., Kasikci, İ., and Ozturk H.K.**, 2009. Electrical analysis of a hybrid photovoltaic-hydrogen/fuel cell energy system in Denizli, *Turkey Original Research Article Energy and Buildings*, **41**, 975-981.
- [46] **Çetin, E.**, 2010. Fotovoltaik-Rüzgar-Yakıt Pili hibrit Güç Sistemleri İçin Bir Mikro Doğru Akım Dağıtım Şebekesi Tasarlanması, Uygulanması ve Analizi, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.
- [47] **Chen, C.C. and Chau, K.T.**, 2001. Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press, New York.
- [48] **Emadi, A.**, 2005. Handbook of Automatic Power Electronics and Motor Drives, CRC Press, New York.
- [49] **Fraas, L. and Partain, L.**, 2010. Solar Cells And Their Applications, Wiley, New Jersey, USA.

[50] http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/
Hydrogen fuel cell vehicles. 12 Agosto 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Habip ŞAHİN, 1984 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Elazığ, lise eğitimini ise Kayseri'de tamamladıktan sonra 2002 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. Buradaki eğitimine çeşitli sağlık problemleri nedeniyle birkaç sene ara verdikten sonra Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümüne yatay geçiş yaparak 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılında Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketine (TEİAŞ) mühendis olarak işe başladı. 2013 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Bu süreçte 2014 yılında TEİAŞ'taki görevini bırakarak Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve halen bu görevini sürdürmektedir.