



MANYETİK ALAN KATKILI YAKIT HÜCRE SİSTEMİ TASARIMI

Mustafa Melih KALE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa Melih KALE

18/01/2023

MANYETİK ALAN KATKILI YAKIT HÜCRE SİSTEMİ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa Melih KALE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan cihazlar yakıt hücreleridir. Literatürde farklı tiplerde yakıt hücreleri bulunmasına rağmen en fazla tercih edilen PEM (polimer elektrolit membran) yakıt hücresidir. Birçok avantajı sayesinde gelecek zamanlarda fosil yakıtlara seçenek olarak bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Hibrit Güç Sistemlerinde hidrojen tüketimini azaltmak için yeni bir enerji yönetim stratejisi önerilmiştir. Bu Enerji Yönetimi Stratejisi, DC barasında talep edilen yük talebinin bir Yük Takip kontrol döngüsünü ve hava akış hızına uygulanan Global Extremum Seeking algoritmasına dayalı olarak yakıt ekonomisini iyileştirmek için bir optimizasyon kontrol döngüsünü kullanır. Bu tez çalışmasında, Hibrit Güç Sisteminde kullanılan PEM yakıt hücresine harici olarak uygulanan manyetik alan B'nin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, B manyetik alanı çok düşük değerlerden çok yüksek değerlere kadar sisteme uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda B manyetik alan hücre yığını boyunca akıma olumlu bir etki verir ve sistemin verimliliğine katkıda bulunur. Hücre akım akışının maksimum olduğu optimum bir manyetik alan değeri vardır. Ayrıca akımda yine bir optimizasyon çalışmasının gerekli olduğu bazı dalgalanmalar vardır.

Bilim Kodu : 90516

Anahtar Kelimeler : Yakıt hücreleri, manyetik alan, PEM, akım dalgalanması

Sayfa Adedi : 43

Danışman : Prof. Dr. Erol KURT

MAGNETIC FIELD ADDED FUEL CELL SYSTEM DESIGN

(M. Sc. Thesis)

Mustafa Melih KALE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Fuel cell structures convert chemical energy to electrical energy. In the literature, although many types of fuel cell structures exist, the most preferable one is called PEM (Polymer Electrolyte Membrane) type. Since PEM has many advantages over the other types, there are many applications for the energy requirements. A new energy control strategy for energy efficiency in a Hybrid Power System was recommended. This energy control strategy mainly uses an optimization scheme for the control of fuel economy by a Global Extremum Seeking in a relevant algorithm, so that the dc power requirement on the load is considered for the flowing charge amount and applied to the air velocity used in the stack to improve fuel economy. In this work, the effect of magnetic field B applied externally to the PEM fuel-cell stack in a Hybrid Power System is explored. In MatLab/Simulink, field B is varied to some extent from very low to the higher values in an arbitrary unit and the conversion output is examined versus the field strength. For this process, B gives a positive effect to the flowing current along the cell stack and contributes to the efficiency of the system. There exists an optimum field value, where the cell current flow maximizes. Besides, there exist certain fluctuations in the current where an optimization work is still required.

Science Code : 90516

Key Words : Fuel cell, magnetic field, PEM, current fluctuation

Page Number : 43

Supervisor : Prof. Dr. Erol KURT

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışması sürecinde bilgi ve tecrübesiyle bana ışık gösteren değerli hocam Prof. Dr. Erol KURT'a sonsuz teşekkürlerimi takdim ederim. Uygulamanın çeşitli mertebelerinde desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Kayhan ÇELİK'e teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimi almamda beni destekleyen ve motive eden Havelsan A.Ş.'ye teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamı yaparken yapmış olduğu fedakarlık ve vermiş olduğu emekler ile bana güç veren biricik eşim Merve GÜLER KALE'ye teşekkür ederim. Ayrıca her konuda beni destekleyen ve her daim yardımcı olan aileme teşekkür etmek istiyorum.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. TEMEL ELEKTROMANYETİK İFADELER	5
3.1. Elektrik Alan	5
3.2. Manyetik Alan.....	6
3.3. Elektromanyetik Alan	8
3.4. Maxwell Denklemleri	9
4. YAKIT HÜCRELERİ	11
4.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi.....	11
4.2. Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi	13
4.3. Yakıt Hücresinin Avantajları ve Dezavantajları	15
4.4. Yakıt Hücresinin Performansını Etkileyen Faktörler	16
4.5. Yakıt Hücresi Türleri.....	17
4.5.1. Alkali yakıt hücreleri	17
4.5.2. Fosforik asit yakıt hücreleri	17
4.5.3. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücreleri	17

4.5.4. Katı oksit yakıt hücreleri	19
4.5.5. Erimiş karbonat oksit yakıt hücreleri.....	19
5. PEM YAKIT HÜCRESİ	21
5.1. Yakıt Hücresi Bileşenleri	22
5.1.1. Membran.....	22
5.1.2. Katalizör tabakası	22
5.1.3. Gaz difüzyon tabakaları.....	22
5.1.4. Bipolar tabakalar	23
5.2. PEM Yakıt Hücresi Açık Devre Gerilimi	23
5.3. Polarizasyon Eğrisi ve Kayıplar.....	23
5.3.1. Aktivasyon kayıpları.....	24
5.3.2. Ohmik kayıplar	24
5.3.3. Konsantrasyon kayıpları.....	25
5.3.4. Diğer kayıplar	25
5.3.5. Entropi kayıpları	25
6. MATERYAL VE METOT	27
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	39
KAYNAKLAR.....	41
ÖZGEÇMİŞ	43

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Maxwell denklemleri.....	10
Çizelge 7.1. Sisteme uygulanan manyetik alan değerleri.....	31



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Elektrik alan çizgilerinin temsili gösterimi.....	6
Şekil 3.2. Manyetik alan çizgilerinin demir tozuyla gösterimi.....	7
Şekil 3.3. Sağ el kuralı	7
Şekil 3.4. Elektrik ve manyetik alan etkileşimi	8
Şekil 4.1. Yakıt hücrelerinin tarihsel süreci.....	13
Şekil 4.2. Yakıt hücrelerinin çalışma şekli	15
Şekil 4.3. PEM yakıt hücresi elektriksel eş değer devresi	18
Şekil 5.1. PEM yakıt hücresi.....	21
Şekil 5.2. Polarizasyon eğrisi.....	24
Şekil 6.1. HPS topolojisi.....	28
Şekil 7.1. PEM yakıt hücresi manyetik alan yönü	31
Şekil 7.2. 0,01; 0,05; 0,1 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	32
Şekil 7.3. 0,25; 0,5; 0,75 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	32
Şekil 7.4. 1; 1,1; 1,2 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	32
Şekil 7.5. 1,3; 1,4; 1,5 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	32
Şekil 7.6. 1,75; 2; 3 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	33
Şekil 7.7. 4, 5, 10 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	33
Şekil 7.8. 15, 20, 25 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	33
Şekil 7.9. 30, 35, 50 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi	33
Şekil 7.10. Yakıt hücresi akımının maksimum değerleri.....	34
Şekil 7.11. Yakıt hücresi AirFr'nin maksimum değerleri.....	35
Şekil 7.12. Yakıt hücresi FuelFr'nin maksimum değerleri.....	35
Şekil 7.13. Yakıt hücresi Pfcnet'in maksimum değerleri	36

Şekil

Sayfa

Şekil 7.14. Yakıt hücresi veriminin maksimum değerleri 37



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
T	Tesla
V	Volt

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
EDS	Enerji Depolama Sistemi
EMS	Enerji Yönetim Sistemi
GES	Global Extremum Seeking
HPS	Hibrit Güç Sistemi
PEM	Proton Exchange Membran
PEM	Proton Exchange Membran Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ve teknolojik gelişmelerle enerji ihtiyacı git gide artmaktadır. Enerji ihtiyacımızın büyük bir çoğunluğunu fosil yakıtlardan karşılamaktayız. Bu yakıtlar doğadan elde edilebilirler ancak yeryüzünde kısıtlı miktarda bulunmaktadır. Bu kaynaklar ilerleyen yıllarda tükendiğinde, hayatımızın her alanında aktif olarak kullandığımız pek çok şeyden yoksun kalabileceğiz. Bunun önüne geçmek için de fosil yakıtlar yerine yenilebilir enerji kaynakları ve alternatif enerji teknolojilerinden yakıt hücrelerini kullanmaya çalışmaktayız.

Yakıt hücreleri, alternatif enerji kaynakları için geliştirilen teknolojilerin başında gelmektedir. Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlara yakıt hücreleri denir. Enerji üretiminde önemli bir rol oynayan yakıt hücreleri, birçok gelişmelere yol açacak ve ilerleyen zamanlarda küresel ekonomiye ışık tutabilecek potansiyele sahiptir.

Tarih boyunca yakıt hücreleri teknolojisinin gelişim aşamasında, ticarileşmenin önüne taş koyan problemlerin çözülmesi için ileri sürülmüş farklı yönelimler sayesinde birçok çeşitli tasarımın gelişmesine destek sağlamıştır. Enerji üretiminde iyi mekanik özellikler, yüksek seçicilik, yüksek güç yoğunluğu ve enerji elde etmekte yüksek verim sunması açısından avantajlara sahiptir. Birçok çeşitli türde yakıt hücresi olmasına rağmen en çok tercih edilen PEM yakıt hücresidir. Taşınabilir güç, ulaşım ve yerel güç üretimi gibi çok fazla sahada PEM yakıt hücreleri, gözle görülür seviyede olumu özelliklere sahiptir. PEM yakıt hücreleri, farklı tasarımlarla karşılaştırıldığında az hacim kaplarlar, çalışma sıcaklıkları daha düşüktür, ağırlıkları azdır ve işletimleri zor değildir. Bu sebeplerden ötürü şu anda hidrojen yakıtı ile çalışan taşıtların birçoğu PEM yakıt hücre teknolojisi kullanmaktadır. Yakıt hücreleri üzerinde günümüzde çok sayıda araştırma ve geliştirme faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. PEM yakıt hücreleri bu çalışmalarının neredeyse %90'ını oluşturmaktadır.

Yakıt hücrelerinin yedek kaynak olarak kullanımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarındaki güç akışının değişkenliği azaltılmaktadır. Bu yüzden Hibrit Güç Sistemi ile Enerji Depolama Sistemi (EDS) tasarımı optimum çalışması sağlanmalıdır. Literatürde Hibrit Güç Sistemi (HPS) optimizasyonu için birçok algoritma bulunmaktadır. HPS topolojisinde iki veya daha fazla enerji kaynağı ve yük bulunduğundan Enerji Depolama Sisteminin uygun şekilde

tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle HPS topolojisinde birçok yakıt hücresi türü yedek enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarında, yük akışı (P_{Res}) ve yük talebi (P_{load}) değişken olduğu için tahmini zordur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen mevcut gücün belirsizliğini azaltmak ve yük talebindeki değişkenliği, boost convertar da LF kontrol ile analiz edilmektedir [1].

Yakıt hücreleri elektrokimyasal enerji sistemleri olduğundan, yakıt hücrelerine manyetik alan uygulanması elektron transfer oranlarını artırır. Elektron transfer oranının artması da sistemi de etkilemektedir [2]. Bu çalışmada, bir hibrit güç sisteminde PEM yakıt hücresi yığına harici olarak uygulanan manyetik alan B'nin etkisi araştırılmıştır. Bu işlem için B, hücre yığını boyunca akan akıma olumlu bir etki verir ve sistemin verimliliğine katkıda bulunur. Yakıt hücresi akım akışının maksimum olduğu bir optimum manyetik alan değeri vardır. Ayrıca, akımda yine bir optimizasyon çalışmasının gerekli olduğu bazı dalgalanmalar vardır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür taramasında yakıt hücrelerine manyetik alan uygulanmasına ilişkin incelemeler yapılmıştır. İncelemelerde bir çok çalışmanın deneysel olarak yapıldığı görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmaların çoğunda manyetik alan yakıt hücrelerinin iç yapısına uygulandığı görülmüştür.

Matsushima ve arkadaşları 2008 yılında PEM yakıt hücresine manyetik alan uygulamanın etkisini incelemek için çalışma gerçekleştirmiştir. Düşük sıcaklık ve oksijenin daha düşük kısmi basıncında PEM yakıt hücresine manyetik alanine etkisini incelemiştir. Gaz besleme yönü manyetik kuvvetle çakıştığı gaz iletiminin hızlandığı, ters yönde olduklarında ise gaz iletiminin baskılandığı gözlemlenmiştir [3].

Okada ve arkadaşları 2003 yılında yaptığı çalışmada bir yakıt hücresinin katodunun arkasına kalıcı mıknatıs yerleştirmiştir. Bu kalıcı mıknatıs elektrokimyasal akıyı iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Oksijen indirgenmesi ile de üretilen akımın manyetik yoğunluğunun artması ile arttığını ortaya koymuşlardır [4].

Feng-Jen Chu ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı çalışmada fotosentetik seramik microbial yakıt hücresine (CMFC) farklı manyetik alanlar etkisi altında bırakarak geleneksel proton değişim membranlarının verimliliğini artırmışlardır. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki 200 mT manyetik alan uygulandığında yakıt hücresinin güç üretimi yaklaşık %61 artmıştır. Yüksek manyetik alan değerleri uygulandığında ise yakıt hücresinin performansının negative anlamda etkilendiği görülmüştür [5].

Zhong-Hua Tong ve arkadaşları 2015 yılında yaptığı mikrobiyal yakıt hücrelerine zayıf manyetik alan uygulayarak çalışma gerçekleştirmişlerdir. Manyetik alan altında, yakıt hücresinin aktivasyon kaybı azaldı, ancak redoks araçlarının salgılanmasında artış olmadı. Çalışmaları ile zayıf manyetik alanine çeşitli biyoelektrokimyasal enerji üretimi ve dekontaminasyon uygulamaları için mikrobiyal aktiviteleri uyarmak için basit ve etkili bir yaklaşım olarak uygulanabileceğini görülmüştür [6].

Ahmed A. Abdel-Rehim tarafından 2019 yılında PEM yakıt hücresine deneysel olarak düşük manyetik alan uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda PEM yakıt hücresi manyetik alan maruz kaldığında verimlilikte yaklaşık %10'luk bir artış göstermiştir. Ayrıca manyetik güç arttıkça çıkış voltunun arttığını da göstermiştir [2].



3. TEMEL ELEKTROMANYETİK İFADELER

3.1. Elektrik Alan

Elektrik alan, statik (durağan) bir yük veya dinamik (zamanla değişen) bir manyetik alan tarafından oluşturulan elektromanyetiğin temel sonuçlarından biridir. Elektrik alan, aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi birim yük başına kuvvet olarak tanımlanır.

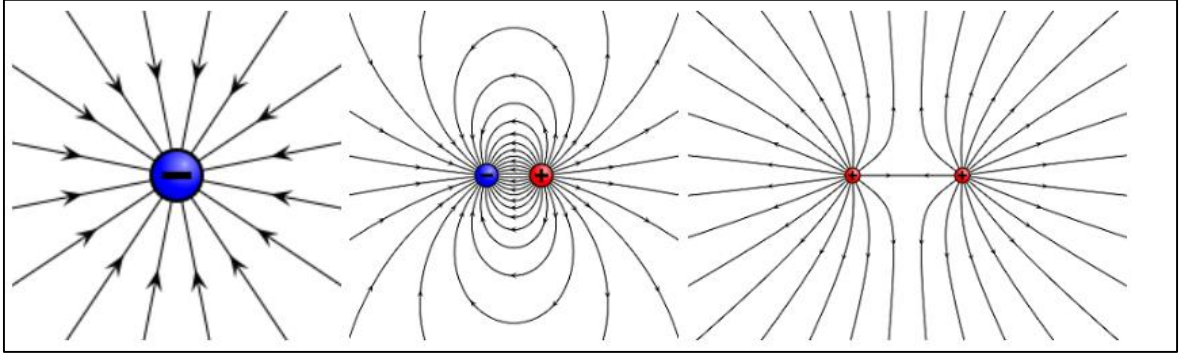
$$E = \frac{F}{q} \quad (2.1)$$

Eş 2.1’de verilen q değeri Columb cinsinden yükü ifade etmektedir. Bu nedenle bir elektrik alanın varlığında bir yük olduğunda, yüklü parçacığın hareket etmesine neden olan bir kuvvete maruz kalır. Bu da Eş 2.1’deki denklemi aşağıdaki forma çevirir:

$$\vec{F} = q * \vec{E} \quad (2.2)$$

Tıpkı yükler gibi, kütleli cisimlerin birbirlerinin varlığında birbirlerine doğru çekilmesi gibi, elektrik alanına birçok yönden yerçekimi alanına benzer bir şekilde bakılabilir. Fakat, önemli bir fark vardır; yerçekimi alanları çekimle (nesneleri bir araya getirerek) sınırlıdır, oysa elektrik alanları nesnenin alandaki yüküne bağlı olarak çekici veya itici olabilir. Tanım olarak, yukarıda verilen kuvvet denklemindeki pozitif bir yük itici bir kuvvete maruz kalacak (alan kaynağından uzaklaşacaktır) ve negatif bir yük çekici kuvveti hissedecektir. Elektrik alanlarının bu çekici/itici doğası nedeniyle, onları çizmek için bir notasyon vardır. Pozitif bir durağan yükün elektrik alan çizgileri radyal olarak ondan uzağa işaret eder (yüzeyinden uzağa, her yöne dik çizgiler) ve negatif bir durağan yükün çizgileri radyal olarak ona doğru bakar [7].

Elektrik alan şiddeti, gerilim ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Elektrik alan şiddeti kaynaktan uzaklaştıkça azalmaktadır. Elektrik alanlar insan derisinden geçerken bile şiddeti çok düşmektedir. İnsan bedeninin de zayıf akımlar oluşturabilmektedir.



Şekil 3.1. Elektrik alan çizgilerinin temsili gösterimi

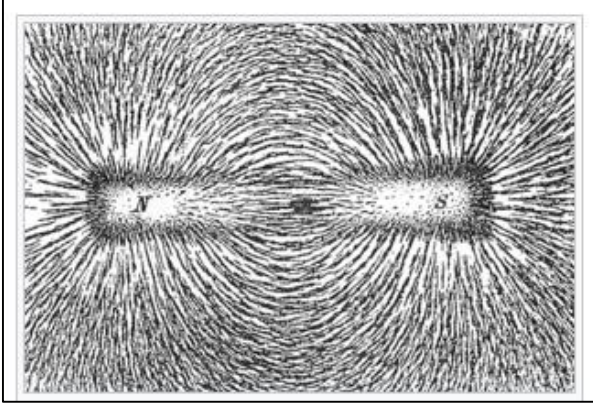
3.2. Manyetik Alan

Manyetik alanlar, elektrik alanlarının değiştirilmesiyle, genellikle elektronlar gibi hareketli yükler aracılığıyla, genellikle makroskopik elektrik akımı (bir teldeki akım gibi) veya mikroskopik bir akım (atomik yörüngede olduğu gibi) şeklinde üretilir. Fizikteki simetrisinin en güzel örneklerinden birinde, değişen manyetik alanlar elektrik alanları oluşturur. Değişen manyetik alanlardan gelen bu elektrik alanları, elektrik jeneratörlerinin nasıl elektrik akımı oluşturabildiğidir. Manyetik alan bir vektör alanıdır, yani herhangi bir noktada belirli bir büyüklüğü ve yönü vardır. B harfi ile manyetik alan temsil edilir ve SI birimi Tesla'dır ve kısaca T ile gösterilir. Günlük olaylar için Tesla birimi çok büyüktür. Bu sebepten dolayı günlük olaylar için Gauss (G) birimi kullanılmaktadır.

En geniş tabirle manyetik alan, hareket eden elektrik yüküne etki eden Lorentz kuvveti ile adlandırılır. Maxwell denklemleri elektrik alan, manyetik alan, akım ve onları oluşturan yükler arasındaki ilişki ile tanımlanır. Eş 2.3'te manyetik alan şiddeti verilmiştir.

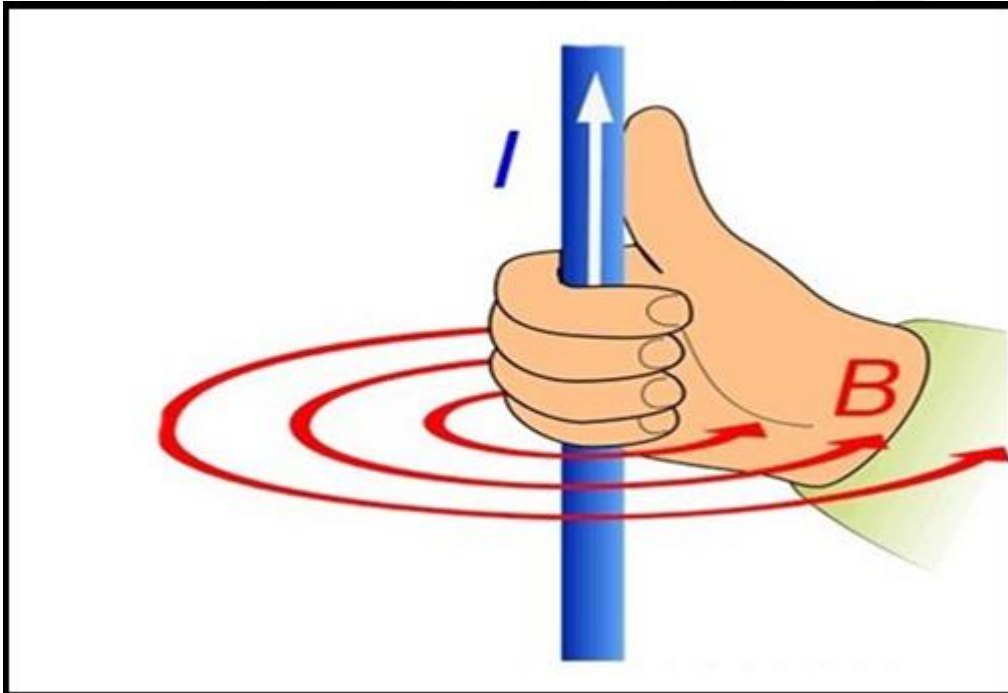
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (2.3)$$

Manyetik alan çizgilerinin yönü N kutbundan S kutbuna doğru olduğu kabul edilmektedir. Manyetik alanın içerisine bir pusulayı koyarsak, pusula manyetik alan doğrultusuna yönelir (N kutbundan S kutbuna doğru). Bu çizgilere teğet durumda olan ise manyetik alan vektörüdür. Manyetik alan çizgilerinin yoğun olduğu yerlerde manyetik alanın şiddeti fazladır [8].



Şekil 3.2. Manyetik alan çizgilerinin demir tozuyla gösterimi

Akım taşıyan bir iletkenin etrafında manyetik alan oluşmaktadır. Oluşan bu manyetik alan, sağ el kuralı yardımı ile bulunabilir. Sağ el kuralında sağ elin baş parmağı akımın yönünü gösterirken diğer dört parmak ise manyetik alanın yönünü göstermektedir. Şekil 3.3'te sağ el kuralı gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.3. Sağ el kuralı

Manyetik alan şiddeti, akım ile doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir. Manyetik alanın oluşması için ortamda bir elektrik akımı oluşması gerekmektedir. Manyetik alan şiddeti kaynaktan uzaklaştıkça azalmaktadır. Manyetik alan şiddetini azaltan madde sayısı oldukça

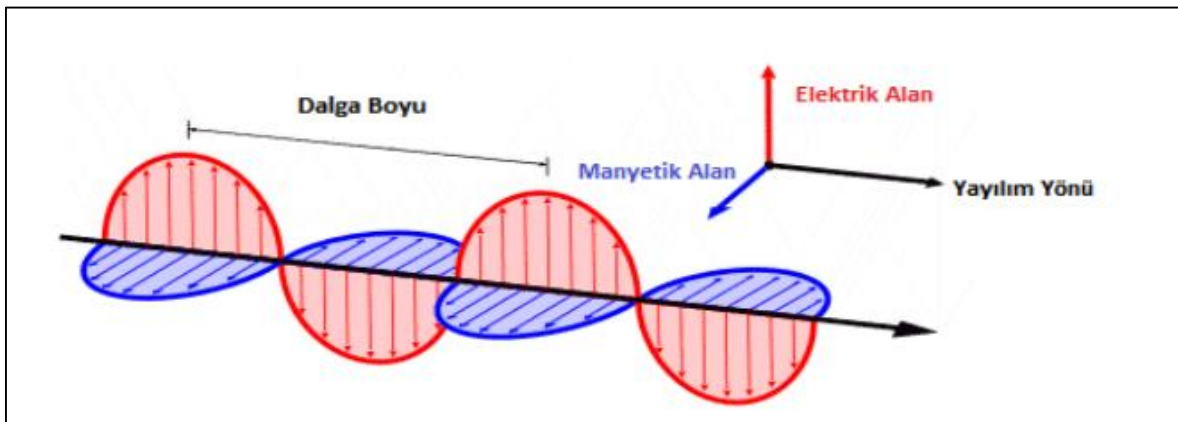
düşüktür. Manyetik alanlar neredeyse her yerden geçebilmektedir. Manyetik alanlar insan bedenine içine girip organlarda zayıf akımlara yol açabilir.

3.3. Elektromanyetik Alan

Elektromanyetik alan, bir elektrik alan ve bir manyetik alanın birleşimi olarak görülebilir. Elektrik alan sabit yükler tarafından üretilirken ve manyetik alan hareketli yükler (akımlar) tarafından üretilir. Bu ikisi genellikle elektromanyetik alanın kaynakları olarak tanımlanır. Akımın ve yüklerin elektromanyetik alanla etkileşime girme şekli, Maxwell denklemleri ve Lorentz kuvvet yasası ile tanımlanır.

Kuvvetin elektrik yükü hareketinden bağımsız olan kısmı elektrik alanla alakalıdır. Elektrik yükünün hareketi ise manyetik alanla alakalıdır. Hareketli elektrik yükleri üzerinde statik manyetik alanlar bir kuvvet oluştururken durgun elektrik yükleri üzerinde de değişen manyetik alanlar bir kuvvet oluşturur. Durağan yükler üzerindeki kuvvetler elektrik alanla ölçülmektedir. Değişen elektrik alanlar manyetik alanları indüklerken değişen manyetik alanlar da elektrik alanları indüklemektedir.

Elektrik alan ve manyetik alan vektörleri boşlukta birbirine dik olup doğrultusu her iki alana da dik şekilde yayılan elektromanyetik dalga şeklindedir. Elektrik alan vektörlerinin varyasyonu ile manyetik alan vektörlerinin varyasyonu sinüzoidal şekildedir. Şekil 3.4'te elektrik alan ve manyetik alan vektörünün etkileşimi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Elektrik ve manyetik alan etkileşimi

Günümüzde birçok cihaz elektromanyetik alan kaynağı bulunmaktadır. Cep telefonları, bilgisayar ekranları, mikrodalga fırınları, saç kurutma makineleri, baz istasyonları gibi birçok cihaz elektromanyetik alan oluşturmaktadır. Bu cihazların her biri farklı değerde elektromanyetik alan oluşturmaktadır. Elektromanyetik alan kaynaklarına ne kadar çok maruz kalınırsa o kadar fazla elektromanyetik alan etkisi içine girmiş olmaktadır. Ancak elektromanyetik alana maruz kalmamız sonucu vücudumuza yaptığı etki hakkında araştırmalar devam etmektedir.

3.4. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri, manyetik ve elektrik alanların birbirlerini, akımlar ve yükler tarafından nasıl değiştirildiği ve üretildiğini açıklamaktadır. Elektrik alan ve manyetik alan denklemlerinde dört adet denklem bulunmaktadır.

Birinci eşitlik olan Faraday Yasası elektrik dolanımıyla alakalı olup, bir kapalı durağan devredeki elektromotor kuvvetin, devreden geçen manyetik akının zamana göre türevine eşittir. Yani artış hızının negatifine eşit olduğunu belirtir. Bu sonuca göre manyetik alandaki değişiklik elektrik alan meydana getirmektedir.

İkinci eşitlik olan Ampere Yasası, kapalı bir yüzeye ait manyetik alan ve toplam akım yoğunluklarının birbirleri arasındaki bağlantıyı gösterir. Bu duruma göre iletken bir telden geçen akım ve elektrik alanındaki değişkenlik manyetik alanın doğmasına sebep olmaktadır. İkinci eşitli olan Ampere yasasında, “herhangi bir kapalı yol etrafındaki manyetik alan şiddetinin dolaşımının, bu yolun sınırladığı yüzey içinden akan serbest akıma eşit” olduğu sonucuna varılmaktadır.

Üçüncü eşitlik elektrik alan için Gauss Yasası’dır. Gauss yasasına göre kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısı ile yüzey içindeki elektrik yükü arasındaki bağlantı gösterilmektedir. İçerisinde elektrik yükü bulunan bir hacmin duvarlarındaki elektrik akısının toplamının elektrik yüke eşit olduğunu gösterir.

Dördüncü ve son eşitlik manyetizma için Gauss Yasası’dır. Kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akının her daim sıfıra eşit olduğunu belirtmektedir. Bu eşitlik bize manyetik yükün olmadığı sonucunu vermektedir [9].

Çizelge 3.1. Maxwell denklemleri

Denklem	Diferansiyel Form
Faraday Yasası	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
Ampere Yasası	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
Gauss Yasası	$\nabla \cdot D = \rho$
Manyetizmada Gauss Yasası	$\nabla \cdot B = 0$



4. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri en yalın haliyle kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan cihazdır. Fosil yakıtlar yerine yakıt ve oksijenin elektrokimyasal bir işlem sonucunda enerji üretimi sağlayan pil olarak da değerlendirilebilirler. Genel olarak yakıt hücrelerinde hidrojen kullanılır. Ancak hidrojen dışında metan, metanol, etanol ve doğalgaz gibi yakıtlarda kullanılmaktadır. Yakıt hücrelerini diğer enerji üreten sistemlerden ayıran en büyük özelliği oksitleyici ve yakıt beslenmesi devam ettiği sürece elektrik üretiminin de devam edebilmesidir. Oksitleyici olarak ise genellikle oksijen kullanılır. Ancak oksijenin dışında klor ve klordioksit de kullanılmaktadır.

Hareketli bölümler içermediğinden dolayı sessiz bir şekilde çalışmaktadır. Dizel motorlar ve gaz türbinlerine göre verimleri çok yüksektir.

4.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi

21. yüzyılda yeşil güç kaynağı yakıt hücreleri olarak adlandırılmaktadır. Kimyasal olarak depolanan enerjiyi elektrokimyasal bir işlemle elektrik akımına dönüştüren cihazlara yakıt hücreleri denir.

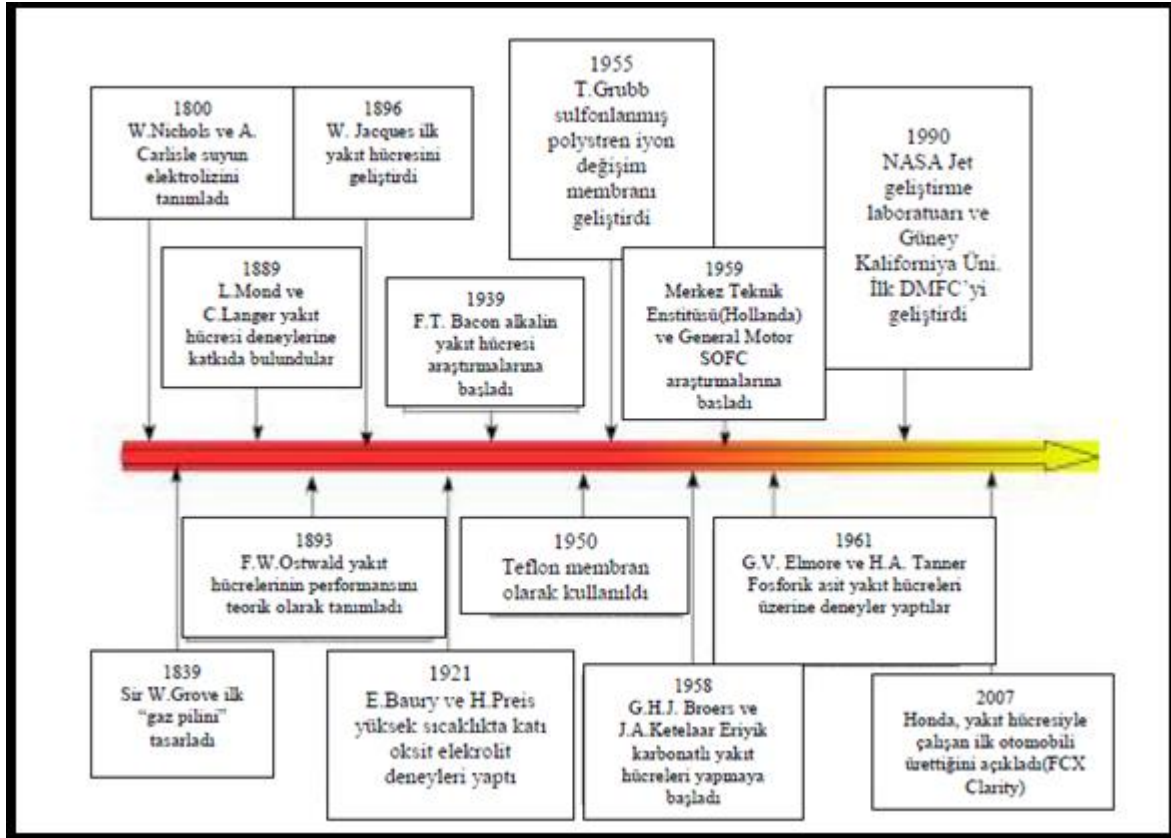
1838 yılında Birleşik Devletler Enerji Departmanına göre Alman kimyacı Christian Friedrich Schönbein, yakıt hücreleri üzerine tanınan ilk bilimsel çalışmaları yapmıştır. 1839 yılı Ocak ayında “Philosophical Magazine” isimli bilimsel dergide çalışması yayınlanmıştır. Buna karşı bazı otoriteler Sir William Robert Grove’u hidrojenli yakıt hücresinin çalışma prensibini açıklayan ilk bilim insanı olarak değerlendirmektedirler. 1893 yılında F. W. Ostwald bir yakıt hücresinin çeşitli bileşenlerinin birbirleri ile etkileşimde olmasını deneysel bir çalışma ile belirlemiştir. Ayrıca Grove’un gaz pili ile ilgili sorununu çözdü. 1896 yılında William W. Jacques pratik uygulamalarda ilk yakıt hücresini geliştirmiştir.

20. yüzyılın başlarında, yakıt hücreleri ile ilgili çalışmalarda önde gelen araştırmacılar arasında William W. Jacques ve Emil Baur gelmekteydi. 1921 yılında Emil Baur tarafından ilk kez erimiş karbonatlı yakıt hücresi oluşturulmuştur. 1933 yılında ise Thomas Francis Bacon tarafından ilk kez hidrojen ve oksijenden yapılmış yakıt hücresi pratik uygulamada

kullanılmıştır. Bu yakıt hücresi elektrokimyasal bir işlem ile hava ve hidrojeni doğrudan kullanarak elektrik enerjisi üretmekteydi. 1955 yılında General Electric şirketinde çalışan Thomas Grubb ve Leonard Niedrach tarafından proton değişimli membran yakıt hücresi üretilmiştir. 1961 yılında G.V. Elmore ve H.A. Tanner isimli bilim insanları tarafından fosforik asit yakıt hücresi tanıtılmıştır. NASA'da Jet Tahrik Laboratuvarında 1992 yılında, doğrudan metanol yakıt hücresi teknolojisi geliştirilmiştir [10].

Günümüzde ve ilerleyen zamanlarda hidrojen enerjisinin tüketiminin artması ve hidrojen ekonomisine geçiş yapılması için yakıt hücrelerine gereksinim bulunmaktadır. Fakat öncelikli olarak bunun yaygınlaşması gerekmektedir. Günümüzde yakıt hücreleri için yapılan araştırmalar, bu sistemlerin kullanılabilirliğini artırmaya yöneliktir. Bilhassa yakıt hücreleri için gerçekleştirilen bu araştırmalar yakıt hücrelerinin ticarileşmesinin önünde engel teşkil eden; üretimde maliyetin fazla olması, süratle kirlenerek verimde düşmeye sebep olması, ulaşımda ya da lokal sistem çalışmalarında evrensel kirliliğe sebep olan kirletici emisyonlarının soluduğumuz havaya yayılmasına sebep olması gibi durumların azaltılmasına yatkındır [11,12].

Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi aşağıdaki şekilde gibidir [13].



Şekil 4.1. Yakıt hücrelerinin tarihsel süreci

4.2. Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi

Geleneksel bir yakıt hücresi günlük hayatta kullandığımız pillere benzerlik göstermektedir. Yakıt hücreleri de piller gibi negatif ve pozitif elektrotlar ile bir elektrolitten meydana gelmektedir. Yakıt hücreleri elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda doğru akım üretir. Pilin içerisine çalışması için belirli miktarlarda kimyasal reaktif eklenir ve elektrotların yüzeylerinde eklenen bu reaktifler elektrokimyasal tepkimeye girmesiyle birlikte enerji açığa çıkarılırlar. Fakat bu reaktifler bittiğinde pil ömrünü deşarj olarak tamamlar. Fakat deşarj olma durumu yakıt hücrelerinde bulunmamaktadır. Bu durum yakıt hücreleri ile piller arasındaki en büyük farkı oluşturmaktadır. Bu sebeple reaktif beslemesi daimi devam etmektedir. Besleme devam ettiği için de enerji üretimi devam etmektedir.

Yakıt hücresi içinde elektrokimyasal tepkimeye giren reaktifler, elektron alışverişini içeren bir yükseltgenme-indirgenme tepkimesi gösterecek şekilde bir indirgen ile bir yükseltgenden oluşmaktadır. Elektrik üretimi gerçekleştirmek için yakıt hücreleri genellikle oksijen ve hidrojeni tüketir. Yakıt hücrelerine oksijen sisteme hava içinde verilebilmektedir. Ancak

hidrojen için aynı durum söz konusu değildir. Çünkü hidrojenin depolanması ve taşınması zordur. Bundan dolayı da hidrojen, hidrokarbon veya alkollerin sistem içerisinde yeniden işlenmesi ile elde edilmektedir.

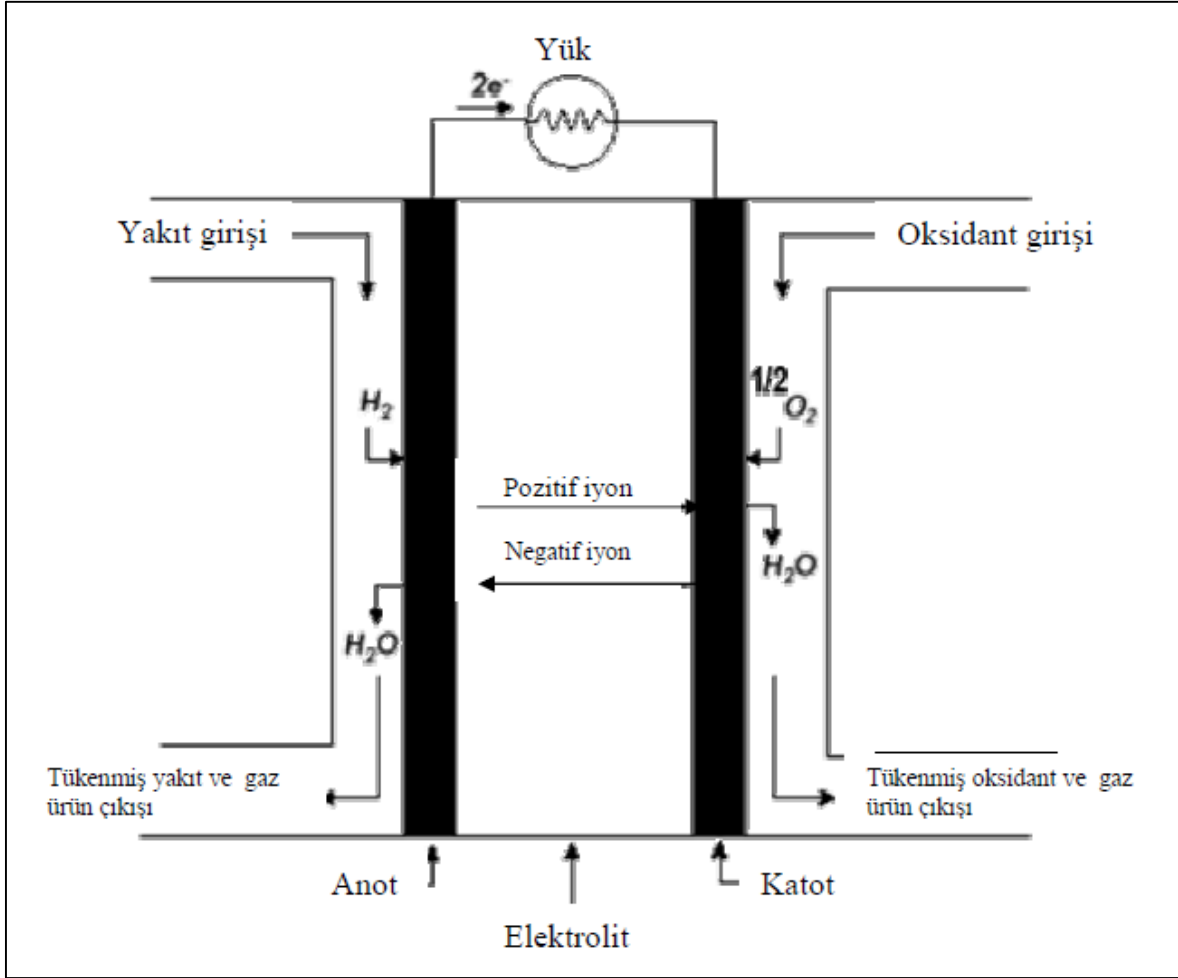
Bir yakıt hücresi en basit haliyle iyonların akışını gerçekleştiren bir elektrolitten, bir anottan ve bir katot yapısından meydana gelir. Elektrolit, elektronlara karşı bir izolatör işlevini yapmaktadır. Negatif yüklü kutup anot, beslenmeye devam eden yakıttan gelen hidrojen moleküllerini hidrojen atomlarına ayırır. Ayrılan hidrojen atomları elektrolite gönderilirken ortaya çıkan elektronlar dış devreye iletilir. Pozitif yüklü kutup olan katot ise, beklenen oksijeni katalizör yüzeyine aktarır burada oksijen iyonlarını dış devreden gelen iki elektronu etkileşime geçirir. Reaksiyon işlemi sonucu oksijenin indirgenme reaksiyonu oluşur. Ek olarak bu reaksiyondan sonra elektrolitten gönderilen hidrojen atomları ile oluşan O^{2-} iyonlarını tepkimeye sokarak yakıt hücresinde atılacak olan H_2O 'yu yani suyu meydana getirir.

Yakıt hücrelerinin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için dikkat edilmesi gereken bazı durumlar bulunmaktadır. Bunlar:

- Yakıt hücresi içindeki su akışı kontrol edilmelidir. Bu sayede yakıt hücre çalışması kararlı seviyede kalmalıdır.
- Yakıt hücresi içinde oluşan su uygun şekilde dışarı çıkarılmalıdır. Eğer su çıkarılmazsa elektrot üzerinde fazla su oluşabilir. Bu sebeple de yakıt hücresinin performansında bozulmalar meydana gelebilir.
- Yakıt hücresinin sıcaklığı eşit tutulmalıdır. Yakıt hücresindeki elektrik direnci ve elektrokimyasal işlem sonucu ortaya çıkan ısı yakıt hücresinden uzaklaştırılmalıdır.

Yakıt hücreleri bir araya getirilerek yakıt hücresi yığınları oluşturulabilir. Yakıt hücresi yığınları seri olarak birbirlerine bağlanır. Bu sayede istenilen gerilim elde edilebilir. Seri olarak birbirine bağlama işlemi yakıt hücrelerinden her birinin katodu bir diğerinin anoduna bağlanır. Bir yakıt hücresi yığınlarındaki yakıt hücresi sayısı yakıt hücrelerinin potansiyelini verir. Yakıt hücresinin sayısı ise çekilen toplam akımı verir.

Yakıt hücrelerinin çalışma şekli Şekil 4.2'de gösterilmektedir:



Şekil 4.2. Yakıt hücrelerinin çalışma şekli

4.3. Yakıt Hücresinin Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt hücreleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlar olduğundan pek çok avantaja da sahiptirler. Bunlar:

- Yüksek ve tutarlı verimliliğe sahip olmaları
- Düşük seviyede emisyon salmaları
- Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları
- Düşük gürültüde çalışmaları
- Hareketli parça içermemesi
- Birden fazla yakıt hücresi yığını oluşturarak istenilen güç yoğunluğu elde edilebilmesidir [14].

Yakıt hücrelerinin pek çok avantajı olmasına rağmen elbette dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar:

- Yakıt olarak kullanılan hidrojenin taşınması ve depolanması için oluşan maliyet
- Yakıt hücresinde kullanılan yakıt eğer saf değilse, bu yakıtın saflaştırılma işleminin yapılması
- Yakıt olarak hidrojen kullanıldığı için güvenlik önlemi alınması

4.4. Yakıt Hücresinin Performansını Etkileyen Faktörler

Yakıt hücrelerinin performansını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler aşağıda belirtilmiştir.

Aktivasyon Kayıpları; elektrot yüzeyinde oluşan tepkimelerin meydana gelmesi gerekenden daha yavaş bir şekilde oluşması durumunda, kimyasal tepkime aşamasında ortaya çıkan elektronların naklinde veya elektrottan iyonları taşınması aşamasında stabilizenin sağlanamamasından kaynaklanan ve bundan dolayı oluşan voltajdaki azalmalardır. Aktivasyon kayıpları anotta ayrı katot da ayrı bulunmaktadır. Katottaki aktivasyon kaybı anottaki aktivasyon kaybına göre çok daha yüksektir. Aktivasyon kaybının azaltılması için katalizör kullanımı gereklidir [17].

Yakıt Aktarma ve İç Akım Kayıpları; elektrolitten yakıtın akışında ve elektrolite doğru gönderilen elektron naklinden meydana gelen aksaklıklardan kaynaklı oluşan enerji kayıplarıdır. Yakıt aktarım ve iç akım kaybı genellikle direkt yakıt hücrelerinin bir çeşidi olan metanol yakıt hücrelerinde (DMFC) meydana gelmektedir.

Direnç Kayıpları; gerilim düşmesinin bir nedeni olarak, elektrotu meydana getiren materyallerden elektronların iletimi aşamasında oluşan basit dirençlerden dolayı iyonların elektrolit aracılığıyla iletiminde oluşan kayıplardır.

Kütle Transfer Kayıpları; yakıt şeklinde beslemesi yapılan hem oksijen hem de hidrojenlerin elektrot yüzeyinde karşılaştıkları konsantrasyon değişikliklerinden gerçekleşen kayıplar konsantrasyon kayıpları olarak adlandırılmaktadır. Elektrot yüzeyine gerekli seviyede reaktif naklinin yapılamaması sonucu ise kütle transfer kayıpları olarak adlandırılmaktadır.

4.5. Yakıt Hücresi Türleri

Yakıt hücrelerinin çalışma durumları, kullanım alanları, elektrokimyasal tepkimeler ve kullandıkları elektrolit türlerine göre çeşitlilik oluşturmaktadır. Bundan dolayı yakıt hücreleri kullandıkları elektrolitlere göre sınıflandırılmaktadırlar.

4.5.1. Alkali yakıt hücreleri

Alkali yakıt hücresi yakıt ve yükseltgen içindeki karbondioksite karşı aşırı duyarlıdır. Son 60 yıldır uzay programlarında alkali yakıt hücreleri kullanılmıştır. Alkali yakıt hücrelerinin en temel sorunu ise karbondioksit zehirlenmesidir [15].

Alkali yakıt hücresi zehirlenmesi sonucunda, karbondioksit ile çözültideki hidroksil iyonları tepkimeye girmesiyle birlikte karbonat meydana gelir. Hidroksil konsantrasyonunu elektrolit içerisinde azaltır. Bundan dolayı da yakıt hücresinin veriminin azalmasına neden olur [16].

4.5.2. Fosforik asit yakıt hücreleri

Fosforik asit yakıt hücreleri 150 °C ve 220 °C arasındaki çalışma sıcaklığında çalışmaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda çalıştıklarında iyonlarını asit içerisinde daha düşük bir hızla iletebilmektedirler. Ancak 200 °C'ye kadar kararlı yapısını koruyabilmektedir. Çalışma sıcaklığını artırmak zaman alacağından fosforik asit yakıt hücre çeşidinin taşınabilir bir enerji kaynağı olarak kullanılması güçtür. Yakıt hücresinin elektroliti sıvı formunda olduğundan çalışma sıcaklığında elektrolitin buharlaşmaması için özel önlemler alınması gerekmektedir. Fosforik asit yakıt hücresinin çalışmaya başlama sıcaklığı yüksek olduğu için çalışması zaman almaktadır. Yakıt hücresi ilk defa çalışmaya başladıktan itibaren, sıcaklığı dengesini koruyabilmek adına yeterli seviyede ısı oluşturur [15]. Ticari olarak kullanımı devam etmektedir ancak maliyetleri çok pahalıdır. Diğer teknolojilerin gelişmesi ile birlikte kullanımının bırakılması beklenmektedir.

4.5.3. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücreleri

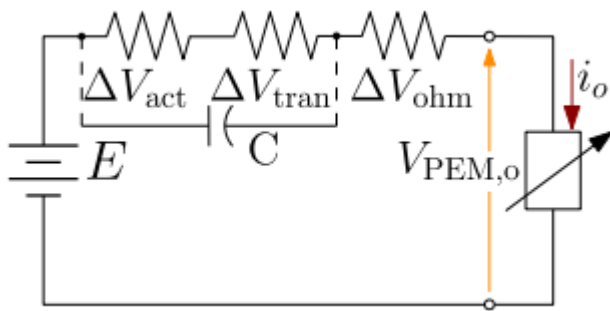
PEM yakıt hücresi, basit olması, enerji ihtiyacının olduğu alanlarda deneyimlenmiş olması, çeşitli sahalarda uygulanmış olması ve işletim kolaylığından dolayı diğer yakıt hücre

türlerine göre daha çok tercih edilmektedir. Polimer elektrolit yakıt hücreleri otomotiv çalışmaları için ciddi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Sabit güç üretiminde veya taşınabilir enerji kaynaklarında kullanılabilir.

Polimer elektrolit membranlı yakıt hücreleri elektrolit olarak protonları iletebilme yeteneği bulunur ve perflorosülfonik asit gibi ince bir membran kullanır. Bu ince membran elektrolit genellikle poli-perflorokarbon sülfattan meydana gelmektedir. Bunun gibi özelliklere sahip membran gazlara karşı engel oluşturur ve bu yüzden geçirgen değildir. Fakat H₂O yani su ile doyurulduğu zaman iyon değişimi aracılığıyla hidrojen katyonlarını gönderebilme yeteneği vardır. Polimer membran, elektriksel iletkenliği yüksek ve gözenekli iki elektrot arasına sıkıştırılmış durumda bulunmaktadır. Elektrotlar genellikle karbon kağıdından oluşturulmuştur. Polimer membran ile gözenekli elektrotlar arasındaki arayüzde katalizör partiküllerinden oluşan bir bölüm bulunmaktadır [15].

Çalışma sıcaklığı düşük olan yakıt hücreleri içerisinde katı bir elektrolit bulunduran tek yakıt hücre türü PEM yakıt hücresi olduğundan, bu yakıt hücresi üstünlük sağlamaktadır. Nafyon ve benzeri malzemeler elektrolit olarak kullanıldığı zaman, sıcaklık arttığında proton iletebilme özelliğini kaybetmektedir. PEM yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı bu nedenlerden ötürü 100 °C altında bulunmaktadır [17].

PEM yakıt hücresinin elektrik eş değer devresi Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. PEM yakıt hücresi elektriksel eş değer devresi

4.5.4. Katı oksit yakıt hücreleri

İsminden de anlaşıldığı gibi katı oksit yakıt hücrelerinde elektrolit katıdır. Çalışma sıcaklıkları 700 – 1000 °C gibi çok yüksektir. Bu yüksek sıcaklık aralığında çalışmasından dolayı yüksek tepkime hızlarına yüksek maliyetli katalizörlere ihtiyaç olmaksızın ulaşabilir. İlave olarak farklı ünitelere gerek olmaksızın doğal gaz gibi yakıtları doğrudan yakıt hücresine verilebilir. Çalışma sıcaklığı çok yüksek olduğu için yakıt hücresi içinde oluşan su buhar formundadır. Bu çalışma sıcaklığından kaynaklı hidrojen ile oksijeni birbirinden ayırmak son derece zordur. Ayrıca yakıt hücresini oluşturan materyallerin seçiminde, aynı genişleme katsayısına sahip olmasına özen gösterilmelidir. Özen gösterilmediği takdirde, katı oksit yakıt hücresinde yüksek sıcaklıklarda çatlama meydana gelebilir [16].

4.5.5. Erimiş karbonat yakıt hücreleri

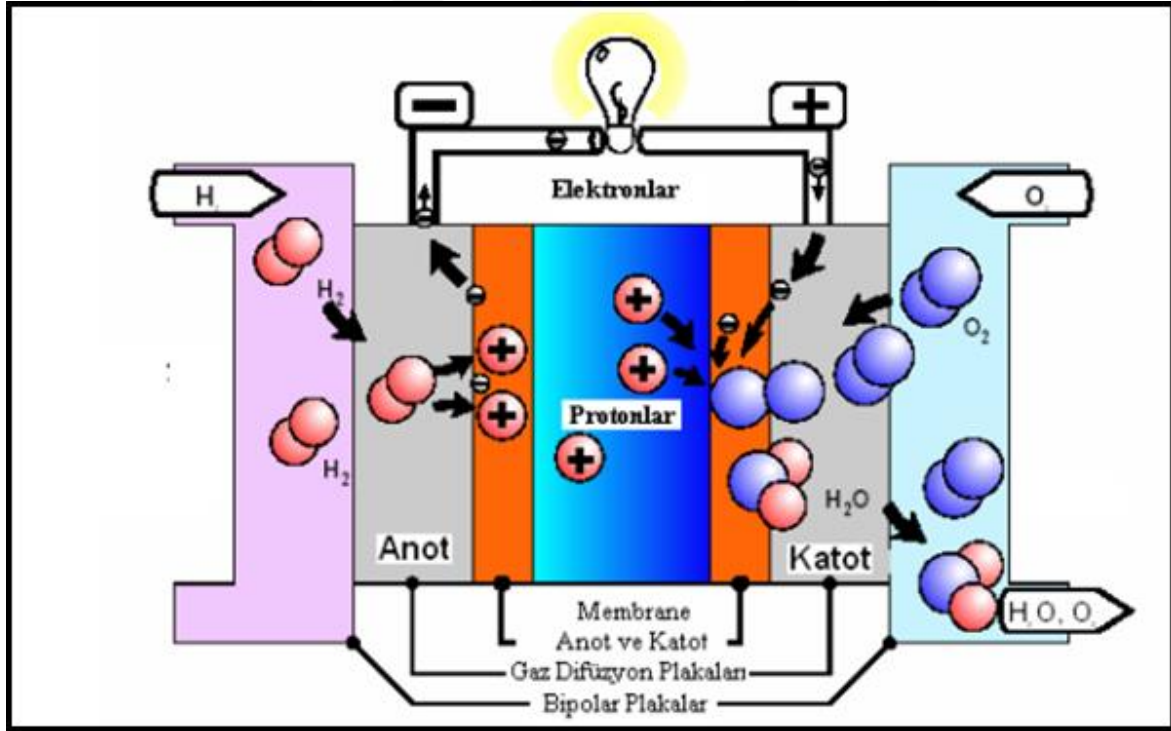
Çalışma sıcaklıkları çok yüksek olan erimiş karbonat yakıt hücreleri, yaklaşık 650 °C gibi bir sıcaklık değerinde çalışırlar. Bu yakıt hücresi yakıt kaynağı olarak metan, metanol, ham petrol kullanabilir. Erimiş karbonat yakıt hücrelerinin elektrot reaksiyonlarının aktif olduğu alan anot yüzeyidir. Erimiş karbonat yakıt hücrelerinin verimliliği birçok faktöre bağlıdır. Bunlar yakıt hücresinin tasarımı ve yakıt hücresi parçalarının malzeme tipi gibi faktörlerdir [18].



5. PEM YAKIT HÜCRESİ

Dördüncü bölümde yakıt hücrelerinin tarihçesine, çalışma şekline, avantaj, dezavantajlarına, performansına ve çeşitlerine kısaca değinilmişti. Bu bölümde ise bu çalışmada kullanılan PEM yakıt hücresine detaylı bir inceleme yer alacaktır.

Polimer elektrolit membran yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı 100 °C' nin altındadır. 60 – 80 °C sıcaklık aralığında verimli şekilde çalışmaktadır. PEM yakıt hücresinin anoduna gelen yakıt, katalizör sayesinde elektron ve protonlarına ayrılmaktadır. Ayrılan elektronlar dış devre üzerinden katot tarafına taşınmaktadır. Elektron hareketi olduğu için de dış devre de bir elektrik akımı oluşmaktadır. Protonlar ise elektrolit üzerinden katot tarafına taşınmaktadır. Elektrolit tabaka elektronların geçmesine izin vermez. Katot tarafına ulaşan proton, elektron ve oksitleyici gaz reaksiyon vererek su ve ısı açığa çıkarmaktadır. Basit anlamıyla bir PEM yakıt hücresi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. PEM yakıt hücresi

5.1. Yakıt Hücresi Bileşenleri

PEM yakıt hücrelerinin avantajlarından bir tanesi basit yapıda olmalarıdır. Bundan dolayı da çok daha az bileşenlere sahiptirler. Bu kapsamda bir polimer elektrot membranlı yakıt hücresinin temel bileşenleri aşağıda açıklanmıştır.

5.1.1. Membran

Elektrolit görevi görmektedir. Anottan katoda proton taşınmasını sağlar. Katı bir maddeden oluşur. Yüksek iyon iletkenliğine sahiptir. Kısa devre oluşmaması için elektron iletkenlik özelliğinin bulunmaması beklenmektedir. Sadece elektronun değil yakıtın da geçişine izin vermemektedir. Genellikle Nafion maddesi membran olarak kullanılır. Ancak bu maddenin de olumsuz özelliği bulunmaktadır. Çalışma sıcaklığı arttığında nem miktarı azaldığı için proton iletkenliğinde azalma meydana gelmektedir [19].

5.1.2. Katalizör tabakası

Katalizör tabakasında kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Katalizör tabakası iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar anot katalizör tabakası ve katot katalizör tabakasıdır. Genellikle kıymetli metallere meydana gelmektedir. Platin kullanılmaktadır. İyi bir performans göstermesi için elektriksel iletkenliği iyi olmalıdır, stabil olmalıdır ve reaktant gazlar azami düzeyde temas halinde olmalıdır. Gözenekli bir yapıda olması beklenmektedir. Oksijen indirgenme reaksiyonu ve hidrojen yükseltgenme reaksiyonu diğer malzemelere göre daha iyidir. Bu açıdan da katalizör tabakası olarak Platin tercih edilmektedir [20].

5.1.3. Gaz difüzyon tabakaları

Gaz difüzyon tabakalarının amacı gazların katalizör yüzeyine homojen olarak dağılmasını sağlamaktır. Katot katalizöründe oluşan suyun yakıt hücresinden uzaklaştırılmasını da sağlamaktadır. Anot katalizörünün ise nemli yapıda olmasını sağlamaktadır. İyi bir elektriksel iletkenliğe sahip olması beklenmektedir. Membran tabakasına destek sağlamaktadır. %80 oranında gözenekli yapıda olması beklenmektedir. Gözenekli olmasının yanı sıra sert tabakalı, kısmen hidrofobik olması beklenmektedir. Gaz difüzyon tabakası olarak genellikle karbon kullanılmaktadır [21].

5.1.4. Bipolar tabakalar

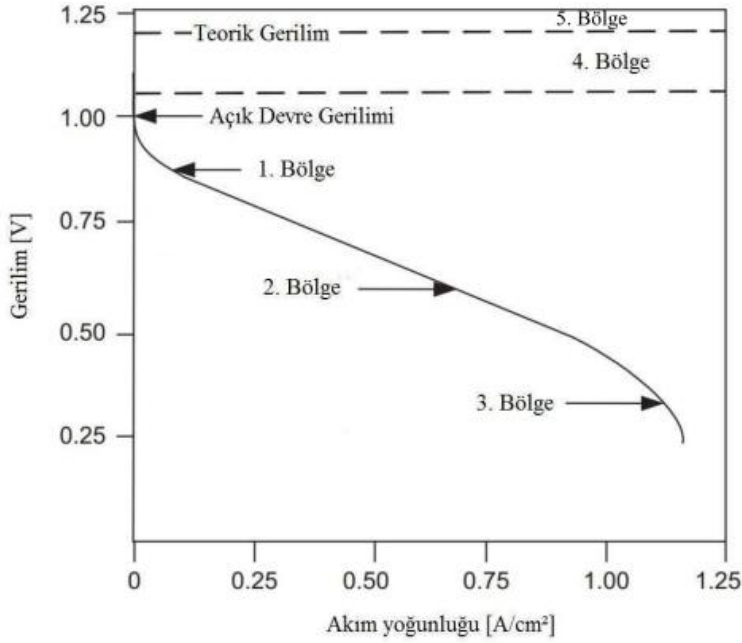
Difüzyon bölgesine elektron ve ısı iletimini gerçekleştiren ve iletken alanlara mekanik fayda sağlayan bileşen bipolar tabakalardır. Gaz akış kanallarıyla birlikte bipolar tabakalarının üretimi, bir yakıt hücresinin maliyetinde önemli bir rol oynamaktadır. Bipolar tabakalar hidrojen ve oksijeni anot ve katotlara dağıtır. Hücrede ortaya çıkan akımı dışarıya aktararak ısıyı kontrol eder. Su yönelimini kolaylaştırır. Bipolar tabaka olarak genellikle metal ve grafit kullanılır. Ancak korozyon dirençleri düşük olduğu için genellikle grafit tercih edilmektedir. Yüksek elektrik iletimi olan, kimyasal dayanıklılığı olan, düşük ağırlık ve hacimli olan malzemeler tercih edilmektedir [22].

5.2. PEM Yakıt Hücresi Açık Devre Gerilimi

Yakıt hücresinden akım çekimi gerçekleşmediğinden gerçekte gerilemektedir. Yani açık devre halinde elde edilmektedir. Bu gerilim değeri genellikle yaklaşık 1V değerindedir.

5.3. Polarizasyon Eğrisi ve Kayıplar

Polarizasyon eğrisi yakıt hücresinin performansını değerlendirmeye yarayan, akım ve gerilim arasındaki bağıntıyı ifade eden bir eğridir. Bu eğri üzerinden yakıt hücresindeki kayıplar hakkında bilgi sahibi olunur. Şekil 5.2’de örnek bir polarizasyon eğrisi gösterilmektedir. Şekil 5.2’de birinci aktivasyon kayıplarını, ikinci bölge ohmik kayıplarını, üçüncü bölge konsantrasyon kayıplarını, dördüncü bölge diğer kayıpları ve beşinci bölge ise entropi kayıplarının olduğu alanları göstermektedir [23].



Şekil 5.2. Polarizasyon eğrisi

5.3.1. Aktivasyon kayıpları

Elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için gereken aktivasyon enerjisi sonucunda meydana gelmektedir. Tepkime türü, katalizör türü, işletme parametreleri gibi birçok etkiye bağlı olarak bu kayıplar oluşmaktadır. Değişken akım yoğunluğu aktivasyon kayıplarının en önemli parametrelinden biridir. Açık devre durumunda, değişken akım yoğunluğu elektrotlarda oluşan akımdan meydana gelmektedir. Değişken akım yoğunluğu arttıkça aktivasyon kayıpları azalmaktadır [23].

5.3.2. Ohmik kayıplar

Elektron akışında meydana gelen dirençten ve iyonların elektrolit içerisinde karşılaştığı dirençten kaynaklı ohmik kayıplar oluşmaktadır. Elektron akışında meydana gelen ohmik kayıplar ihmal edilecek kadar düşüktür. Elektrolit ve katalizör tabakalar için yüksek iyonik iletkenliğe sahip materyaller seçilirse ohmik kayıplar azaltılabilir. Bu kapsamda malzeme seçimi çok önemli olmaktadır [24].

5.3.3. Konsantrasyon kayıpları

Elektrotlara ulaşan reaktanların hızlı bir şekilde elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu tüketilmesi sonucunda meydana gelmektedir. Katalizör yüzeyinde oluşanlar akım yoğunluğuna bağlıdır. Akım yoğunluğu yükseldikçe katalizör yüzeyindeki konsantrasyon düşmektedir. Akım yoğunluğu dışında difüzyon hızları da konsantrasyon kayıplarına sebep olmaktadır [24].

5.3.4. Diğer kayıplar

Yakıt hücresinde meydana gelen kısa devreler ya da membrandan gaz geçişi gibi kayıplardan oluşmaktadır. Bu kayıpları azaltmak için yakıt hücresi tasarımı iyileştirmesi ile mümkün olmaktadır [23].

5.3.5. Entropi kayıpları

Termal gerilimden entropi nedeniyle gerçekleşen sapmaları ifade eden kayıplara entropi kayıpları denilmektedir.



6. MATERYAL VE METOT

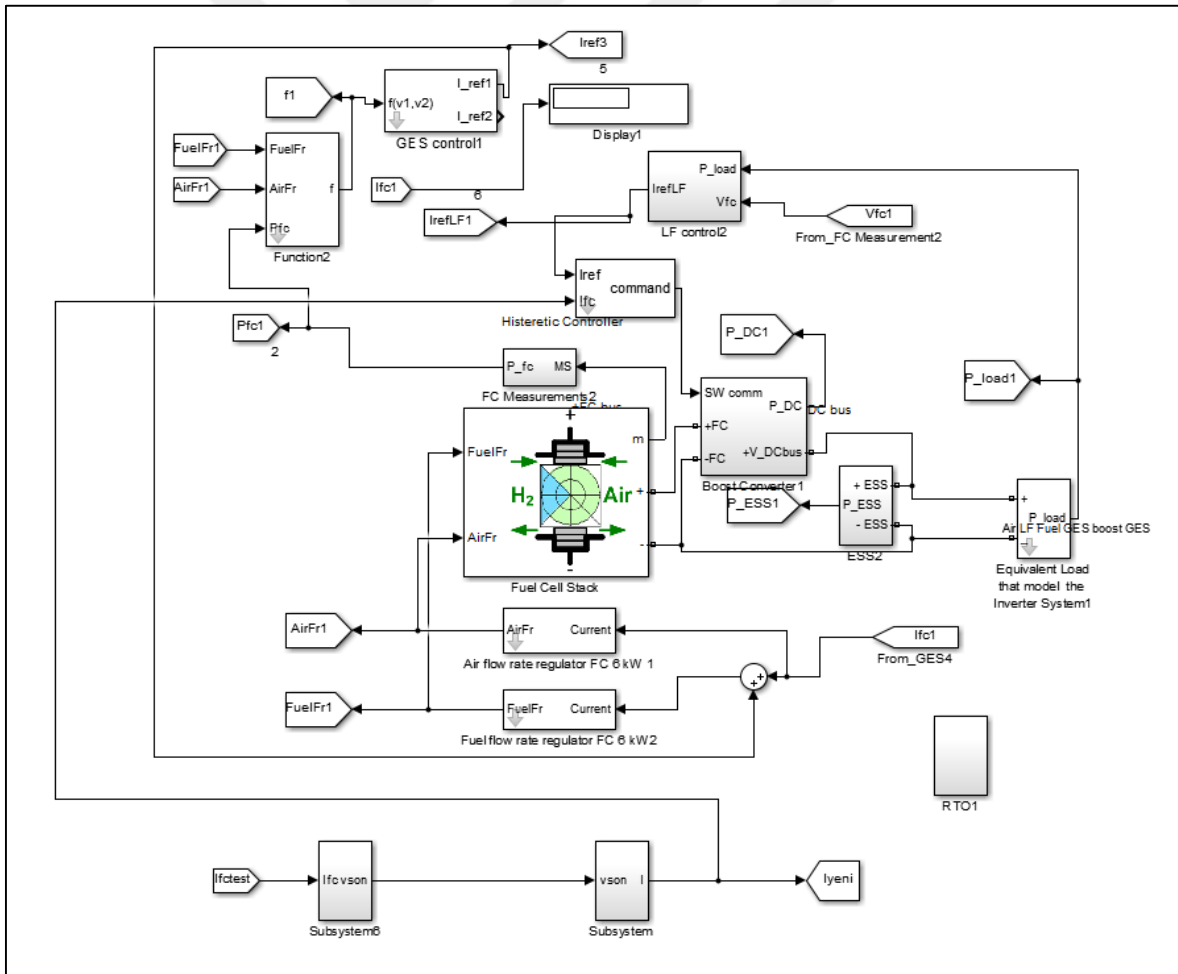
Yenilenebilir enerji kaynaklarında güç akışı, hava koşulları ve yük talebi gibi faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerden kaynaklı yenilenebilir enerji kaynaklarında güç akışı değişkenlik göstermektedir. Yakıt hücrelerinin yedek kaynak olarak kullanımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarındaki güç akışının değişkenliği azaltılmaktadır. Bu nedenle DC barasındaki güç akışlarını yönetmek için uygun Enerji Yönetimi Stratejisine (EMS) dayalı olarak güç talebini sürdürmek için bir Hibrit Güç Sistemi (HPS) tasarlanmıştır. Literatürde Global Extremum Seeking (GES) algoritması da dahil olmak üzere Hibrit Güç Sistemi optimizasyonu için birçok algoritma bulunmaktadır. Bu tasarımda hava akış oranında Global Extremum Seeking algoritması uygulanmış bir Hibrit Güç Sistemi tasarlanmış ve yedek enerji kaynağı olarak kullanılan yakıt hücresine manyetik alan uygulanmıştır.

Hibrit Güç Sistemi tasarımında yedek enerji kaynağı olarak birçok farklı yakıt hücresi çeşidi kullanılabilir. Düşük seviyede yedek enerji kaynağı olarak kullanılan PEMFC ve akıllı şebekeler, binalar ve endüstriyel uygulamalar gibi orta ve yüksek seviyede yedek enerji kaynağı olarak kullanılan SOFC karşılaştırılmıştır. PEMFC ile karşılaştırıldığında, SOFC'ler CO zehirlenmesine karşı savunmasız değildir, karbon monoksit (CO), doğal gaz, hidrojen (H₂), propan (C₃H₈), çöp gazı, dizel ve JP-8 ve elektrolitin buharlaşması ve sirkülasyonu yönetimine ihtiyaç duymaz. Hem SOFC hem de PEMFC yakıt hücreleri için yaşam ömrü ve elektriksel verimliliği konusunda teknolojik ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak SOFC yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı PEMFC'den çok yüksektir. Bundan dolayı da tasarımda yakıt hücresi çeşidi olarak PEMFC tercih edilmiştir.

Enerji Yönetim Stratejisi 3 farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar dağıtık, merkezi ve hibrit şeklindedir. Merkezileştirilmiş enerji yönetim sisteminin her bir bileşeni için iki iletişim içermektedir. Bunlardan biri merkezden bileşenlere veri aktarmak için diğeri ise ters akış sağlamak içindir. Bu yüzden merkezileştirilmiş enerji yönetim sistemleri akıllı mikro şebekelerde çok etkili değildir. Dağıtılmış enerji yönetim sistemlerinde her bileşenin kendi yerel denetleyicisi vardır ve her bileşen, denetleyici tarafından alınan daha doğru kararlar anlamına gelen uygun bir ölçüm seti (akımlar ve gerilimler) kullanır. Merkezileştirilmiş enerji yönetim sistemi kıyaslandığında stabilite durumunun daha da arttığı gözlemlenmiştir.

Hibrit enerji yönetim sistemleri ise diğer tüm bileşenler ile bilgi paylaşımı yapmaktadır. Bu bilgi alışverişi, mikro şebekelere stabilite ve esneklik sağlamaktadır.

Literatürde en çok bilinen HPS topolojileri, DC bara HPS topolojisi, AC bara HPS topolojisi ve hibrit bara HPS topolojisidir. Her bir topolojide uygun bir güç dönüştürücü ile AC ya da DC baraya bağlanır. Enerji Yönetim Stratejileri, ortak baradaki güç akışı dengesine dayalı olarak yük talebini sağlamak için mevcut enerji kaynaklarının güç akışını kontrol eder. Bu tasarımda ele alınan HPS topolojisi, HPS'nin diğer parçalarının eşdeğer bir DC yükü ile modellenmesiyle bir DC barasına indirgenmiştir. Bu nedenle, evirici sistemi (şebekeye bağlı veya değil), gerçekte olduğu gibi dinamik profilli eşdeğer bir yük ile DC bara üzerinde modellenir. Modelleme işlemi Matlab-Simulink uygulamasında yapılmış olup Şekil 5.1'de tasarlanan HPS topolojisi gösterilmiştir [1].



Şekil 6.1. HPS topolojisi

Matlab-Simulink uygulamasında tasarlanan modelde yakıt hücresi olarak 6kW/45V değerlerine sahip olan PEMFC seçilmiştir. Seçilen yakıt hücresinde time constant değeri 0,1 olarak ayarlanmıştır. Yakıt hücresinin diğer değerleri uygulamanın bize sunduğu varsayılan değer olarak bırakılmıştır. DC barasında kullanılan kondansatör ise 100 μ F değerinde ayarlanmıştır.

Enerji Depolama Sistemi tasarımında ise Matlab-Simulink uygulamasında Lithium-Ion 100Ah/200V değerine sahip batarya seçilmiştir. Initial SOC değeri %80 olarak ayarlanmıştır. Battery Response Time değeri 10s olarak ayarlanmıştır. Bataryanın diğer değerleri uygulamanın bize sunduğu varsayılan değer olarak bırakılmıştır.

Model tasarımı tamamlandıktan sonra yakıt hücresine manyetik alan, I_{FC} akımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. I_{FC} akımı yakıt hücresinden ölçülen akımdır. Bu akıma manyetik alan Eş. 5.1, Eş. 5.2, Eş. 5.3, Eş. 5.4, Eş. 5.5 ve Eş. 5.6 eşitlikleri aracılığıyla uygulanmıştır.

$$\frac{dv_x}{dt} = a_x \quad (5.1)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = a_y \quad (5.2)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = a_z \quad (5.3)$$

$$\frac{da_x}{dt} = \frac{1}{m} I V_y B_z + \frac{q}{m} a_y B_z \quad (5.4)$$

$$\frac{da_y}{dt} = -\frac{1}{m} I V_x B_z - \frac{q}{m} a_x B_z \quad (5.5)$$

$$\frac{da_z}{dt} = 0 \quad (5.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde belirtilen B_z değeri sisteme uyguladığımız manyetik alanı temsil etmektedir. B_z değişkenine farklı değerlere vererek bu eşitlik setinin bir sonucu olarak v_x ve v_y hız değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu hız değerleri Eş. 5.7’de kullanılarak sistemin yeni hız değeri hesaplanmıştır.

$$v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} \quad (5.7)$$

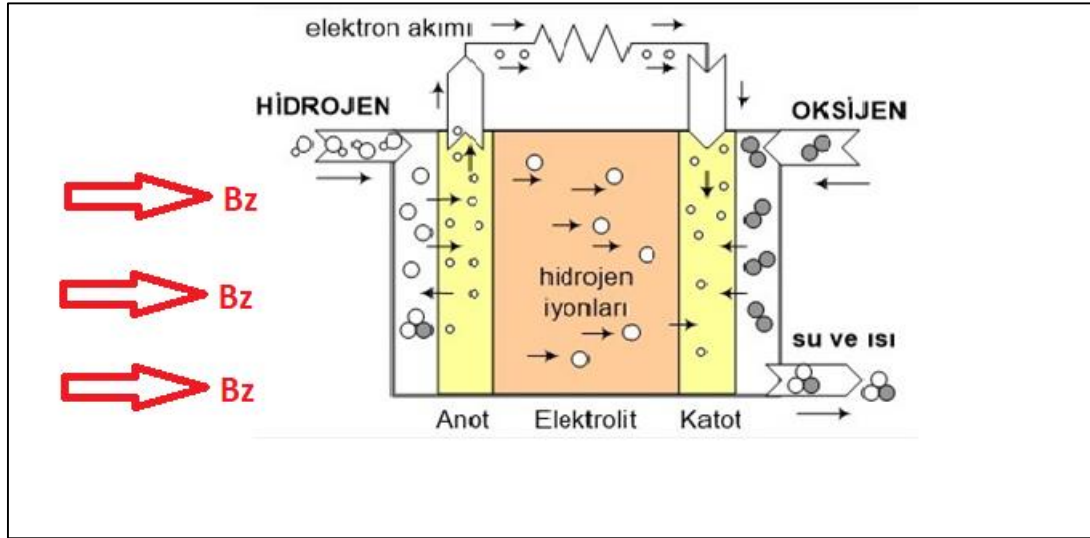
Eş. 5.7'den elde edilen yeni hız değerini Eş. 5.8'de kullanarak sistemin yeni akımını hesaplamış olduk. Hesaplanan bu akım bize I_{FC} akımını vermektedir.

$$I = n q v S_{cell} \quad (5.8)$$

Eş. 5.8'de, n değeri hacim başına düşen taşıyıcı sayısı, q yükü, V hızı ve S_{cell} de alanı temsil etmektedir. S yakıt hücresinin kesit alanını temsil etmektedir ve Matlab-Simulink uygulamasında belirtilen modelin ölçüleri kullanılarak elde edilmiştir. n ve q değişkenleri sabit değer olarak alınmıştır. Eş. 5.8'in sonucunda Matlab'da Runge-Kutta diferansiyel denklem çözücü kullanılarak yeni bir I yakıt hücresi akımı elde edilir ve sisteme aktarılır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Matlab-Simulink uygulamasında model tasarımı yapıldıktan sonra sisteme manyetik alan uygulama işlemi yapılmıştır. PEM yakıt hücresinin akımına uygulanan manyetik alanın yönü Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. PEM yakıt hücresi manyetik alan yönü

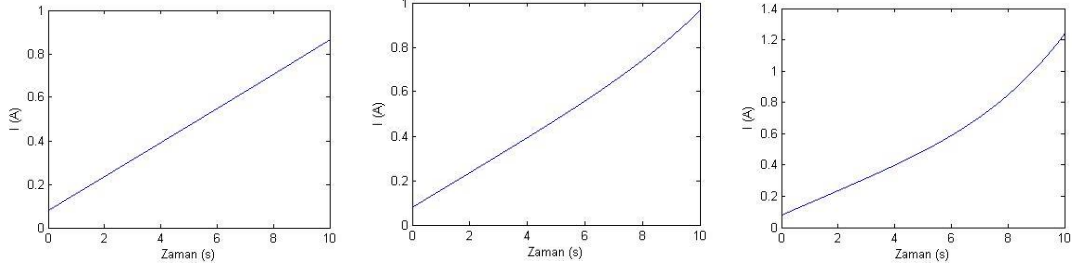
Çizelge 7.1’de manyetik alan şiddetleri verilmiş olup bu değerler tasarlanan modele giriş parametresi olarak verilmiştir.

Çizelge 7.1. Sisteme uygulanan manyetik alan değerleri

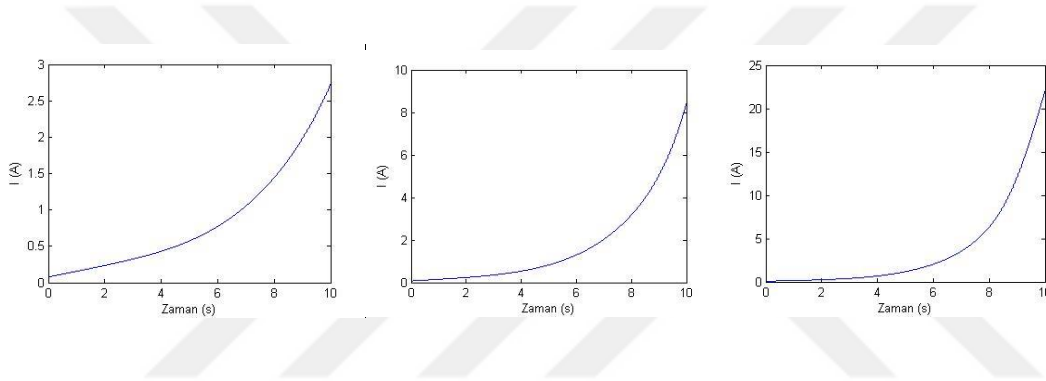
Sıra No	Manyetik Alan
1	0,01
2	0,05
3	0,1
4	0,25
5	0,5
6	0,75
7	1
8	1,1
9	1,2
10	1,3
11	1,4
12	1,5

Sıra No	Manyetik Alan
13	1,75
14	2
15	3
16	4
17	5
18	10
19	15
20	20
21	25
22	30
23	35
24	50

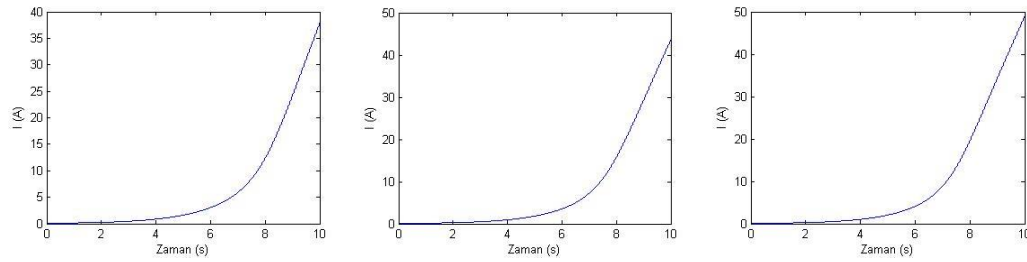
Çizelge 7.1’de verilen manyetik alan şiddeti değerleri tasarlanan modelin akımın sırasıyla uygulanmıştır.



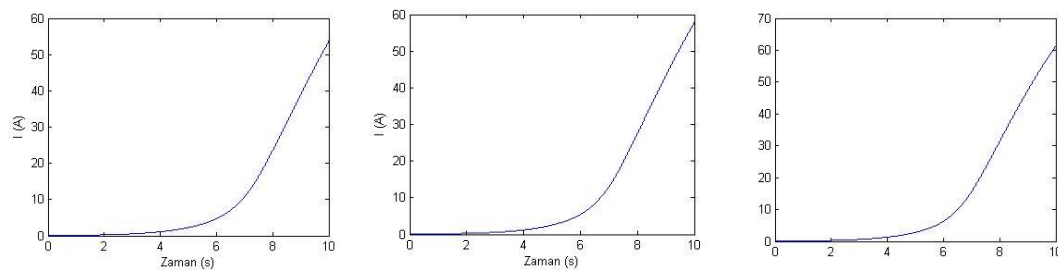
Şekil 7.2. 0,01; 0,05; 0,1 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



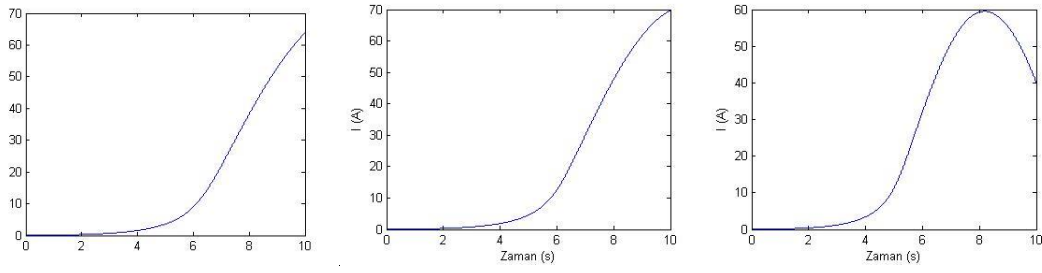
Şekil 7.3. 0,25; 0,5; 0,75 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



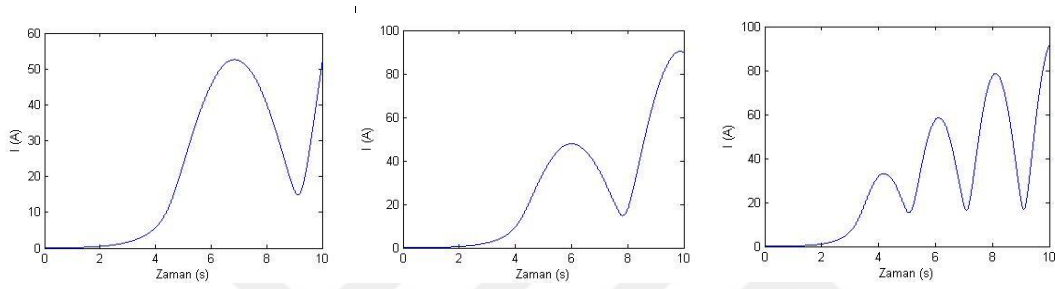
Şekil 7.4. 1; 1,1; 1,2 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



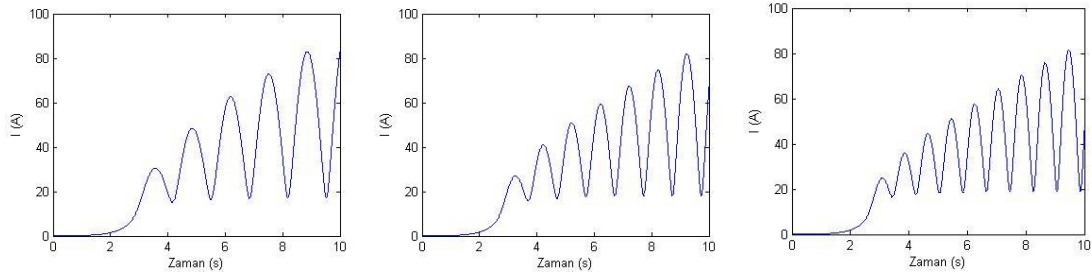
Şekil 7.5. 1,3; 1,4; 1,5 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



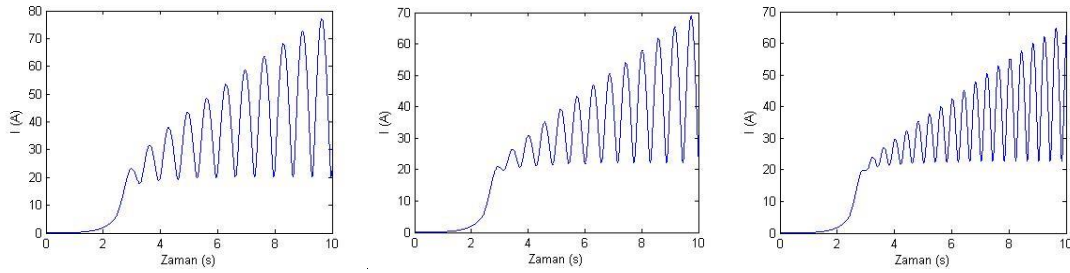
Şekil 7.6. 1,75; 2; 3 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



Şekil 7.7. 4, 5, 10 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



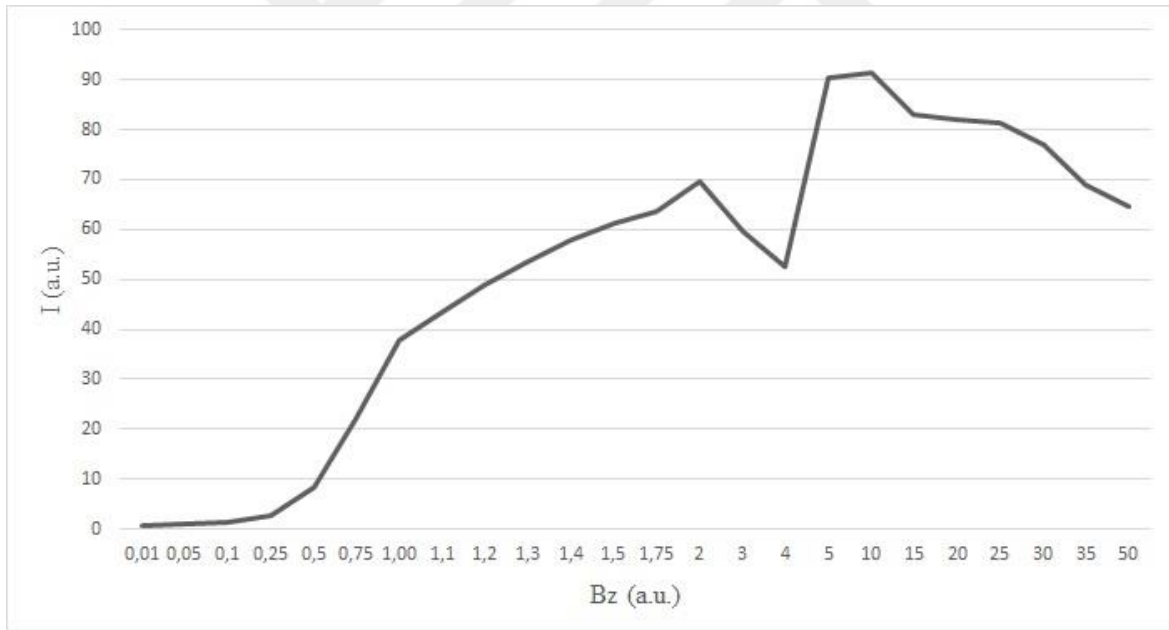
Şekil 7.8. 15, 20, 25 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi



Şekil 7.9. 30, 35, 50 değerlerindeki manyetik alan şiddetinin akıma etkisi

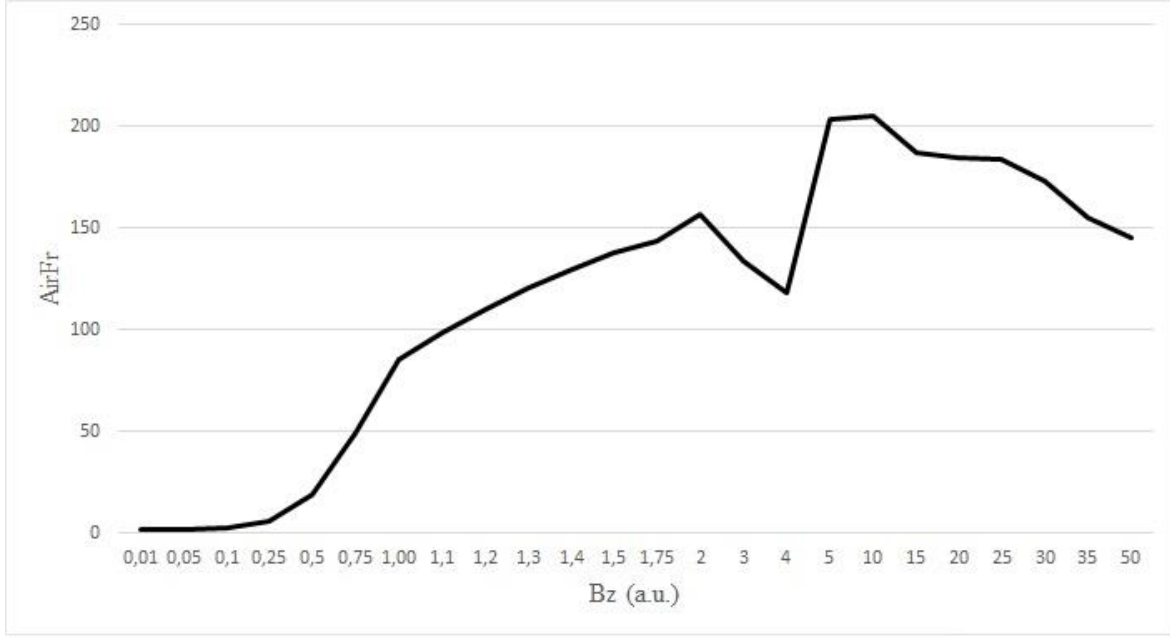
Çizelge 7.1’de verilen değerler tasarlanan modele uygulandığında I_{FC} akımına pozitif anlamda etki etmiştir. Tasarlanan model 10 saniye çalıştırılmış olup 0,001 saniye örnekleme aralığında sonuçlar elde edilmiştir. 0,01 değerinden 1,75 değerine kadar uygulanan değerler sonucunda akımda sürekli olarak zamana karşı artış göstermiştir. 2 değerinden 50 değerine kadar ise akımda zamana karşı sinüs dalgasına benzer bir sonuç elde edilmiştir.

Uygulanan manyetik alan değeri küçük değerlerde olduğunda akımın maksimum değeri fazla değişkenlik göstermemiştir. Ancak artmaya devam ettiğinde akımın maksimum değeri artmaktadır. Optimum değere ulaştıktan sonra manyetik alan artmaya devam etse bile akımın maksimum değeri azalma eğiliminde bulunmuştur. Bazı manyetik alan değerlerinde ise akımın maksimum değeri dalgalanma gösterdiği için optimizasyon çalışması gerektirmektedir. Çizelge 7.1’de verilen değerler tasarlanan modele uygulandığında I_{FC} akımının maksimum değerleri Şekil 7.10’da gösterilmiştir.



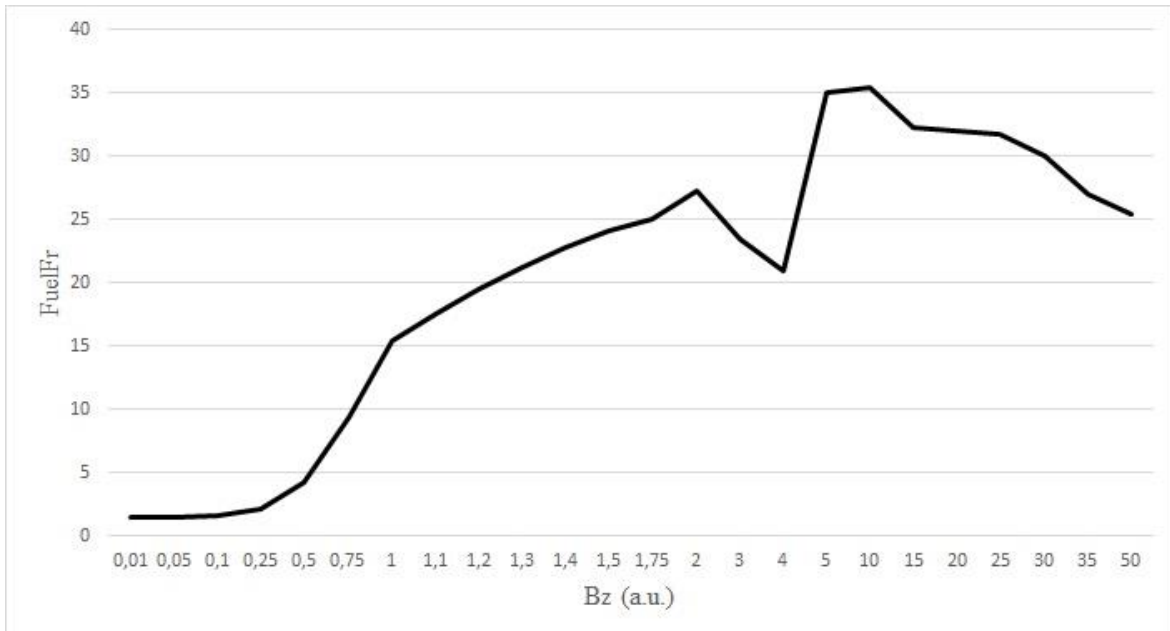
Şekil 7.10. Yakıt hücresi akımının maksimum değerleri

Manyetik alan uygulanması ile bir diğer elde edilen değer ise yakıt hücresinin hava akış oranı ($AirFr$)’dır. $AirFr$ ’nin maksimum değeri de aynı akımın maksimum değerinde olduğu davranışı sergilemiştir. Çizelge 7.1’de verilen değerler tasarlanan modele uygulandığında $AirFr$ ’nin maksimum değerleri Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



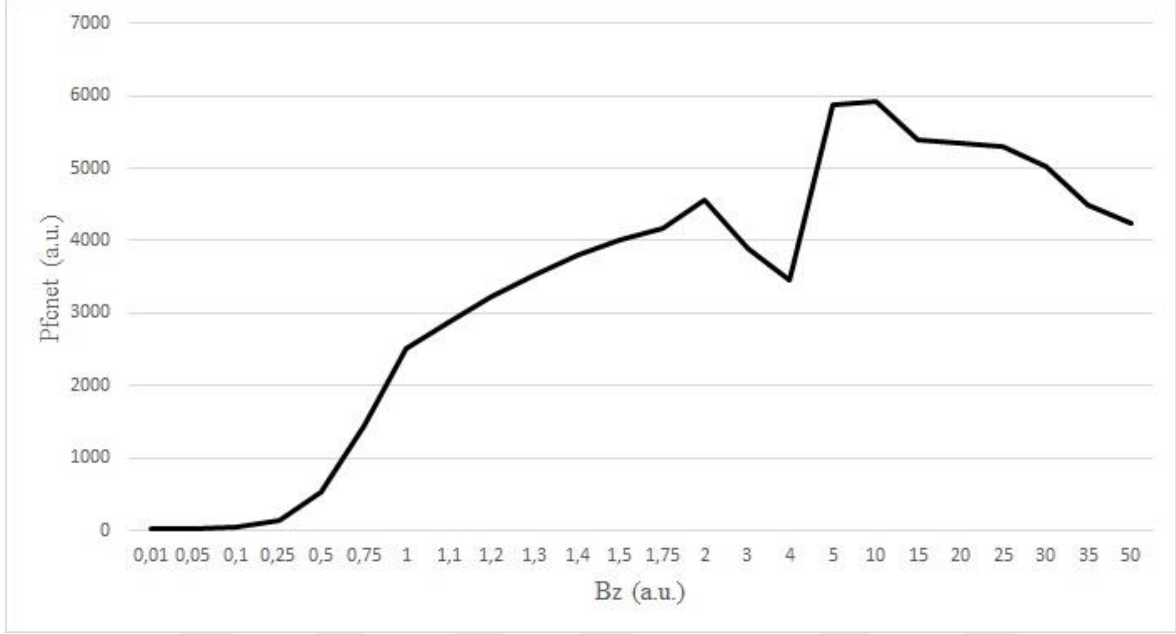
Şekil 7.11. Yakıt hücresi AirFr'nin maksimum değerleri

Manyetik alan uygulanması ile bir diğer elde edilen değer ise yakıt hücresinin yakıt akış oranı ($FuelFr$)'dır. $FuelFr$ 'nin maksimum değeri de aynı akımın maksimum değerinde olduğu davranışı sergilemiştir. Çizelge 7.1'de verilen değerler tasarlanan modele uygulandığında $FuelFr$ 'nin maksimum değerleri Şekil 7.12'de gösterilmiştir.



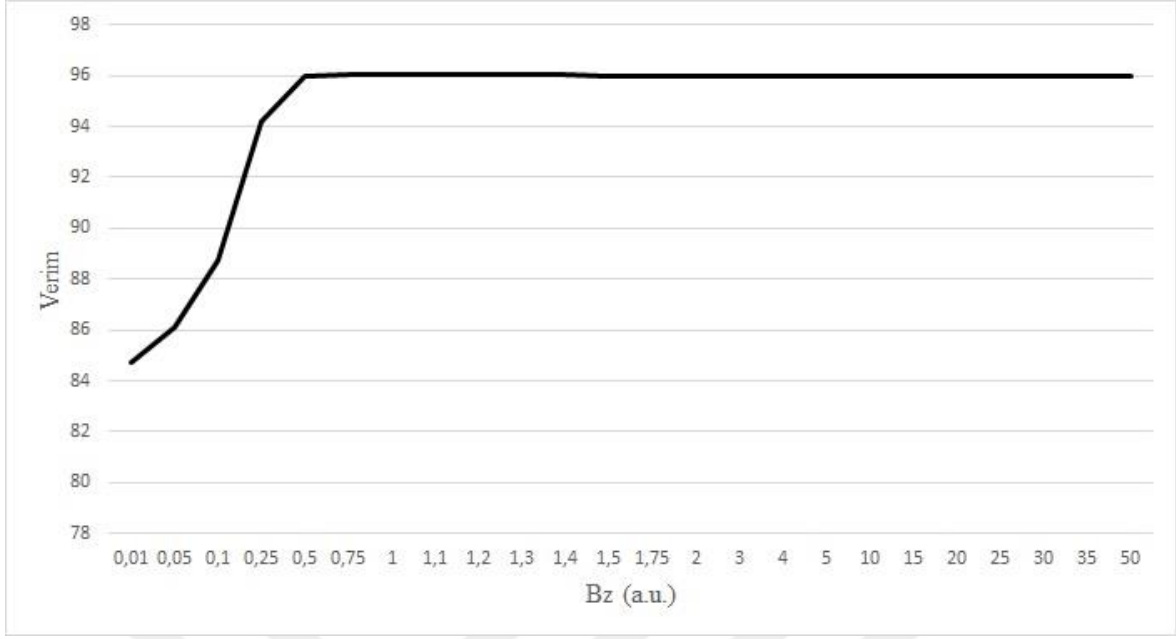
Şekil 7.12. Yakıt hücresi FuelFr'nin maksimum değerleri

Manyetik alan uygulanması ile bir diğ er elde edilen değer ise yakıt hücresinin net gücü (P_{fnet})'dür. P_{fnet} 'in maksimum değeri de aynı akımın maksimum değerinde olduğu davranışı sergilemiştir. Çizelge 7.1'de verilen değerler tasarlanan modele uygulandığında P_{fnet} 'in maksimum değerleri Şekil 7.13'de gösterilmiştir.



Şekil 7.13. Yakıt hücresi P_{fnet} 'in maksimum değerleri

Manyetik alan uygulanması ile bir diğ er elde edilen değer ise yakıt hücresinin verimidir. Düşük manyetik alan değerleri uygulandığında elde edilen verim yaklaşık %90 değerinden daha azken, manyetik alan arttıkça verimin maksimum değeri de artı göstermektedir. Ancak manyetik alan artışı artmaya devam ettikçe verimin maksimum değeri sabitleşmeye stabil kalmaya başlamıştır. Çizelge 7.1'de verilen değerler tasarlanan modele uygulandığında verimin maksimum değerleri Şekil 7.14'te gösterilmiştir.



Şekil 7.14. Yakıt hücresi veriminin maksimum değerleri



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada PEM yakıt hücresine manyetik alan uygulayarak Hibrit Güç Sistemi'ne etkisi simüle edilmiştir. 0,01 değerinden 50 değerine kadar toplam 24 farklı manyetik alan şiddeti değeri sisteme uygulanmıştır. Literatürde yakıt hücresine bu şekilde bir manyetik alan katkısı daha önce tasarımsal olarak yapılmamıştır. Bu çalışmada ise yakıt hücresi akımına manyetik alan katkısı yapılarak, tasarlanan sistemin manyetik alana göre değişimi gözlemlenmiştir.

Yakıt hücresine uygulanan manyetik alan değeri genel anlamda sisteme pozitif anlamda etki etmiştir. 3 ve 4 a.u. değerlerinde akım, net güç, hava akış oranı ve yakıt akış oranının da düşüş gösterse de 15 a.u. değerine kadar artış göstermiştir. 15 a.u. değerinden daha yukarıya çıkartıldıkça akımın değerinde ve dolayısı ile güç, hava akış oranı ve yakıt akış oranının değerlerinde azalma görülmüştür.

Yakıt hücresine uygulanan manyetik alan değeri 0,01 a.u. ila 0,5 a.u. değerleri arasında %85 değerinden %96 değerine kadar artış göstermiştir. Ancak yakıt hücresine uygulanan manyetik alan değeri 0,5 a.u. değerinden 50 a.u. değerine kadar artırılrsa bile sistemin veriminde gözle görülür bir değişme ortaya çıkmamıştır. Sistemin verimi yaklaşık olarak %96 değerinde kalmıştır.

Yakıt hücresine belirli bir değerden fazla manyetik alan uygulamak yakıt hücresinin akımına, net gücüne, hava akış oranına ve yakıt akış oranına olumsuz etki ettiği görülmüştür. Sistemin verimini ise artırmakta ancak belirli bir değerden sonra sabit bırakmaktadır.

Sonuç olarak yakıt hücresi akımına optimum seviyede manyetik alan uygulanması tasarlanan sistemin performansını artırmaktadır. Bu performans artışı da Hibrit Güç Sistem'lerinde manyetik alan katkılı yakıt hücresi kullanımına fayda sağlayabilir. Hibrit Güç Sistem'lerinin dışında yakıt hücreleri birçok alanda da kullanılmaktadır. Bu alanlardan bazıları sabit güç kaynakları, uzay araçları, havacılık sektörü, otomotiv sektörü ve bazı askeri uygulamalar örnek verilebilir. Deşarj olarak ömrünü tamamlamaması yani uzun süre kullanılabilmesi, yüksek performansa sahip olması, enerji yoğunluğunun iyi seviyede

olması, ağırlık ve yer bakımından avantajlı olması sebepleri de yakıt hücresi uygulamalarının günümüzde daha fazla kullanılmasına başlıca rol oynamaktadır. Bu uygulama alanları ve bu avantajlı sebeplere ek olarak da optimum seviyede bir manyetik alan uygulanması yakıt hücrelerinin günümüzde ve gelecekte kullanımına fayda sağlayabilmektedir.

Gelecek çalışmalarda ise tasarlanan sisteme uygulanan manyetik alan şiddetinin bazı değerlerindeki stabilizasyon sorunu için ise optimizasyon gerçekleştirilebilir. Uygulanan optimizasyon sayesinde yakıt hücresi akımı, net gücü, hava akış oranı ve yakıt akış oranındaki dalgalanmaların önüne geçilebilir.



KAYNAKLAR

1. Bizon, N., Lopez-Guede, J.M., Kurt, E., Thounthong, P., Mazare A.G., Ionescu L.M. (2019). Hydrogen economy of the fuel cell hybrid power system optimized by air flow control to mitigate the effect of the uncertainty about available renewable power and load dynamics. *Energy Convers Manage*, 179:152-165.
2. Ahmed, A. A. (2019). The influence of electromagnetic field on the performance and operation of a PEM fuel cell stack subjected to a relatively low electromagnetic field intensity. *Energy Convers Manage*, 198:111906.
3. Matsushima, H., Iida, T., Fukunaka, Y., Bund, A. (2008). PEMFC performance in a magnetic field. *Fuel cells*, 08(1):33–6. <https://doi.org/10.1002/fuce.200700050>.
4. Okada, T., Wakayama, N., Wang, L., Shingu, H. (2003). The effect of magnetic field on the oxygen reduction reaction and its application in polymer electrolyte fuel cells. *Electrochimica Acta*, 48:531-9.
5. Feng-Jen, C., Chia-Ying, S., Terng-Jou, W., Shang-Hao, L., Tzu-Yi, P., Po-Min, K. (2021). Effects of magnetic fields on electricity generation in a photosynthetic ceramic microbial fuel cell. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 11411-11418.
6. Zhong-Hua, T., Han-Qing, Y., Wen-Wei, L., Yun-Kun, W., Min, S., Xian-Wei, L., Guo-Ping, S. (2015). Application of a weak magnetic field to improve microbial fuel cell performance. *Ecotoxicology*, 24:2175–2180.
7. İnternet: R. Serway and C. Vuille URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Magnetic_field#:~:text=A%20magnetic%20field%20is%20a,magnetic%20field%20being%20quite%20large. Son Erişim Tarihi: 1 Kasım 2022
8. Cheng, D. K. (2009). *Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri* (2. b.). (A. Köksal, & B. Saka, Çev.) Palme Yayıncılık, Ankara.
9. St-Pierre, J., Wilkinson, D.P. (2001) Fuel cells: A new, efficient and cleaner power source. *The Global Home of Chemical Engineers*, 47:1482.
10. Trimm, D.L, Önsan, Z.I. (2001). Onboard Fuel Conversion for Hydro- gen-fuel-cell driven Vehicle. *Catalysis Reviews Science Engineering*, 43:31-84.
11. Andu'jar, J.M., Segura, F. (2019). Renewable and sustainable energy. *Reviews* 13:2309–2322.
12. Barbir F. (2005). *PEM Fuel Cells : Theory and practice*. Elsevier, 1-46.
13. Cook B. (2001). *An Introduction to Fuel Cells and Hydrogen Technology*. Heliocentris. 1-28.
14. Sharaf, Z. O., Orhan, F. M., (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810–853.

15. Güneş, S. (2008). *PEM yakıt hücresi katotunda kullanılmak üzere platin bazlı üçlü katalizörlerin sentezi, karakterizasyonu ve elektrokatalitik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-85.
16. Rodriguez, J.L, Gonza'lez, E.R, Pastor, E., Garcí'a, G., Silva-Chong, J.A. (2006). CO tolerant catalysts for PEM fuel cells spectroelectrochemical studies, *Catalysis Today*, 116:415–421.
17. İnternet: R. Chabay and B. Sherwood
URL:https://energyeducation.ca/encyclopedia/Electric_field. Son Erişim Tarihi: 1 Kasım 2022
18. Jaroslow, M., Wejrzanowski, T., Szablowski, L., Baron, R., Szczesniak, A., Cwieka, K., (2017). Development of Molten Carbonate Fuel Cells at Warsaw University of Technology. *Energy Procedia*, 142, 1496- 1501.
19. Peighamardoust, S.J., Rowshanzamir, S., Amjadi, M. (2010). Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9349-9384.
20. Bıyıkoglu, A. (2005). Review of proton exchange membrane fuel cell models. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1181 – 1212.
21. Hussain, N., Steen, E.V., Tanaka, S., Levecque, P., (2017). Metal based gas diffusion layers for enhanced fuel cell performance at high current densities. *Journal of Power Sources*, 337, 18-24.
22. Hermann, A., Chaudhuri, T., Spagnol, P. (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1297–1302.
23. Mench, M. M. (2008). *Fuel Cell Engines*. John Wiley&Sons.
24. Barbir, F. (2013). *PEM Fuel Cell Theory and Practice*. Elsevier.



Gazili olmak ayrıcalıktır