

**TEŞEKKÜR**

Bu tez çalışması boyunca her türlü destek ve yardımlarını esirgemedi, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan danışman hocalarım Yrd.Doç.Dr. Bilal GÜMÜŞ'e ve Yrd.Doç.Dr. M.Tunay GENÇOĞLU'na teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bu çalışma Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (DÜBAP) tarafından 06-MF-48 nolu projesi olarak desteklenmiştir. Verdikleri destekten dolayı Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| TEŞEKKÜR .....                                                           | i  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                        | ii |
| ÖZET .....                                                               | iv |
| ABSTRACT .....                                                           | v  |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1  |
| 2. YAKIT PİLLERİ .....                                                   | 3  |
| 2.1. Giriş .....                                                         | 3  |
| 2.2. Yakıt Pillerinin Temel Çalışma Prensibi .....                       | 3  |
| 2.3. Yakıt Pillerinin Üstünlükleri.....                                  | 6  |
| 2.4. Yakıt Pillerinde Enerji, Güç ve Verim.....                          | 7  |
| 2.5. Yakıt Pili Çalışma Gerilimi .....                                   | 11 |
| 3. YAKIT PİLİ TÜRLERİ .....                                              | 13 |
| 3.1. Giriş .....                                                         | 13 |
| 3.1. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pilleri.....                             | 16 |
| 3.1.1. Polimer Elektrolitlerin Çalışma Prensibi .....                    | 19 |
| 3.1.2. Elektrot ve Elektrot Yapısı .....                                 | 19 |
| 3.1.3. Gaz Difüzyon Katmanı .....                                        | 20 |
| 3.1.4. Akış Alanı Plakaları .....                                        | 21 |
| 3.1.4. PEM Yakıt Pili Su Kontrolü .....                                  | 22 |
| 3.2. Alkalın Elektrolit Yakıt Pili.....                                  | 22 |
| 3.2.1. Alkalın Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....                  | 23 |
| 3.2.2. Alkalın Yakıt Pillerinin Başlıca Avantajları.....                 | 23 |
| 3.3. Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pili .....                          | 24 |
| 3.3.1. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili Yapısı ve Bileşenleri..... | 25 |
| 3.4. Fosforik Asit Yakıt Pili.....                                       | 26 |
| 3.4.1. Fosforik Asit Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....            | 27 |
| 3.4.2. Fosforik Asit Yakıt Pillerinin Uygulamaları.....                  | 27 |
| 3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili .....                                    | 27 |
| 3.5.1. Erimiş Karbonat Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi.....           | 28 |
| 3.5.2. Erimiş Karbonat Yakıt Pillerinin Uygulamaları.....                | 29 |
| 3.6. Katı Oksit Yakıt Pilleri .....                                      | 29 |
| 3.6.1. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....               | 30 |
| 3.6.2. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Uygulamaları.....                     | 30 |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 4. PEM YAKIT PİLİ MODELİ .....                              | 32 |
| 4.1. Giriş .....                                            | 32 |
| 4.2. PEM Yakıt Pili Modellerinin Tarihsel Gelişimi .....    | 32 |
| 4.3. Bir PEM Yakıt Pili Modelinin Matematiksel Modeli ..... | 36 |
| 4.4. Bir PEM Yakıt Pili Modelinin Dinamik Modeli .....      | 40 |
| 5. BENZETİM SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMA .....             | 43 |
| 5.1. Benzetim sonuçları .....                               | 43 |
| 5.2. Deneysel Çalışma .....                                 | 68 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                  | 71 |
| KAYNAKLAR .....                                             | 73 |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                         | 75 |
| TABLO LİSTESİ .....                                         | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                              | 80 |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

# YAKIT PİLLERİ VE BİR PEM YAKIT PİLİ SİSTEMİNİN DİNAMİK BENZETİMİ

**Zehra URAL**

Dicle Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2007, Sayfa: 79.

Geçtiğimiz yüzyılda, enerji tüketimindeki hızlı artış ve enerji kaynaklarının sınırlılığı, günümüzde birçok sorun ve endişeye neden olmuştur. Bunun yanında küresel ısınma gibi çevresel etkilerin ciddi bir şekilde artması önemli tedbir ve planlamalar gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları bu tedbir, endişe ve sorunlara çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biridir. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri de bu enerjinin en önemli kullanım alanlarından.

Yakıt pili sistemlerinin geliştirilebilmesi için yakıt pillerinin çalışma prensibinin bilinmesi gerekmektedir. Son yıllarda yakıt pili teknolojilerine olan ilgi gittikçe artmaktadır. Özellikle polimer elektrolit membranlı (proton değişim membran, PEM) yakıt pillerinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. PEM yakıt pilleri; düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunlukları ve yüksek enerji dönüşüm verimlerinden dolayı otomobiller ve sabit uygulamalar için potansiyel bir güç kaynağı olarak oldukça dikkat çekmektedir.

Matematiksel modeller ve benzetimler yakıt pilleri, yığınları, yakıt pili güç sistemlerinin tasarım ve optimizasyonu için gerekli olan araçlar olarak görülmektedir. Son zamanlarda sayısal modellemeler ve bilgisayar benzetimleri, daha iyi PEM yakıt pili sistemlerinin geliştirilmesi ve analiz edilmesi için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yakıt pilinin çalışma prensibi ve yakıt pili türleri arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Ayrıca, bir polimer elektrolit membran yakıt pili sistemi modellenmiş, benzetimi yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. PEM yakıt pili sisteminin benzetimi ve modellenmesi için Matlab-Simulink yazılımı kullanılmıştır. Yakıt pili sistem modeli; reaktant akış dinamikleri, yakıt pili modeli ve güç düzenleme biriminden meydana gelmiştir. Aynı zamanda bir PEM yakıt pilinin karakteristiği ve verimi deneyler yardımıyla elde edilmiştir. Benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur. Bu çalışmada sunulan dinamik benzetim modeli ile şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız çalışan PEM yakıt pili generatör sistemleri uygulamaları gerçekleştirilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt pili, PEM yakıt pili, Dinamik benzetim.

**ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

**FUEL CELLS AND THE DYNAMIC SIMULATION OF A PEM FUEL CELL SYSTEM****Zehra URAL**

Dicle University  
Graduate School of Natural and Applied Science  
Department of Electrical and Electronics Engineering  
2007, Page:79.

During the last century, rapid growth in energy consumption and limited resources of energy has caused many concerns and issues today. Furthermore, environmental concerns, such as global warming, are becoming increasingly serious, and require significant attention and planning. Renewable energy sources are the answer to this needs, issues and concerns. Hydrogen energy is one of the important renewable energy sources. Fuel cells which are used hydrogen as a fuel are the most important area of this energy. Basic principles of the fuel cell are need to know for developed the fuel cell system. In the recent years there was an increasing interest in fuel cell technology. Especially, polymer electrolyte membrane (interchangeably called proton exchange membrane, PEM) has reached a high development status. The PEM fuel cell has attracted a great deal of attention as a potential power source for automobile and stationary applications due to its low temperature of operation, high power density and high energy conversion efficiency.

Mathematical models and simulations are needed as tools for design and optimization of fuel cells, stacks, and fuel cell power systems. Recently, numerical modeling and computer simulation have been used for improving and analyzing better PEM fuel cell systems.

In this study, basic principle of the fuel cell and difference among fuel cell types are investigated. Also, the dynamics of a polymer electrolyte membrane fuel cell system is modeled, simulated and its results are presented. Matlab-Simulink is used for the modeling and simulation of the PEM fuel cell system. The fuel cell system model consists of the dynamics of reactant flow, fuel cell model and power conditioning unit. Also characteristics and efficiencies of a PEM fuel cell system are obtained by experiments. Simulation and experimental results are presented in this paper. The analyses of grid connected or stand alone applications of PEM fuel cell generator system can be achieved with this dynamic simulation model.

**Keywords:** Fuel cell, PEM fuel cell, Dynamic simulation.

## 1. GİRİŞ

Sanayileşme ve nüfus artışıyla birlikte enerji ihtiyacının artmasıyla fosil yakıtlara olan talep artmıştır. Bunun sonucu olarak da hava kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi ciddi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve hızla tükenmesi alternatif enerji kaynakları arayışını doğurmuştur [1]. Günümüzde fosil yakıtlara alternatif olarak doğal üretim kaynakları (güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik vb.) ve nükleer enerji ele alınmaktadır [2]. Ancak fosil yakıtların yerini alabilecek ve dünyanın artan enerji ihtiyacını karşılayabilecek en iyi alternatif hidrojen enerjisidir.

Kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt hücreleri, enerji dönüşüm teknolojilerinden biridir. Yakıt pilleri, yakıt olarak kullanılan hidrojen ile oksijenin elektro-kimyasal reaksiyonu sonucunda enerji üretirler.

Hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt hücrelerinin veriminin yüksek, çevre dostu ve güvenli olması yakıt hücrelerine olan ilgiyi arttırmıştır. Güneş pilleri, gündüz gece zaman dilimine ve mevsimlere göre değişen ışık şiddetine bağlı olarak elektrik enerjisi üretirler. Benzer biçimde bir rüzgâr türbininin üreteceği elektrik enerjisi de, rüzgâr hızına dolayısıyla iklim şartlarına bağlıdır. Ancak yakıt hücreleri, iklim şartlarından bağımsız olarak, ihtiyacın olduğu yerde kesintisiz biçimde enerji üretimine olanak sağlayabilmektedirler. Dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynakları içinde özel bir yere sahiptir. Bu nedenlerle yakıt hücreleri ile ilgili olarak, hızla artan bir biçimde, araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bağımsız ve dağıtık biçimde enerji üretimine olanak sağlayan yakıt hücreleri, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de giderek önem kazanacak ve geniş uygulama alanları bulacaktır [3].

Bu çalışmanın amaçlarından birisi, geleceğin enerjisi olarak görülen hidrojen enerjisi ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan yakıt pilleri hakkında bilgiler edinmektir. Bu bilgilerin ışığında en çok kullanılan ve verimi yüksek yakıt pili türü olan, PEM yakıt pilinin çalışması ve yapısı incelenmiştir. PEM yakıt pilinin, matematiksel modeli yardımıyla, dinamik modeli, MATLAB Simulink yazılımı yardımıyla elde edilmiştir. Böylelikle PEM yakıt pilinin dinamik davranışının incelenmesi ve PEM yakıt pili sisteminin güç donanımlarıyla değişken yükleri beslemesi durumunun analiz edilebilmesi sağlanmıştır.

Tezin yapısı genel olarak incelendiğinde, ikinci bölümde yakıt pillerinin temel çalışma prensipleri ve üstünlükleri hakkında genel bilgiler verilmiş, bir yakıt pilinde enerji, güç ve verim hesabı denklemler yardımıyla açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, kullandıkları elektrolit tipine göre her bir yakıt pili türünün çalışma yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Bu çalışmada PEM yakıt pili türünün incelenmesi sebebiyle

bu bölümde PEM yakıt pillerine geniş olarak yer verilmiştir. PEM yakıt pillerinin çalışma prensibi, elektrot yapısı, gaz difüzyon katmanı, akış alan plakaları ve PEM yakıt pilinde su kontrolü detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; bir PEM yakıt pilinin modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle var olan modeller ve gelişimleri kısaca anlatılmıştır. Daha sonra bir PEM yakıt pilinin matematiksel denklemleri verilerek Matlab-Simulink yazılımı yardımıyla bir PEM yakıt pili sisteminin benzetimi yapılmıştır.

Beşinci bölümde benzetim sonuçları ve 1,2 W'lık bir PEM yakıt pili sistemi ile yapılan deneysel ölçüm ve çalışmalar verilmiştir.

Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise çalışmaya ilişkin sonuçlar aktarılmıştır.

## 2. YAKIT PİLLERİ

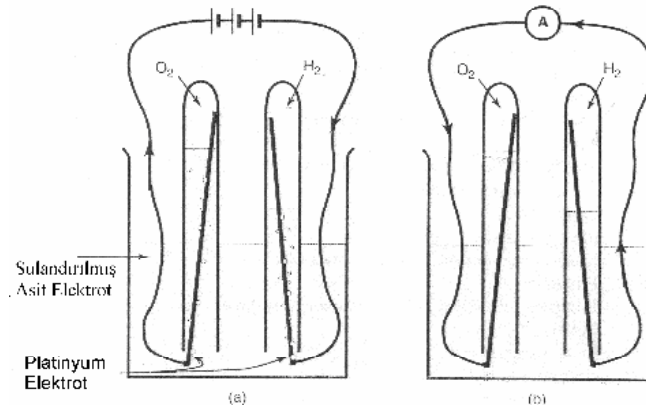
### 2.1. Giriş

Yakıt pilleri elektrokimyasal dönüştürücülerdir. Yakıt pillerinde kimyasal enerji, ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü olmadan, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür [4]. Bu kimyasal süreçte içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma evresi olmadığından temiz enerji kaynağıdır [2]. Çevreye zararı olan atık maddeler üretmezler. Ayrıca, elektrik enerjisinin yüksek verimlilik ile elde edilmesine olanak sağlarlar [4].

Yakıt pillerinde ana enerji kaynağından (Güneş, rüzgâr vb.) alınan enerji ile hidrojen elde etme yöntemlerinden biri kullanılarak hidrojen üretilir. Hidrojen havadaki oksijenle yakıt pili aracılığı ile yanarak su oluşturur. Tepkime ekzotermik olup ısı açığa çıkar. Ancak oluşan ısı çok yüksek değerde olmadığına su ile yakıt pili dışına atılır. Yüksek ısı üreten yakıt pillerinde ise ayrıca soğutma ihtiyacı duyulabilir [2].

### 2.2. Yakıt Pillerinin Temel Çalışma Prensibi

Yakıt pillerinin temel çalışma prensipleri oldukça basittir. 1839'da William Grove tarafından bir yakıt pilinin ilk gösterimi yapılmıştır. Şekil 2.1.a'da su; bir elektrik devresinden geçerek hidrojen ve oksijene ayrıştırılır. Şekil 2.1.b'de yakıt pilinin çalışma prensibi gösterilmektedir, ampermetreden küçük bir akım akmaktadır. Elektroliz olayı tersine çevrilir, hidrojen ve oksijen tekrar birleşir ve bir elektrik akımı üretilir.



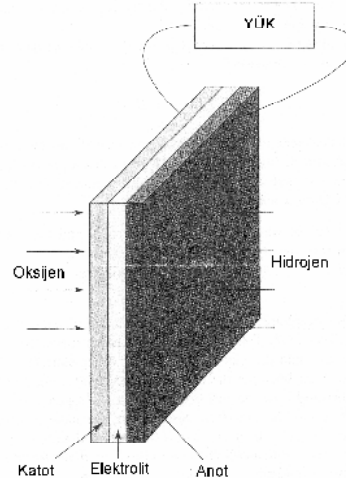
**Şekil 2.1. (a)** Suyun elektrolizi. Su; bir elektrik devresinden geçerek hidrojen ve oksijene ayrıştırılır. **(b)** Küçük bir akım akar, hidrojen ve oksijen tekrar birleşir.

Şekil 2.1.a ve 2.1.b'de gösterilen deneyler, yakıt pilinin temel prensibinin uygun bir gösterimidir. Fakat üretilen akım çok küçüktür, akımın küçük olmasının asıl nedeni;

- Gaz ve elektrot arasındaki temas alanının düşük olması,

- Elektrotlar arasındaki geniş mesafe (elektrolit elektrik akımının akmasına direnç gösterir).

Bu problemleri çözmek için elektrotlar genellikle Şekil 2.2'deki gibi elektrolitin ince bir tabakasıyla yassı bir şekilde yapılır. Elektrot yapısı gözeneklidir, böylelikle bir yandan elektrolit diğer yandan gaz olmak üzere her ikisi de elektrotun içine girebilirler. Böylelikle elektrot, elektrolit ve gaz arasında mümkün olan maksimum temas sağlanmış olur.



**Şekil 2.2.** Bir yakıt pilinin temel katot-elektrot-anot yapısı

Bununla birlikte, hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyondan bir elektrik akımının nasıl üretildiğini ve elektronların nereden geldiğini anlamak için, her bir elektrotta oluşan ayrı reaksiyonların düşünülmesi gerekir. Bu önemli detaylar yakıt pilinin farklı tipleri için değişmektedir. Yakıt pilinin çalışma prensibinin anlaşılması için, en yaygın ve en basit tip olan asit elektrolit esaslı bir hücrenin çalışma prensibi incelenebilir.

Bir asit elektrolit yakıt pilinin anodunda hidrojen gazı iyonize olur, elektronlar açığa çıkar ve  $H^+$  iyonları (protonlar) oluşur.

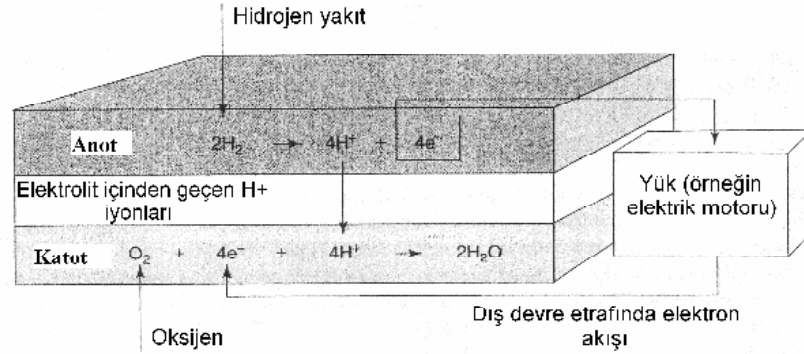


Bu reaksiyon sonucunda enerji açığa çıkar. Elektrottan gelen elektronlar ve elektrolitten gelen  $H^+$  iyonları ile katottaki oksijen reaksiyona girer ve su formuna dönüşür.



Açık bir biçimde, her iki reaksiyonda da anotta üretilen elektronlar, katotta bir elektrik devresi içinden geçmelidirler. Aynı zamanda  $H^+$  iyonları da elektrolitin içinden geçmelidir. Asit, serbest  $H^+$  iyonlarının bir akışıdır ve bu amaca çok iyi hizmet eder. Belirli polimerler serbest zarlı olarak adlandırılırlar, çünkü bir  $H^+$  iyonu bir protondur.

(2.1) ve (2.2) numaralı reaksiyonları karşılaştırırken; eğer sistem dengede korunacaksa, iki hidrojen molekülü her bir oksijen molekülüne ihtiyaç duyacaktır. Bu durum Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Elektrolit elektronlara değil, sadece  $H^+$  iyonlarının geçişine izin vermelidir. Aksi takdirde elektronlar elektrolit içinden geçerse hepsi kaybolabilir.



Şekil 2.3. Bir asit elektrolit yakıt pili için elektrot reaksiyonları ve yük akışı

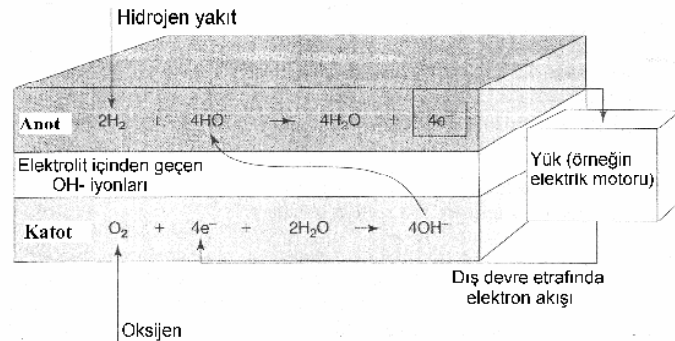
Alkalın elektrolit yakıt pilinde de genel reaksiyonlar aynıdır, fakat her bir elektrottaki reaksiyonlar farklıdır. Alkalinde, hidroksil ( $OH^-$ ) iyonları hazır ve hareketlidir. Bu iyonlar anotta hidrojenle reaksiyona girer, enerji ve elektronları açığa çıkarırlar ve su üretirler.



Katotta oksijen, elektrottan aldığı elektronlarla ve elektrolitteki su ile reaksiyona girer, yeni  $OH^-$  iyonları oluşturur.



İlerleyen bu reaksiyonlarda,  $OH^-$  iyonları elektrolit içinden geçebilmelidirler ve anottan katoda elektronlar için bir elektrik devresi olmalıdır. Aynı zamanda (2.3) ve (2.4) numaralı denklemler karşılaştırırken oksijene oranla iki kat fazla hidrojen kullanılmıştır. Bu durum Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Su katotta tüketilmesine rağmen, anotta iki kat hızlı meydana getirilir [5].



Şekil 2.4. Bir alkalın elektrolit yakıt pili için elektrot reaksiyonları ve yük akışı

### 2.3. Yakıt Pillerinin Üstünlükleri

Günümüzde bütün yakıt pilleri tipleri için en önemli dezavantaj, maliyettir. Bununla birlikte yakıt pillerinin çeşitli avantajları da vardır. Bunlar; farklı tipleri farklı uygulamalara yönlendiren az ya da çok etkili özelliklerdir. Bu özellikler;

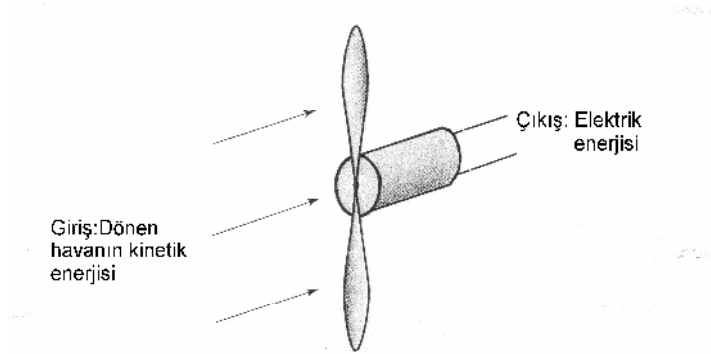
- Verim; Yakıt pilleri genelde piston veya türbin tabanlı yakıt motorlarından daha verimlidir. Bu özelliğinin ötesinde küçük sistemler büyük sistemler kadar verimli olabilirler. Küçük yerel güç sistemlerinde, güç ve ısı sistemlerinin birleştirilmesine ihtiyaç duyulması durumunda bu özellik çok önemlidir.
- Basitlik; Hareketli parçaları olsa da bu parçaların az olmasıyla yakıt pillerinin yapıları çok basittir, bu durum uzun süreli ve oldukça güvenilir sistemlere yön gösterebilir.
- Düşük Emisyon; Temel yakıt pili reaksiyonlarının üretiminde hidrojen yakıt olduğundan, bu bir yakıt pilinin önemli bir derecede sıfır emisyonu neden olabileceği anlamına gelir. Yakıt pillerinin araçlarda kullanıldığı durumlarda bu durum temel avantajdır. Çünkü araç emisyonlarını azaltmaya ve hatta onları şehirlerde elimine etmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, gelecekte CO<sub>2</sub> emisyonu, yakıt olarak ihtiyaç duyulan hidrojen üretimi ile neredeyse her zaman ilgili olacaktır.
- Sessizlik; Ekstra yakıt işleme teçhizatıyla bile yakıt pilleri oldukça sessizdirler. Bu durum hem taşınabilir güç uygulamaları hem de ısı ve gücün birleştirildiği bölgesel güç üretiminde oldukça önemlidir.

Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojenin kullanılması, hidrojen elde edilmesindeki güçlükler nedeniyle dezavantaj gibi gözükmemektedir. Fosil yakıtlar tükendikçe, hidrojenin dünyanın en büyük yakıt ve enerji vektörü olacağı düşünüldüğünde bu dezavantaj avantaja dönüşecektir. Örneğin güneş pilleri yardımıyla suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilebilmesi mümkündür.

Yakıt pillerinin avantajları, kombine ısı ve güç sistemlerinde (geniş ve küçük boyutlu uygulamaların her ikisi için) ve özellikle araçlar gibi hareketli güç sistemlerinde ve taşınabilir bilgisayarlar, mobil telefonlar ve askeri haberleşme araçları gibi elektronik teçhizatlarda etkilidir. Bu alanlar, yakıt pillerinin kullanıldığı en geniş sahalardır. Burada en önemli amaç, birkaç wattlık sistemlerden megawatlara kadar yakıt pili gücünün geniş çapta uygulama alanı bulmasıdır. Bu bakımdan yakıt pilleri, enerji dönüştürücüler olarak her yönleriyle üstün özellikler taşırlar [5].

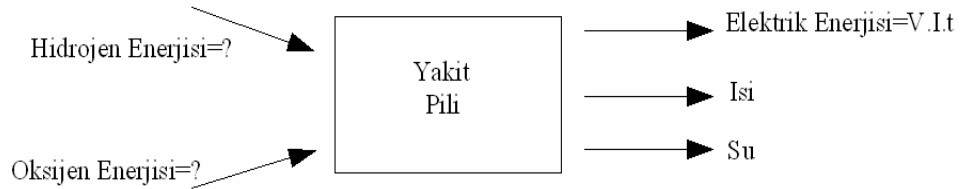
## 2.4. Yakıt Pillerinde Enerji, Güç ve Verim

Bazı elektrik güç oluşum sistemlerinde elektriğe dönüştürülen enerjinin formunun ne olduğu açıkça bellidir. Şekil 2.5’de gösterilen bir rüzgar türbinine bağlı generatör iyi bir örnektir. Burada enerji kaynağı, pervane kanadı üzerinde hareket eden havanın kinetik enerjisidir.



Şekil 2.5. Bir rüzgar türbini

Bir yakıt pili ile bu gibi enerji düşüncelerinin hayali olarak canlandırılması oldukça zordur. Yakıt pilinin temel giriş ve çıkışları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yakıt pilinin giriş ve çıkışları

Elektriksel güç ve enerji (2.5) numaralı denklemlerden kolaylıkla hesaplanabilir.

$$\text{Güç} = V.I \quad \text{ve} \quad \text{Enerji} = V.I.t \quad (2.5)$$

Bununla birlikte kimyasal giriş ve çıkış enerjisi kolayca tanımlanamaz. Basit bir seviyede  $H_2$ ,  $O_2$  ve  $H_2O$ ’nun kimyasal enerjisi olduğu söylenebilir. Buradaki problem, kimyasal enerjinin entalpi, Helmholtz fonksiyonu, Gibbs atık enerji gibi kullanılan terimlerinin kolaylıkla tanımlanamaz oluşudur. Son yıllarda faydalı terim ‘exerji’ oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır ve bu kavram özellikle yüksek sıcaklık yakıt pillerinde faydalıdır. Isıtıcı değer gibi daha eski fakat hala faydalı olan terimler de vardır.

Yakıt pillerinde önemli olan tanımlardan biri Gibbs atık enerjidir. Bu; basınç ve/veya hacimde herhangi bir değişiklik olmadan, dış çalışma yapmak için kullanılabilir enerji olarak

tanımlanabilir. Yakıt pillerinde dış çalışma, bir dış devre etrafında hareket eden elektronları içerir. Exerji; basınç ve hacim değişimlerine rağmen kapsanarak özetlenebilen tüm dış çalışmadır. Entalpi ise; Gibbs atık enerji ile entropiye bağlı enerjinin toplamıdır.

Kimyasal enerjinin tüm bu formları doğal mekanik potansiyel enerji gibidir. Bu da iki önemli yolla açıklanabilir.

Birincisi; sıfır enerji noktasının hemen hemen herhangi bir yer olarak tanımlanabilmesidir. Kimyasal reaksiyonlarla çalışıldığı zaman, sıfır enerji noktası, saf elementlerin normal şartlarda, yani standart basınç ve sıcaklık noktaları (25 °C veya 298,15 K, 0,1 MPa) olarak tanımlanır. Gibbs atık enerji değişimi ( $G_f$ ); Gibbs atık enerji teriminden daha çok kullanılır. Standart bir hidrojen yakıt pilinin standart sıcaklık ve basınçta (STP) çalışması; Gibbs atık enerji değişimi girişinin sıfır olduğu anlamına gelir.

İkincisi; mekanik potansiyel enerjiye benzer olarak, enerjideki değişimin önemli olmasıdır. Yakıt pillerinde,  $\Delta G_f$ , (Gibbs atık enerji değişimi) bize enerji farkını verir. Bu değişim, ürünlerin Gibbs atık enerjisi ve girişler veya reaktantların Gibbs atık enerjisi arasındaki farktır.

$$\Delta G_f = G_f (\text{ürünler}) - G_f (\text{reaktantlar}) \quad (2.6)$$

Kolayca karşılaştırma yapmak için; bu miktarları per mol formunda tahmin etmek en uygun yoldur. Bunlar “ $\bar{\phantom{x}}$ ” üst indisi ile gösterilirler, örneğin  $(\bar{g}_f)_{H_2O}$ ; su için Gibbs atık enerji değişimidir.

Hidrojen / Oksijen yakıt pili için temel reaksiyon;



Reaktantlar; 1 mol  $H_2$  ve yarım mol  $O_2$  dir ve ürün de 1 mol  $H_2O$  dur. Böylece;

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_f (\text{ürün}) - \bar{g}_f (\text{reaktant}) \quad (2.8)$$

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (\bar{g}_f)_{O_2} \quad (2.9)$$

Bu denklem yeterince basit ve açıktır. Bununla birlikte Gibbs atık enerji değişimi sabit değildir. Sıcaklıkla ve gaz veya sıvı durumuna göre değişir. Tablo 2.1 bir grup farklı şartlarda temel yakıt pili reaksiyonu için  $\Delta \bar{g}_f$  değerlerini göstermektedir.



**Tablo 2.1.** Çeşitli sıcaklıklarda  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  reaksiyonu için  $\Delta \bar{g}_f$  değerleri

| Üretilen su formu | Sıcaklık (°C) | $\Delta \bar{g}_f$ (kJ mol <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|---------------|--------------------------------------------|
| Sıvı              | 25            | -237,2                                     |
| Sıvı              | 80            | -228,2                                     |
| Gaz               | 80            | -226,1                                     |
| Gaz               | 100           | -225,2                                     |
| Gaz               | 200           | -220,4                                     |
| Gaz               | 400           | -210,3                                     |
| Gaz               | 600           | -199,6                                     |
| Gaz               | 800           | -188,6                                     |
| Gaz               | 1000          | -177,4                                     |

Değerlerin negatif olması enerjinin açığa çıktığını gösterir. Eğer yakıt pilinde hiç kayıp olmasaydı veya işlem tersine çevrilebilir olsaydı, Gibbs atık enerjisinin tümü elektrik enerjisine dönüştürülebilirdi (Pratikte enerjinin bir kısmı ısı olarak açığa çıkmaktadır).

Önceki ayrılarda, bir yakıt pilinin temel çalışması açıklanmıştır. Hidrojen yakıt pilinde, kullanılan her bir hidrojen molekülü ve üretilen her bir su molekülü için dış devre etrafında iki elektron geçer. Böylece kullanılan 1 mol hidrojen için 2 N elektron (N:Avagadro sayısı=6,022x10<sup>23</sup>) dış devre etrafından geçer. Eğer -e bir elektron üzerindeki yük ise, akan yük;

$$-2 N e = -2 F \text{ coulomb} \quad (2.11)$$

F: Faraday sabiti yada 1 mol elektron yükü,

E; yakıt pilinin gerilimi olmak üzere, devre etrafında hareket eden yüklerin yaptığı elektriksel iş;

$$\text{Yapılan elektriksel iş} = \text{yük} \times \text{gerilim} = -2 F E \text{ joule} \quad (2.12)$$

olur. Sistem tersine çevrilebiliyorsa (yani hiç kayıp yoksa) yapılan bu elektriksel iş açığa çıkan Gibbs atık enerjisine ( $\Delta \bar{g}_f$ ) eşit olur.

$$\Delta \bar{g}_f = -2 F \cdot E \quad (2.13)$$

Böylece; bir hidrojen yakıt pili için tersine çevrilebilir açık devre gerilimi; aşağıdaki denklemle elde olunur.

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (2.14)$$

Bu ana denklem hidrojen yakıt pilinin elektromotor kuvvetini (EMF) ya da tersine çevrilebilir açık devre gerilimini verir.

Örneğin 200 °C de çalışan bir hidrojen yakıt pili,  $\Delta \bar{g}_f = -220$  kJ enerjiye sahiptir. Böylece;

$$E = \frac{220,000}{2 \times 96,485} = 1.14 \text{ V olur.}$$

Yakıtın her molekülünden z elektronun transfer edildiği bir reaksiyonda tersine çevrilebilir açık devre gerilimi genel olarak;

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{zF} \quad (2.15)$$

olur. Bununla birlikte  $\Delta \bar{g}_f$  sıcaklık ve diğer faktörlerle değişir. Maksimum verim, aşağıdaki ifade ile verilmiştir.

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \times 100 \quad (2.16)$$

Hidrojen yakıt pilinin çalışma verimi basit formüllerden de bulunabilir. Verim:

$$\eta = \mu_f \frac{V}{1,48} \%100 \quad (2.17)$$

ile bulunabilir. Bu denklemde:

$\mu_f$  : Yakıt kullanımını (yaklaşık 0,95),

V: Yakıt pili yığının içindeki tek bir pilin gerilimini,

belirtir. Bu denklem, hidrojenin yüksek ısı değeri (1,48) için verim oranını verir. Reaktantın basıncı ve konsantrasyonu Gibbs atık enerjisini ve dolayısıyla gerilimi etkiler. Bu durum, bazı formlarda verilebilen Nernst denkleminde açıklanmıştır.

Örneğin reaktantların ve ürünlerin basıncı bar biriminde verilmiş ve üretilen su buhar formunda ise;

$$E = E^0 + \frac{R.T}{2.F} \ln \left( \frac{P_{H_2} . P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.18)$$

olur.  $E^0$ : Standart basınçta pilin elektromotor kuvveti (EMF) [5].

## 2.5. Yakıt Pili Çalışma Gerilimi

Bir hidrojen yakıt pilinin açık devre geriliminin değeri aşağıdaki formülde verildiği gibidir.

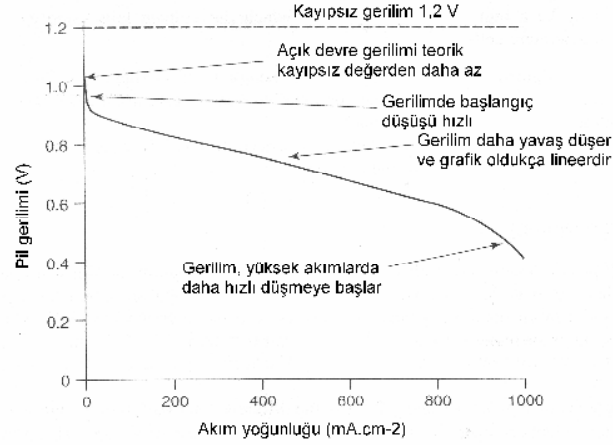
$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (2.19)$$

Bu denklem, 100 °C'nin altında çalışan bir pil için yaklaşık 1,2 V gibi bir değer verir. Bununla birlikte, bir yakıt pili yapıldığında ve kullanıldığında gerilimin bu değerden oldukça az olduğu görülür. Şekil 2.7 normal hava basıncında yani yaklaşık 70 °C de çalışan tipik bir tek hücrenin performansını gösterir. Akım yoğunluğuna karşı pil geriliminin bu grafiğinde dikkat edilecek noktalar;

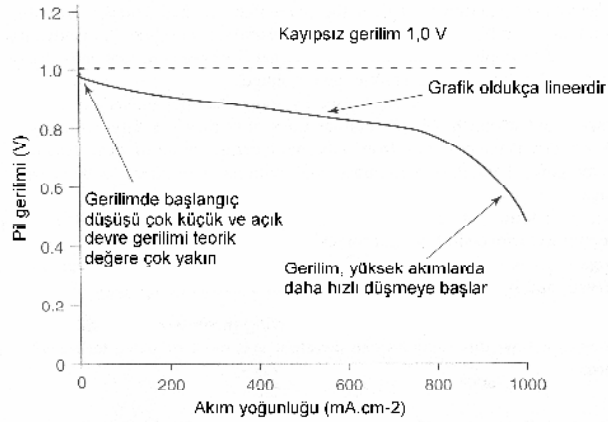
- Açık devre gerilimi, teorik değerden daha azdır.
- Başlangıçta gerilimde hızlı bir düşüş vardır.
- Sonra gerilim daha az hızlı ve daha lineer bir şekilde düşer.
- Hızlı bir şekilde düşen gerilimde bazen yüksek bir akım yoğunluğu vardır.

Bir yakıt pili daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılırsa, gerilim/akım yoğunluğu grafiğinin şekli değişir ve tersine çevrilebilir, kayıpsız gerilim düşer. Bununla birlikte gerçek çalışma gerilimi ile kayıpsız değer arasındaki fark genellikle daha az olur. Bilhassa pilden çizilen akım gibi gerilimdeki başlangıç düşüşü de önemsizdir. Şekil 2.8 yaklaşık 800 °C de çalışan tipik bir katı oksit yakıt pilinin durumunu gösterir. Burada dikkat edilecek noktalar;

- Açık devre gerilimi; teorik değerden sadece biraz küçük veya teorik değere eşittir.
- Başlangıçta, gerilimdeki düşüş çok küçüktür ve grafik daha lineerdir.
- Düşük sıcaklık pillerinde olduğu gibi gerilimin hızlıca düştüğü yerlerde yüksek bir akım yoğunluğu olabilir.



Şekil 2.7. Tipik bir düşük sıcaklık, hava basınçlı yakıt pili gerilimi



Şekil 2.8. Yaklaşık 800 °C de çalışan tipik bir hava basınçlı yakıt pili gerilimi

Şekil 2.7 ve 2.8 incelendiğinde; tersine çevrilebilir veya kayıpsız olan gerilim yüksek sıcaklıklarda daha düşük olmasına rağmen, çalışma gerilimi genellikle yüksektir. Çünkü gerilim düşümü veya tersinmezlik daha küçüktür [5].

### 3. YAKIT PİLİ TÜRLERİ

#### 3.1. Giriş

Yakıt pilleri elektrokimyasal bir reaksiyon sonunda kaliteli ve sürekli elektrik enerjisi üretirler. Havadaki oksijen ve yakıt olarak da hidrojen sağlandığı sürece kesintisiz olarak çalışmaya devam ederler [3]. Üretim ve malzeme fiyatları gibi pratik konuların dışında, yakıt pillerinin teknik iki temel problemi vardır. Bunlar;

- Yavaş reaksiyon oranı (düşük güç ve akıma yol açan),
- Hidrojenin hazır kullanılabilir bir yakıt olmaması.

Bu problemleri çözebilmek için, birçok farklı yakıt pili türleri araştırılmaktadır. Farklı yakıt pili tipleri genellikle kullanılan elektrolite göre birbirinden ayrılırlar. Bununla beraber başka önemli farklılıklar da vardır [5].

Yakıt pilleri yakıt ve oksitleyici kombinasyonuna bağlı olarak, yakıtın içte veya dışta işlenmesi, kullanılan elektrolitin tipi, pilin çalışma sıcaklığı, tepkenlerin iç veya dış manifoldla verilmesi gibi özelliklere göre sınıflandırılabilirler.

Çalışma sıcaklıklarına göre;

1. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-100 C<sup>0</sup>)
2. Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-500 C<sup>0</sup>)
3. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-1000 C<sup>0</sup>)

Kullandıkları elektrolite göre;

1. Proton değişim zarlı yakıt pili (PEMYP)
2. Doğrudan metanol kullanan yakıt pili (DMYP)
3. Alkalın yakıt pili (AYP)
4. Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
5. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)
6. Katı oksit yakıt pili (KOYP)

En çok kullanılan sınıflandırma şekli kullanılan elektrolite göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmadaki yakıt pili tipleri ile ilgili temel bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Yakıt pili türlerinin karşılaştırılması [6].

|                      | PEMYP                                                                                                         | DMYP                                                                                           | AYP                                                                                                      | FAYP                         | EKYP                                                                                                       | KOYP                                                         |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Elektrolit           | Katı Polimer Membran                                                                                          | Katı Polimer veya sıvı alkalın                                                                 | KOH                                                                                                      | Sıvı Fosforik Asit           | Sıvı Erimiş Karbonatlar                                                                                    | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeren zirkonya                |
| Çalışma Sıcaklığı    | 80°C                                                                                                          | 50°C – 90°C                                                                                    | 65°C – 220°C                                                                                             | 150 °C -220°C                | 650°C                                                                                                      | 600°C – 1000°C                                               |
| Katalizör            | Platinyum                                                                                                     | Pt veya Pt/Ru                                                                                  | Platinyum                                                                                                | Platinyum                    | Nikel                                                                                                      | Perovskites                                                  |
| Transfer edilen iyon | H <sup>+</sup>                                                                                                | H <sup>+</sup>                                                                                 | OH <sup>-</sup>                                                                                          | H <sup>+</sup>               | CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>                                                                              | O <sup>-2</sup>                                              |
| Yakıt Islahı         | Pil Dışı                                                                                                      | Gerekmez                                                                                       | Pil Dışı                                                                                                 | Pil Dışı                     | Pil içi                                                                                                    | Pil İçi                                                      |
| Anot Gazı            | Hidrojen                                                                                                      | Su içinde metanol                                                                              | Hidrojen                                                                                                 | Hidrojen                     | Hidrojen, Metan                                                                                            | Hidrojen, Metan                                              |
| Katot Gazı           | Saf oksijen veya hava                                                                                         | Havadan Oksijen                                                                                | Saf Oksijen                                                                                              | Havadan Oksijen              | Havadan Oksijen                                                                                            | Havadan Oksijen                                              |
| Isı Yönetimi         | Soğutucu                                                                                                      | Soğutucu                                                                                       | Soğutucu – Koj.                                                                                          | Kojenerasyon                 | Kojenerasyon                                                                                               | Kojenerasyon                                                 |
| Verim                | %35-60                                                                                                        | %35-40                                                                                         | %50-70                                                                                                   | %35-50                       | %40-55                                                                                                     | %45-60                                                       |
| Diğer Özellikler     | Elektrolitin katı olmasının getirdiği avantajlara sahiptir. Düşük sıcaklıkta çalışması diğer bir avantajıdır. | PEMYP'nin avantajları yanında yakıtın elektrik üretmeden anottan katoda geçiş problemi vardır. | Hidrojen ve oksijenle iyi performans gösterir. Uzay araştırmaları gibi kapalı uygulamalar için uygundur. | Performans AYP den düşüktür. | Elektrolit korozif ve hareket edebilir. Pil yapısı için paslanmaz çelik gerekir. Pahalı metaller gerekmez. | Materyaller arasında ısıl genleşme oranlılıkları oluşabilir. |

Çeşitli yakıt pili tipleri ve yakıt pillerinin güçleri üzerinde farklı yollarla çalışmalar yapılmaktadır. Proton değişim zarlı yakıt pili (Proton Exchange Membrane Fuel Cells: PEMFC); yakıt pilinin temel sadeliğinden faydalanır. Bu pilin elektroliti, protonların içinde serbest hareket edebilen bir katı polimerdir. PEM yakıt pilinin kimyası ise Şekil 1.3'deki asit elektrolit yakıt pili ile aynıdır. Katı ve hareketsiz bir elektrolite sahip olan bu pil, doğal olarak çok basit yapıya sahiptir.

PEM yakıt pilleri oldukça düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Düşük sıcaklıktan kaynaklanan yavaş reaksiyon oranı problemi bu pillerde, nitelikli katalizörler ve elektrotlar kullanarak çözülmüştür. Platin bu pillerde kullanılan katalizörlerden biridir, ancak son yıllardaki gelişmelerle, çok az miktarlarda platin kullanılmaktadır. Ayrıca, platinin fiyatı bir PEM yakıt pilinin toplam fiyatının küçük bir kısmını oluşturur. Hidrojeni temin etme problemi, hidrojeni sağlamanın çeşitli yolları mümkün olmasına rağmen tam olarak çözülmemiştir. Bu yakıt pili tiplerinde oldukça saf hidrojen kullanılması gerekmektedir.

Hidrojeni temin etme problemine teorik olarak çok cazip bir çözüm; yakıt olarak metanol (oldukça kullanışlı, akıcı bir yakıt, formülü; CH<sub>3</sub>OH) kullanmaktır. Bu çözüm PEM yakıt pillerinde de kullanılabilir ve bu gibi piller doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri (Direct Methanol Fuel Cell: DMFC) olarak adlandırılmaktadırlar. Bu pillerin adındaki doğrudan kelimesinin sebebi, metanolden hidrojen elde etmek yerine, yakıt olarak sıvı formda metanolün kullanılmasıdır. Maalesef bu piller çok düşük güce sahiptirler. Fakat bu düşük güçlerle de taşınabilir elektronik teçhizatların hızla gelişen kullanım alanlarında birçok muhtemel uygulama

vardır. Bu gibi piller, hiç olmazsa yakın gelecekte, çok düşük güçlü, uzun periyotlar boyunca elektrik tüketiminin yavaş ve sabit olmasını gerektiren uygulamalarda kullanılabileceklerdir.

Yakıt pilleri ilk insanlı uzay aracında kullanılmışlardır. Alkalın yakıt pili (Alkaline Elektrolyte Fuel Cell: AFC) de Apollo ve Shuttle Orbiter aracında kullanılmıştır. Bu yakıt pillerindeki yavaş reaksiyon oranı problemi, bir platin katalizörle birlikte oldukça gözenekli elektrotlar kullanılarak ve bazen de oldukça yüksek basınçta çalıştırılarak aşılmıştır. Bazı alkalın yakıt pilleri yaklaşık 200 °C 'de çalıştırılmasına rağmen, alkalın yakıt pilleri genellikle 100 °C'nin altında çalışırlar. Alkalın yakıt pillerinin asıl problemi; hava ve yakıt teminleri, serbest CO<sub>2</sub>'den olmasıdır, aksi takdirde saf oksijen ve hidrojen kullanılmalıdır.

Fosforik asit yakıt pili (Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC), ilk olarak ticari niceliklerde üretilmiştir ve yaygın ticari amaçlarda kullanılır. Bazı 200 kW'lık sistemler Uluslararası Yakıt Pilleri Anonim Şirketi tarafından imal edilmiştir. Bu sistemler, Japon şirketlerinin ürettiği sistemler gibi ABD ve Avrupa'da kurulmuşlardır. Reaksiyon oranını uygun bir seviyede tutmak için gözenekli elektrotlar ve platin katalizör, oldukça yüksek bir sıcaklıkta (~220 °C) kullanılır. Hidrojen yakıt problemi; hidrojen ve karbondioksit için doğal gaz (genellikle metan) kullanılarak çözülür. Fakat bunun için gerekli teçhizat, yakıt pili sisteminin boyutu, güçlük ve maliyete oldukça etkir. Bununla beraber PAFC sistemleri; fevkalade güvenilir ve korumasız bir güç sistemi sağlamak için bir yakıt pilinin doğal basitliğini kullanırlar.

Her bir yakıt pili tipi bazı problemleri çözer, fakat yeni zorlukları da kendisiyle beraber getirir. Katı oksit yakıt pili (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) 600 ila 1000 °C bölgesinde çalışır. Bu sıcaklık, yüksek reaksiyon oranının pahalı katalizörler olmadan da başarılabilirdiği anlamına gelir. Doğal gazlar ve benzeri gazlar da ayrı bir üniteye ihtiyaç göstermeden doğrudan veya yakıt pili içinde düzenlenmiş olarak kullanılabilirler. Bu yakıt pili tipi böylece yakıt ve reaksiyon oranı problemlerini çözer ve yakıt pili kavramının tabiatındaki basitliğin tüm avantajlarını alır. Bununla beraber, seramik materyallerden yapılan bu pillerin ele alınması zordur ve imalatları pahalıdır. Böylece, tam bir yakıt pili sistemi yapmak için oldukça büyük bir yardımcı teçhizata ihtiyaç vardır. Bu yardımcı tesis, hava ve yakıt ön ısıtıcısını içermekle beraber, soğutma sistemi çok karmaşıktır ve tesis edilmesi kolay değildir.

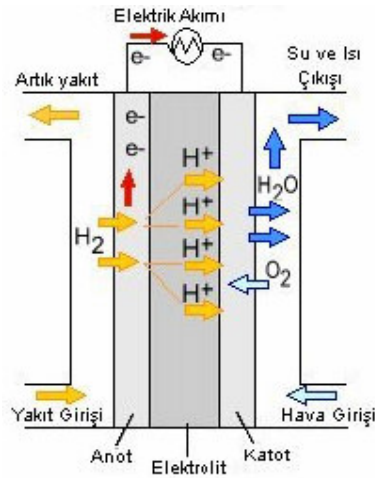
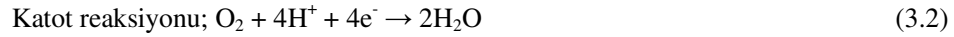
Katı oksit yakıt pilleri 1000 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda çalıştırılmalarına rağmen daima katı halde bulunurlar. Bu durum erimiş karbonat yakıt pilleri (Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC) için geçerli değildir. Erimiş karbonat yakıt pili çalışması için havadaki karbondioksite gereksinim duymak gibi ilginç özelliklere sahiptir. Yüksek sıcaklarda, oldukça ucuz bir katalizör olan nikel kullanılarak iyi bir reaksiyon oranı elde edilebilmektedir. Nikel

hem de elektrotun elektrik temeline şekillendirir. SOFC gibi erimiş karbonat yakıt pili de metan ve kömür gazı ( $H_2$  ve  $CO$ ) gibi gazları bir dış düzenleyici olmadan doğrudan kullanabilir [5].

### 3.1. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pilleri

Proton değişim zarlı (PEM) yakıt pili aynı zamanda katı polimer yakıt pili olarak da adlandırılır. Proton değişim zarlı yakıt pili; ilk olarak 1960'lı yıllarda A.B.D.'de NASA tarafından ilk insanlı uzay araçlarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir [5].

Elektroliti iyon geçişli bir polimerdir. Her bir kenar üzerine katalize edilmiş gözenekli bir elektrot yapıştırılmıştır. Anot-elektrolit-katot grubu bir adettir ve çok incedir. Bu zar elektrot grupları genellikle iki kutuplu levhalar kullanılarak sırayla bağlanmışlardır. Polimerlerin kullandığı hareketli iyonlar; bir  $H^+$  iyonu veya protonudur. Böylece pilin temel çalışması asit elektrolit yakıt pili ile esas itibarıyla aynıdır [5]. Hidrojen anot kısmına verilir ve burada katalizörün yardımıyla hidrojen iyonlarına (protonlara) ayrılır ve elektronlar serbest bırakılır. Elektronlar dış çevrim vasıtasıyla katot tarafına geçerken elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Daha sonra protonlar membran üzerinden katot tarafına geçerler, burada hidrojen atomları ile birleşerek su oluşur ve çevrim tamamlanır (Şekil 3.1). Membranın sulandırılması gerektiğinden buharlaşma ile kaybolan suyun üretilen sudan fazla olmayacağı bir sıcaklıkta çalıştırılmalıdır. Anotta ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar ise aşağıda gösterilmiştir.



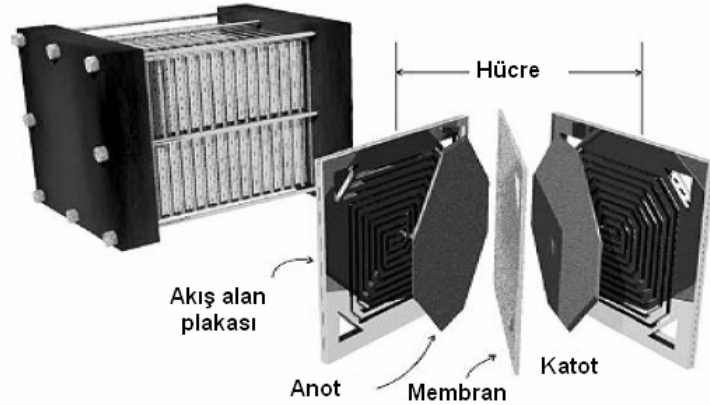
Şekil 3.1. PEM yakıt pili [6]

Polimer elektrotlar, bir PEM yakıt pilini hızlıca başlatabilecek düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Bu durum bu tip yakıt pilleri için bir üstünlük sağlar. Zar elektrot grubunun inceliği; yoğun yakıt pillerinin yapılabildiği anlamına gelir. İlave avantajları, aşındırıcı akıcılara sahip olmaması ve pilin herhangi bir çevre şartında çalışabilmesidir. Bu durum, PEM yakıt pilinin özellikle araçlarda ve taşınabilir uygulamalarda kullanım için uygun olduğu anlamına gelir.

PEM yakıt pilinin ilk versiyonları NASA Gemini uzay aracında kullanılanlar gibi sadece yaklaşık 500 saatlik bir ömre sahipti. Fakat bu ömür, sınırlı ilk görevler için yeterliydi. Gelişme programı 1967 de Nafion olarak adlandırılan (Dupont'un kayıtlı bir ticari markası) yeni bir polimer zarın birleştirilmesi ile devam etmiştir. Bu zar tipi PEM yakıt pili için standart olmuştur ve bugün de bu zar tipi kullanılmaktadır.

Bununla beraber elektrolitteki suyun yönetim problemi ve güvenli olarak düzenlemesi çok zor araştırma konularından olmuştur. Apollo araçları için NASA rakip alkalın yakıt pilini (Warshay, 1990) seçmiştir. Aynı zamanda General Elektrik PEM yakıt pilinin ticari gelişmesini takip etmemeyi seçmiştir. Bu durumun, PEM yakıt pillerinin fiyatlarının daha sonra geliştirilen fosforik asit yakıt pili gibi diğer yakıt pillerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmış olduğu tahmin edilmektedir.

Yakıt pili yığını



Şekil 3.2. Çift kutuplu levhalardan yapılmış yakıt pili yığını ve membran elektrot birimi [7]

PEM yakıt pillerinin gelişimi 1970'lerde ve 1980'lerin başlarında az, çok askıya alınmıştır. Bununla beraber, 1980'lerin son yarısında ve 1990'ların başında bu tip hücrelerde yeniden bir ilgi doğmuştur. Son yıllar boyunca gelişmeler, büyük oranda platin kullanımı azaltırken, aynı zamanda akım yoğunluğunu  $1 \text{ A.cm}^{-2}$  veya daha büyük değerlerine kadar getirmiştir. Bu gelişmeler, gücün kW'ına düşen maliyette büyük azalmaya ve güç yoğunluğunun artmasına izin vermektedir (Şekil 3.2.'de yakıt pili yığınlarından görüldüğü gibi). Bu hücre tipinin baskınlığını gösteren bir işaret, NASA ve yeni uzay mekik uydularının PEM

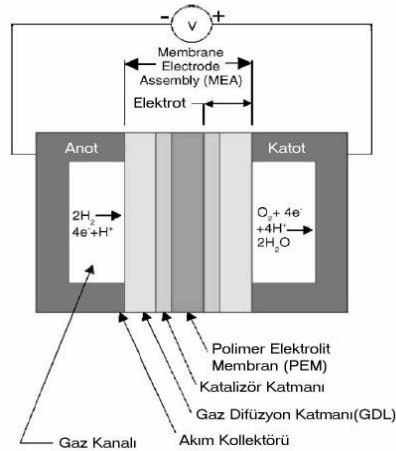
pillerini kullanımının yeniden tercih etmeleridir. PEM yakıt pilinin muhtemel uygulamalarının faaliyet alanına uygunluğuyla diğer tüm elektrik enerji üretim teknolojilerinden üstün olması tartışılabilir. Güçlü mobil telefonlar ve bilgisayarlar gibi diğer elektronik teçhizatlar için birkaç Watt'a, botlar ve ev sistemleri için birkaç kW'a, arabalar için 10 kW'a, otobüsler ve endüstriyel kombine ısı sistemleri için 100 kW'a kadar mümkün bir güç kaynağıdır. Uygulamaların bu geniş alanı içinde PEM yakıt pillerinin iki durumu az çok benzerdir. Bunlar;

- Kullanılan elektrolit,
- Elektrot yapısı ve katalizör,

Bununla birlikte; yakıt pili tasarımının diğer önemli durumları uygulamaya ve tasarımcının görüşüne bağlı olarak çokça değişir. Bunların en önemlileri:

- Su idaresi,
- Yakıt pillerinin soğutma metodu,
- Seri halde pillerin bağlanma metodu (2 kutuplu levha tasarımı çokça değişir ve bazı yakıt pilleri tamamen farklı metotlar kullanır),
- Yakıt pilinin hangi basınç altında çalışacağı sorusu,
- Kullanılan reaktantlar (saf hidrojen mümkün olan tek yakıt değildir ve havanın yerine oksijen kullanılabilir [5]),

olarak sıralanabilir. Tipik olarak bir PEM yakıt pili bir polimer elektrolit membran, elektrik iletken gözenekli gaz difüzyon katmanı, membran ve difüzyon katmanı arasında sandviç şeklinde bulunan katalizör, akış kanalları vasıtası ile, yakıt ve oksitleyiciyi reaksiyon bölgesine ulaştıran grafit yapılı akış alanı, plakalarından oluşmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. PEM yakıt pili ve bileşenleri [6]

### 3.1.1. Polimer Elektrolitlerin Çalışma Prensipleri

Polimer elektrolit membranlar üreten farklı firmalar, çoğunlukla tescilli olan kendi özel niteliklerine sahiptirler. Bununla beraber yaygın bir konu, genellikle fluoretilen olan sulfonat fluoropolimerlerin kullanımıdır. Bunlardan en iyi bilinen ve en çok kullanılanı, 1960'lardan bu yana çeşitli değişikliklerle üretilen Nafion (Dupont)'dur. Bu materyal diğerlerine karşı değerlendirildiğinde bir endüstri standardı duyarlılığında bir elektrolittir.

Elektrolit materyalin yapısını anlamada en basit başlangıç noktası, insan yapımı temel polimer olan polietilendir. Temel polimer, hidrojen için florin katılımıyla değiştirilir. Bu işlem birçok diğer bileşiğe de uygulanır ve perflorasyon olarak adlandırılır. Değiştirilen polimer politetrafluoretilendir (PTFE). Bu polimer elektrolit Teflon olarak bilinir. Bu kayda değer materyal yakıt pilinin gelişiminde çok önemli olmuştur. Florin ve karbon arasındaki güçlü bağlar bu malzemeyi kimyasal atığa karşı dayanıklı ve dirençli yapmıştır. Diğer önemli bir özellik ise, güçlü bir şekilde hidrofobik olmasıdır ve böylece yakıt pili elektrotlarında üretilen suyun elektrotun dışına atılmasında kullanılır ve böylece su taşmasını önler.

Yakıt pili kullanımının bu bakış açısıyla, Nafion ve diğer fluorosulfanat iyonmerlerin özellikleri şunlardır;

- Kimyasal olarak yüksek dirençlidirler,
- Mekanik olarak güçlüdürler ve böylece çok ince filmlerden yapılabilirler (50-175 mikron [4])
- Asidiktirler,
- Büyük su miktarlarını absorbe edebilirler,
- İyi hidratlanmışlarsa,  $H^+$  iyonları materyalin içine doğru tamamen serbest bir şekilde hareket edebilirler, iyi proton iletkenliklidirler [5].

### 3.1.2. Elektrot ve Elektrot Yapısı

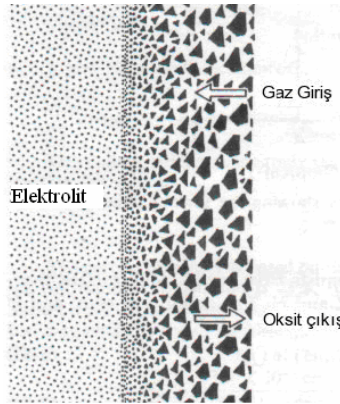
Hem anot hem de katot için en iyi katalizör platindir. PEM yakıt pilinin gelişiminin erken döneminde bu katalizör platin,  $28 \text{ mg.cm}^{-2}$  oranında kullanılmıştır. Kullanımın bu yüksek oranı platinin PEM yakıt pilinin maliyetindeki ana faktör olduğu düşüncesine yol açmıştır. Son yıllarda gücün artmasına rağmen bu kullanım azalarak  $0,2 \text{ mg.cm}^{-2}$  civarlarına gerilemiştir. 1 kW'lık PEM yakıt pili içindeki platin metalinin ham madde maliyeti, toplam maliyetin çok küçük bir miktarı olan, yaklaşık 10\$'dır.

PEM yakıt pilinin farklı tasarımlarındaki elektrotun temel yapısı detayda değişmesine rağmen benzerdir. Anot ve katotlar temel olarak aynıdır. Gerçekten birçok PEM yakıt pilinde eşitler.

Platin katalizör; iyi bir şekilde bölünmüş karbon tozlarının oldukça büyük parçacıklarının yüzeyleri üzerinde, oldukça küçük parçacıklar biçimini alır. Bir karbon parçacıklı toz olan XC72 (Cabot), yaygın bir şekilde kullanılır. Platin yüksek oranda bölünmüş ve dağıtılmıştır, böylece yüzey alanının çok yüksek oranındaki kısmı reaktantlarla temasta olacaktır [5].

### 3.1.3. Gaz Difüzyon Katmanı

Bir yakıt pilinde polimer membran - katalizör ile bunlarla iki taraftan temas halinde bulunan gözenekli gaz difüzyon katmanları sandviç görünümünde bir yapı oluşturur. Gaz difüzyon katmanlarının görevleri, tepkimeye girecek gazların, suyun iletiminin sağlanması ve elektrotlar-akış alanı plakaları arasında elektronik ve ısıl temasın sağlanmasını sağlamaktır. Ayrıca pil için mekanik destek sağlar. Bir gaz difüzyon katmanından istenilen özellikler ise, yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik, yüksek gözeneklilik, iyi kimyasal, mekanik uyum ve düşük maliyettir. Gaz difüzyon katmanında materyal olarak karbon esaslı kağıtlar, keçeler ve kumaşlar kullanılabilir. Makro gözenekten mikro gözeneğe doğru değişen bir kombinasyon iyi performans sağlar. Yapısı Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.

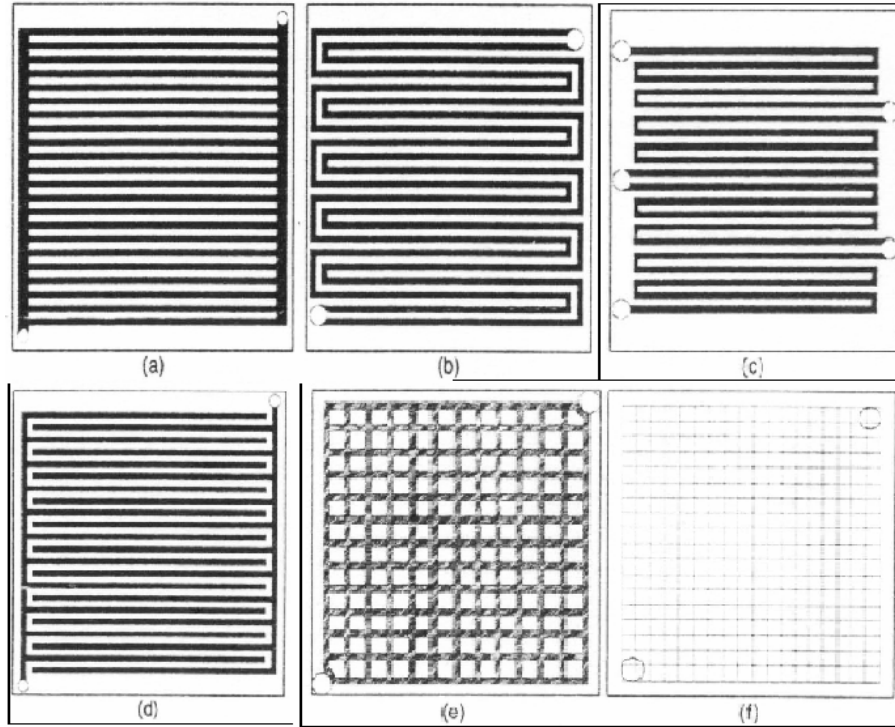


**Şekil 3.4.** Gaz difüzyon katmanının yapısı

Bu katman, politetrafluoroetilen gibi su sevmeyen (hidrofobik) bir materyal içerir. Bu materyalin görevi gaz difüzyon katmanının gözenekleri arasında su birikintilerinin oluşmasını önlemektir. Böylece gazlar, katalizör alanları ile serbestçe temas kurabilirler. Genelde kalınlıkları 300–400µm arasında değişmektedir [6].

### 3.1.4. Akış Alanı Plakaları

Akış alanı plakaları, membran elektrot biriminin (MEA) karşıt taraflarına yakıt ve oksitleyici geçişini sağlarlar. Her bir akış alanı plakası, MEA'nın gaz ile temasını maksimum seviyede sağlamak için, kıvrımlı bir gaz kanalından oluşur. Gaz kanallarının şekilleri, düzenli güç üretimi, sürekli performans ve reaksiyon ürünü olan suyun kontrolü bakımından çok önemlidir. Çeşitli PEM yakıt hücresi uygulamaları için farklı akış alanı plakaları tasarımları mevcuttur [7].



**Şekil 3.5.** Akış alan konfigürasyonları

(a) Paralel gaz kanalları (b) Serpantin tipi akış kanalı (c) Mirrored akış alanı (d) Parçalı akış alanı  
(e) Akış kanalsız gaz difüzyon katmanı (f) Metal ağ akış alanı [6].

Her bir plaka; elektrokimyasal reaksiyon sonucunda oluşan akımın yandaki hücreye geçebilmesi, en son olarak da yakıt hücresi akımının alındığı arka levhalara ulaşması için elektriksel olarak iletken olmalıdır. Plakalar, içine akış kanallarının işlendiği grafitlerden yapılırlar. Mükemmel iletkenliği, düşük kirliliği ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle grafit tercih edilen bir malzemedir. Soğutucu plakalar, her bir yakıt hücresinin arasına yerleştirilir ve tasarım ile yapıları gaz akış alanı plakalarınınkine benzetilirler. Soğutucu akış kanalları, etkili bir ısı kontrolüne uygun olarak tasarlanır. Akış alanı ve soğutucu plakalar; demete giren ve çıkan yakıt, oksitleyici ve soğutucuyu düzgün bir şekilde dağıtmak için, kullanılan gaz ve su

çıkışlarını birleştirirler. Grafit plakalar arasındaki contalar, bu akışların karışmamasını sağlarlar [7].

### 3.1.4. PEM Yakıt Piliinde Su Kontrolü

PEM yakıt pilinin tanımından, polimer elektrolitte yeterli su içeriğinin bulunması gerektiği açıktır. Proton iletkenliği direk olarak su içeriği ile orantılıdır. Bununla birlikte, su; elektrotlardaki gözenekleri ve gaz difüzyon tabakasını kapatacak şekilde çok fazla olmamalıdır. Bir denge gereklidir.

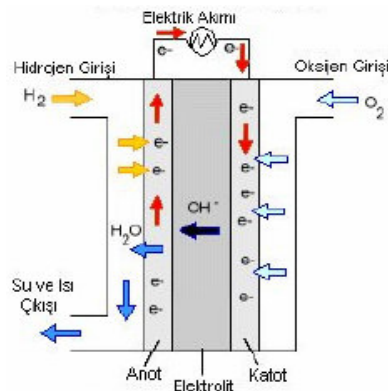
PEM yakıt pilinde su katotta şekillenir. İdeal bir dünyada bu su, uygun hidrasyon seviyesinde elektrolitte tutulacaktır. Hava katot üzerinden esecek, herhangi bir aşırı suyu kurutacak şekilde gerekli oksijeni sağlayarak ayrılacaktır. Zar elektroliti çok ince olduğundan, su katot tarafından anot tarafına yayılacaktır ve bütün elektrolit üzerinden hidrasyonun uygun bir durumu herhangi bir zorluk olmadan başarılacaktır. Bu uygun durumun başarılabilmesi, için iyi bir mühendislik tasarımına ihtiyaç vardır [5].

### 3.2. Alkalın Elektrolit Yakıt Pili

Alkalın elektrolit yakıt pilinin (AFC) temel kimyası 2. Bölümde, Şekil 2.4.'de açıklanmıştı. Anotta gerçekleşen reaksiyon;



Bu reaksiyonda açığa çıkan elektronlar; dış devre etrafından geçerler ve reaksiyona girdikleri yere yani katoda ulaşır yeni  $\text{OH}^-$  iyonlarını oluştururlar (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Alkalın yakıt pili [6]

Elektrolit için bir alkalın eriyiğinin olması gereklidir. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit eriyikleri; daha düşük maliyet, yüksek çözünürlüğün olması ve fazla aşındırıcı

olmamalarıyla ilk adaylardır. Potasyum karbonat, sodyum karbonattan daha fazla çözülebilir ve bu da önemli bir avantajdır. Fiyat farkı az olduğundan elektrolit olarak daima potasyum hidroksit eriyiği kullanılır. Bununla birlikte gördüğümüz kadarıyla bu, farklı AFC'ler arasında sadece ortak bir faktördür. Basınç, sıcaklık ve elektrot yapısı gibi diğer değişkenler, dizaynlar ile çokça değişir. Örneğin Apollo yakıt pili 260 °C'de çalışır, oysa Orbiter alkalın yakıt pilinin sıcaklığı 90 °C civarındadır [5].

### 3.2.1. Alkalın Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Alkalın yakıt pili 1902'lerden beri tanımlanmaktadır. Fakat Cambridge'de Bacon tarafından değişken güç üniteleri olarak 1940 ve 1950'lerde doğruluğu tespit edilmiştir. PEM yakıt pili NASA'nın ilk insanlı uzay aracı için seçilmiş olmasına rağmen, Apollo misyonlarıyla aya insan taşıyan araçlarda kullanılan yakıt pilleri alkalın yakıt piliydi. Bu uygulamadaki alkalın yakıt pilinin başarısı ve Bacon tarafından yüksek güçte çalışan yakıt pillerinin gösterimi; 1960'lardan 1970'lere kadar alkalın yakıt pillerinin birçok deney ve gelişmelerine yol açmıştır. Alkalın yakıt pilleri, zirai traktörlerde, güç arabalarında, kıyıda uzakdaki denizcilik teçhizat ve botlarına güç sağlamada, fork lift araçlarının sürülmesi gibi yerlerde kullanılmıştır. Bu sistemlerin bazıları demonstrasyon olarak oldukça iyi çalışmalarına rağmen, maliyet, güvenilirlik, kullanım kolaylığı, karmaşık yapı ve emniyet gibi diğer zorluklar kolaylıkla çözülememiştir. Bu geniş mühendislik problemlerini çözmek için girişimlerde bulunduğu zaman; yakıt pillerinin rakip enerji dönüşüm teknolojileri ile rekabet edemediği görülmüştür ve araştırma ve gelişmeler azaltılmıştır. Son zamanlarda, PEM yakıt pilindeki gelişmeler, alkalın yakıt pillerindeki ilginin azalmasına neden olmuştur ve şu an çok az sayıda şirket veya araştırma grubu bu alanda çalışmaktadır. Alkalın yakıt pili dünyasında uzay programı parlayan bir yıldız olarak kalmıştır. Apollo sistemi, uzay mekiği uydu araçları için geliştirilmiş ve ilerletilmiştir. Alkalın yakıt pilleri, uzay programındaki başarılarından dolayı, 20. yüzyılın son yarısından sonra yakıt pili teknolojik gelişmesinin sürekliliğinde çok büyük bir rol oynamıştır.

### 3.2.2. Alkalın Yakıt Pillerinin Başlıca Avantajları

Alkalın yakıt pilleri, nispeten önem kaybetmesine rağmen, AFC üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. ABD, Kanada ve Avrupa'daki birkaç şirket AFC üretimi ve gelişimi üzerinde çalışmaktadırlar. Bunun sebebi, AFC'nin diğer yakıt pili türlerinin üzerinde bir takım açık ve temel avantajlara sahip olmasıdır.

AFC'nin ilk önemli avantajı, katottaki aktivasyon aşırı geriliminin genellikle bir asit elektrolitten daha az olmasıdır. Bu durum, düşük sıcaklıklı yakıt pillerinde en önemli gerilim kaybıdır. Alkalın sisteminde oksijen ilerlemesinin çok hızlı bir şekilde azalmasının nedeni açıkça anlaşılamaz. Fakat bunu gözlemlemek uzun zaman alır.

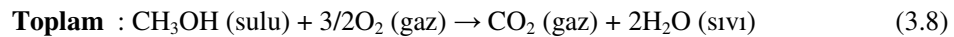
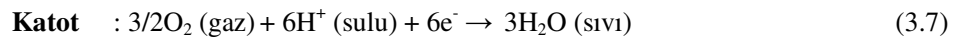
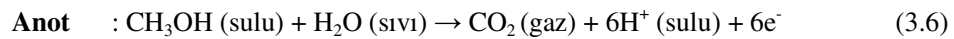
Sisteme bağılı diğer önemli avantaj da maliyettir. Potasyum hidroksitten daha ucuz olan çok az standart kimyasallar vardır. Alkalın, aslında çok düşük maliyette bir metaldir. AFC'nin elektrot maliyeti herhangi bir diğer tip hücreden daha azdır ve daima böyle olacaktır. Aynı zamanda elektrotlar, özellikle katot, değersiz metallere yapılabilir ve özellikli ve değerli materyaller gerekli değildir. Böylece AFC elektrotları, diğer yakıt pili türlerindekiyle göre oldukça ucuzdur.

AFC'lerin son avantajı, AFC'lerin genellikle iki kutuplu tabakalara sahip olmamalarıdır. Bu tabakalar PEMFC'nin maliyetine önemli bir katkıda bulunur. Maliyet azalmasında bir fayda sağlanmakla beraber, PEMFC ile karşılaştırıldığında, bu durumun, düşük reaksiyon yoğunluğunun önemli bir nedeni olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak; AFC'ler genellikle oldukça karmaşık sistemler iken genellikle PEMFC'den biraz daha az karmaşık oldukları not edilmelidir. Örneğin AFC de su yönetimi problemi daha kolaylıkla çözülmüştür [5].

### 3.3. Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pili

Bir dönüştürücüye ihtiyaç duyulmadan, metanolün doğrudan kullanımına imkân tanıyan Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili, çalışma prensibi olarak PEM yakıt piline benzemektedir. Yakıt pilinde teorik olarak gerçekleşmesi beklenen reaksiyonlar sırasıyla şu şekildedir; katot üzerinde oluşan su ile sisteme doğrudan beslenen metanol-su karışımı anot üzerinde elektrokimyasal bir reaksiyon meydana getirmekte ve ürün olarak metanolün parçalanması sonucunda protonlar, elektronlar ve karbon dioksit meydana gelmektedir. Oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip polimer elektrolit zardan geçerek katoda göç etmekte ve katot üzerinde, beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek su oluşumunu sağlamaktadır [8-9]. Bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen termodinamik potansiyeller, iletken tel ile oluşturulan dış devrede gerilimin oluşmasına ve elektrik üretilmesine neden olmaktadır. Gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili için çalışma sıcaklığı 50- 100 °C'dir [9]. Bu düşük sıcaklık aralığı, bu tip yakıt hücrelerini küçük ve orta ölçekli uygulamalar için çekici hale getirmektedir. Günümüzde, pratikte elde edilen verim % 45 civarında iken, hedeflenen verim % 55 civarındadır [10].

### 3.3.1. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili Yapısı ve Bileşenleri

Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili yapısında anot, katot, sıvı elektrolit ve seçici geçirgenliğe sahip zar bulunmaktadır. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pillerinde; kullanılan zarın seçiciliği, elektrolit yapısı ve katalizör seçimi öncelikli çalışmalar arasındadır.

Günümüze kadar yapılan pek çok çalışma sonucunda, Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili'nde anotta oksidasyon verimini arttırıp, yüksek akım yoğunluğunun elde edilmesinde verimi arttıran katalizör çeşidi, 50-50 Platin-Rutenyum karışımı olmuştur [11]. Bu etkilerin yanında, katalizörün uzun ömürlü, yüksek verimli ve maliyetin düşürülebilmesi için az miktarda kullanılabilir olması beklenmektedir. Katot yüzeyinde performansı arttıran katalizör çeşidi ise Platin katalizörler olmuştur. Bu katalizörler genelde, karbon kömürü ile karıştırıldıktan sonra, elektrot yüzeyine püskürtülerek, preslenerek veya yapıştırılarak uygulanmaktadırlar [12].

Anot yüzeyinde kullanılan katalizörün önemi çok büyüktür. Seçilecek olan katalizörün metanolü hidrojene dönüştürme kapasitesi yakıt pilinin performansını ve verimini doğrudan etkileyen bir özelliktir [12]. Günümüzde, çalışmaların bir kısmı anot yüzeyinde kullanılan katalizörleri geliştirmeye ayrılmış durumdadır. Platin- Rutenyum katalizörüne alternatif olarak, bilim adamları diğer Platin alaşımları, porfirin ve metal oksitler gibi değişik malzemeler üzerinde çalışmalarına devam etmektedirler [13-14].

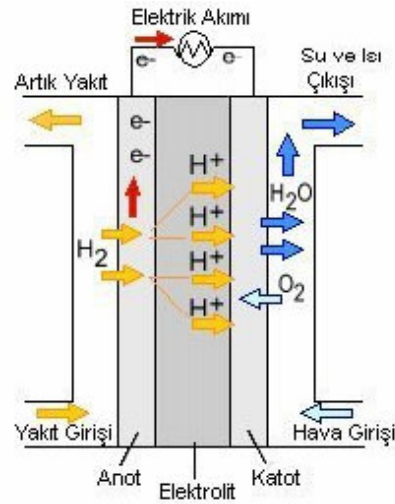
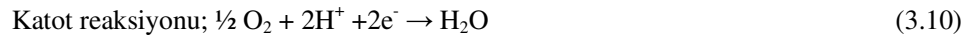
Yakıt Pili içinde kullanılan zardan beklenen özellikleri; yüksek sıcaklığa karşı tolerans gösterebilmesi, serbest proton transferine dayanıklı olması, metanol molekülleri gibi diğer kimyasal türlerin geçişine izin vermemesi, fiziksel dayanıklılık ve ucuzluktur. Günümüzde, zar seçimini ve çalışmalarını zorlaştıran en önemli problem, metanol moleküllerinin zardan geçişidir. Metanol tanımı, metanol moleküllerinin zardan difüze olarak, anot tarafından katot tarafına geçişi şeklinde verilebilir. Metanol geçişi Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili'nde verimi üç yoldan düşürmektedir. İlk olarak, katot kısmına geçen moleküller işe dönüştürülecek enerjiyi kullanarak okside olarak, enerji kaybına neden olmaktadır. İkinci olarak, protonlarına ve karbon dioksit ayrılacak olan yakıtın azalmasına neden olmaktadır. Son olarak ise, katot tarafındaki karbonların katot katalizörünü zehirlemesi sonucunda katalizörün inaktif hale gelmesine neden olmaktadır.

Polimer elektrolit membran çeşitleri içinden en çok kullanılan ve beklenen tüm özellikleri karşılayan zar çeşidi Nafion (® DuPont)dur [15]. Her ne kadar kullanımı en geniş olan malzeme olsa da, metanol geçişine izin vermesi ve maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu malzemenin çıkış noktası Teflon olarak bilinen polytetrafloroetilendir. Teflon, hidrofobik bir özelliğe sahiptir. Teflonun sülfolanması sonucunda oluşan Nafion, hidrofilik ve asit özelliğe sahip hale gelmektedir. Oluşan malzeme farklı fazlara sahip olurken, seyreltik asit özelliğine

sahip kısımlar kuvvetli hidrofobik özelliğe sahip olmaktadır. Bu özellikler sayesinde  $H^+$  iyonları zar üzerinde hareket edebilmektedirler [5].

### 3.4. Fosforik Asit Yakıt Pili

Fosforik asit yakıt pilleri (PAFC) 150-200 °C çalışma sıcaklığında faaliyet gösterirler. Bu tür pillerde fosforik asit elektrolit olarak kullanılmaktadır. 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 3.7.). Anotta ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar ise aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Fosforik asit yakıt pili [6]

Elektrotlardaki platin katalizör reaksiyonların hızlandırılmasını sağlar. Fosforik asit yakıt pillerinin bir avantajı 200 °C'de çalışırken %1,5 oranında bir CO konsantrasyonuna izin vermeleridir. Bir başka avantajları ise fosforik asit elektrolitin suyun kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda da görevini yapabilmesidir.

Fosforik asit yakıt pillerinde kullanılacak olan hidrojen harici bir üniteye bir hidrokarbonlu yakıt yakılarak elde edilir. Fosforik asit yakıt pillerinin verimi %40-50 civarındadır. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılırsa verim %80'i bulabilir [16].

### 3.4.1. Fosforik Asit Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Bilim adamları yakıt pili teknolojisinin başından beri asitleri elektrolit olarak kullanmaya çalışmışlardır. Ancak fosforik asit kötü bir elektriksel iletken olduğundan çok çekici değildir ve diğer tür yakıt pillerine göre geliştirilmeleri çok daha zordur. Ancak 1961 yılında G. V. Elmore ve H. A. Taner yeni bir deney yapmış ve %35'i fosforik asit, kalan %65'i ise silisli kum olan bir elektrolit kullanmışlardır. Ayrıca yaptıkları pilde saf oksijen yerine hava oksijen kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu pil başarılı bir şekilde 6 ay boyunca çalışmıştır. Pilin akım yoğunluğu  $90 \text{ mA/cm}^2$  ve gerilimi 0,25 voltur.

Ayrıca 1960'ların ortasında Allis-Chalmers firması Amerikan ordusunda kullanılmak üzere 5 kW'lık bir fosforik asitli yakıt pili üretmiştir [16].

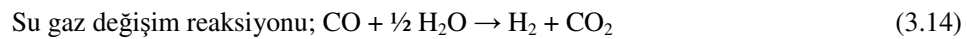
### 3.4.2. Fosforik Asit Yakıt Pillerinin Uygulamaları

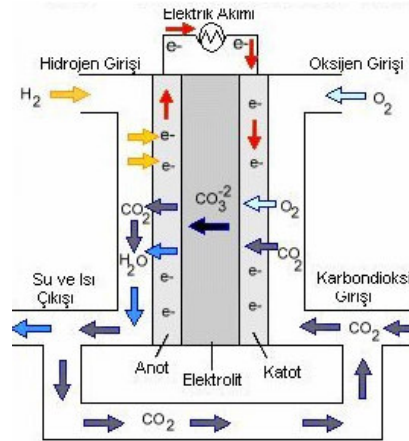
1970'lerde Los Alamos National Laboratory mühendisleri ilk kez fosforik asitli bir yakıt piliyle çalışan bir golf arabası üretmiştir. 1994 yılında ABD'nin Georgetown kentinde ilk fosforik asitli yakıt pilleriyle çalışan otobüsler devreye girmiştir. Fosforik asit yakıt pillerinin ulaşım araçlarında kullanımı en uygun opsiyon olarak gözükmektedir. Buna rağmen 10 yıldır fosforik asitli yakıt pilleri sabit enerji kaynağı olarak da kullanılmaktadır.

New York'ta Times Square üzerindeki Conde Nast Building ONSI Corp.'un fosforik asit yakıt pilleriyle enerjisini sağlamaktadır. Ayrıca yine New York'ta Yonkers Waste Treatment Plant, 200 kW'lık ONSI üniteleriyle beslenmektedir [16].

### 3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili

Bir erimiş karbonat yakıt pilinde (MCFC) karbonat tuzları elektrolit olarak kullanılır.  $650^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılan tuzlar erir ve karbonat iyonlarını ( $\text{CO}_3$ ) katottan anoda iletirler. Anotta, hidrojen bu iyonlarla birleşerek su, karbondioksit ve elektronları açığa çıkarır. Elektronlar harici bir devreyi izleyerek elektrik enerjisini meydana getirir ve katoda geri döner. Burada havadan alınan oksijen ve anotta açığa çıkan karbondioksit elektronlarla reaksiyona girerek  $\text{CO}_3$  iyonları meydana getirir ve bu iyonlar daha önce boşalan elektroliti tekrar doldurur (Şekil 3.8.). Oluşan reaksiyonlar ise aşağıda gösterilmiştir.





**Şekil 3.8.** Erimiş karbonat yakıt pili [6]

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 zararlıdır.

Erimiş karbonat yakıt pilleri, platından çok daha ucuz olan nikelden yapılmış katalistlerle oldukça iyi performans verirler. Verimleri yaklaşık olarak %60 seviyesindedir. Ancak açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılırsa verim %80 i bulabilir. Günümüzde mevcut üniteler 2 MW'a kadar güç üretmişlerdir. Ancak 50-100 MW'lık ünitelerin projeleri de hazırlanmıştır. Erimiş karbonat yakıt pillerinin dezavantajlarından birincisi katı yerine sıvı bir elektrolitle çalışmanın yarattığı zorluk, ikincisi ise karbonat iyonlarının anot reaksiyonunda harcanması nedeniyle sürekli katoda karbondiyoksit enjeksiyonu gerektirmesidir [16].

### 3.5.1. Erimiş Karbonat Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışan pillerdir. Bu yüzden bu iki tip yakıt pilinin tarihsel gelişimi de yaklaşık olarak beraber yürümüştür.

1930'larda Emil Baur ve H. Preis, İsviçre'de katı oksit elektrolitlerle yüksek sıcaklıkta deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde elektrolitler ve gazlar arasında istenmeyen kimyasal reaksiyonlar ve elektriksel iletkenlik problemleriyle karşılaşmışlardır. 1950'lerin sonlarında ise Hollandalı bilim adamları G. H. J. Broers ve J. A. A. Ketelaar katı oksit yerine erimiş karbonat elektrolit kullanma üzerinde çalışmışlardır. 1960 'da 6 ay süreyle çalışan ve lityum, sodyum, potasyum karbonat karışımı elektrolite sahip yakıt pilini duyurmuşlardır. 1960'ların ortalarında Birleşik Devletler Silahlı Kuvvetleri Mobil Ekipmanlar Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Texas Instruments tarafından geliştirilen erimiş karbonat yakıt pillerini test etmiştir. Bu piller olumlu sonuçlar vermiştir ve 100-1000 W arası güç üretmişlerdir [16].

### 3.5.2. Erimiş Karbonat Yakıt Pillerinin Uygulamaları

Erimiş karbonat yakıt pilleri çok yüksek çalışma sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit, büyük santrallerde yerleşimleri mümkün olmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısıнын kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır. Bu ısı, ısıtmada, endüstriyel olarak veya daha çok elektrik üretmek için kullanılabilir.

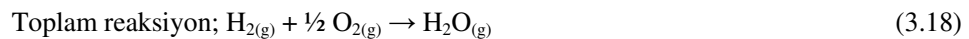
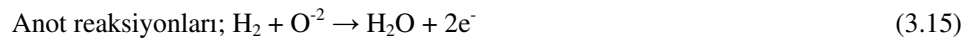
1990'ların başında Japonya'daki Ishikawajima Heavy Industries 1000 W gücünde erimiş karbonat yakıt pili tesisini 10000 saat boyunca kesintisiz çalıştırmayı başarmıştır. Power Corporation of Illinois, 1997 yılında Miramar Deniz Kuvvetleri Hava Üssünde 250 kW 'lık erimiş karbonat yakıt pili tesisini kurmuştur. Tesis sürekli olarak 160 MWh üretim yapmakta ve çıkan buhar da hava üssünde kullanılabilir. Miramar'da kapasite 300 kW'a çıkarılarak ticari santral olarak kullanımı düşünülmektedir.

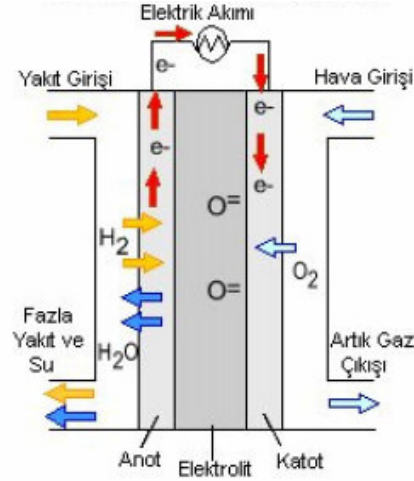
Yakın gelecekte enerji kaynaklarının azalmasıyla birlikte erimiş karbonat yakıt pili santralleri önemli bir elektrik üretim yolu haline gelecek gibi gözükmetedir [16].

### 3.6. Katı Oksit Yakıt Pilleri

Katı oksit yakıt pilleri (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) yaklaşık 1000 °C sıcaklıkta çalışırlar ve sıvı bir elektrolit yerine sert, seramik bir elektrolit kullanırlar. Katı elektrolitin her iki tarafı geçirgen özel elektrot maddeyle kaplanmıştır.

Yüksek çalışma sıcaklığında, negatif yüklü oksijen iyonları kristal madde içerisinde hareket eder. Hidrojen içeren bir yakıt gazı anottan geçirildiğinde negatif yüklü oksijen iyonları yakıtı oksidize etmek için elektrolitten geçer. Oksijen genellikle katot tarafında havadan elde edilir. Anotta oluşan elektronlar harici bir yol kat ederek elektrik devresini tamamlar ve elektrik enerjisi üretilmiş olur (Şekil 3.9.). Katı oksit yakıt pillerinde verim %60 seviyesindedir [17]. Oluşan reaksiyonlar ise aşağıda gösterilmiştir.





Şekil 3.9. Katı oksit yakıt pili [6]

### 3.6.1. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pillerinin tarihsel gelişimi beraber devam etmiştir. 1930'ların sonunda İsviçreli bilim adamı Emil Baur ve arkadaşı H. Preis zirkonyum, itriyum, seryum, lantanyum ve tungsten gibi katı oksit elektrolitler kullanarak deneyler yapmışlardır. Bu çalışmalarda tasarımı elektriksel açıdan yeterince iletkenliği sağlayamamış ve elektrolitlerle aralarında karbonmonoksitin de bulunduğu çeşitli gazlar arasında istenmeyen reaksiyonlar meydana gelmiştir.

1940'ta Rus bilim adamı O. K. Davtyan, iletkenliği artırıcı çalışmalar yaptı ancak istenmeyen kimyasal reaksiyonları engelleyemedi. 1950'lerin sonlarında katı oksit yakıt pilleri çalışmasına Lahey'deki Central Technical Institute'de, Pensilvanya'daki Consolidation Coal Company'de ve New York'taki General Electric tesislerinde hız verildi. 1959'da katı elektrolitlerin yüksek elektriksel iç direnç, erime, ve yarı iletkenlikten kaynaklanan kısa devre olayları gibi problemler yarattığı belirlendi. Bu yüzden erimiş karbonat yakıt pillerinin daha avantajlı olduğu kabul edildi. Ancak katı oksit pillerden herkes ümidini kesmedi. Örneğin 1962 yılında Westinghouse araştırmacıları zirkonyum oksit ve kalsiyum oksit kullanan bir pili test ettiler. Son olarak ta dünyada artan enerji ihtiyacı ve tırmanan enerji fiyatları üzerine birçok şirket yeniden katı oksit yakıt pilleri konusundaki çalışmalarına hız verdi [16].

### 3.6.2. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Uygulamaları

Erimiş karbonat yakıt pilleri gibi katı oksit yakıt pilleri de çok yüksek sıcaklıklarda faaliyet göstermektedir ve bunlar da genelde büyük sabit santrallerde kurulur. Yine yüksek sıcaklıktan dolayı açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanılmaya uygundur.

Katı oksit yakıt pilleri de diğer tipler gibi oldukça temizdir. Ürettikleri doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi için inverter sistemleri gereklidir. Basit yapıları ve temiz olmaları kentlerde kullanımını cazip kılmıştır. Örneğin Tokyo'da 25 kW'lık üniteler halen çalışmaktadır. Nisan 2000'de ABD Enerji Bakanlığı National Fuel Cell Research Center and Southern California Edison'da kurulacak bir katı oksit yakıt pili mikrotürbin kojenerasyon tesisini duyurdu. Tesisin yakıt pili Siemens Westinghouse tarafından ve tribün ise Northern Research and Engineering Corporation tarafından üretildi. Tesiste doğal gaz yakıtlı katı oksit yakıt pilinden 220 kW enerjinin yaklaşık %55 verimle elde edilmesi planlanmaktadır.

Katı oksit yakıt pilleri konusundaki ortaklığını sürdüren Siemens-Westinghouse 2002 yılı itibariyle toplam 1 MW yakıt pili ve kojenerasyon tesisini kullanıma açmışlardır [16].

## 4. PEM YAKIT PİLİ MODELİ

### 4.1. Giriş

Son yıllarda fosil yakıtların tükenebilme endişesi ve enerji ihtiyacını karşılayabilmesi yönündeki şüpheler, yakıt pillerinin modellenmesi üzerine yapılan araştırmaları arttırmıştır. PEM yakıt pillerinin geliştirilmesindeki en önemli beklenti; tüm yakıt pili geometrisini ve çalışma koşullarını kapsayacak bir hesaplama modelinin gerçekleştirilmesidir.

Matematiksel modeller ve benzetimler, yakıt pilleri, yığınları ve yakıt pili güç sistemlerinin optimizasyonu ve tasarımı için gerekli olan araçlardır. Bir PEM yakıt pilinin deşarj akımlarıyla gerilim değişimi davranışını tahmin etmek, PEM yakıt pili sistemlerinin performansını öğrenmek ve iyileştirmek için farklı matematiksel modeller kurulmaktadır. Son yıllarda yakıt pillerini daha iyi kavrayabilmek için sayısal modellemeler ve bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmektedir [5, 18-21]. Sayısal modeller PEM yakıt pilinin içindeki ayrıntıların benzetiminin yapılabilmesi için gereklidir. Fakat bu modeller için gerekli hesaplamalar, sistem modelleri için fazla ayrıntılıdır. Sistem modellerinde, geniş hesaplamalar olmadan işletme koşullarına dayanarak bir PEM yakıt pilinin ayrıntılı performansını tahmin etmek için yeterli bir modele sahip olmak gerekir. Fakat az sayıdaki çalışma; pil performansı üzerinde hücre işletme koşullarının etkilerini araştırmak ve tüm yakıt pili sistemlerini tasarlamak için kullanılabilecek basit modeller üzerine odaklanmaktadır [18].

### 4.2. PEM Yakıt Pili Modellerinin Tarihsel Gelişimi

Bazı araştırmacılar, bir takım parametrelerin yakıt pillerinin performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktadırlar. Bu parametreler; işlemsel parametreler (sıcaklık, nem, basınç, akış oranı vb.), tasarım parametreleri (geometrik parametreler), fiziksel parametreler (gözenekli ortam gözenekliliği, geçirgenlik vb.), elektrokimyasal parametreler (referans elektrik yoğunluğu tarafından ayarlanan katalist tabakasının özel alanı) ve diğer parametrelerdir (CO zehri vb.).

Berning, yakıt pili performansı üzerine sıcaklık, basınç, stokiometrik akı oranı gibi değişik işlemsel parametrelerin etkilerini araştırmıştır. Ayrıca, gaz difüzyon elektrot kalınlığı, yüzey alanı ve kanal genişliği ve yüzey alanı arasındaki orana karşı geçirgenlik gibi geometrik ve materyal parametreler de araştırılmıştır. Yi ve Nguyen, bir inter-digitated gaz distribütörü ile bağlantı durumunda bir PEM yakıt pilinin hava katodunun performansı üzerinde gaz hidrodinamiklerinin etkilerini araştırmıştır. İnter-digitated gaz distribütörünün giriş ve çıkış kanalları arasında basınç düşüşünün etkisine ilaveten, elektrot ağırlığı ve ortalama akım yoğunluğu üzerindeki sırt genişliği araştırılmıştır. Paşaoğulları ve Wang katot gaz difüzyon

tabakasında 2 faz akı fiziklerini araştırmak için bir model geliştirmişlerdir. Simülasyonlar, gözenekli katodun taşmasının, katot katalizör tabakasına oksijen geçiş oranını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, nemlendirme seviyesi ve reaktant akımlarının akış oranının, PEM yakıt pili performansı ve 2 faz akı ve geçiş karakteristiklerini kontrol eden anahtar parametreler olduğunu göstermişlerdir. Jaouen PEM yakıt pili katodunda kütle geçiş limitlerinin çeşitlerini incelemek için tek boyutlu bir sürekli durum toplam modelini geliştirmiştir. Aktif tabaka kalınlığının etkisi, oksijen konsantrasyonu ve oksijen akımının nem oranı araştırılmıştır. Chen PEM yakıt pillerine yakıt kanalları dizayn etmek için 2 boyutlu bir ileri kanal modeli sunmuştur. Analiz, giriş hızı, giriş basıncı, katalist etkisi, kanalın ağırlığı ve gaz difüzyon tabakasının geçirgenliği gibi bazı çalışma ve dizayn parametrelerinden oluşmuştur. Chu ve Jeng bir PEM yakıt pilinin performansı üzerinde gaz difüzyon tabaka geçirgenliğinin değişiminin etkilerinin bir araştırmasını yapmışlardır. Lee, gaz difüzyon tabaka kalınlığı, geçirgenlik ve gözenek boyutunun dağılımı gibi elektrot değişkenleri üzerindeki etkileri için difüzyon tabakası ve gaz kanalındaki akışın bir benzetimini sunmuştur. Lum ve McGurik, elektrot geçirgenliği, kalınlık ve sırt genişliği gibi çeşitli işlemsel parametrelerin etkilerini dikkatle inceleyerek bir inter-digitated gaz distribütörü ile PEM yakıt pili katodunun bir modelini geliştirmiştir. Kazim, katot geçirgenliği, giriş oksijen mol parçası, işlemsel sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin etkilerini araştırmak için 2 boyutlu bir matematiksel model geliştirmiştir. Hwang, PEM yakıt pilinin katot kenarı üzerindeki olağanüstü geçişleri simule etmek ve inter-digitated akı alanı ve paralel akı alanı polarizasyon eğrilerini karşılaştırmak için 3 boyutlu nümerik bir model geliştirmiştir. Son zamanlarda, Li ve Sabir, PEM yakıt pillerinde farklı iki kutuplu tabakalar için yeniden bir inceleme sunmuştur. Meng ve Wang, gaz difüzyon tabakasının içine doğru elektron geçişinin etkilerini ayrıntılı incelemiştir. Duo, efektif proton ve katalist tabakalarının elektronik iletkenliğini araştırmıştır. Chan ve Tun, alan ile çarpılmış katot referans değişken akım yoğunluğunun, referans oksijen konsantrasyonunun ve performans üzerinde oksijen yayılma gücünün etkilerini araştırmıştır. Sun, PEM yakıt pili katot katalist tabakasının lokal reaksiyon oranı üzerinde difüzyon tabakası yayılma gücü, difüzyon tabakası iletkenliği, alana göre kanal genişlik oranı ve difüzyon tabakası kalınlığı gibi akı-alan geometrisi ve gaz difüzyon tabaka özelliğinin etkilerini araştırmak için 2 boyutlu bir çapraz kanal modeli uygulamıştır. PEM yakıt pili yeniden formatlanan hidrojeni kullandığı zaman, PEM yakıt pili performansının anot akış oranı artışı gibi CO zehirlenmeleri yüzünden çarpıcı olarak düştüğünü keşfetmişlerdir. Zhou ve Liu, Chan, Baschuk, Camara, Zhang, Wagner ve Gülsow PEM yakıt pili performansı üzerinde CO zehirlenmelerinin etkilerini araştırmışlardır. Çok yakın bir geçmişte, araştırmacılar hava teneffüslü PEM yakıt pili modellerinin incelemeleri üzerinde odaklanmaya başlamışlardır.

Yukarıdaki çalışmalarda başlıca odak noktası, bazı bireysel parametrelerin etkileri üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Farklı parametrelerin etkilerinin karşılaştırılması ve V-I eğrisinin nihai sonucu üzerinde parametre değişiminin hassasiyetinin araştırılması asıl amaç olarak görülmemektedir. Burada bir parametre derecesinin ne olduğu ile ilgili parametrik hassasiyet PEM yakıt pili performansını özellikle de V-I eğrisini etkilemektedir. Son zamanlarda, bazı araştırmacılar hassasiyet konusunun önemini fark etmişler ve bazı makaleler yayınlamışlardır. Stockie bir hassasiyet incelemesi gerçekleştirmiştir. Bazı geometrik ve işlemsel parametrelerin yakıt pili performansına çözümsel olduğu gösterilmiştir. Grujicic sabit durumlu, 2 fazlı, 3 boyutlu elektrokimyasal bir model esaslı PEM yakıt pilinin performansı üzerinde parametrelerin etkisini açıklamak için bir hassasiyet analizi gerçekleştirmiştir. Bu parametreler; aktif tabakayı içine alan kalınlık, oksijenin molar difüzyon miktarı, suyun molar difüzyon miktarı, nitrojenin molar difüzyon miktarı ve katodun geçirgenliğidir. Sonuçlar genel PEM yakıt pili performansının bu parametrelerle fazlasıyla ilgili olduğunu göstermiştir. Fakat yakıt pili performansı özellikle bu parametrelerden genellikle etkilenmeyen optimize edilen metotlarıyla tasarlanmışlardır. Correa PEM yakıt pili yığını üzerinde bir hassasiyet analizi sunmuştur. Parametreleri yakıt pili yığına etkilerine göre duyarsız, duyarlı ve yüksek duyarlı olarak sınıflandırmışlardır.

Şimdiki yazarlar daha sonra parametre değerlerinin sayısal benzetim makalelerinde nasıl elde edildiğini incelemişlerdir. PEM yakıt pili parametre değerlerini elde etmek için 3 metodun olduğu bulunmuştur. Birinci metot; parametrelerin deneyler ile ölçüldüğü direk ölçümdür. Örneğin Lee empedans ve Nafion zarının sonuç proton iletkenliğini ölçmek için 2 prop ve 4 prop metoduna dayalı tam bir empedans ölçüm sistemi hazırlamıştır. Saito iyonik iletkenlik, su transfer katsayısı, su geçirgenliği ve birkaç zar için su ve  $\text{Li}^+$  iyonunun difüzyon katsayısını ölçmüştür. Parthasarathy ve Zhang zardaki oksijen azaltma reaksiyonu için kinetik ve kütle geçiş özelliklerini ölçmüştür. Bununla beraber bazı parametrelerin ölçümleri oldukça zordur veya deneysel metotlarla açıklanamayabilir ve tahmin edilmelidir. Bu yüzden parametreleri elde etmek için ikinci metot; uygun bir sayısal veya doğru metot yolu ile dir. Suares ve Hoo, oksijen reaksiyonu için değişken akım yoğunluğu, suyun difüzyon katsayısı, buharlaşma ve yoğunlaşma oranı, gerilim ve akım verilerini kullanarak toplam ısı transfer katsayısı gibi dört parametreyi tahmin etmiştir. Carnes ve Djilali, tek boyutlu bir PEM yakıt pili modelinde efektif zar iletkenliği, değişken akım yoğunlukları ve oksijen difüzyon katsayısını tahmin etmek için uygun doğrusal olmayan en küçük karelerden bir algoritma tanımlamıştır. Berg, tek boyutlu bir PEM yakıt pili modelini kullanarak değişken akım, zar su transfer katsayısı, efektif oksijen yayılma gücü ve ortalama zar direnci gibi dört parametreyi tahmin etmiştir. Thamapan uygun eğri kullanarak zar iletkenlik alt modelleri için bir parametre tahmini

gerçekleştirmiştir. Guo tek boyutlu bir katot katalist tabaka modelini kullanarak geçirgenlik, referans akım yoğunluğu ve efektif difüzyon katsayıları gibi katot katalist tabaka parametreleri hazırlamıştır. Bununla birlikte, benzetim yapan araştırmacılarının çoğu için parametreler, parametreleri elde etmek için üçüncü metodu oluşturan diğer araştırma grupları tarafından verilen modellerden elde edilmiştir. Böylece bazı geçiş ve elektrokimyasal parametre değişim oranlarının oldukça geniş olmasının asıl sebeplerinden birinin, deneysel ölçümlerde doğal güçlük ve karmaşıklıktan olduğu kolaylıkla görülebilir. Gerçekte, gaz kanalının küçük hacmi ve difüzyon tabakasının, katalizör tabakasının ve zarın ince kalınlığından dolayı bu bölgede akış ve çeşitli yayılmaları ölçmek oldukça zor olmaktadır. Bu durum yakıt pili model onaylama konusu ilgili olduğu zaman hesaba katılmalıdır.

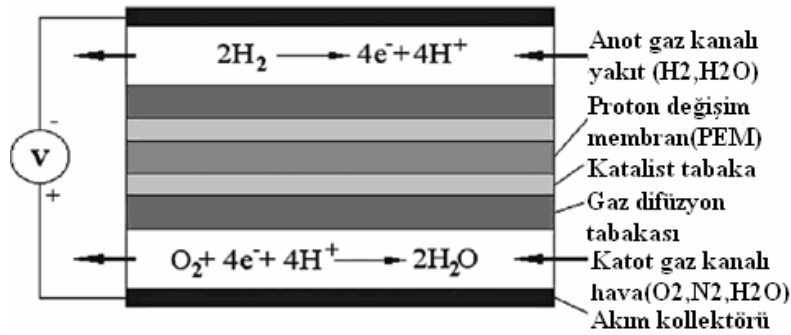
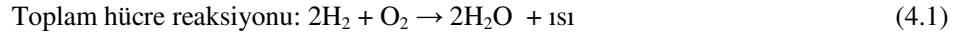
Önceki çalışmalarda geçiş ve elektrokimyasal parametreler model sonuçları üzerindeki etkilerine göre duyarlı ve duyarsız olarak sınıflandırılabilirler. Geçirgenlik ve katı faz iletkenliği duyarsız parametrelerden oluşmaktadır. Difüzyon tabaka gözenekliliği, zarın faz iletkenliği, alanla çarpılmış katot referans değişim yoğunluğu, oksijen yayılımı, referans oksijen konsantrasyonu gibi diğer parametrelerin çoğu duyarlı parametrelerdir.

Hakenjos çok boyutlu modellerin onaylanması için sadece polarizasyon eğrisini kullanmanın yetersiz olduğunu göstermiştir. Ölçülen ve benzetimi yapılan elektriksel akım dağıtımı arasında ilave bir karşılaştırma gerçekleştirmişlerdir. Lum ve McGuirk, polarizasyon eğrisiyle global onaylama ve bölünmüş yakıt pilinden elde edilen lokal akım yoğunluğu dağılımından lokal onaylama olmak üzere iki adımlı bir onaylama yaklaşımı kullanmışlardır. Ju ve Wang; ilginç bir örnek gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu bir PEM yakıt pili modeli tek kanallı bir yakıt pili için kullanılmıştır. Birinci durumda iki katalist tabakada iyonik direnç dahil edilirken, diğer durumda bu dirençler ihmal edilmiştir. Kinetikleri ayarlama yolu ile iki durumun akım yoğunluğu için sayısal simülasyon sonuçları 0,75 V'luk bir gerilimde tamamen aynı olmuştur. Böylece yazarlar, global onaylamanın dışında akım yoğunluğunun lokal dağıtımının ayrıntılı bir PEM yakıt pili modelini onaylamak için eklenmesi gerektiğini önermişlerdir [22].

PEM yakıt pili için geliştirilen modellemeler [22-30] incelendiğinde, modellemelerin, genellikle PEM yakıt pilinin iç yapısı detaylı bir şekilde ele alınarak, yapıldığı ve parametrelerin PEM yakıt pilinin performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği görülmektedir. PEM yakıt pilinin bir elektrik sisteminde üreteç olarak kullanılması durumundaki performansı üzerine yapılan modellemelerin yetersizdir. Bu nedenle, bu tezde bir PEM yakıt pili sistemi güç düzenleme birimi ile birlikte modellenmiştir.

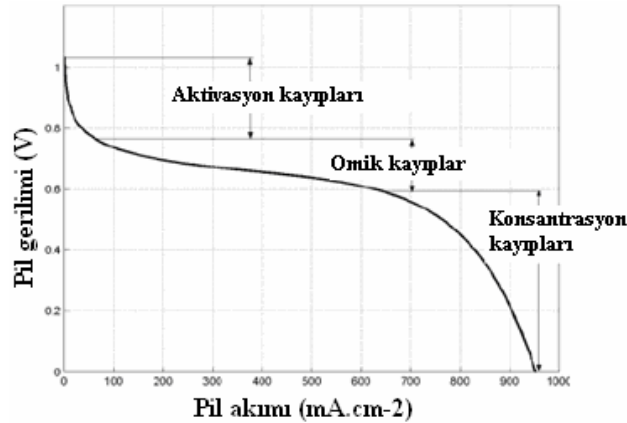
### 4.3. Bir PEM Yakıt Pilinin Matematiksel Modeli

Bir PEM yakıt pilinin temel yapısı; bir elektrolit gibi görev yapan katı bir membran (zar) tarafından ayrılmış iki elektrot (anot ve katot) olarak tanımlanabilir (Şekil 4.1). Hidrojen yakıtı protonlara ayrıştığı yer olan anoda bir kanal içinden akar, sonra katoda membran içinden akar ve bir dış devre tarafından elektriksel akım olarak toplanan elektronlar iki elektrotu birbirine bağlar. Benzer bir kanal ağı içinden hava, bir dış devrede elektronlarla birlikte oksijenin toplandığı yer olan katoda, protonlar da membran içine doğru akar ve böylece su oluşur. Bir PEM yakıt pilinin anot ve katot elektrotlarında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar Şekil 4.1.'de verildiği gibidir [18]. Polimer membran iki elektrot arasına sıkıştırılmıştır. Her bir elektrot bir gaz difüzyon tabakası ve bir ince katalizör tabakadan oluşmaktadır. Membran-elektrot bileşkesi reaktant akışına izin veren kanallarını kapsayan iki iletken tabaka tarafından sıkıştırılmıştır. Anottan gelen hidrojen ile katottan gelen oksijen ısı ve su üretmek için birleşir.



Şekil 4.1. Tek bir PEM yakıt pilinin şematik gösterimi

Polarizasyon eğrisi olarak bilinen I-V eğrisi, genellikle bir yakıt pilinin karakteristiğini ifade etmek için kullanılır (Şekil 4.2.). Bir hücrenin davranışı yüksek derecede non-lineer bir yapıya sahiptir ve akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, membran nemliliği ve reaktant kısmi basıncı gibi birtakım faktörlere bağlıdır.



Şekil 4.2. Tek bir PEM yakıt pilinin şematik gösterimi

Yakıt hücresinin gerilimi akım artışıyla azalır. Bir PEM yakıt pili genellikle 70- 80 °C civarında bir sıcaklık, 3-5 atm reaktant kısmi basıncında ve ~%100 bir zar nemliliğinde en iyi performans gösterir [5]. Hücre gerilimi ( $V_{cell}$ ); herhangi bir durumda 4.2 nolu denklem kullanılarak bulunabilir. Bir hücre yüke güç verdiği zaman yüksüz gerilim (E); gerilim düşümü olarak adlandırılan aktivasyon ( $V_{act}$ ), omik ( $V_{ohm}$ ) ve konsantrasyon ( $V_{conc}$ ) aşırı gerilimleri tarafından azaltılır.

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad V \quad (4.2)$$

Nerst denklemi (4.3); açık devre hücre gerilimini (E) hücre sıcaklığının (T) ve reaktant kısmi basınçlarının bir fonksiyonu olarak verir [5].

$$E = E_0 - 0,85 \cdot 10^{-3} (T - 298,15) + \frac{R.T}{2.F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O} \cdot P^{0.5}} \right) \quad V \quad (4.3)$$

$E_0$ ; referans gerilimi gösterir, R universal gaz sabiti ve F'de Faraday sabitidir.  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  ve  $P_{H_2O}$ ; hidrojen, oksijen ve su buharı basınçları, P ise yığın içindeki toplam basınçtır. İlgili parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir. Aktivasyon düşümü Tafel denklemi tarafından analiz edilebilir.

$$E_{act} = -0,9514 + 0,00312T - 0,000187.T.[\ln(I)] + 7,4 \cdot 10^{-5}.T.[\ln(C_{O_2})] \quad V \quad (4.4)$$

Burada I akım yoğunluğu,  $C_{O_2}$  oksijen konsantrasyonudur. Denklem 4.5.'de yığın sıcaklığının bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \exp(-498/T)} \quad \text{mol.cm}^{-3} \quad (4.5)$$

Aktivasyon aşırı gerilimi Denklem 4.2.'de bir gerilim düşümü olarak görünür ve  $E_{act}$  Denklem 4.4 de tüm dizinin her yerinde negatiftir. Denklem 4.6. bu terimin çift bir negatifliğinden kaçınmak için kullanılır.

$$V_{act} = - E_{act} \quad V \quad (4.6)$$

Elektrot-elektrolit ara yüzeyinde yüklenen çift katman kapasitansının etkisi Denklem 4.7 ile ifade edilebilir [5].

$$\frac{dV_{act}}{dt} = \frac{I}{C_{dl}} - \frac{V_{act}}{R_{act} \cdot C_{dl}} \quad V \quad (4.7)$$

Burada  $C_{dl}$  çift katman kapasitansı,  $R_{act}$  aktivasyon direncidir ve aktivasyon geriliminin ( $V_{act}$ ), hücre akım yoğunluğuna (I) bölümüyle bulunur.

$$R_{act} = \frac{V_{act}}{I} \quad \text{k}\Omega.\text{cm}^2 \quad (4.8)$$

Burada  $R_{act}$  verilen bir hücre akımı için efektif direnç yerine geçer ve aktivasyon aşırı gerilimine ( $V_{act}$ ) katkıda bulunur. Diğer taraftan Denklem 4.7, zamanın her bir örneğinde  $V_{act}$ 'ı

belirlemek için kullanılır. Bu yüzden bu denklemler ayrı olarak kullanılması gereklidir ve değiştirilemezler.

Ortalama akım yoğunluğunda gerilim düşümü hemen hemen lineerdir ve doğal durumda omiktir.  $R_{mem}$  membran direncidir ve membran kalınlığının ( $t_m$ ) iletkenliğe ( $\sigma$ ) bölümüyle bulunur.

$$V_{ohm} = I.R_{mem} \quad (4.9)$$

$$R_{mem} = \frac{t_m}{\sigma} \quad k\Omega.cm^2 \quad (4.10)$$

**Tablo 4.1.** Yakıt pili model parametreleri [20].

| Sembol        | Parametre               | Değer                 | Birim                               |
|---------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| $E_0$         | Referans gerilim        | 1,229                 | V                                   |
| R             | Üniversal gaz sabiti    | 8,314                 | J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| F             | Faraday sabiti          | 96485                 | C mol <sup>-1</sup>                 |
| T             | Yığın sıcaklığı         | 353                   | K                                   |
| P             | Hücre basıncı           | 1,2                   | atm                                 |
| $t_m$         | Membran kalınlığı       | $175.10^{-4}$         | cm                                  |
| $C_{dl}$      | Çift katman kapasitansı | 0,035x232             | F                                   |
| $\tau_{H+}$   | Zaman sabiti            | 12,78                 | s                                   |
| $\alpha_{H+}$ | İlgili parametre        | 5,78                  | cm <sup>6</sup> A <sup>-3</sup>     |
| $D_{H+}$      | Difüzyon katsayısı      | $0,85 \times 10^{-6}$ | cm s <sup>-1</sup>                  |

Membran su hacmi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; elektron hareketinden dolayı anottan katoda su akışı, reaktantların dış su hacmi ve katottan anoda geri su difüzyonu gibi olaylardır [5]. Su akışının etkisi önemli bir faktör olduğundan membran proton konsantrasyonu sadece hücre akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu farz edilebilir. Ampirik bir diferansiyel denklem proton konsantrasyonunu ( $C_{H+}$ ) tanımlamak için çözülebilir ve Denklem 4.11 ve 4.12 membran iletkenliğini ( $\sigma$ ) tahmin etmek için kullanılabilir.

$$\frac{dC_{H+}}{dt} + \frac{C_{H+}}{\tau_{H+}} = \frac{1 + \alpha_{H+} \cdot I^3}{\tau_{H+}} \quad (4.11)$$

$$\sigma = \frac{F^2}{R.T} D_{H+} \cdot C_{H+} \quad (4.12)$$

Daha yüksek akım yoğunluklarında, hücre potansiyeli kütle-geçiş sınırlamalarından dolayı hızla azalır. Bu non-lineerlik konsantrasyon aşırı gerilimi olarak adlandırılır.

$$V_{conc} = a.e^{(bl)} V \quad (4.13)$$

Burada a (V) ve b (cm<sup>2</sup>.mA<sup>-1</sup>) katsayıları sıcaklıkla değişir.

$$a = 1,1.10^{-4} - 1,2.10^{-6} \cdot (T-273)$$

$$b = 8.10^{-3}$$

4.2-4.13 nolu denklemler ile hücre potansiyeli ( $V_{cell}$ ) akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, reaktant basıncı ve membran hidratlamanın bir fonksiyonu olarak çözülebilir. Eğer tüm hücreler seri olarak bağlanmışlarsa yığın gerilimi hücre gerilimi ile hücre sayısının çarpımına eşittir.

$$V_{stack} = V_{cell} \times N \quad (4.14)$$

Hücre potansiyeli oksijen, hidrojen ve buhar kısmi basınçlarına bağlıdır. Bu durum Denklem 4.3 ile ifade edilmektedir. Bu basınçlar, anot ve katottaki reaktant akış oranları ve nemlilikleri tarafından oldukça etkilenir.

Tüm gazların ideal olduğu varsayılarak ideal gaz kanunu dinamik analizler için genişletilebilir ve kütle korunum yasası, genel denklemler ile reaktant akış modeli kullanılabilir.

$$\frac{V}{R.T} \frac{dP_g}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \pm \frac{I}{n.F} \quad (4.15)$$

Burada; anot veya katot hacmi  $V(m^3)$ , gaz (oksijen, hidrojen, buhar) basıncı  $P_g$  (atm), reaktant giriş akış oranı  $\dot{m}_{in}$  (mol.s<sup>-1</sup>), reaktant çıkış akış oranı  $\dot{m}_{out}$  (mol.s<sup>-1</sup>), reaksiyonda kullanılan her bir molekülü kapsayan elektron sayısı ise n ile gösterilmiştir.

Hücre içerisinde ani durumları belirleyebilmek için gaz reaktantların korunumları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir.

Anot akışı model eşitlikleri;

$$\begin{aligned} \frac{V_a}{R.T} \frac{dP_{H_2}}{dt} &= \dot{m}_{H_2-in} - \dot{m}_{H_2-out} - \frac{I}{2.F} \\ \dot{m}_{H_2-out} &= k_a (P_{H_2} - P_{amb}) \\ \dot{m}_{H_2-in} &= FR_{H_2} \cdot PC_{H_2} \cdot CF_{H_2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Katot akışı model eşitlikleri;

$$\begin{aligned} \frac{V_c}{R.T} \frac{dP_{O_2}}{dt} &= \dot{m}_{O_2-in} - \dot{m}_{O_2-out} - \frac{I}{4.F} \\ \dot{m}_{O_2-out} &= k_c (P_{O_2} - P_{amb}) \\ \dot{m}_{O_2-in} &= FR_{O_2} \cdot PC_{O_2} \cdot CF_{O_2} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Katot su akışı model eşitlikleri;

$$\frac{V_c}{R.T} \frac{dP_{H_2O-C}}{dt} = \dot{m}_{H_2O-in-C} - \dot{m}_{H_2O-out-C} + \frac{I}{2.F}$$

$$\dot{m}_{H_2O-out-C} = k_c (P_{H_2O-C} - P_{amb}) \quad (4.18)$$

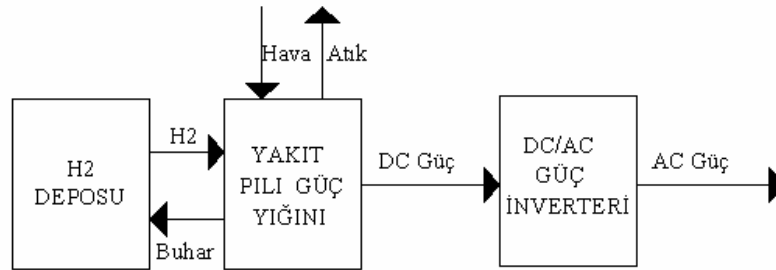
Denklemlerde kullanılan parametreler Tablo 4.2’de [20] verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Reaktant akışı model parametreleri

| Sembol        | Parametre                                                    | Değer                 | Birim                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $P_{amb}$     | Çevreleyen basınç                                            | 1                     | atm                   |
| $V_a$         | Anot hacmi                                                   | 0,0159                | $m^3$                 |
| $k_a$         | Anot akış sabiti                                             | 0,004                 | $mol\ s^{-1}atm^{-1}$ |
| $V_c$         | Katot hacmi                                                  | 0,0025                | $m^3$                 |
| $k_c$         | Katot akış sabiti                                            | 0,01                  | $mol\ s^{-1}atm^{-1}$ |
| $PC_{H_2}$    | $H_2$ (saf) yüzdesi(saf)                                     | 99%                   | -                     |
| $CF_{H_2}$    | $H_2$ akış oranı değişim faktörü (SLMP’den $mol.s^{-1},ye$ ) | $6,85 \times 10^{-4}$ | -                     |
| $PC_{O_2}$    | $O_2$ (saf)yüzdesi                                           | 21%                   | -                     |
| $CF_{O_2}$    | $O_2$ akış oranı değişim faktörü (SLMP’den $mol.s^{-1},ye$ ) | $6,084.10^{-4}$       | -                     |
| $PC_{H_2O-C}$ | Katot buhar hacmi                                            | 1%                    | -                     |

#### 4.4. Bir PEM Yakıt Pili Dinamik Modeli

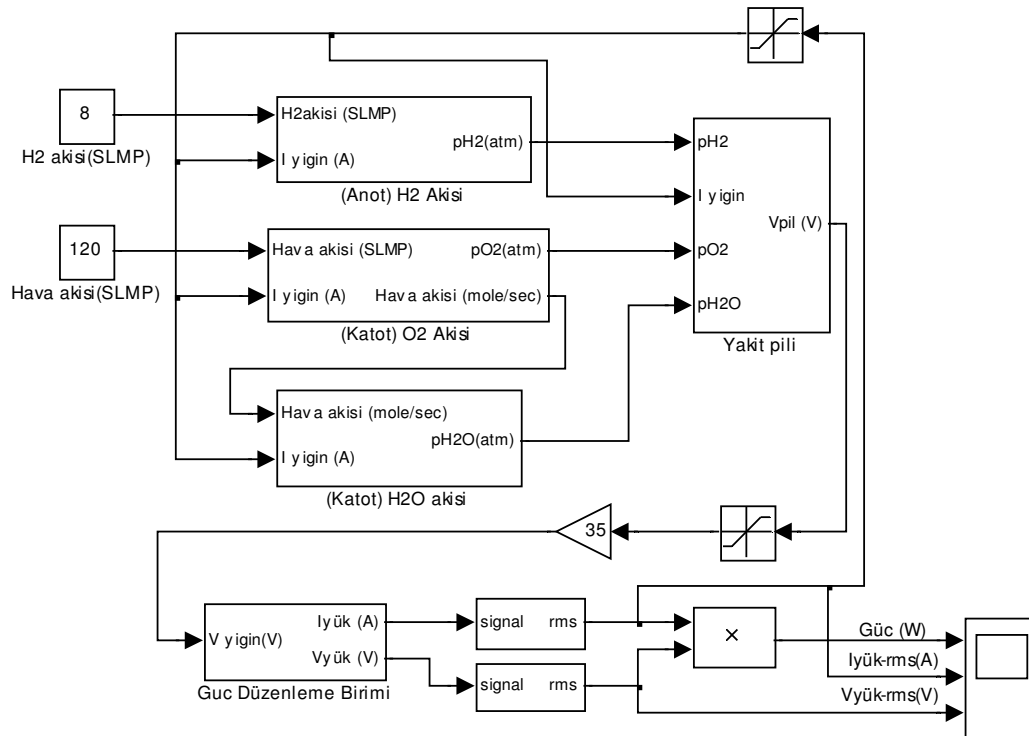
Bir yakıt pili sistemi yakıt işleme ünitesi (reformer), yakıt pili yığını ve güç düzenleme birimlerinden oluşmaktadır. Basit bir yakıt pili sisteminin temel gösterimi Şekil 4.3’de verilmiştir. Yakıt pili, giriş yakıtı olarak hidrojeni kullanır ve yığın çıkışında DC güç üretir.



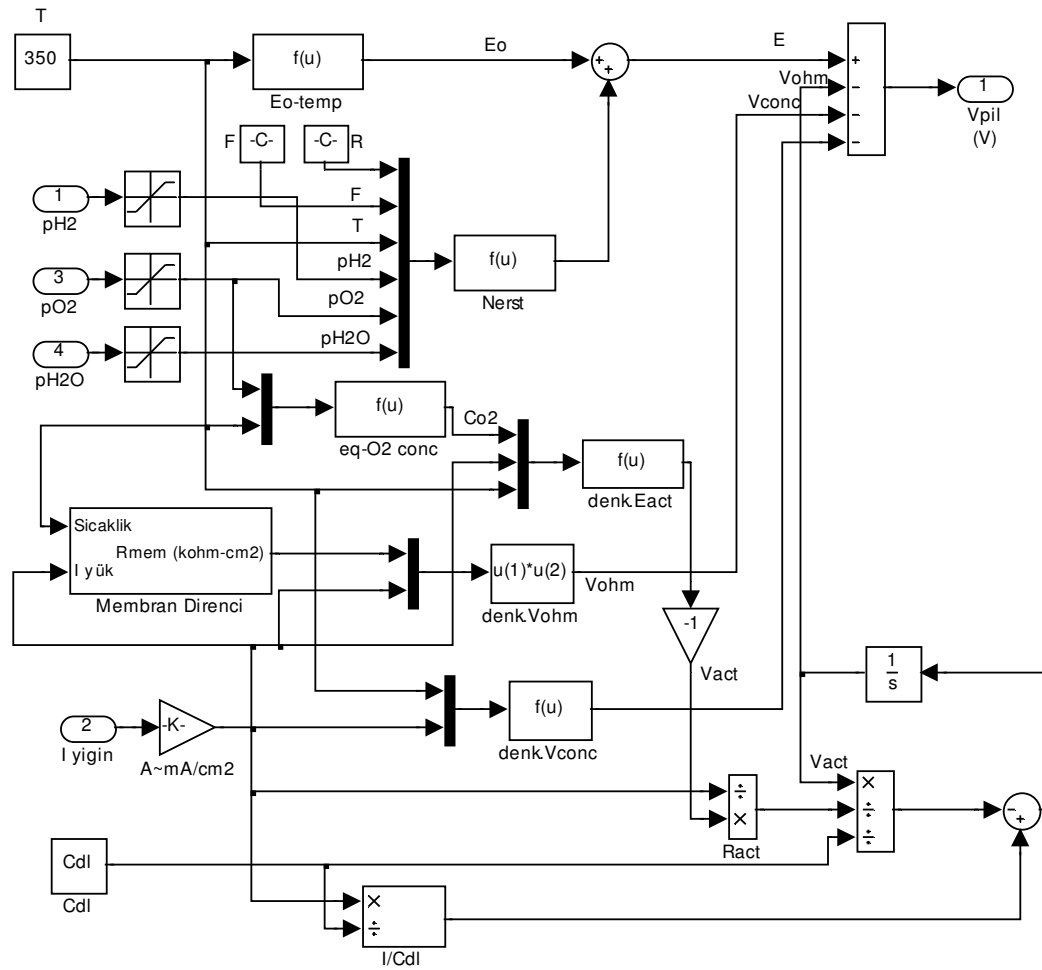
**Şekil 4.3.** Temel bir yakıt pili sisteminin elemanları

Benzetimi yapılan bir PEM yakıt pili sisteminin blok diyagramı Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Yakıt pili sistem modeli; reaktant akış dinamikleri, yakıt pili modeli ve güç düzenleme biriminden meydana gelmiştir. Membran direnci alt sistemini içeren yakıt pili alt sistemi ise Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Hidrojen, oksijen ve buhar basınçları, yığının hücre akım yoğunluğu yakıt pilinin girişleridir. Hidrojen, oksijen ve buhar basınçları 4.16, 4.17 ve 4.18

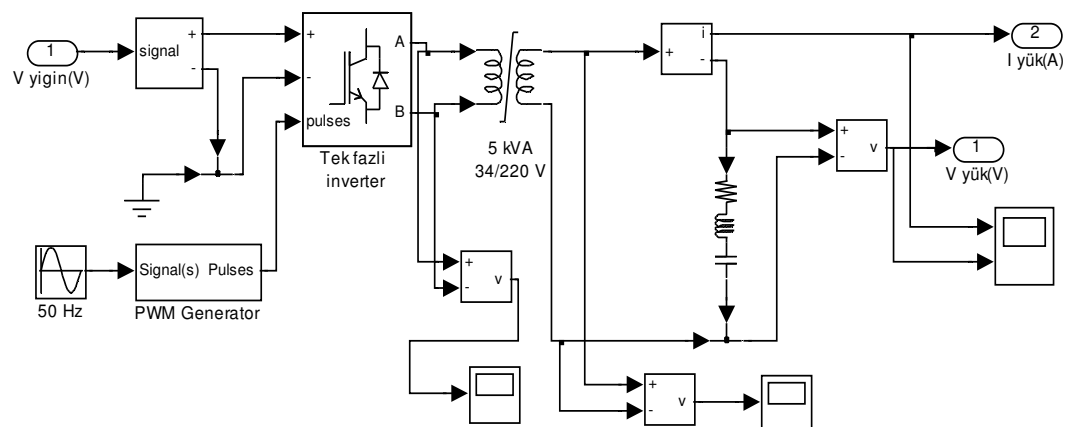
numaralı denklemlerden bulunabilir. Bu terimler açık devre hücre potansiyelini belirlemek için Denklem 4.2’de kullanılabilir. Hücre potansiyeli yığındaki hücre sayısı ile çarpılır. Böylece bu çarpımdan yığın gerilimi elde edilir. Aynı zamanda yığın gerilimi güç düzenleme biriminin girişidir. Güç düzenleme biriminin Simulink blok diyagramları Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Güç düzenleme birimi; DC gücü AC’ye çeviren tek fazlı bir inverter, çıkış gerilimini şebeke gerilim ve frekansına (220 V, 50 Hz) dönüştüren bir transformatörden oluşmuştur. Bu çalışmada transformatör gücü 5 kVA olarak seçilmiştir.



**Şekil 4.4.** Benzetimi yapılan bir PEM yakıt pili sisteminin blok diyagramı



**Şekil 4.5.** Tek yakıt pili modeli (Yakıt pili alt sistemi)



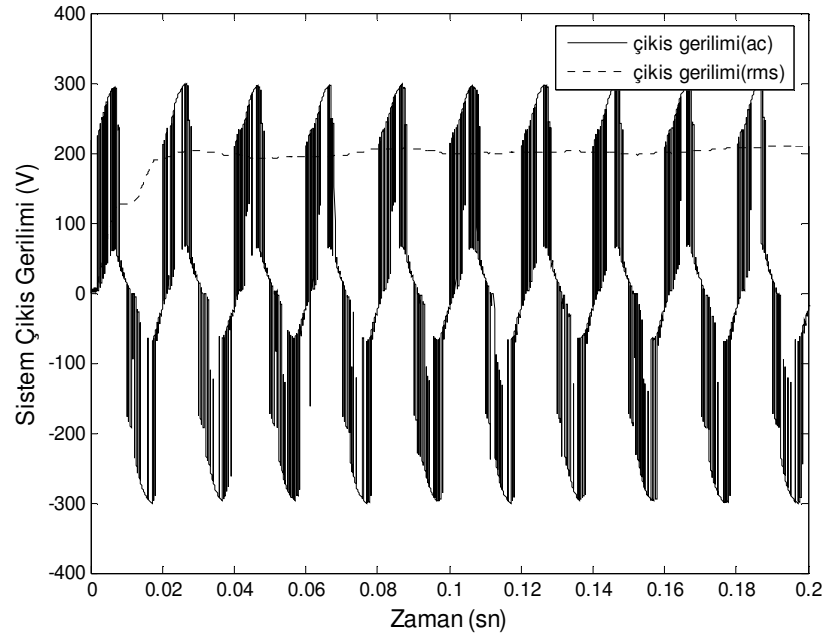
**Şekil 4.6. Güç Düzenleme Birimi**

## 5. BENZETİM SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMA

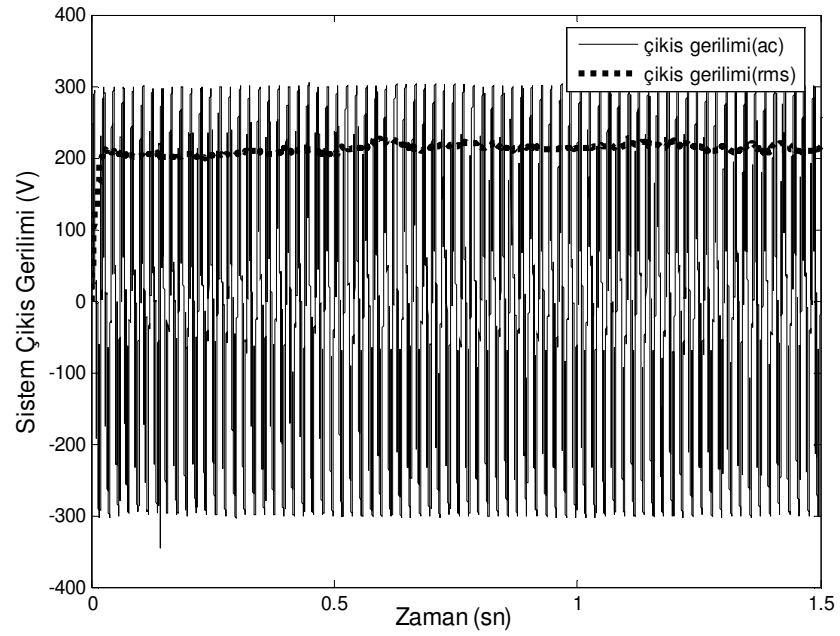
### 5.1. Benzetim sonuçları

PEM yakıt pili sistemi benzetimi için Matlab-Simulink™ yazılımı kullanılmıştır. Cebri döngüler ve aşırı derecede sayısal değerlerden doğacak problemleri önlemek için çeşitli anahtar döngüler yerleştirilmiştir. Hidrojen akış oranı 8 standart litre/dakika (SLPM) de korunmuştur. Hava akış oranı da 120 SLPM de sabitleştirilmiştir. Benzetim süresi 1,5 sn olarak seçilmiştir. Fakat her bir akım ve gerilim grafiğindeki değişimlerin daha rahat gözlenebilmesi amacıyla daha küçük zaman aralığı (0-0,2 sn) için de benzetim sonuçları alınmıştır.

Şekil 4.4'de gösterilen yakıt pili sistem çıkışına endüktif, kapasitif ve omik yükler bağlanarak bu yükler üzerinde akım, gerilim ve güç değişimleri incelenmiştir. Endüktif ve kapasitif yükler için  $\cos \phi=0,90$  da sabit tutulmuştur. Ayrıca yük üzerindeki aktif ve reaktif gücün değişimine bağlı olarak çıkış akım, gerilim ve görünür güç grafikleri üzerindeki değişimler de gözlenmiştir. Benzetim sonuçlarındaki tüm akım ve gerilim grafiklerinde hem alternatif hem de efektif değerler verilmiştir. Benzetimini yaptığımız modelde 5 kVA güce sahip transformatörün çıkışına endüktif yükün bağlanması durumunda aktif gücün, 4500 W, 3000 W ve 1000 W değerleri için, çıkış gerilimi eğrilerinin alternatif ve efektif değerleri Şekil 5.1-5.6 arasında, yük akımı eğrilerinin alternatif ve efektif değerleri Şekil 5.7-5.12 arasında, çıkış gücü eğrileri ise Şekil 5.13-5.15 arasında gösterilmiştir. Verilen tüm grafiklerde sistemin frekansı şebeke frekansında sabit kalmıştır.

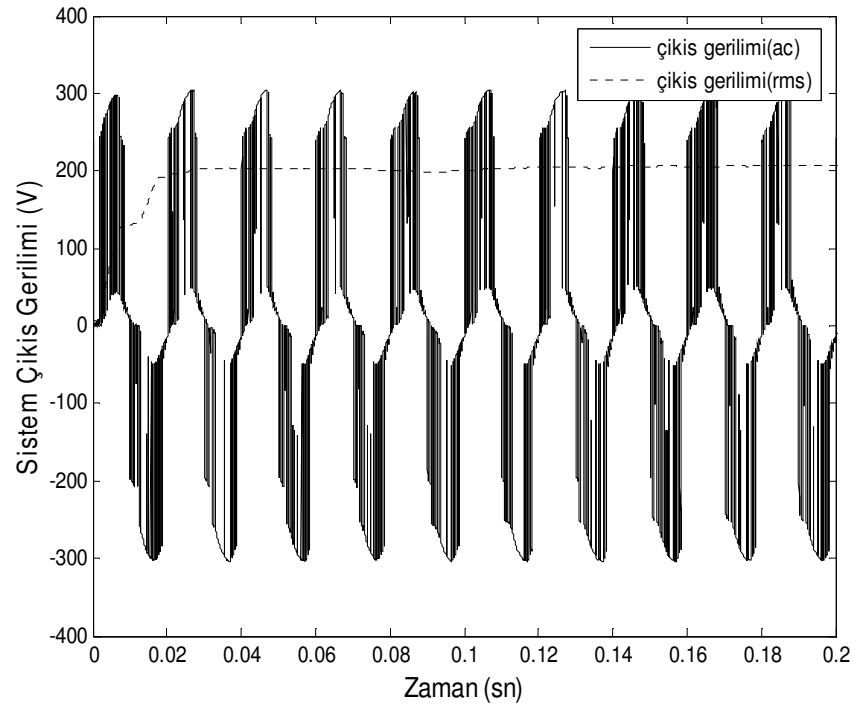


Şekil 5.1. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, endüktif yük,  $t=0-0,2$  sn)

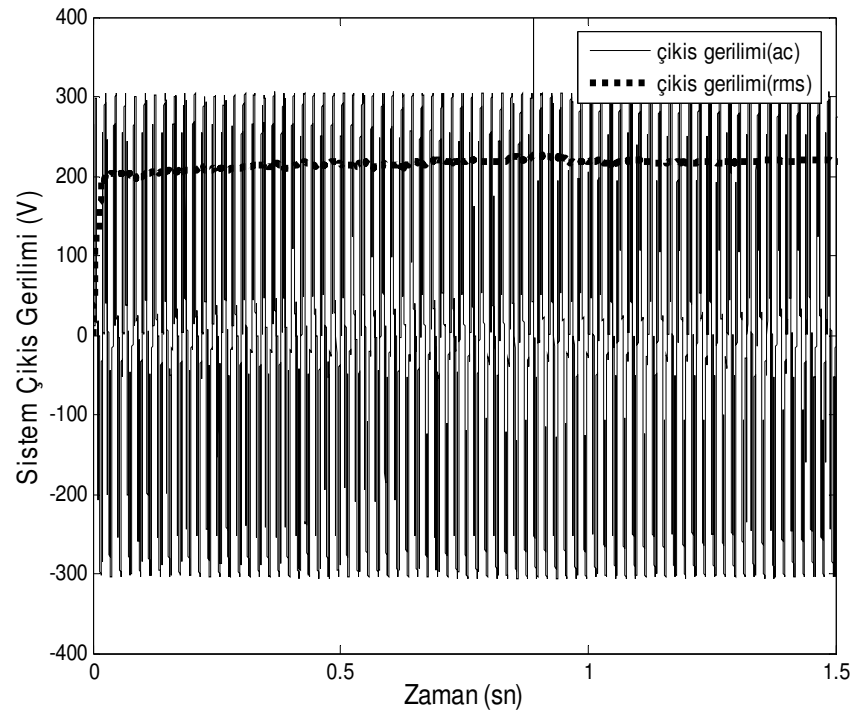


Şekil 5.2. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Şekil 5.1-5.2'den görüleceği gibi çıkış gerilimi hemen hemen sinüse yakın bir formdadır. Özellikle gerilimin efektif değeri başlangıç anındaki bir yükselmeden sonra şebeke geriliminde sabitlenmiştir. Yani böyle bir sistemin şebeke ile paralel çalışması durumunda sabit bir çalışma gerilimi sağlamış olur.

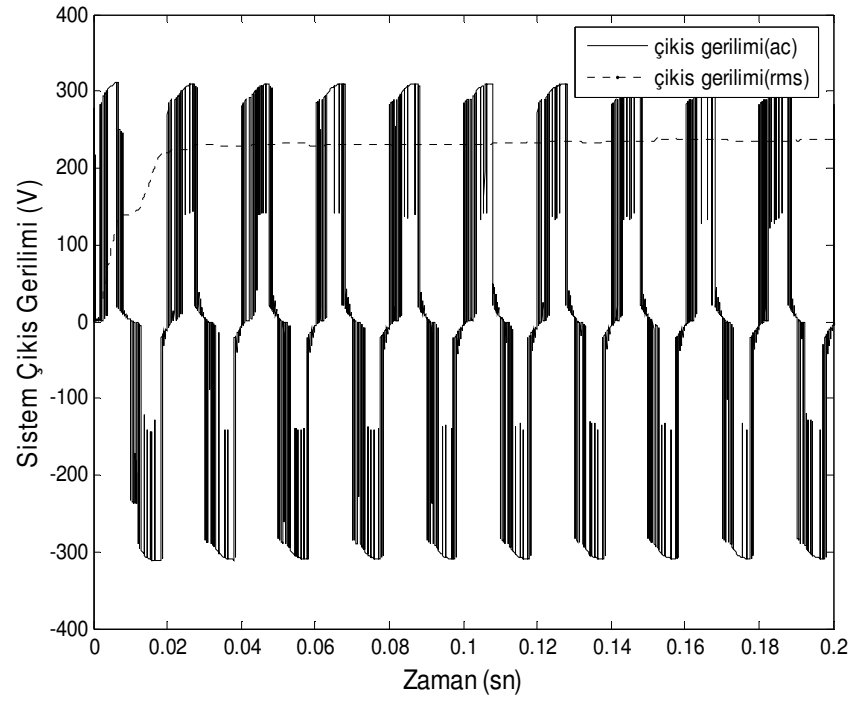


Şekil 5.3. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, endüktif yük,  $t=0-0,2$ sn)

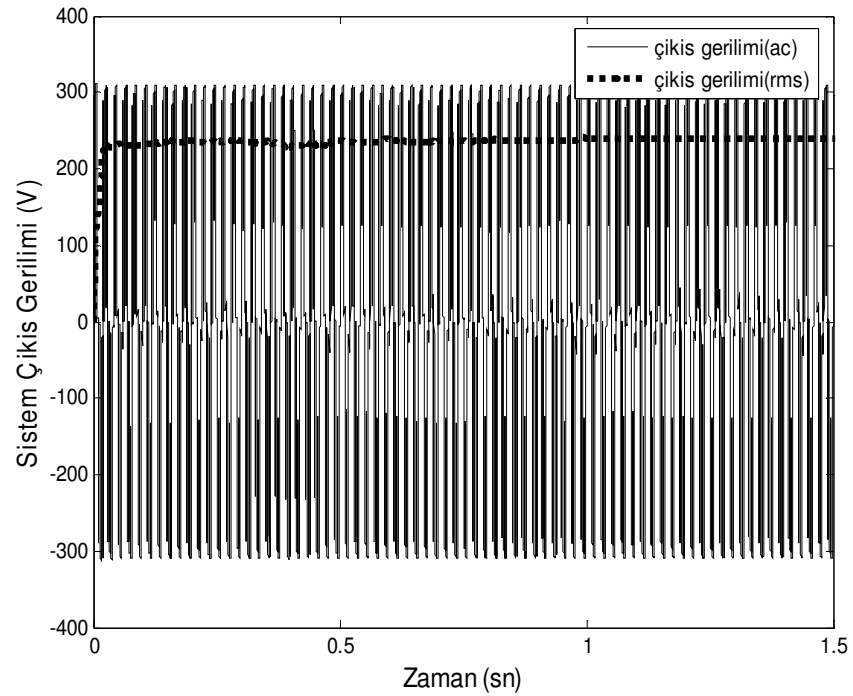


Şekil 5.4. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$ sn)

Aktif gücün 3000 W olması durumunda ise (Şekil 5.3-5.4) gerilimdeki ani kaçmaların sayısı azalmış, gerilim sinüs formuna daha çok yaklaşmıştır.

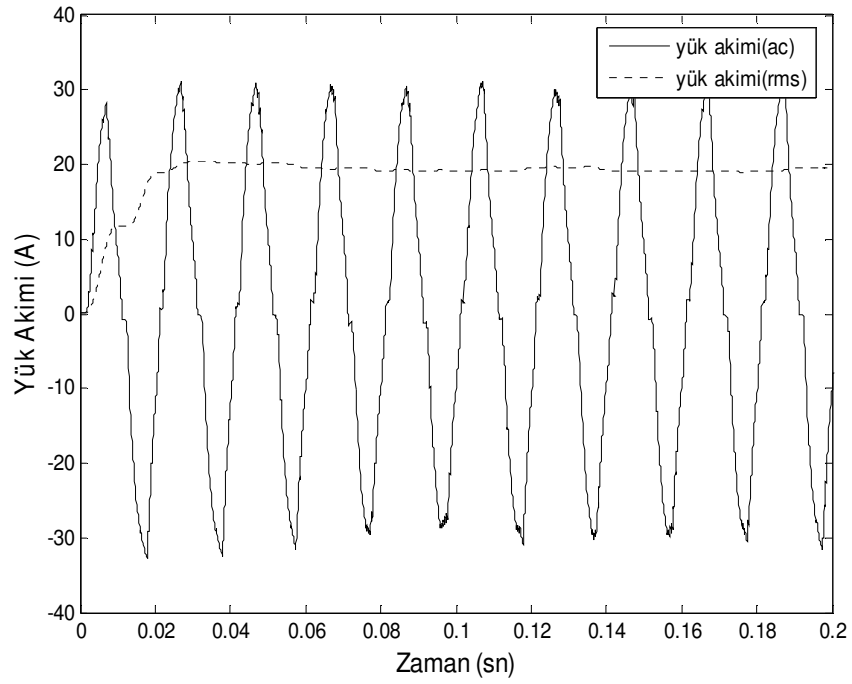


Şekil 5.5. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, endüktif yük,  $t=0-0,2$  sn)

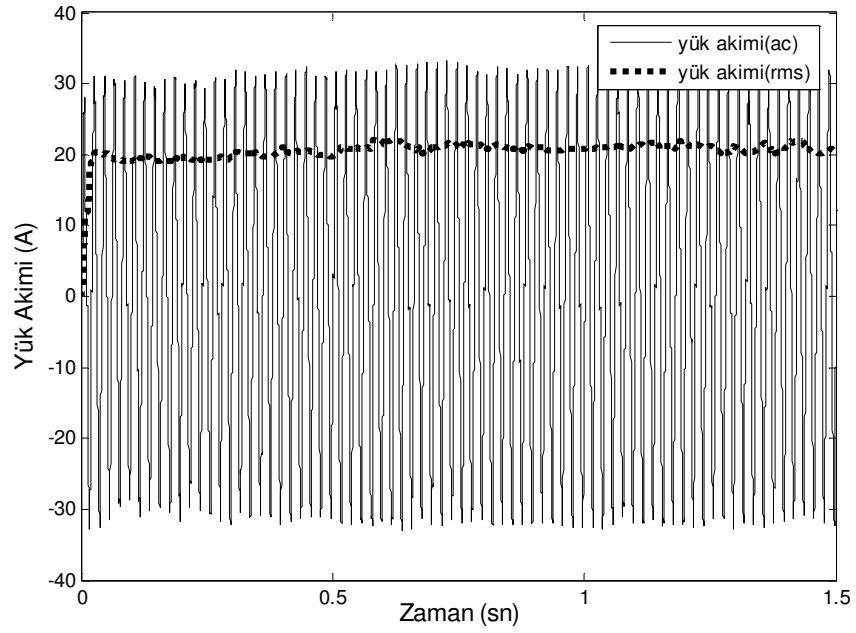


Şekil 5.6. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 1000 W olması halinde (Şekil 5.5.-5.6.) ise hem gerilimin AC değeri sinüse daha çok yaklaşmış hem de efektif değer daha kısa bir sürede sabit bir değere ulaşmıştır.

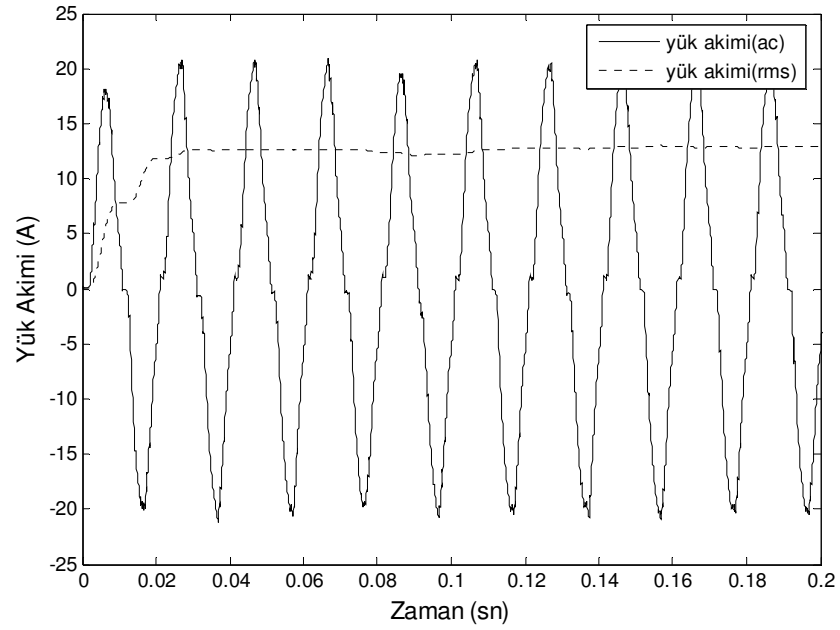


Şekil 5.7. Yük Akımı ( $P=4500$  W, endüktif yük,  $t=0-0,2$  sn)

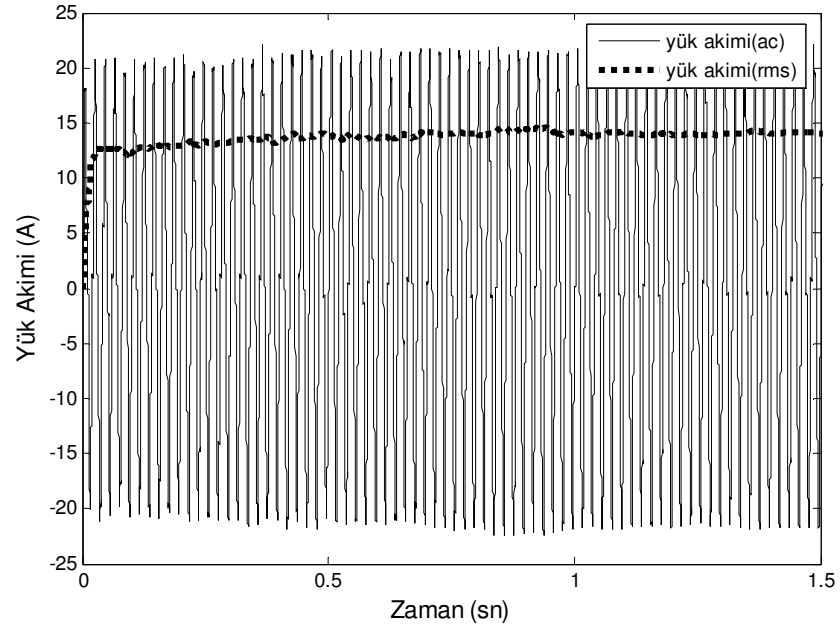


Şekil 5.8. Yük Akımı ( $P=4500$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Şekil 5.7. ve 5.8.'den görüleceği gibi sistem çıkışına bağlanan yük içinden geçen akımın değişimi oldukça düzgün bir sinüs eğrisidir. Akımın efektif değeri de başlangıçta hızlı bir artış sonucunda sabitlenmiştir.

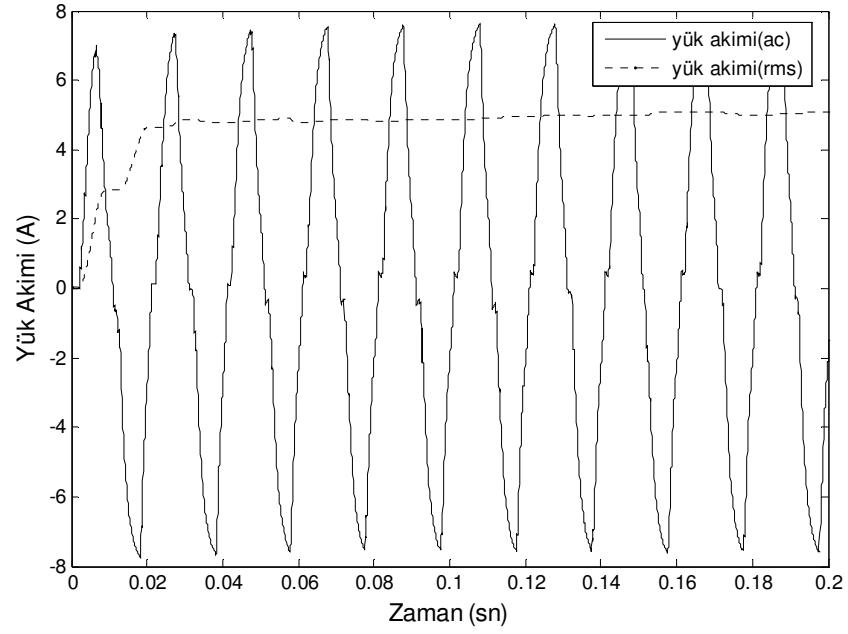


Şekil 5.9. Yük Akımı ( $P=3000$  W, endüktif yük,  $t=0-0,2$  sn)

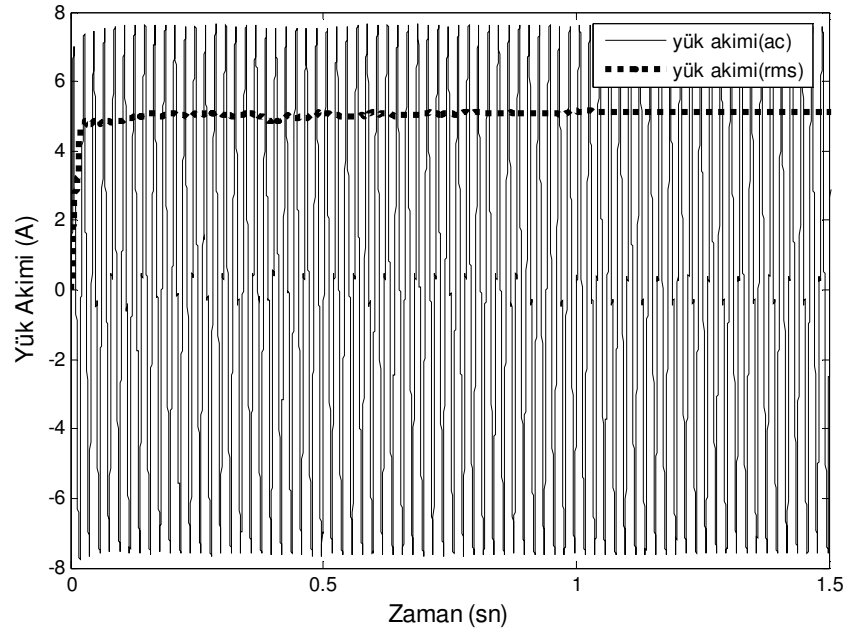


Şekil 5.10. Yük Akımı ( $P=3000$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 3000 W olması durumunda ise (Şekil 5.9-5.10) akımın şekli daha da düzelmiş ve sinüs formuna daha çok yaklaşmıştır. Ayrıca akımın efektif değeri daha kısa bir sürede sabitlenmiştir.

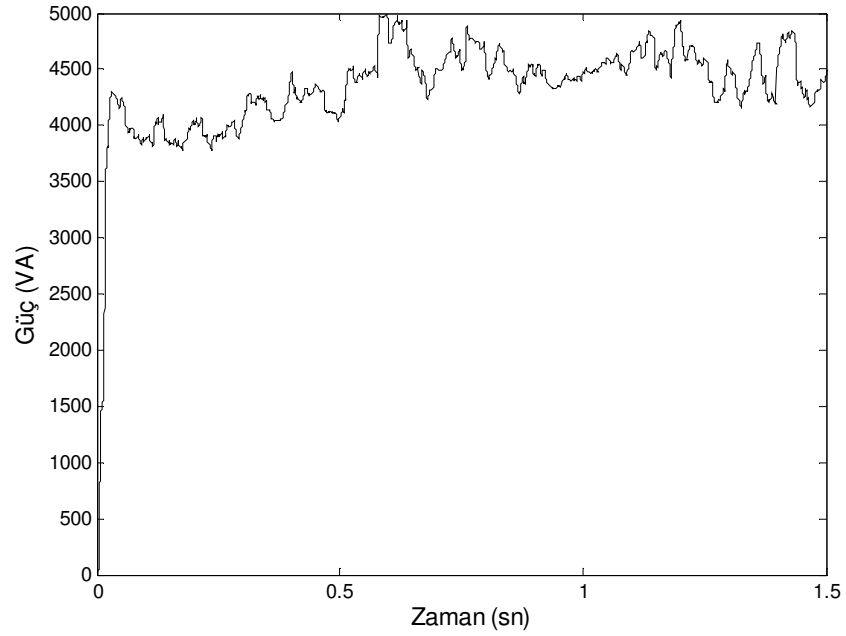


Şekil 5.11. Yük Akımı ( $P=1000$  W, endüktif yük,  $t=0-0,2$  sn)

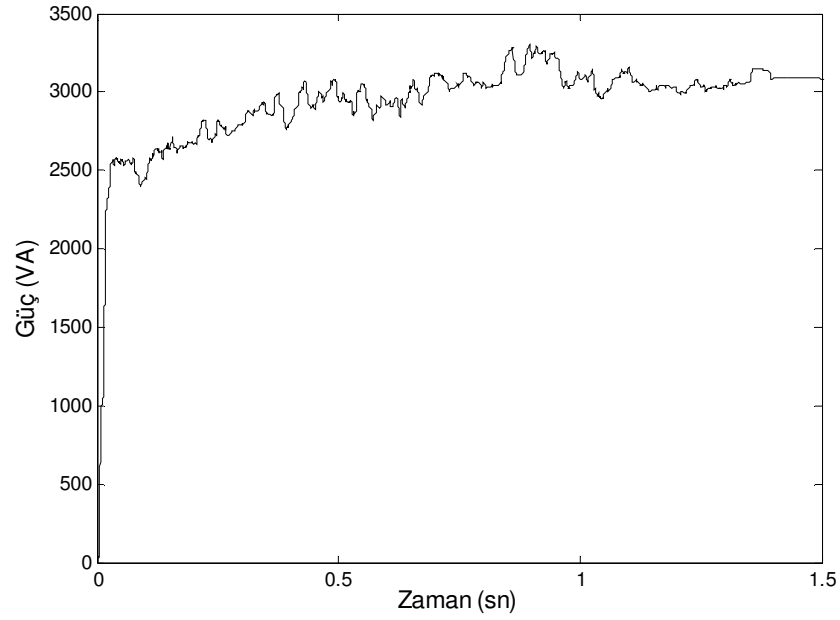


Şekil 5.12. Yük Akımı ( $P=1000$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 1000 W olması halinde (Şekil 5.11.-5.12.) hem akımın alternatif değeri daha düzgün bir sinüs halini almış hem de efektif değeri daha kısa zamanda sabit bir değere ulaşmıştır.

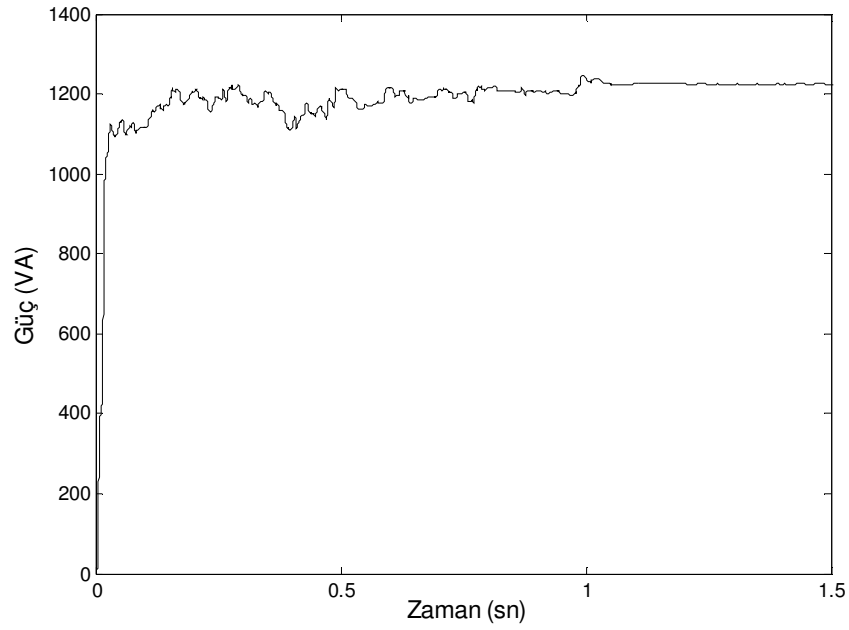


**Şekil 5.13.** Güç Eğrisi ( $P=4500$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)



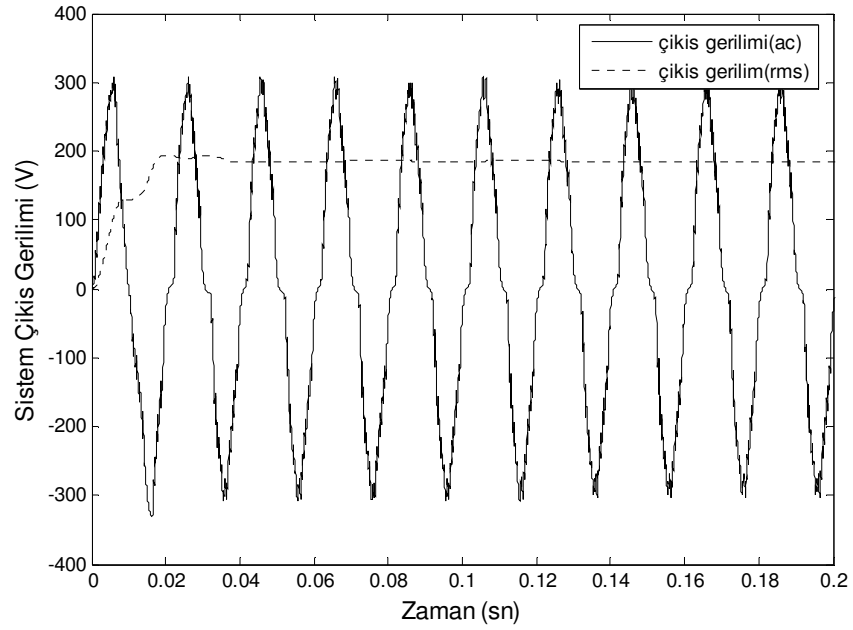
**Şekil 5.14.** Güç Eğrisi ( $P=3000$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Sistem çıkışındaki yükün aktif gücünün dolayısıyla görünür gücünün değişimi ile çıkış gücündeki dalgalanmalar Şekil 5.13-5.15’de gösterilmiştir. Verilen grafiklere göre güçteki azalmaya bağlı olarak eğrideki dalgalanmalar azalmış ve eğrinin sabit bir değere ulaşma süresi kısalmıştır.

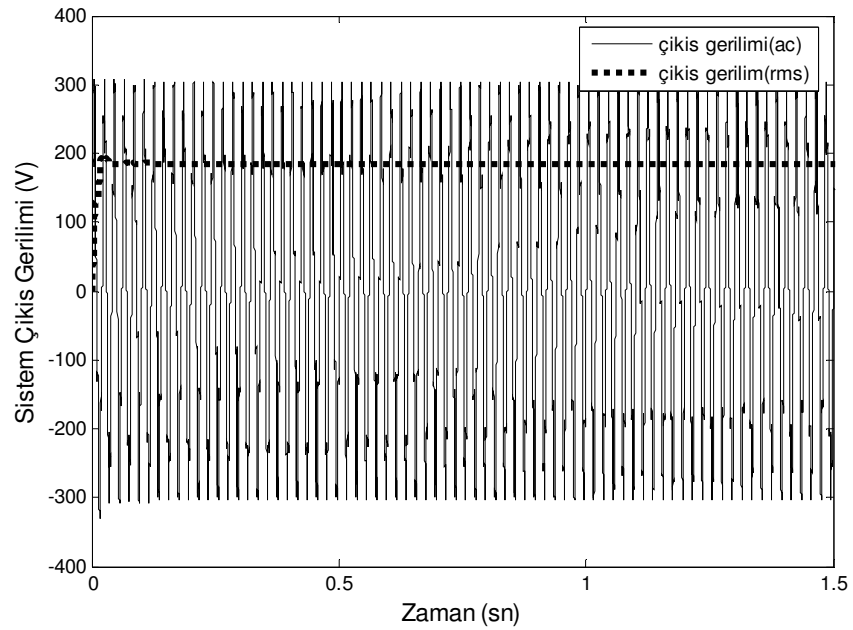


**Şekil 5.15. Güç Eğrisi ( $P=1000$  W, endüktif yük,  $t=0-1,5$  sn)**

Benzetimini yaptığımız modelde 5 kVA güce sahip transformatörün çıkışına kapasitif yükün bağlanması durumunda aktif gücün, 4500 W, 3000 W ve 1000 W değerleri için, çıkış gerilimi eğrilerinin alternatif ve efektif değerleri Şekil 5.16-5.21 arasında, yük akımı eğrilerinin alternatif ve efektif değerleri Şekil 5.22-5.27 arasında, çıkış gücü eğrileri ise Şekil 5.28-5.30 arasında gösterilmiştir.

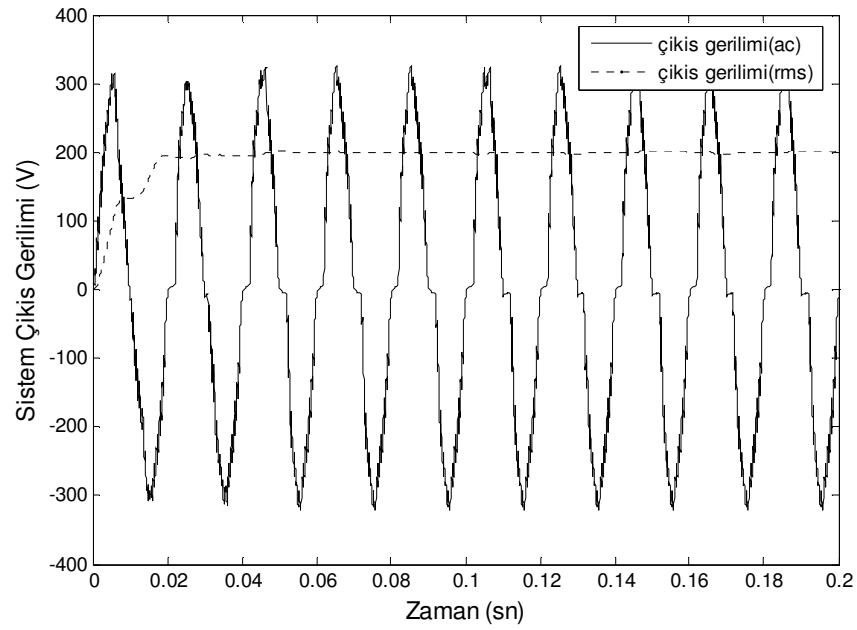


Şekil 5.16. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, kapasitif yük,  $t=0-0,2$  sn)

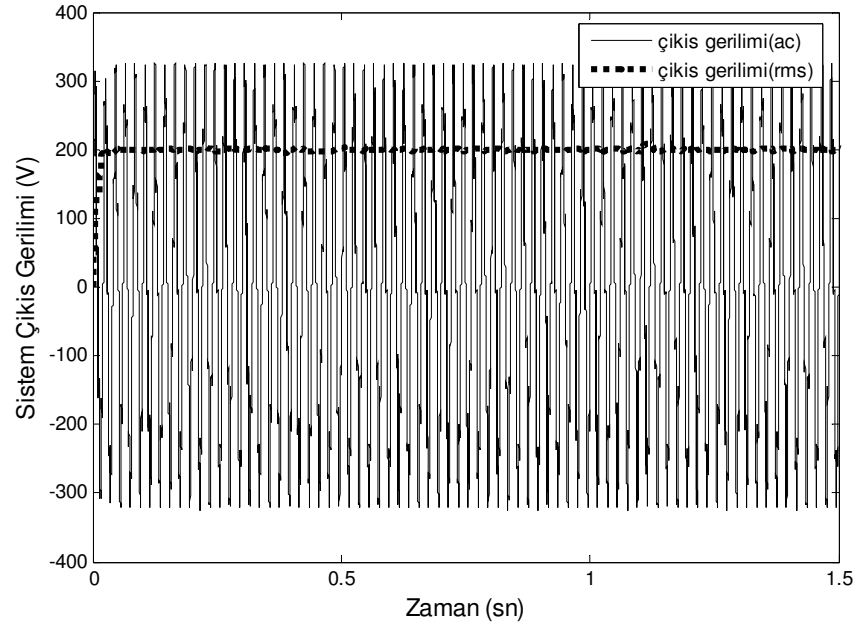


Şekil 5.17. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Şekil 5.16.-5.17.'den görüleceği gibi çıkış gerilimi endüktif yüke göre sinüse formuna daha yakın bir şekildir. Gerilimin efektif değeri başlangıçta hızlı bir yükselişten sonra sabit bir değere ulaşmıştır.

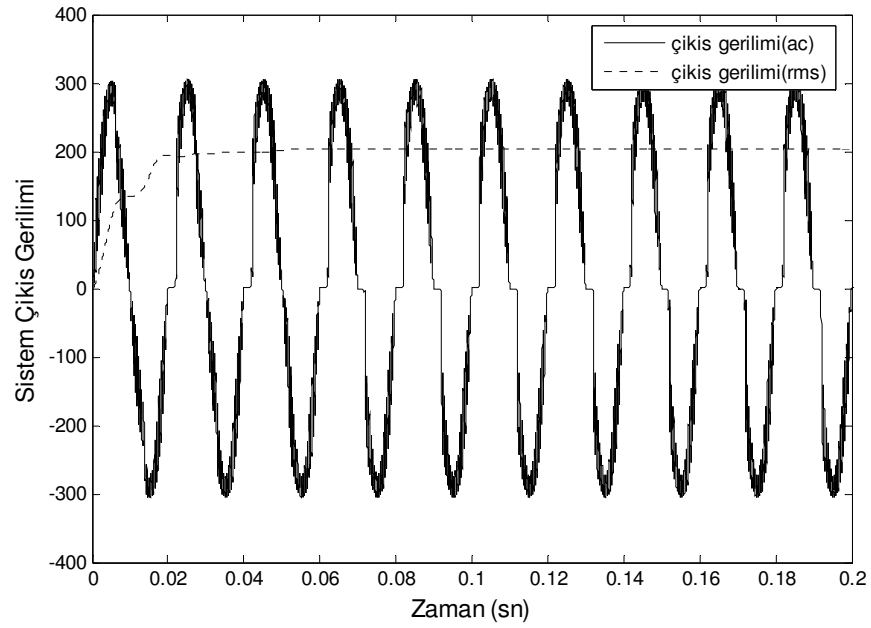


Şekil 5.18. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, kapasitif yük,  $t=0-0,2$  sn)

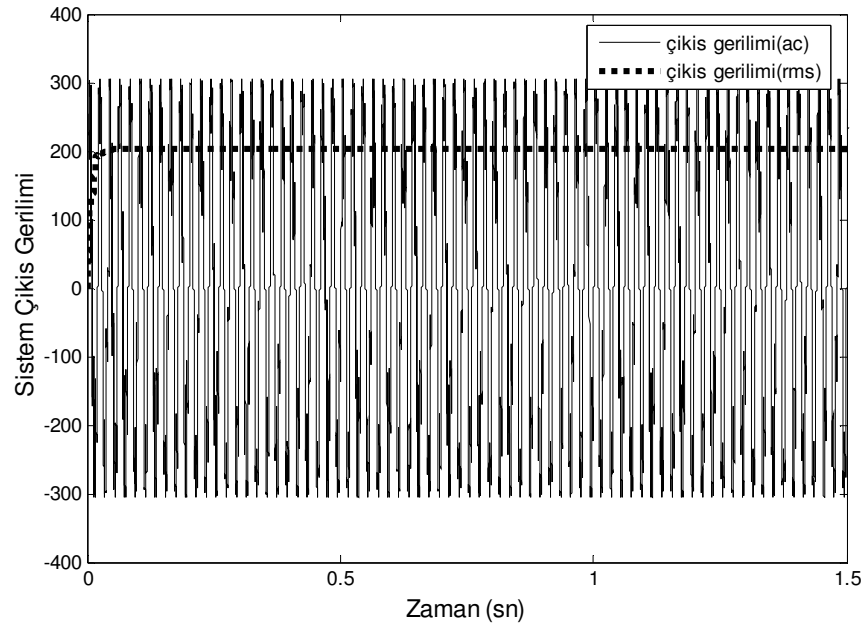


Şekil 5.19. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 3000 W olması durumunda ise (Şekil 5.18.-5.19.) gerilim uç noktalarda daha fazla yakalanmıştır.

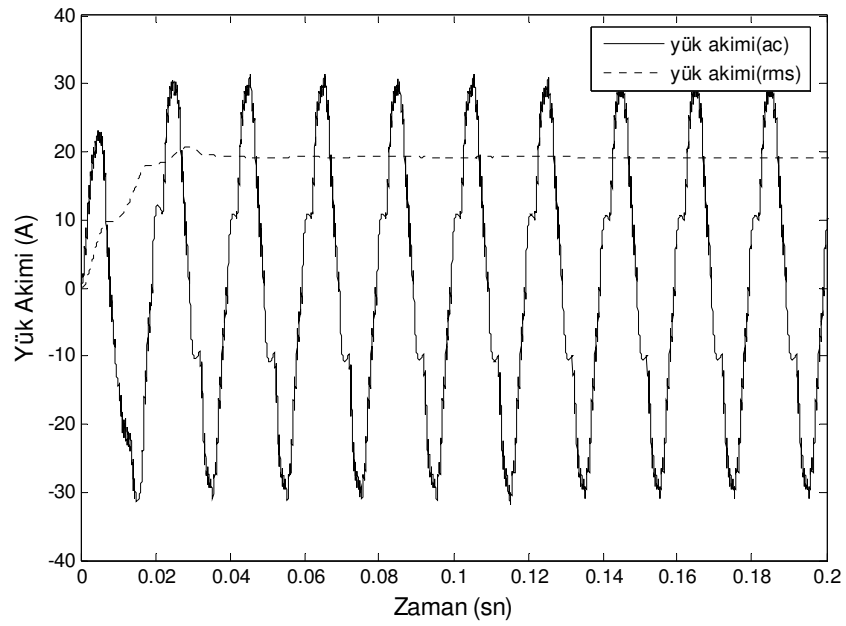


Şekil 5.20. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, kapasitif yük,  $t=0-0,2$  sn)

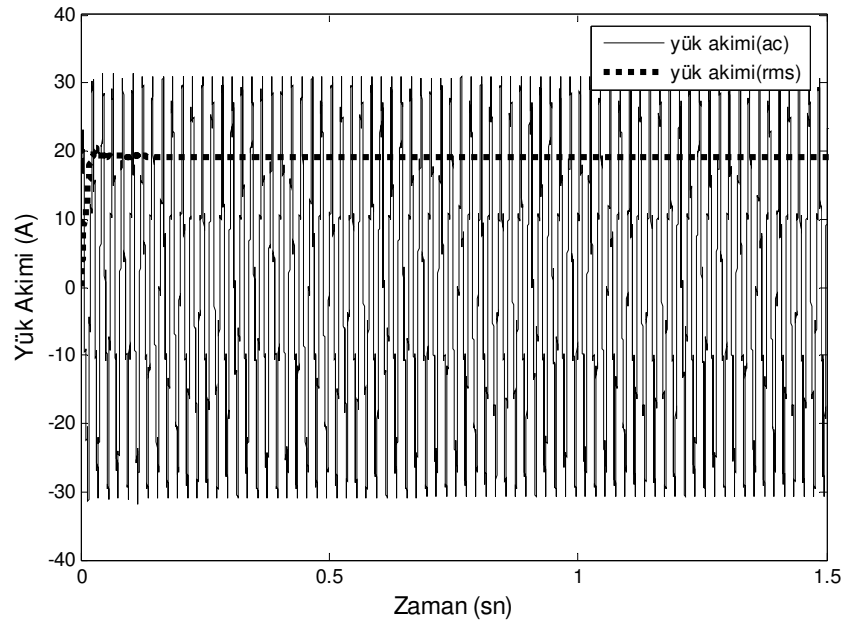


Şekil 5.21. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 1000 W'la düşmesi halinde ise (Şekil 5.20.-5.21.) gerilim sinüse oldukça yaklaşmıştır. Uç noktalar oldukça belirginleşmiştir. Gerilimin efektif değeri ise çok kısa bir süre içinde sabitlenmiştir.

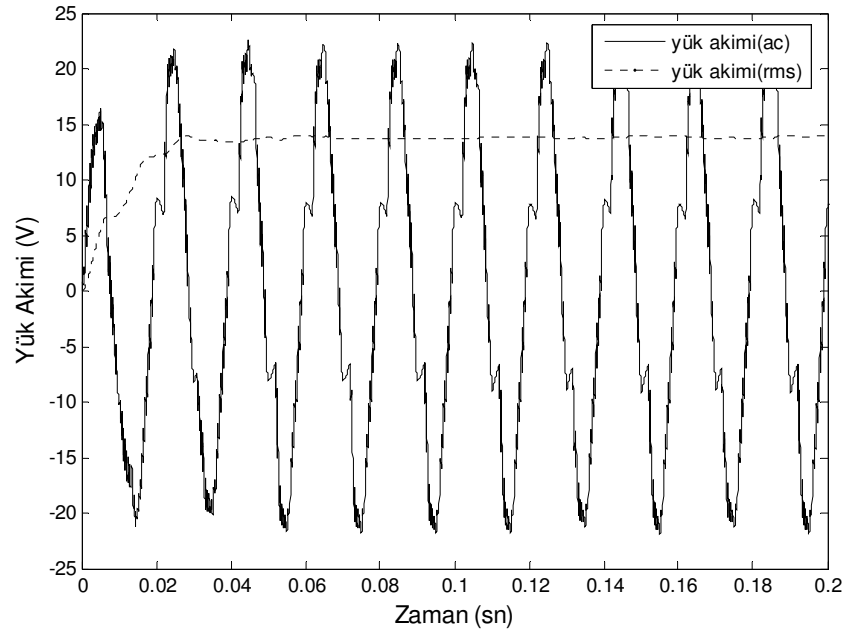


Şekil 5.22. Yük Akımı ( $P=4500$  W, kapasitif yük,  $t=0-0,2$  sn)

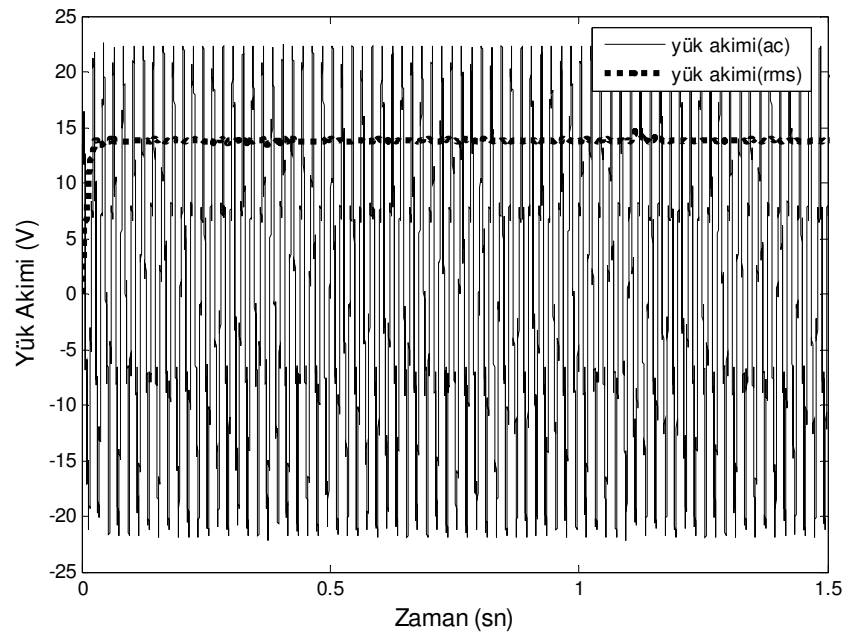


Şekil 5.23. Yük Akımı ( $P=4500$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Şekil 5.22. ve 5.23.'den görüleceği gibi sistem çıkışına bağlanan yük içinden geçen akımın değişimi sinüse yakın bir eğridir. Fakat endüktif yükün bağlı olması durumuna göre birkaç noktada ani kaçmalar olmuştur. Akımın efektif değeri de başlangıçta hızlı bir artış sonucunda sabitlenmiştir.

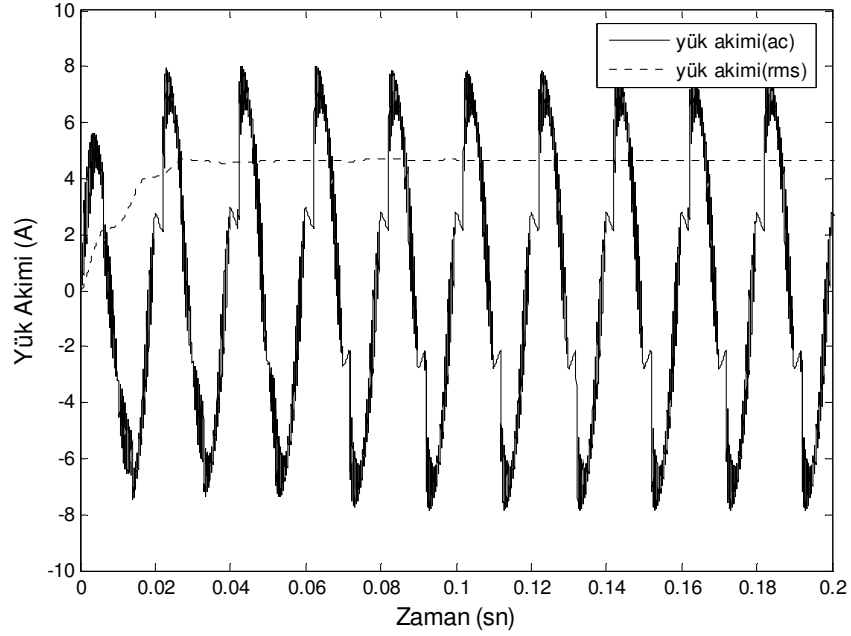


Şekil 5.24. Yük Akımı ( $P=3000$  W, kapasitif yük,  $t=0-0,2$  sn)

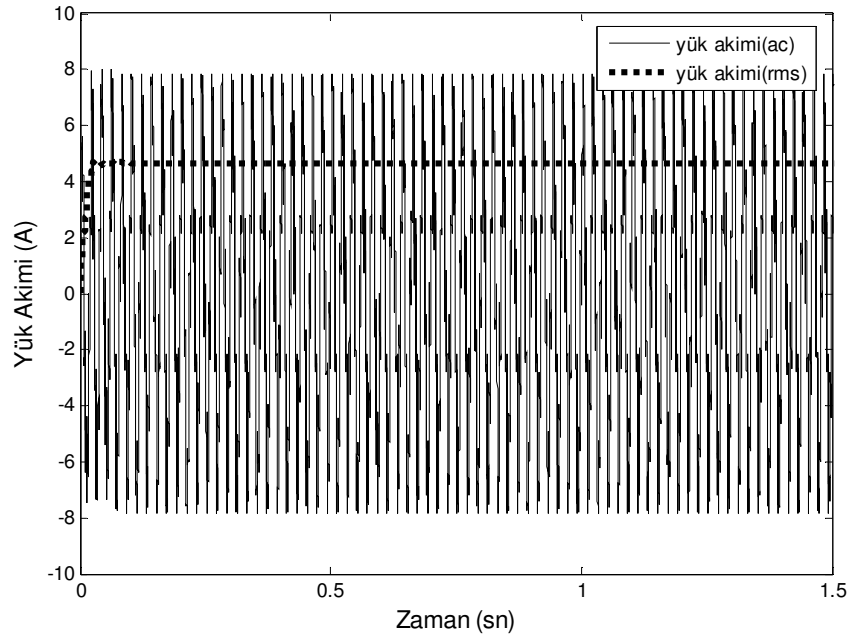


Şekil 5.25. Yük Akımı ( $P=3000$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 3000 W olması durumunda ise (Şekil 5.24.-5.25.) akımın şekli uç noktalarda daha belirgin bir hal almıştır. Akımın efektif değeri ise yine kısa bir sürede sabitlenmiştir.

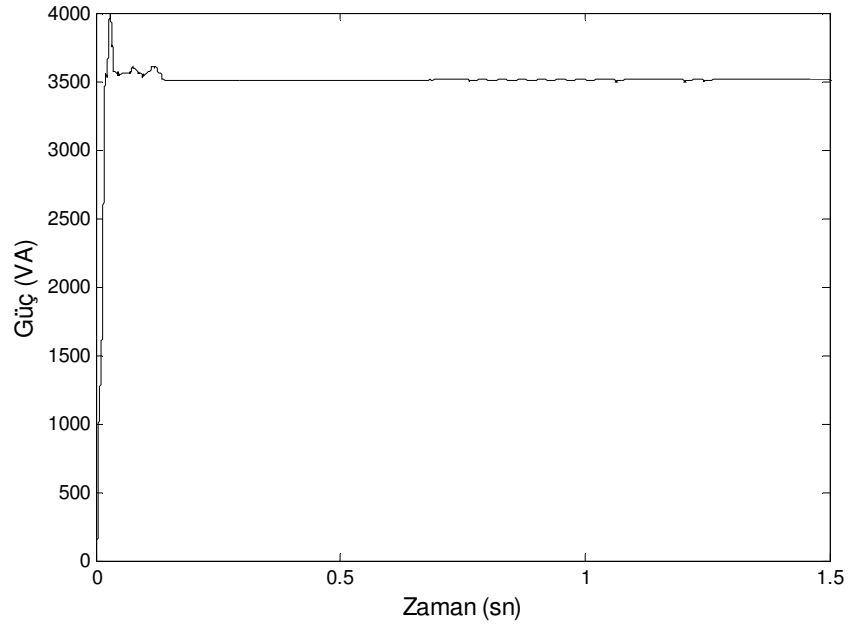


Şekil 5.26. Yük Akımı ( $P=1000$  W, kapasitif yük,  $t=0-0,2$  sn)

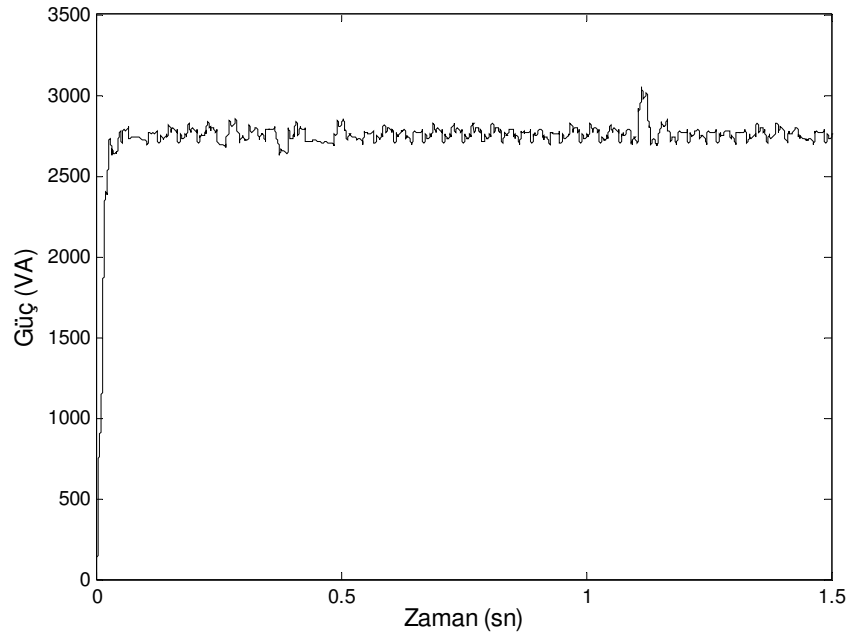


Şekil 5.27. Yük Akımı ( $P=1000$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 1000 W olması halinde (Şekil 5.26.-5.27.) akımın alternatif değerinin uç kısımlarında daha fazla noktada değerler yakalanmış, fakat endüktif yük akımına göre birkaç noktada ani kaçmalar olmuştur. Efektif değer ise kısa bir zamanda sabit bir değere ulaşmıştır.

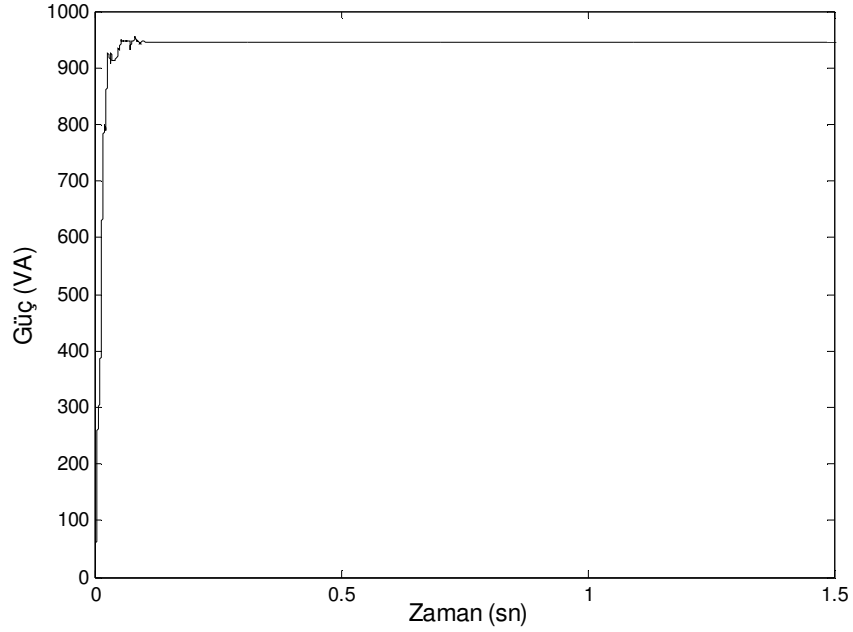


**Şekil 5.28.** Güç Eğrisi ( $P=4500$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)



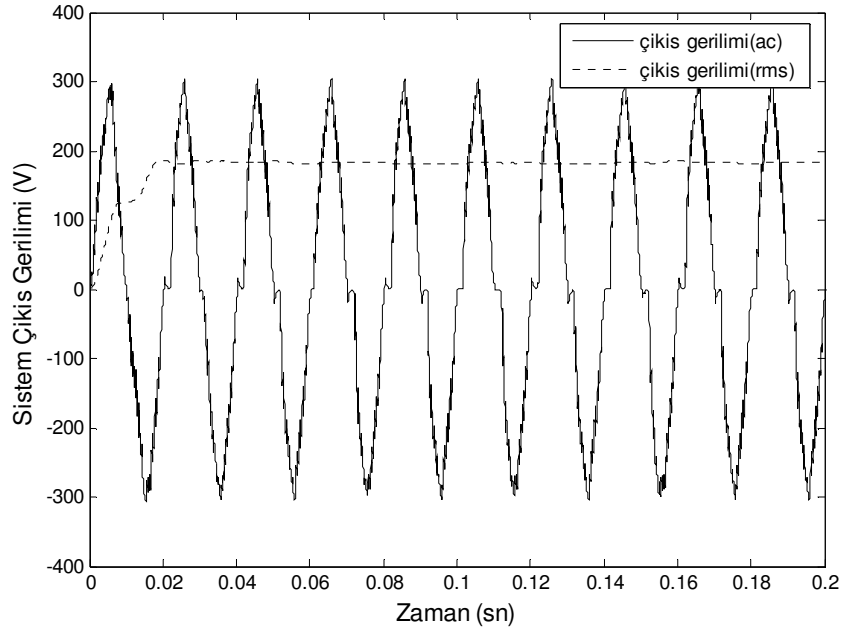
**Şekil 5.29.** Güç Eğrisi ( $P=3000$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Sistem çıkışındaki yükün aktif gücünün dolayısıyla görünür gücünün değişimi ile çıkış gücündeki dalgalanmalar Şekil 5.28.-5.30'da gösterilmiştir. Verilen grafiklere göre güçteki azalmaya bağlı olarak eğrideki dalgalanmalar Şekil 5.29. hariç azalmış ve eğrinin sabit bir değere ulaşma süreci kısalmıştır. Şekil 5.29.'da ani dalgalanmalar oluşmuştur, fakat bu dalgalanmalar küçük bir aralıkta meydana gelmiştir.

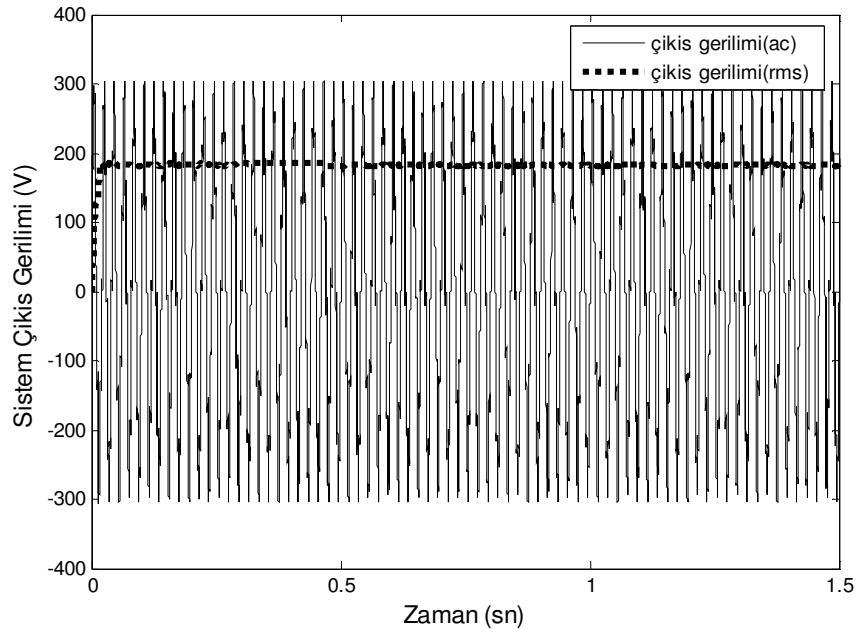


**Şekil 5.30.** Güç Eğrisi ( $P=1000$  W, kapasitif yük,  $t=0-1,5$  sn)

Benzetimini yaptığımız modelde 5 kVA güce sahip transformatörün çıkışına omik bir yükün bağlanması durumunda aktif gücün, 4500 W, 3000 W ve 1000 W değerleri için, çıkış gerilimi eğrilerinin alternatif ve efektif değerleri Şekil 5.31-5.36 arasında, yük akımı eğrilerinin alternatif ve efektif değerleri Şekil 5.37-5.42. arasında, çıkış gücü eğrileri ise Şekil 5.43-5.45 arasında gösterilmiştir.

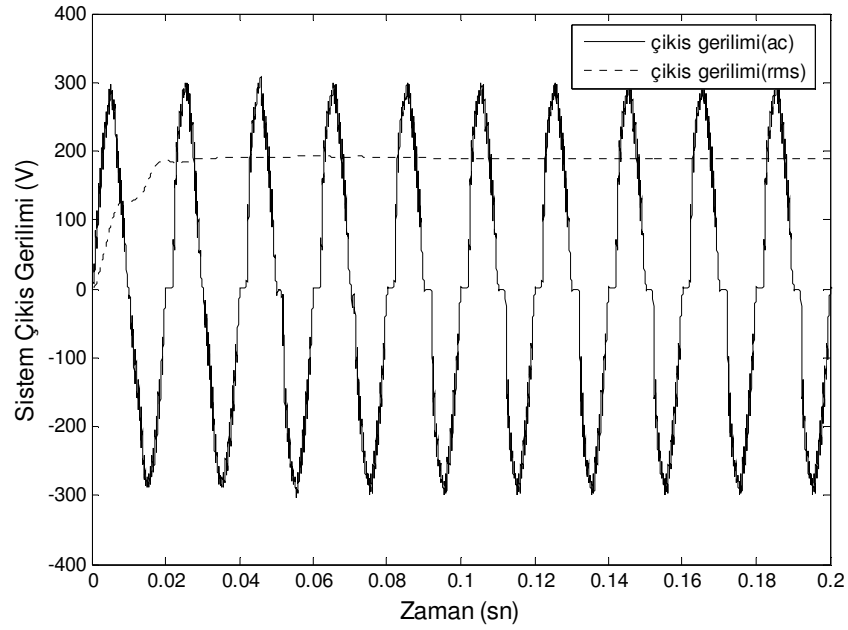


Şekil 5.31. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, omik yük,  $t=0-0,2$  sn)

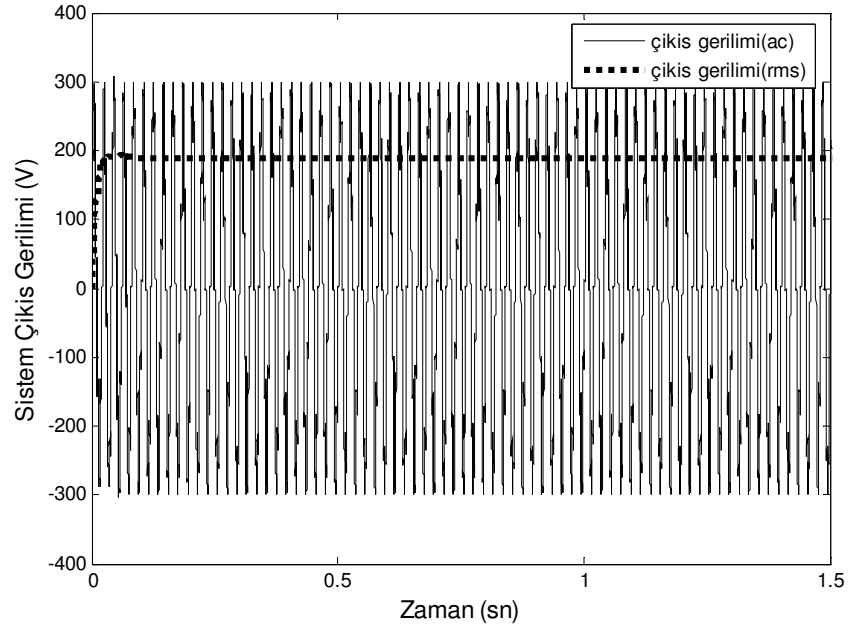


Şekil 5.32. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

Şekil 5.31.-5.32.'den görüleceği gibi çıkış geriliminde birkaç noktada kaçma olmasına rağmen eğri sinüse yakın bir formdadır. Gerilimin efektif değeri başlangıç anındaki bir yükselmeden sonra kısa bir sürede sabitlenmiştir. Uç geriliminde endüktif yüke göre düşüş vardır.

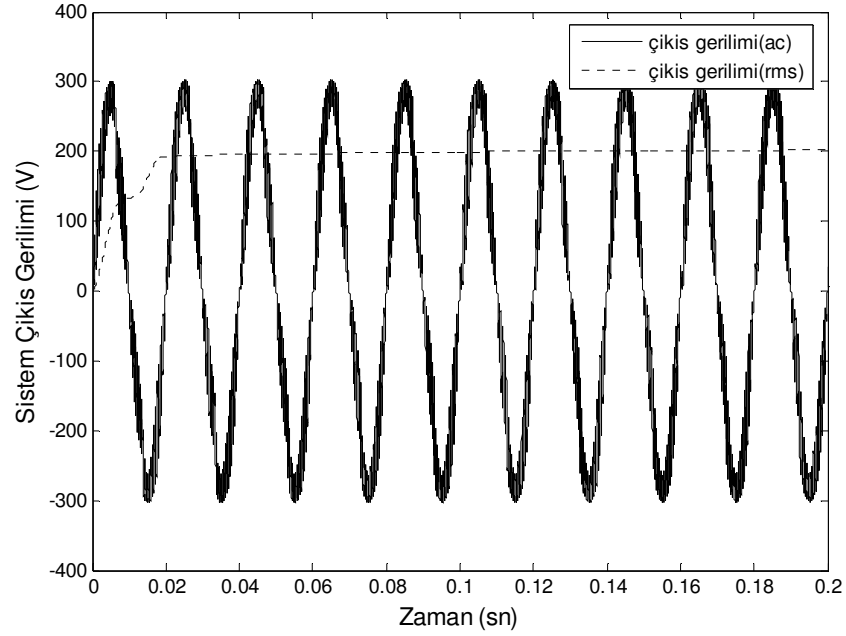


Şekil 5.33. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, omik yük,  $t=0-0,2$  sn)

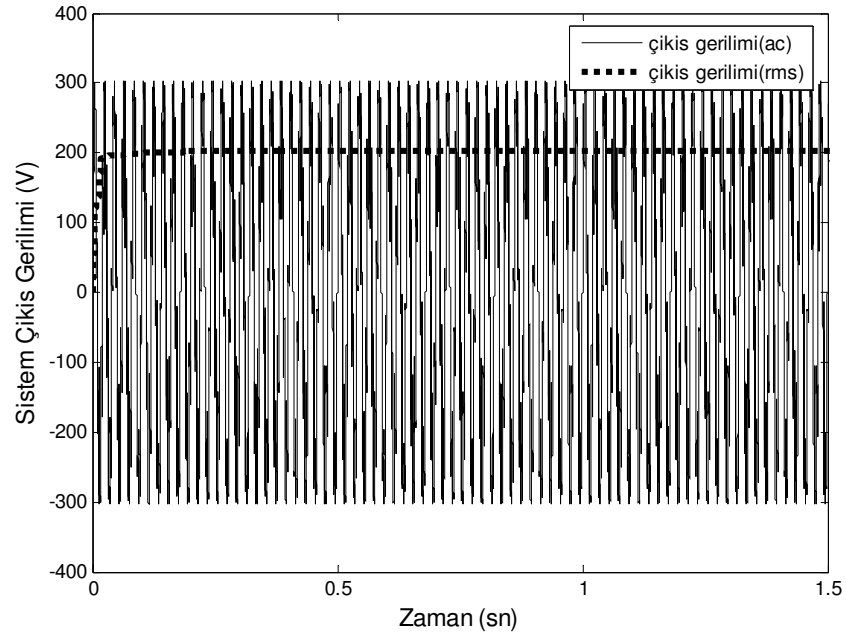


Şekil 5.34. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 3000 W olması durumunda ise (Şekil 5.33.-5.34.) gerilim daha düzgün bir hal almış ve daha fazla noktada yakalanmıştır. Efektif değer ise kısa bir sürede sabitlenmiştir.

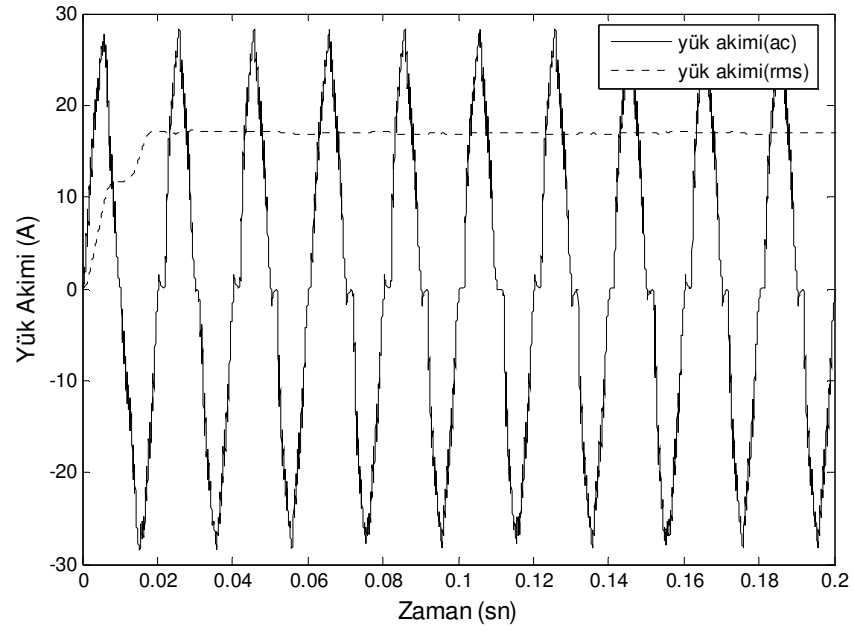


Şekil 5.35. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, omik yük,  $t=0-0,2$  sn)

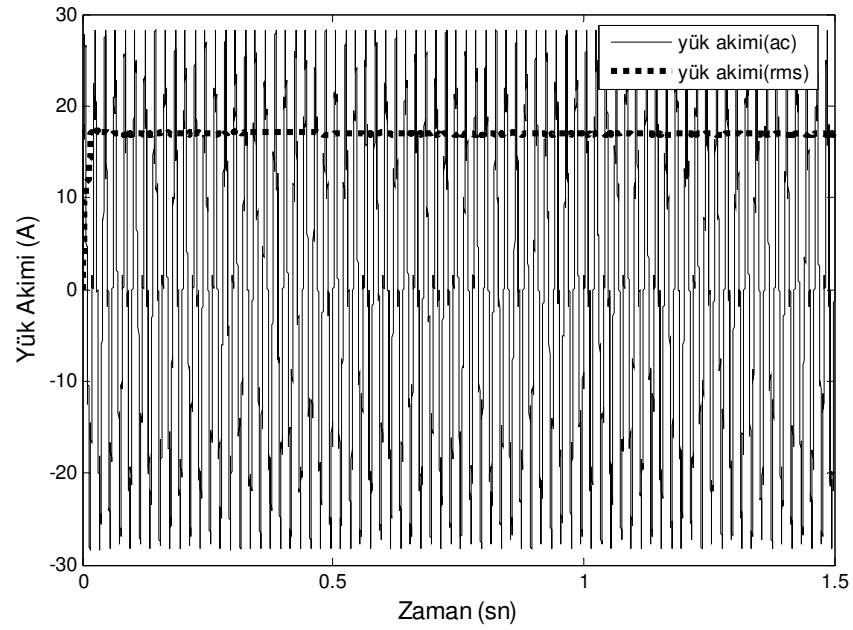


Şekil 5.36. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 1000 W olması durumunda (Şekil 5.35.-5.36.) ise gerilim oldukça belirgin bir sinüs eğrisi halini almıştır. Eğri uç kısımlarda daha fazla noktada yakalanarak düzgün bir sinüs şeklini oluşturmuştur. Gerilimin efektif değeri de daha kısa bir sürede sabit bir değere ulaşmıştır.

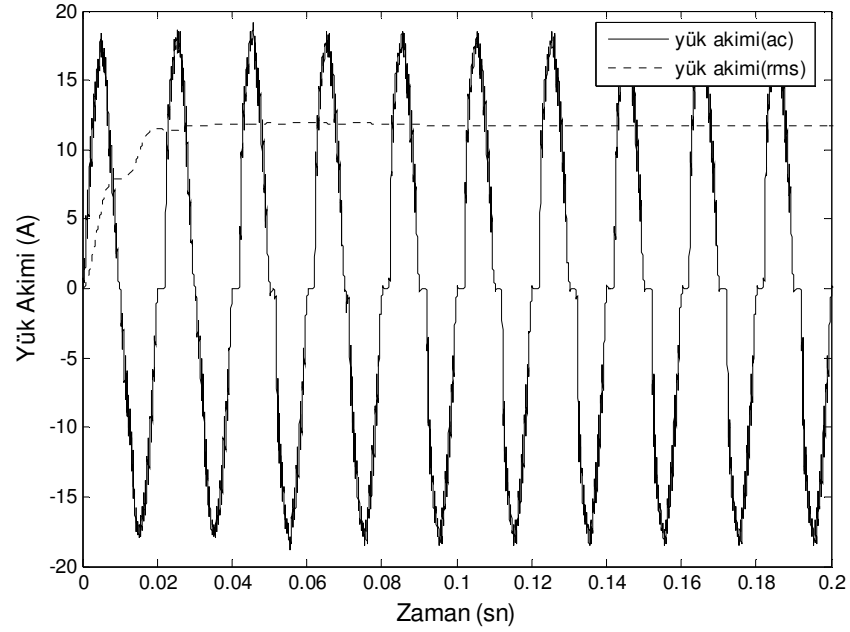


Şekil 5.37. Yük Akımı ( $P=4500$  W, omik yük,  $t=0-0,2$  sn)

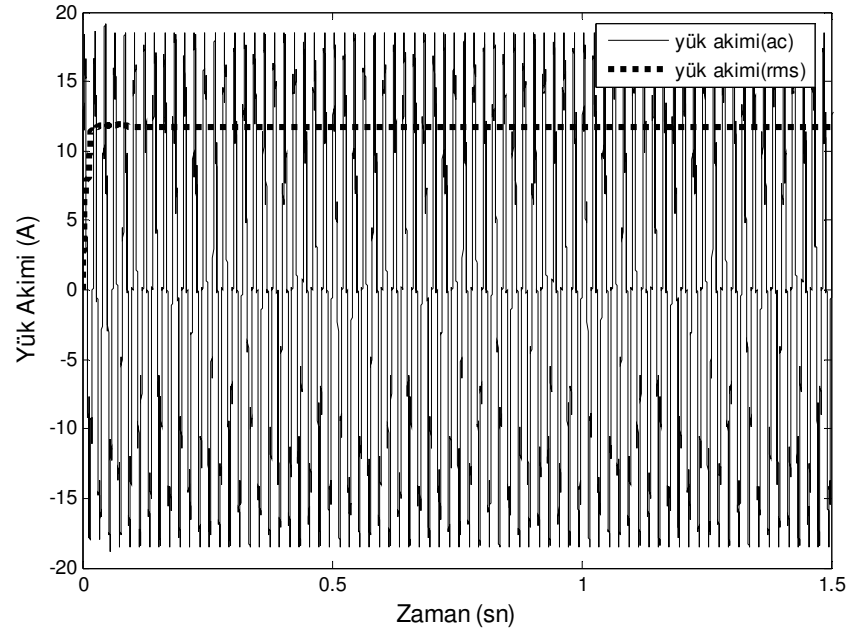


Şekil 5.38. Yük Akımı ( $P=4500$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

Şekil 5.37. ve 5.38.'den görüleceği gibi sistem çıkışına bağlanan yük içinden geçen akımın değişimi birkaç noktada ani kaçmalarla beraber sinüse yakın bir eğridir. Akımın efektif değeri ise başlangıçta hızlı bir artış sonucunda sabitlenmiştir.

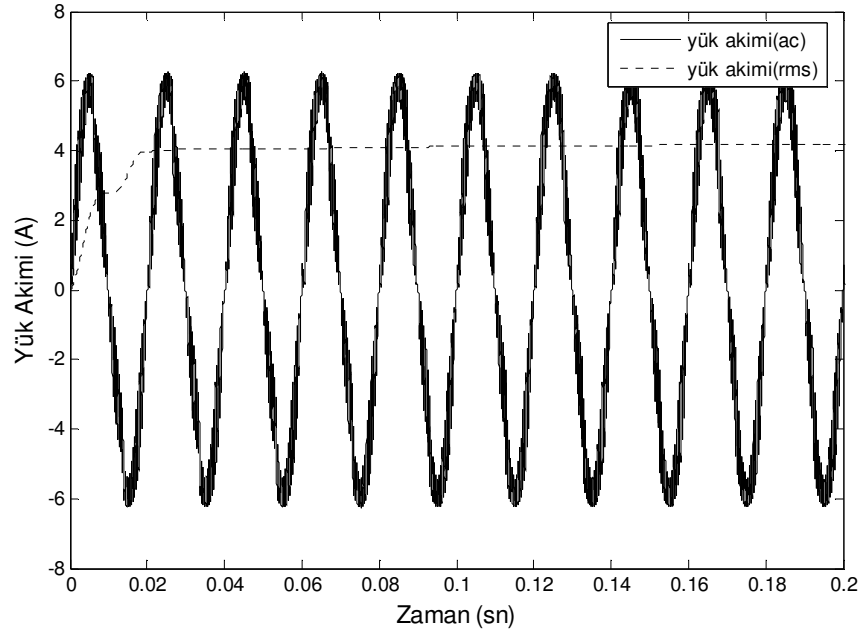


Şekil 5.39. Yük Akımı ( $P=3000$  W, omik yük,  $t=0-0,2$  sn)

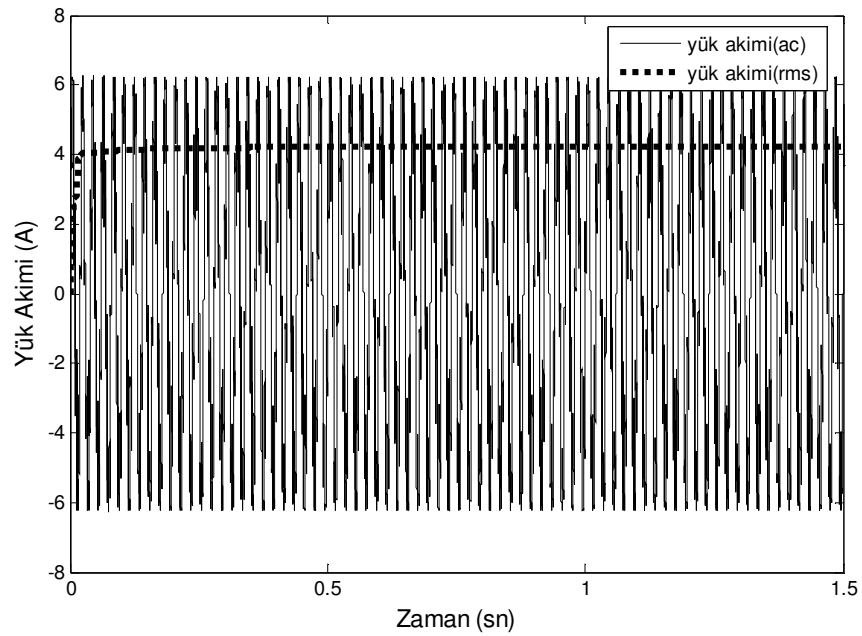


Şekil 5.40. Yük Akımı ( $P=3000$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

Aktif gücün 3000 W olması durumunda ise (Şekil 5.39-5.40) akımın şekli biraz daha düzelmiş ve sinüs formuna daha çok yaklaşmıştır. Ayrıca akımın efektif değeri daha kısa bir sürede sabitlenmiştir.

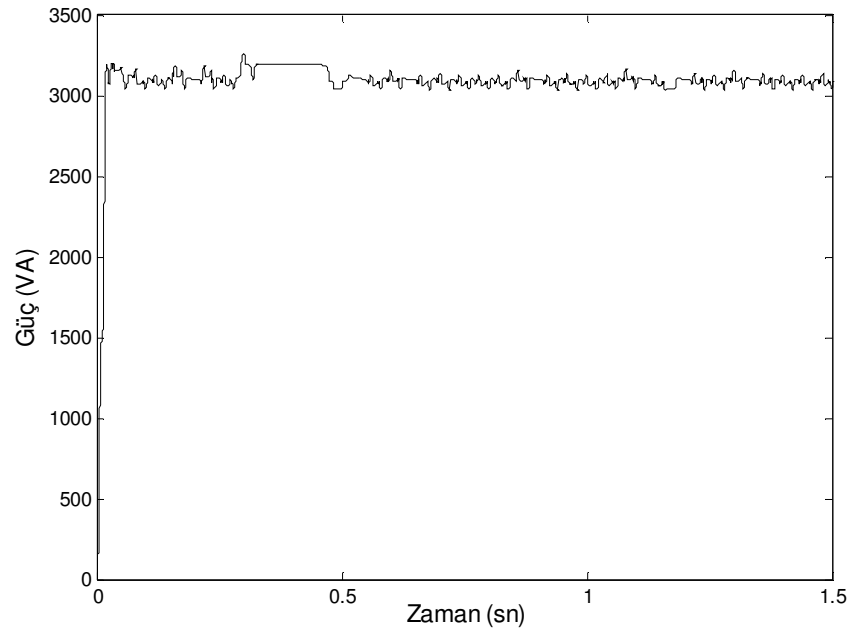


Şekil 5.41. Yük Akımı ( $P=1000$  W, omik yük,  $t=0-0,2$  sn)

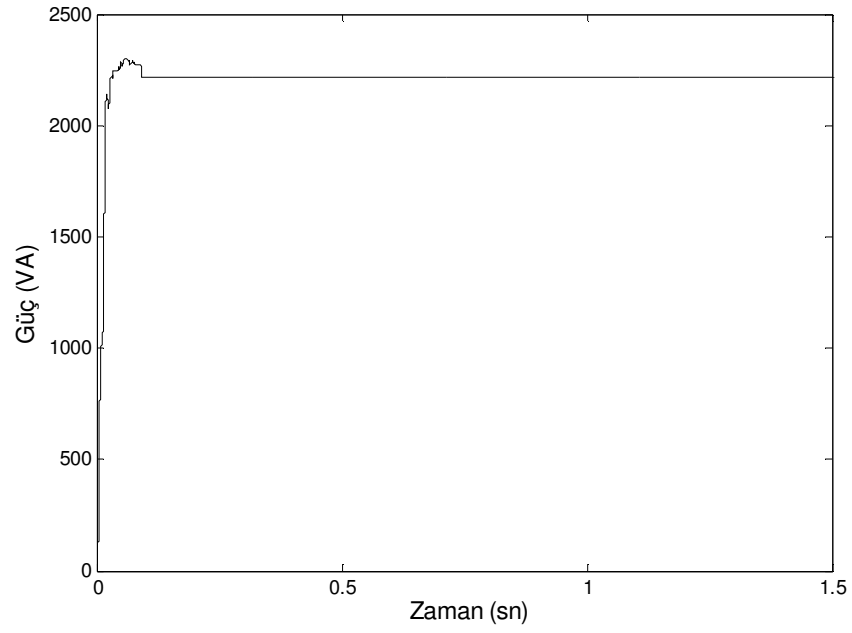


Şekil 5.42. Yük Akımı ( $P=1000$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

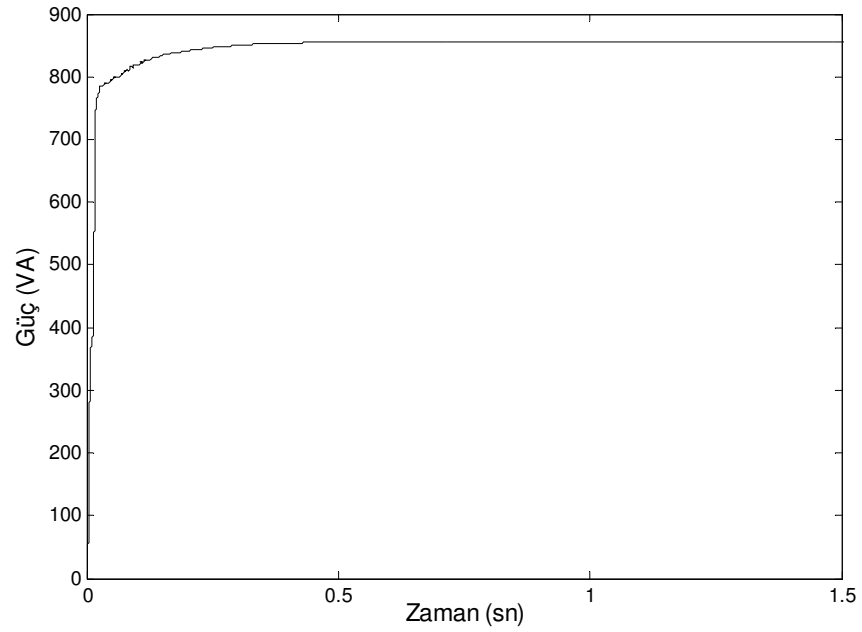
Aktif gücün 1000 W olması halinde (Şekil 5.41.-5.42.) eğrinin uç noktaları daha da yuvarlak bir şekil alarak oldukça düzgün bir sinüs elde edilmiştir. Efektif değer ise ani bir yükseliş ile çok kısa bir sürede sabit değere ulaşmıştır.



Şekil 5.43. Güç Eğrisi ( $P=4500$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)



Şekil 5.44. Güç Eğrisi ( $P=3000$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)



**Şekil 5.45.** Güç Eğrisi ( $P=1000$  W, omik yük,  $t=0-1,5$  sn)

Sistem çıkışındaki yükün aktif gücünün dolayısıyla görünür gücünün değişimi ile çıkış gücündeki dalgalanmalar Şekil 5.43-5.45’de gösterilmiştir. Verilen grafiklere göre güçteki azalmaya bağlı olarak egrideki dalgalanmalar azalmış ve eğrinin sabit bir değere ulaşma süresi kısalmıştır. Özellikle Şekil 5.45’de güç eğrisi çok kısa bir sürede dalgalanma olmadan sabit bir değere ulaşmıştır.

## 5.2. Deneysel Çalışma

Dördüncü bölümde bir yakıt pilinin karakteristiğini ifade etmek için kullanılan I-V eğrisi Şekil 4.2 ile gösterilmiştir. Bu bölümde ise yapılan deneysel ölçümlerle 1,2 W'lık bir PEM yakıt pilinin akım-gerilim karakteristiği çizilecektir. Ayrıca oluşturulacak P-t grafiğinin altında kalan alan hesabı ile de yakıt pilinin gücü hesaplanarak verimliliği hakkında yorum yapılacaktır.

Deneysel ölçümler yapabilmek için bir PEM yakıt pilinin bulunduğu deney seti (Şekil 5.46) kullanılmıştır. 3. bölümde bir PEM yakıt pilinin çalışması kimyasal denklemler ve şekiller yardımı ile anlatılmıştır. Anlatılanlar doğrultusunda bir PEM yakıt pilinin çalışması için gerekli olan hidrojen, deney setinde elektroliz yolu ile elde edilmiştir. Elektroliz için gerekli olan doğru akım ise bir güneş panelinin çıkışı ile sağlanmıştır. Böylelikle havadaki oksijen ve elektroliz ile elde edilen hidrojen yakıt pili içerisinde anot ve katotta meydana gelen reaksiyonlar sonucu birleşerek elektrik enerjisi açığa çıkarmıştır.

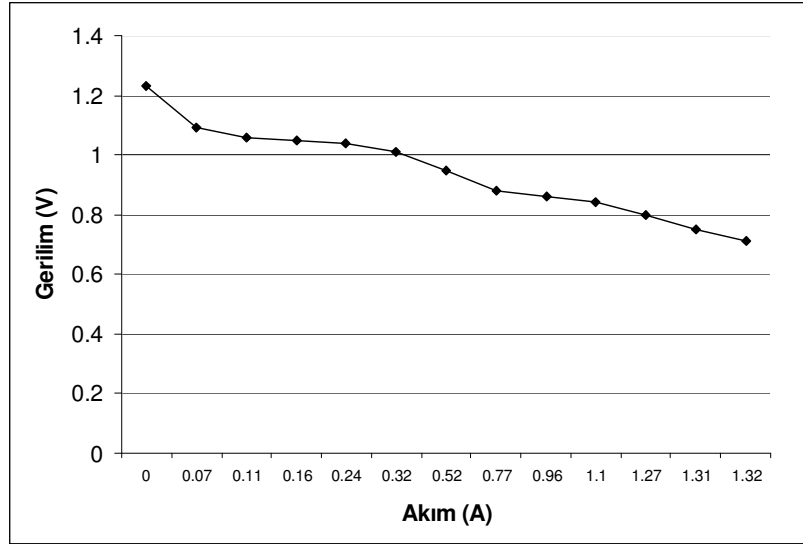


Şekil 5.46. PEM yakıt pili deney seti

Deney için yakıt pilinin çıkış uçlarına 0,14-20Ω arasında değişen dirençler (Tablo 5.1.) bağlanarak yükün uçlarında oluşan gerilim ve yük üzerinden geçen akım değerleri ölçü aletleriyle kaydedilmiştir. Ölçüm değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Bu değerler yardımı ile oluşturulan PEM yakıt pilinin akım-gerilim karakteristiği ise Şekil 5.47'de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** PEM yakıt pili ile alınan ölçüm değerleri

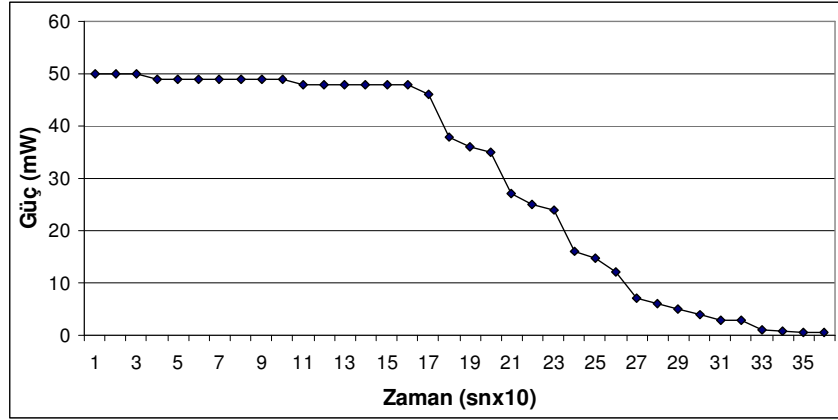
| Direnç ( $\Omega$ ) | Akım (A) | Gerilim (V) |
|---------------------|----------|-------------|
| 0,14                | 1,32     | 0,71        |
| 0,16                | 1,31     | 0,75        |
| 0,2                 | 1,27     | 0,8         |
| 0,25                | 1,1      | 0,84        |
| 0,33                | 0,96     | 0,86        |
| 0,5                 | 0,77     | 0,88        |
| 1                   | 0,52     | 0,95        |
| 2                   | 0,32     | 1,01        |
| 3                   | 0,24     | 1,04        |
| 4                   | 0,16     | 1,05        |
| 5                   | 0,11     | 1,06        |
| 6                   | 0,07     | 1,09        |
| 7                   | 0        | 1,23        |
| 8                   | 0        | 1,22        |
| 9                   | 0        | 1,21        |
| 10                  | 0        | 1,22        |
| 15                  | 0        | 1,22        |
| 20                  | 0        | 1,22        |

**Şekil 5.47.** 1,2 W'lık bir PEM yakıt pili karakteristiği

Ayrıca; deney seti üzerinde belirli zaman aralıkları ile yakıt pilinin çıkışındaki akım ve gerilim değerleri ölçü aletleri ile kaydedilmiştir. Böylelikle sistemin girişine verilen güç ve çıkışta harcanan gücün oranı ile bu sistemin verimliliği hakkında bilgi edinilmiştir.

Deney setinde yakıt pili için gerekli olan hidrojenin elektroliz ile elde edilme sürecinde harcanan enerji ile elde edilen hidrojenin bir yük üzerinde elektrik enerjisine dönüşerek harcanması esnasında harcanan enerji hesaplanarak sistem verimi yaklaşık olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlara göre deney seti içerisindeki yakıt pilinin yaklaşık olarak % 68 verime sahip olduğu bulunmuştur. Ölçüm değerlerine göre çizilen P-t grafiği Şekil 5.48’de verilmiştir.



Şekil 5.48. P-t grafiği

Dördüncü bölümde bir PEM yakıt pilinin matematiksel modeli Matlab-Simulink programında blok diyagramları ile gösterilmiş ve bu modelin benzetimi yapılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar 1,2 W yakıt pilinin teknik verileri bulunmadığından karşılaştırılamamıştır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde kullanılan yakıtların tükenebilme endişesi ve sınırlı oluşları nedeniyle temiz ve tükenmez enerji kaynaklarına olan ihtiyaç sonucunda alternatif enerji kaynaklarına özellikle de hidrojen enerjisine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri konusunda da yaygın olarak, araştırmalar yapılmaktadır. Yakıt pili türleri ile ilgili yeterli Türkçe kaynak bulunmaması nedeniyle, yapılan bu çalışmada yakıt pili türlerine geniş bir yer verilerek bu konuda derleme yapılmıştır.

Yakıt pillerinin optimizasyonunu ve tasarımını yapabilmek için matematiksel modeller ve bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmektedir. Bir PEM yakıt pilinin gerilim değişimini tahmin etmek, PEM yakıt pili sistemlerinin performansını öğrenip iyileştirme yapabilmek için farklı matematiksel modeller kurulmaktadır.

PEM yakıt pili için geliştirilen modellemeler incelendiğinde, modellemelerin, genellikle PEM yakıt pilinin iç yapısı detaylı bir şekilde ele alınarak, yapıldığı ve parametrelerin PEM yakıt pilinin performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği görülmektedir. PEM yakıt pilinin bir elektrik sisteminde üreteç olarak kullanılması durumundaki performansı üzerine yapılan modellemelerin yetersizdir. Bu nedenle, bu tezde bir PEM yakıt pili sistemi güç düzenleme birimi ile birlikte modellenmiştir.

Matlab-Simulink yazılımı ile gerçekleştirilen 5 kVA'lık bir PEM yakıt pili sistem modeli ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yakıt pillerinin değişken yükleri beslemesi gözlenmiştir. Yakıt pilinin çıkışına bağlanan değişken yükler ve bu yüklerin değişken güç ihtiyaçlarına göre yakıt pilinin verdiği cevaplar şekillerle gösterilmiştir. Bu çalışmada tek fazlı bir sistemin modellenmesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlarda ise, bir PEM yakıt pilinin verimi yaklaşık olarak %68 olarak bulunmuştur. Bir yakıt pili sisteminin çevreye zararlı bir etkisinin olmayışı ve elektroliz için de güneş enerjisinin kullanıldığı düşünülürse, böyle bir sistemin hesaplanan değerden daha fazla bir verimle çalıştığı söylenebilir.

İleriki çalışmalarda, elde edilen akım ve gerilimlerin harmonik analizlerinin incelenmesi yapılabilir. Ayrıca inverter kontrolü yapılarak güç düzenleme biriminin iyileştirilmesi ile daha düzgün bir sinüzoidal akım ve gerilimin elde edilebilir. Bu modelin üç fazlı bir sistemde kullanılabilirliği incelenebilir. Böyle bir sistemin şebeke ile paralel çalışması halinde meydana gelebilecek durumlar ve şebeke arızalarının sistem üzerine etkileri de araştırılabilir.

Her geçen gün öneminin daha fazla arttığı hidrojen enerjisi ve yakıt pilleri konusunda dünyadaki gelişmeler de takip edilerek, ülkemizde de bu konu ile ilgili çalışmalar, öncelikli Ar-Ge çalışmaları arasında yer almalıdır. Yakıt pillerinin güç üretim sistemleri olarak kullanılması

ve bu sistemlerin verimlerinin arttırılması yönünde çalışmalar yapılmalıdır. Yapılan çalışmaların arttırılması sonucunda, yakıt pillerinden elektrik elde etme maliyeti düşürülebilir ve yaygın olarak kullanılmaları gerçekleştirilebilir. Yakıt pilleri ile birlikte diğer alternatif enerji teknolojilerinin de kullanımının yaygınlaştırılması ile ancak dünyadaki enerji sorununa çözüm bulunabilir.

## KAYNAKLAR

1. Kurtuluş, G., Tabakoğlu, F.Ö., Türe, İ.E., ‘Türkiye’de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve UNIDO-ICHET’, 3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi, Mart, 2007.
2. Oğuz, A.E., ‘Hidrojen Yakıt Pilleri ve PEM Yakıt Pilinin Analizi’, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Nisan 2006, Ankara.
3. Pravadaloğlu, S., ‘Yakıt Hücresi Beslemeli Kesintisiz Güç Kaynağı’, 3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi, Mart, 2007.
4. Aktaş, M., ‘Yakıt Hücreleri’, Bitirme tezi, Kocaeli Üniversitesi.
5. Dicks A., Larminie, J., ‘Fuel Cell Systems Explained’, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, İngiltere, 2000.
6. Aydın, M., ‘PEM Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellemesi’, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Ocak 2007, İstanbul.
7. Özveren, U., ‘PEM Yakıt Hücrelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi’, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2006.
8. Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., ‘Yakıt Pillerinde Hidrojen Kullanımı’, 1.Ulusal Hidrojen Kongresi, 16 Temmuz 2002, Ankara.
9. Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., ‘Yakıt Pilleri ve Uygulamaları’, 3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi, Ağustos, 2002.
10. Yamada, K., ‘Energy Resource Issue and Direct Methanol Type Fuel Cell Battery’, SCEJ 33rd Fall Meeting, Hamamatsu, Japonya, 12-14 Eylül 2000.
11. Lamy, C., Leger, L.G., “ Interfacial Electrochemistry”, Marcel Dekker, 48, New York, 1999.
12. ‘DMFC Information’, <http://www.andrew.cmu.edu/user/jfagan/sumdmfc2.html>.
13. ‘Plamen Electrochemical Engineering Group’, <http://www.unm.edu/~elchem>.
14. ‘2002 Fuel Cell Seminar’, [http://www.gofuelcell.com/agenda\\_thursday.html](http://www.gofuelcell.com/agenda_thursday.html).
15. Appleby, A. J., ‘Fuel Cells: Trends In Research And Applications’, Hemisphere Publishing Corporation, 1987.
16. Türker, B., İnan, A., Trabulus, S., Yakıt Pili Çeşitleri, 3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi, Sayı 126, Kasım, 2004.
17. Baş, M.E., ‘Katı Oksit Yakıt Pilleri’, bitirme tezi, Uludağ Üniversitesi, 2005, Bursa.
18. Maher A.R., Sadiq Al-Baghdadil, ‘Modelling Of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based On Semi-Empirical Equations’, Renewable Energy, 30, (2005), 1587-1599.

19. Fmoun, P., Member, S., Gemmen, R. S., Electrochemical Circuit Model of a PEM Fuel Cell, IEEE, 2003.
20. Khan, M., J., Iqbal, M. T., Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator, Fuel Cells, 2005, 5, No 1.
21. Tanrioven, M., Alam, M.S., Reliability modeling and analysis of stand-alone PEM fuel cell power plants, Renewable Energy, 31, (2006), 915-933.
22. Tao, W.Q., Min, C.H., Liu, X.L., He, Y.L., Yin, B. H., Jiang, W., 'Parameter Sensitivity Examination and Discussion of PEM Fuel Cell Simulation Model Validation. Part I. Current Status of Modeling Research and Model Development', Journal of Power Sources, 2006.
23. Min, C.H., He, Y.L., Liu, X.L., B. H., Jiang, W., Tao, W.Q., 'Parameter Sensitivity Examination and Discussion of PEM Fuel Cell Simulation Model Validation. Part II. Results of Sensitivity Analysis and Validation of The Model', Journal of Power Sources, 2006.
24. Hu, M., Gu, A., Wang, M., Zhu, X., Yu, L., 'Three Dimensional Two Phase Flow Mathematical Model for Fuel Cell: Part I. Model Development', Energy Conversion&Management, 2004.
25. Rowe,A., Li, X., 'Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells', Journal of Power Sources, 2001.
26. Amphlett, J.C., Mann, R.F., Peppley, B.A., Roberge, P.R., Rodrigues, A., 'A Practical PEM Fuel Cell Model for Simulating Vehicle Power Sources', Battery Conference on Applications and Advances, Proceeding of The Tenth Annual, 1995, IEEE.
27. Lemes, Z., Vath, A., Hartkopf, Th., Mancher, H., ' Dynamic Fuel Cell Models and Their Application in Hardware in The Loop Simulation', Journal of Power Sources, 2006.
28. Padulles, J., Ault, G.W., McDonald, J.R., 'An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation', Journal of Power Sources, 2000.
29. Zhu, Y., Tomsovic, K., 'Development of Models for Analyzing The Load-Following Performance of Microturbines and Fuel Cells', Electric Power Systems Research, 2002.
30. Famouri, P., Gemmen, R.S., 'Electrochemical Circuit Model of A PEM Fuel Cell', Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2003.

## ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 2.1. (a)Suyun Elektrolizi. Su; Bir Elektrik Devresinden Geçerek Hidrojen ve Oksijene Ayırılır.(b) Küçük Bir Akım Akar, Hidrojen ve Oksijen Tekrar Birleşir. .... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.2. Bir Yakıt Pilinin Temel Katot-Elektrot-Anot Yapısı .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.3. Bir Asit Elektrolit Yakıt Pili İçin Elektrot Reaksiyonları ve Yük Akışı... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.4. Bir Alkalın Elektrolit Yakıt Pili İçin Elektrot Reaksiyonları ve Yük Akışı.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.5. Bir Rüzgar Türbini..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.6. Yakıt Pilinin Giriş ve Çıkışları ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.7. Tipik Bir Düşük Sıcaklık, Hava Basıncılı Yakıt Pili Gerilimi..**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 2.8. Yaklaşık 800 °C’de Çalışan Tipik Bir Hava Basıncılı Yakıt Pili Gerilimi **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.1. PEM Yakıt Pili..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.2. Çift Kutuplu Levhalardan Yapılmış Yakıt Pili Yığını Ve Membran Elektrot Birimi ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.3. Pem Yakıt Pili ve Bileşenleri ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.4. Gaz Difüzyon Katmanının Yapısı..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.5. Akış Alan Konfigrasyonları (a)Paralel Gaz Kanalları (b)Serpantin Tipi Akış Kanalı (c)Mirrored Akış Alanı (d)Parçalı Akış Alanı (e)Akış Kanalsız Gaz Difüzyon Katmanı (f)Metal Ağ Akış Alanı. .... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.6. Alkalın Yakıt Pili ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.7. Fosforik Asit Yakıt Pili ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.8. Erimiş Karbonat Yakıt Pili..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 3.9. Katı Oksit Yakıt Pili..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 4.1. Tek Bir Pem Yakıt Pilinin Şematik Gösterimi.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 4.2. Tek Bir Pem Yakıt Pilinin Şematik Gösterimi.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 4.3. Temel Bir Yakıt Pili Sisteminin Elemanları .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

- Şekil 4.4. Bir Pem Yakıt Pili Sisteminin Blok Diyagramları .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 4.5. Tek Yakıt Pili Modeli (Yakıt Pili Alt Sistemi) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 4.6. Güç Düzenleme Birimi ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.1. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, Endüktif Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.2. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.3. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-0,2$ sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.4. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.5. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.6. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.7. Yük Akımı ( $P=4500$  W, Endüktif Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.8. Yük Akımı ( $P=4500$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.9. Yük Akımı ( $P=3000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.10. Yük Akımı ( $P=3000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.11. Yük Akımı ( $P=1000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.12. Yük Akımı ( $P=1000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.13. Güç Eğrisi ( $P=4500$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.14. Güç Eğrisi ( $P=3000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.15. Güç Eğrisi ( $P=1000$  W, Endüktif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.16. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.17. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.18. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.19. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.20. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.21. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.22. Yük Akımı ( $P=4500$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.23. Yük Akımı ( $P=4500$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.24. Yük Akımı ( $P=3000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.25. Yük Akımı ( $P=3000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.26. Yük Akımı ( $P=1000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.27. Yük Akımı ( $P=1000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.28. Güç Eğrisi ( $P=4500$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.29. Güç Eğrisi ( $P=3000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.30. Güç Eğrisi ( $P=1000$  W, Kapasitif Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.31. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, Omik Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

Şekil 5.32. Çıkış Gerilimi ( $P=4500$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

- Şekil 5.33. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, Omik Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.34. Çıkış Gerilimi ( $P=3000$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.35. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, Omik Yük,  $T=0-0,2$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.36. Çıkış Gerilimi ( $P=1000$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn).....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.37. Yük Akımı ( $P=4500$  W, Omik Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.38. Yük Akımı ( $P=4500$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.39. Yük Akımı ( $P=3000$  W, Omik Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.40. Yük Akımı ( $P=3000$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.41. Yük Akımı ( $P=1000$  W, Omik Yük,  $T=0-0,2$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.42. Yük Akımı ( $P=1000$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.43. Güç Eğrisi ( $P=4500$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.44. Güç Eğrisi ( $P=3000$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.45. Güç Eğrisi ( $P=1000$  W, Omik Yük,  $T=0-1,5$  Sn) .....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.46. Pem Yakıt Pili Deney Seti ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.47. 1,2 W'lık Bir Pem Yakıt Pili Karakteristiği.....**HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**
- Şekil 5.48. P-T Grafiği ..... **HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.**

### **TABLO LİSTESİ**

|                                                           |                                         |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Tablo 3.1. Yakıt Pili Türlerinin Karşılaştırılması .....  | <b>HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.</b> |
| Tablo 4.1. Yakıt Pili Model Parametreleri .....           | <b>HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.</b> |
| Tablo 4.2. Reaktant Akışı Model Parametreleri             | <b>HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.</b> |
| Tablo 5.1. Pem Yakıt Pili İle Alınan Ölçüm Değerleri..... | <b>HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.</b> |

**ÖZGEÇMİŞ**

1982 yılında Elazığ'da doğdu. Lise eğitimini, 2000 yılında Elazığ Balakgazi Lisesi'nde tamamladı. Aynı yıl Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2004 yılında bu bölümden mezun olup, aynı yıl Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2006 yılında Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'na yatay geçiş yaptı. Dicle Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde 2005 yılı Aralık ayından beri araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.