

766294

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAKIT PİLLERİNİN TERMO-EKONOMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ahmet Şafak AYKUT
(508021001)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Kasım 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Kasım 2005

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT (İ.T.Ü.) *Oğuz S. Sogut*
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ahmet DURMAYAZ (İ.T.Ü.) *Ahmet Durmayaz* 22/11/2005
Doç.Dr. Osman Azmi ÖZSOYSAL (İ.T.Ü.) *Osman Azmi Ozsoysal*

KASIM 2005

ÖNSÖZ

Yapılan çalışmada bir polimer elektrolit yakıt pilinin termo-ekonomik analizi yapılmıştır. Termodinamik anlamda ve ekonomik anlamda yakıt pili performansına ait parametreler incelenmiştir.

Her şeyden önce bana bu canı bağışlayan ve bu günlere gelmeyi nasip eden yüce Allah'a, hayattaki en büyük hazinem olan aileme, üniversiteye gelinceye kadar temel veren ilk ve orta öğretim öğretmenlerime, lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarıma, bu konu üzerinde çalışmama izin veren ve çalışma boyunca yakın ilgisini asla esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT'e teşekkürü bir borç bilirim.

Kasım, 2005

Ahmet Şafak AYKUT



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3. TARİHÇE	12
2.1. Yakıt Pili Teoreminin Ortaya Çıkışı	12
4. TANIM	15
4.1. Yakıt Pilinin Tanımlanması	15
5. TEMEL YAPI VE ÇALIŞMA İLKESİ	19
5.1. Elektroliz ve Gaz Piline Geçiş	19
5.2. Galvanik Öğeler	21
5.2.1. Galvanik öge olarak yakıt pilleri	21
5.2.2. Tersine elektroliz olarak yakıt pilleri	22
5.3. Yakıt Pilinin Yapısı	22
5.3.1. Elektrik akımı sınırlayan unsurlar	25
5.3.2. Hücrelerin seri bağlanması	27
5.3.3. Yakıt pili sistemindeki diğer parçalar	29
6. KATI POLİMER YAKIT PİLLERİ	30
6.1. Giriş	30
6.2. Polimer Elektrolit Zar Yapısı	31
6.2.1. Elektrolit yapısı	31
6.2.2. Elektrot yapısı	34
6.3. Gelecekle İlgili Beklentiler	36

7. DİĞER YAKIT PİLİ TÜRLERİ VE YAKIT PİLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	38
7.1. Giriş	38
7.2. Alkalın Yakıt Pilleri	39
7.3. Fosforik asitli Yakıt Pilleri	41
7.4. Eriyik Karbonat Yakıt Pilleri	42
7.5. Katı Oksit Yakıt Pilleri	43
7.6. Beş Yakıt Pili Teknolojisinin Karşılaştırılması	45
8. GEMİLERDE YAKIT PİLİ UYGULAMALARI	48
8.1. Denizcilik Sektöründe Emisyon Problemi	48
8.2. Gemi Makineleri Pazarında Yakıt Pillerinin Yeri	49
8.3. Yakıt Pillerinin Dizel Makineler ve Gaz Türbinleriyle Kıyaslanması	50
8.3.1. Isıl verim ve yakıt tüketimi	50
8.3.2. Kısmi yük verimi	52
8.3.3. Ekonomi	53
8.3.4. Ağırlıksal ve hacimsel güç yoğunluğu	54
8.3.5. Bakım	56
8.3.6. Emisyon	56
8.3.6.1 NO _x emisyonları	56
8.3.6.2 SO _x emisyonları	57
8.3.6.1 CO ₂ emisyonları	58
8.3.7. Gürültü	59
8.4. Yakıt Pili Maliyetleri	59
8.4.1. Yatırım maliyetleri	60
8.4.2. İşletim maliyetleri	61
8.4.3. Altyapı	61
8.4.4. Sektördeki belirsizlikler	62
8.5. Yakıt Pillerinin Gemilerde Kullanımı	62
8.5.1. Yakıt pillerinin askeri uygulamaları	63
8.5.2. Yakıt pillerinin ticari uygulamaları	65
9. TERMO-EKONOMİK MODEL	68
9.1. Tanım	68
9.2. Termodinamik Analiz	69
9.2.1. İdeal performans	69
9.2.2. Çalışma performansı	71
9.2.3. Matematiksel model	73
9.3. Ekonomik Analiz	80

10. TEORİK BULGULAR VE SONUÇLAR	84
10.1. Sabit Çalışma Basıncında Çalışma Sıcaklığının Değişimi	84
10.2. Sabit Çalışma Sıcaklığında Çalışma Basıncının Değişimi	92
10.3. Ekonomik Parametrelerdeki Değişim	98
10.3.1. Mevcut koşullarda elektrik üretim maliyetleri	99
10.3.2. Yakıt pili maliyetlerindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi	100
10.3.3. Hidrojen maliyetindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi	101
10.3.4. Gelecekte ulaşılması hedeflenen elektrik üretim maliyetleri	102
10.4. Uygun Çalışma Koşullarının Belirlenmesi	102
11. SONUÇ	104
KAYNAKLAR	107
EKLER	114
EK-A Sabit Basınç Altında Performans Analizi Hesap Tabloları	114
EK-B Sabit Sıcaklıkta performans Analizi Hesap Tabloları	119
EK-C Sabit Basınç Altında Performans Eğrileri	124
EK-D Elektrik Üretim Maliyeti Hesap Tabloları	128
ÖZGEÇMİŞ	132

KISALTMALAR

AFC	: Alkalın yakıt pili (Alkaline Fuel Cell)
Cl₂	: Klor
CO	: Karbon monoksit
CO₂	: Karbondioksit
H₂	: Hidrojen
H₂O	: Su
HCl	: Hidroklorik asit
H₂SO₄	: Sülfirik asit
H₃PO₄	: Fosforik asit
ICR	: Ara soğutmalı üretici (Inter Cooled Recuperated)
ITSOFC	: Orta sıcaklıklı katı oksit yakıt pili (Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell)
KOH	: Potasyum hidroksit
LH₂	: Sıvılaştırılmış hidrojen (Liquefied Hydrogen)
LNG	: Sıvılaştırılmış doğalgaz (Liquefied Natural Gaz)
MCFC	: Eriyik karbonat yakıt pili (Molten Carbonate Fuel Cell)
Na	: Sodyum
NaCl	: Sodyum klorür (Sofra tuzu)
NaOH	: Sodyum hidroksit
NO_x	: Azot oksitler
O₂	: Oksijen
Pt	: Platin
PAFC	: Fosforik asitli yakıt pili (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEMFC	: Polimer elektrolit zar yakıt pili (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
SOFC	: Katı oksit yakıt pili (Solid Oxide Fuel Cell)
SO₄	: Sülfat
SO_x	: Sülfür oksitler
SPFC	: Katı polimer yakıt pili (Solid Polymer Fuel Cell)
VOC	: Uçucu organik bileşikler (Volatile Organic Compounds)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 : Yakıt içerisindeki gazların değişik yakıt pili çeşitleri için anlamları.....	17
Tablo 5.1 : Değişik bileşiklerin ayrışması sonucu oluşan ürünler.....	19
Tablo 7.1 : Değişik yakıt pili teknolojilerinin karşılaştırılması.....	46
Tablo 8.1 : Değişik gemi tipleri için emisyon değerleri.....	49
Tablo 9.1 : Yakıt pillerinde gerçekleşen elektrokimyasal tepkimeler.....	70
Tablo 9.2 : Yakıt pili tepkimeleri ve karşılık gelen Nernst denklemleri.....	70
Tablo 9.3 : Hücre sıcaklığının fonksiyonu olarak ideal potansiyel.....	71
Tablo 9.4 : Değişik yakıt pili modelleri.....	72
Tablo 9.5 : Ballard IV ve Ballard V'e ait deneysel ξ_i sabitleri.....	75
Tablo 10.1 : $P = 3$ atm sabit basınç altında sıcaklık değişiminin hücre potansiyeline etkisi.....	85
Tablo 10.2 : Sabit basınç altında maksimum güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	88
Tablo 10.3 : $T = 75^\circ\text{C}$ sabit sıcaklıkta basınç değişiminin hücre potansiyeline etkisi.....	93
Tablo 10.4 : Sabit sıcaklıkta çalışma basıncı – tersinir potansiyel ilişkisi.....	93
Tablo 10.5 : Sabit sıcaklıkta maksimum güç yoğunluğu değerlerinin basınçla değişimi.....	96
Tablo A.1 : $P = 3$ atm; $T = 30^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	114
Tablo A.2 : $P = 3$ atm; $T = 45^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	115
Tablo A.3 : $P = 3$ atm; $T = 60^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	116
Tablo A.4 : $P = 3$ atm; $T = 75^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	117
Tablo A.5 : $P = 3$ atm; $T = 90^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	118
Tablo B.1 : $P = 1$ atm; $T = 75^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	119
Tablo B.2 : $P = 5$ atm; $T = 75^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	120
Tablo B.3 : $P = 10$ atm; $T = 75^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	121
Tablo B.4 : $P = 15$ atm; $T = 75^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	122
Tablo B.5 : $P = 20$ atm; $T = 75^\circ\text{C}$ için termodinamik performans hesap tablosu.....	123

Tablo D.1	: Mevcut koşullar için elektrik maliyeti hesaplama tabloları.....	128
Tablo D.2	: Yakıt pili maliyetleri değiştiği takdirde elektrik üretim maliyeti hesap tabloları.....	129
Tablo D.3	: Yakıt maliyetleri değiştiği takdirde elektrik üretim maliyeti hesap tabloları.....	130
Tablo D.4	: Gelecekte beklenen elektrik üretim maliyetleri hesap tabloları....	131



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Mevcut ve öngörülen dünya nüfusu, elektrik talebi ve enerji talebi.....	2
Şekil 3.1 : Yakıt pili teoreminin kurucuları.....	12
Şekil 4.1 : İçten yanmalı makineler ve yakıt pilleri için kara mili başına emisyon miktarları.....	16
Şekil 5.1 : Suyun elektrolizi.....	19
Şekil 5.2 : Suyun oluşması.....	21
Şekil 5.3 : Tek bir yakıt pili hücresinin yapısı.....	23
Şekil 5.4 : Temel tepkime.....	24
Şekil 5.5 : Enerji-zaman grafiği.....	26
Şekil 5.6 : Elektrodun mikroskop altında görünümü.....	27
Şekil 5.7 : PEM yakıt pili yapısı.....	28
Şekil 5.8 : Yakıt pili sistem şeması.....	29
Şekil 6.1 : Katı polimer yakıt pili.....	30
Şekil 6.2 : Polietilenin kimyasal yapısı.....	31
Şekil 6.3 : Politetrafloroetilenin kimyasal yapısı.....	32
Şekil 6.4 : Nafion'un kimyasal yapısı.....	32
Şekil 6.5 : Nafion'un mikroskopik yapısı.....	33
Şekil 6.6 : Nafion'un su emdirilmiş haldeki kimyasal yapısı.....	34
Şekil 6.7 : PEM yakıt pillerinin mikroskopik yapısının şematik gösterimi....	35
Şekil 7.1 : Alkali yakıt pilinin yapısı.....	40
Şekil 7.2 : PAFC yapısı.....	41
Şekil 7.3 : Yakıt olarak hidrojen kullanıldığı takdirde anot ve katotta meydana gelen tepkimeler.....	42
Şekil 7.4 : Yakıt olarak karbon monoksit kullanıldığı takdirde anot ve katotta meydana gelen tepkimeler.....	43
Şekil 7.5 : Yakıt olarak karbon monoksit ve hidrojen kullanıldığında gerçekleşen katot ve anot tepkime gösterimleri.....	44
Şekil 8.1 : Değişik sevk sistemleri için verim değerleri.....	51
Şekil 8.2 : Değişik sevk sistemleri için özgül yakıt tüketimleri.....	52
Şekil 8.3 : Değişik teknolojiler için yakıt tüketimi - yük grafiği.....	52
Şekil 8.4 : Değişik sevk sistemleri için birim maliyetler.....	53
Şekil 8.5 : Değişik sevk sistemleri için ağırlıksal güç yoğunlukları.....	54
Şekil 8.6 : Değişik sevk sistemleri için hacimsel güç yoğunlukları.....	54
Şekil 8.7 : Değişik Sevk Sistemlerine Ait NO _x Emisyon Değerleri.....	57
Şekil 8.8 : Değişik sevk sistemlerine ait SO ₂ emisyon değerleri.....	58
Şekil 8.9 : Değişik sevk sistemlerine ait CO ₂ emisyon değerleri.....	58
Şekil 8.10 : Değişik kaynaklarca üretilen gürültü seviyeleri.....	59
Şekil 8.11 : Gemilerde kullanılmak üzere tasarlanmış 160 kW kapasiteli bir yakıt pili.....	63
Şekil 8.12 : İlk yakıt pili sistemli denizaltının denize indirilme töreni.....	64

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 8.13 : Denizaltı yakıt pili sistemi gösterim.....	65
Şekil 8.14 : 20 kW kapasiteli bir PEM yakıt piliyle sevk edilen yelkenli.....	66
Şekil 8.15 : HaveBlue teknesinin genel yerleşim planı.....	67
Şekil 9.1 : Fiziksel ve ekonomik çevrenin etkisinde sistem.....	68
Şekil 9.2 : Sıcaklığın fonksiyonu olarak H ₂ /O ₂ yakıt pilleri için ideal potansiyel grafiği.....	71
Şekil 9.3 : İdeal ve çalışma yakıt pili potansiyeli/akımı karakteristiği.....	73
Şekil 9.4 : Yakıt pili hücre yapısı.....	82
Şekil 10.1 : P = 3 atm için sıcaklık değişiminin hücre potansiyeline etkisi....	86
Şekil 10.2 : P = 3 atm için sıcaklık değişiminin hücre verimine etkisi.....	87
Şekil 10.3 : P = 3 atm için sıcaklık değişiminin güç yoğunluğuna etkisi.....	89
Şekil 10.4 : T = 75°C P = 3 atm için hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğu eğrileri.....	91
Şekil 10.5 : T = 75°C için çalışma basıncındaki değişimin hücre potansiyeline etkisi.....	94
Şekil 10.6 : T = 75°C için çalışma basıncındaki değişimin hücre verimine etkisi.....	95
Şekil 10.7 : T = 75°C için çalışma basıncındaki değişimin güç yoğunluğuna etkisi.....	97
Şekil 10.8 : Yük profilleri.....	99
Şekil 10.9 : Mevcut koşullarda elektrik üretim maliyeti.....	100
Şekil 10.10 : Yakıt pili maliyetlerindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi.....	100
Şekil 10.11 : Hidrojen maliyetindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi.....	101
Şekil 10.12 : Gelecekte hedeflenen elektrik üretim maliyetleri.....	102
Şekil 10.13 : P=3 atm ve T=75°C'de verim-güç yoğunluğu ilişkisi.....	103
Şekil C.1 : T = 30°C ve P = 3 atm için hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğu eğrileri.....	124
Şekil C.2 : T = 45°C ve P = 3 atm için hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğu eğrileri.....	125
Şekil C.3 : T = 60°C ve P = 3 atm için hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğu eğrileri.....	126
Şekil C.4 : T = 90°C ve P = 3 atm için hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğu eğrileri.....	127

SEMBOL LİSTESİ

A	: Aktif hücre alanı, cm^2
a_c	: Katot için kimyasal aktiflik
$A_0, A_1, B_0, B_1, R_0, R_1, \dots$	: Model parametre sabitleri
AEP	: Yıllık elektrik üretimi, kWh/yıl
AFC	: Yıllık yakıt pili maliyeti, $\$/\text{yıl}$
ACC	: Yıllık sermaye maliyeti, $\$/\text{yıl}$
C^*	: Konsantrasyon, mol/cm^3
C_{el}	: Elektrik üretim maliyeti, $\$/\text{kWh}$
C_{fix}	: Yakıt pili yığımı sabit maliyetleri, $\$/\text{yığın}$
C_{cell}	: Yakıt pili hücre maliyeti, $\$/\text{hücre}$
C_{fc}	: Yakıt pili yığın maliyeti, $\$$
CRF	: Sermaye geri dönüşüm faktörü, yıl^{-1}
CF	: Kapasite faktörü
d	: Faiz oranı, %
E	: Termodinamik potansiyel, V
E_0	: Nernst potansiyeli, V
F	: Faraday sabiti, 96450 C/mol
I	: Akım, A
i	: Akım yoğunluğu, A/cm^2
k_a^0, k_c^0	: Anot ve katot reaksiyonları için gerçek hız sabitleri, cm/s
l	: Polimer zar kalınlığı, cm
L	: Yakıt pili ömrü
m	: Hidrojenin molekül ağırlığı
M, N	: Kütle transfer sabitleri
N_{cell}	: Yakıt pili yığımındaki hücre sayısı
P'_{cell}	: Güç yoğunluğu, kW/cm^2
P_{fc}	: Yakıt pili nominal gücü, kW
P^*	: Kısmi basınç, atm
P_A, P_C	: Anot ve katot basınçları, atm
P_{sat}	: Suyun doyma basıncı, atm
q_{H_2}	: Yakıt tüketim hızı, g/s
R	: Evrensel gaz sabiti, 8.314 kJ/kmol K
R^{int}	: İç direnç, $\Omega \text{ cm}^2$
r_M	: Zar öz direnci, $\Omega \text{ cm}$
T	: Sıcaklık, K veya $^{\circ}\text{C}$
T_0	: Standart sıcaklık, 298.15 K
V	: Hücre potansiyeli, V
x	: Mol kesri

z	: Taşınan elektron sayısı
ΔG_e	: Katot reaksiyonunun serbest enerjisi, J/mol
ΔG_{ec}	: Kimyasal yüzeye çıkma serbest enerjisi, J/mol
Δh	: Hidrojenin entalpisi, J/g

Yunan Harfleri:

η_{fc}	: Yakıt pili hücre verimi
$\bar{\eta}$	: Ortalama verim
v	: Potansiyel kaybı, V
$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	: Aktivasyon kaybı hesabında kullanılan yarı ampirik sabitler
ζ_A, ζ_C	: Anot ve katottaki stokiyometri oranları
ε_j	: Seçilen akım yoğunluğunun maksimum akım yoğunluğuna oranı
τ_j	: Zaman, s

Alt Simgeler:

act	: Aktivasyon
$act,A; act,C$	: Anot ve katottaki aktivasyon
ohm	: Omik
$diff$	: Difüzyon

YAKIT PİLLERİNİN TERMO-EKONOMİK ANALİZİ

ÖZET

Verimli ve ekonomik açıdan etkin olmasının yanında aynı zamanda çevresel kısıtları da sağlayan sistemleri tasarlamak mühendislerin önde gelen hedeflerinden biridir. Kaynakların sonlu olduğu ancak enerji talebinin sürekli arttığı günümüz dünyasında, enerji ve kaynakları tüketen sistemlerin işleyişini anlamak ve neticesinde sistemleri geliştirmeye dönük ve dolayısıyla çevreye olan olumsuz etkileri azaltıcı sistematik yaklaşımlar geliştirmek giderek artan bir öneme sahiptir.

Yakıt pilleri, hidrojen veya hidrojenle zengin yakıtların ve oksitleyicilerin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Yakıt pillerinde, yakıt olarak hidrojen kullanıldığından dolayı, tepkime sonucu emisyon olarak açığa sadece su buharı çıkar. Yakıt pillerinde, herhangi bir yanma tepkimesi gerçekleşmediğinden, yakıt enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü yüksek verim değerleriyle gerçekleşir.

Yakıt pilleri polimer elektrolit zar, alkali elektrolit, fosforik asitli, katı oksit ve eriyik karbonat yakıt pilleri olmak üzere sınıflandırılabilir.

Deniz taşıtı kaynaklı emisyonların kaynağı, temel olarak taşıtın sevk ve ek elektrik ihtiyaçlarının tedarikidir. Yakıt pillerinin gemi makineleri ve gemi servis gücü üreticileri pazarında yer alabilmeleri için, yakıt pillerinin, konvansiyonel sistemlerin günümüzdeki ve gelecekte ulaşılması planlanan ekonomik ve teknik verileriyle rekabet edecek seviyelere ulaşması gerekmektedir.

Yakıt pillerinin termodinamik anlamda analizinde çalışma sıcaklığı ve çalışma basıncının yakıt pili performansına (hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğu) nasıl etki ettiği incelenmiştir. Ekonomik analiz esnasında ise elektrik üretim maliyetine yakıt pili yığın sabit maliyeti, yakıt pili hücre maliyetleri ve yakıt maliyetinin etkileri araştırılmıştır.

THERMO-ECONOMIC ANALYSIS OF FUEL CELLS

SUMMARY

The primary aim of engineers is to design systems those satisfying environmental constraints as they should be economically and technically effective. In such a world that sources are limited but energy demand is continuously increasing, understanding dissipative systems and as consequently developing systems and decreasing their environmental effects are becoming vital.

Fuel cells are energy conversion devices that generate electricity and heat by electrochemically combining a gaseous fuel (hydrogen) and an oxidant gas (oxygen from the air) through electrodes and across an ion conducting electrolyte. The consequence of the fact that hydrogen is used in fuel cells, only water will be the emission product. Because no combustion is realized, greater efficiency values could be observed as electrochemical energy of the fuel converts to electricity.

Fuel cells can be classified in four main groups; polymer electrolyte, alkaline electrolyte, phosphoric acid, molten carbonate and solid oxide fuel cells.

The source of marine based emissions are basically propulsion and supply of supplementary electricity demands. To be an attractive alternative to the marine propulsion and ship service power market, fuel cell based systems must have characteristics that make them competitive with current and predicted future, conventional based prime movers.

As fuel cells thermodynamically analyzed, the effects of operating temperature and operating pressure on fuel cell performance (cell potential, cell efficiency and power density) were investigated; and in the economic analysis the effect of fuel cell stack cost, cell costs and fuel cost on the electricity cost were also investigated.

1. GİRİŞ

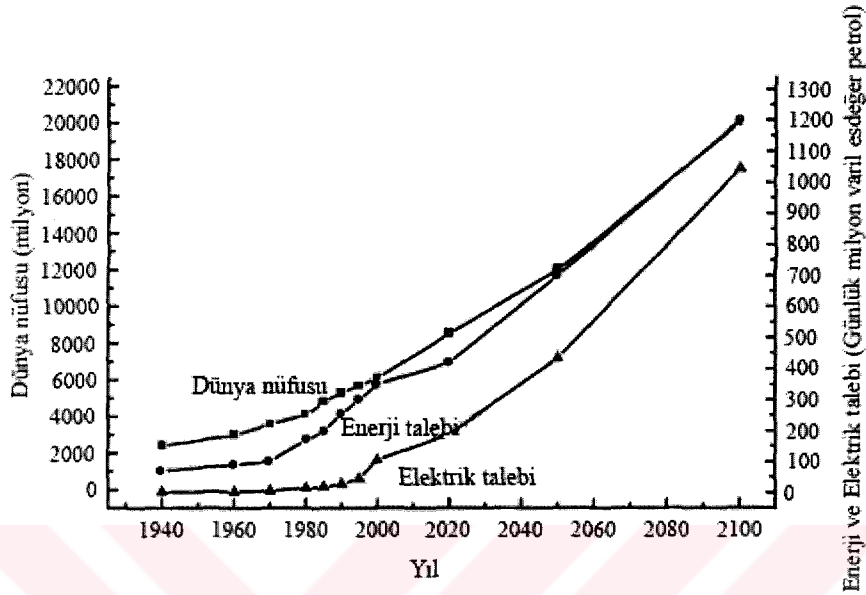
Verimli ve ekonomik açıdan etkin olmasının yanında aynı zamanda çevresel kısıtları da sağlayan sistemleri tasarlamak mühendislerin en önde gelen hedeflerinden biridir. Kaynakların sonlu olduğu ancak enerji talebinin sürekli arttığı günümüz dünyasında enerji ve kaynakları tüketen sistemlerin işleyişini anlamak ve neticesinde sistemleri geliştirmeye dönük ve dolayısıyla çevreye olan olumsuz etkileri azaltıcı sistematik yaklaşımlar geliştirmek giderek artan bir öneme sahiptir.

Dünya petrol rezervlerinin %81'inin sekiz ülke arasında; doğalgaz rezervlerinin %70'inin altı ülke arasında; kömür rezervlerinin %89'unun ise sadece sekiz ülke arasında paylaşıldığı göz önüne alındığında ülkelerin ulusal enerji politikalarının belirlenmesinde Enerji güvenliği, Ekonomik büyüme ve Etrafın korunması olmak üzere "3E" rol oynamaktadır.

Dünya çapında fosil yakıtlar kullanılarak elde edilen enerjiye olan talebin sürekli artışı küresel ısınma sorununun daha da vahim bir hal almasına neden olmaktadır. Tüm buna ek olarak dünya nüfusundaki yıllık ortalama %2'lik artış, 21. yüzyılın ortalarında dünya nüfusunun iki katına çıkmasına neden olması öngörülmektedir. 2050 yılı itibariyle nüfusun 12 milyarı bulması, artan ekonomik büyüme neticesinde küresel enerji talebinin ise Şekil 1'de de görüldüğü üzere 1,5 ile 3 katına çıkması beklenmektedir [1].

Dünya Bankası'nın yaptığı araştırmaya göre, kentlerde yaşayan bir milyanın üzerindeki insan hava kirliliğinin ölümcül etkilerinden zarar görmekte ve her yıl 700000 kişi bu nedenle hayatını kaybetmektedir. Daha da ötesi, içten yanmalı motorlarda kullanılan her 1 litre benzin, 3 kg'ın üzerinde küresel ısınmaya neden olan sera etkisine sahip CO₂ gazının açığa çıkmasına neden olmaktadır. Yapılan öngörülere göre, 2025 yılı itibariyle 17 gelişmiş ülkede CO₂ emisyonunun 1985 yılındaki değerlerin 4 katına çıkarak 3,6 milyar tona ulaşması beklenmektedir. Bu

değerleri aşağı çekmenin tek yolu enerji sistemlerinin verim değerlerinin iyileştirilmesine ve çevreyle dost yakıtlara yönelmekle mümkün olacaktır [2].



Şekil 1.1: Mevcut ve Öngörülen Dünya Nüfusu, Elektrik Talebi ve Enerji Talebi [1]

20. yüzyılın son yıllarından itibaren dünya üzerinde, temiz enerjiye duyulan ihtiyaç nedeniyle mevcut fosil yakıtlarla çalışan enerji sistemlerinden yakıt pilleri başta olmak üzere alternatif güç kaynaklarına olan ilgi giderek artmaktadır.

Uluslararası karakteri nedeniyle deniz taşımacılığı diğer enerji yoğun taşımacılık yollarının karşılaştığı çevresel düzenlemelerden etkilenmemektedir. Bu süregelen uygulamalar neticesinde, denizcilik sektörü her ne kadar dünya üzerindeki CO₂ emisyonunun % 2'sinden sorumlu olsa da küresel CO₂ emisyonunun azaltılmasına yönelik Kyoto hedefleri içerisinde yer almamaktadır. Uluslararası politik çevrelerde artmakta olan çevre bilinci gemicilik sektörüne tanınan bu ayrıcalıkların ortadan kaldırılması yönünde baskı unsuru oluşturmaktadır. Bu bağlamda deniz taşımacılığına yönelik daha sıkı çevresel uygulamalar uluslararası platformda öngörülmektedir [3].

Yakıt pili teknolojisi, sık sık gemicilik ve diğer tüm taşımacılık endüstrilerinde karbon bazlı güç üretimi neticesinde açığa çıkan çevresel problemler için en ideal çözüm olarak görülmektedir.

Yakıt pilleri, hidrojen veya hidrojen zengin yakıtların ve oksitleyicilerin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Öte yandan yan ürün olarak, bazı uygulamalarda yararlanılabilir ısı açığa çıkar. İlk küçük yakıt pilleri, Gemini uzay programında başarıyla kullanılmıştır. Bunu takip eden diğer yakıt pili çeşitleriyle ilgili gelişmeler de yakıt pillerini hayatın her dalında (mikro güç, sabit güç ve seyyar güç üniteleri gibi) yaygın bir şekilde kullanılır hale getirmiştir. Birleşik Devletlerde özel sektör, 40 yılı aşkın bir süredir yakıt pili teknolojisini geliştirmeye çalışmaktadır. Hükümet teşvikleri de bundan 40 yıl önce NASA programları doğrultusunda başlamış ve devam etmektedir. Avrupa Birliği'nin sadece yakıt pili teknolojisini geliştirmek üzere ayırdığı kaynak¹ bile yakıt pillerine verilen değeri bize gösterir. Ticari olarak, sadece elektrik üretiminde kullanılırlarken, bu yıl sonu itibarıyla aralarında Ford, BMW, Volkswagen, Chrysler, Mercedes ve Nissan gibi dünya devi otomobil firmalarının da bulunduğu üreticiler, deneme maksatlı olarak son model araçlarında yakıt piliyle çalışan versiyonları da piyasaya sürmeyi, 2006 sonu itibarıyla de, ticari olarak seri üretime geçmeyi hedeflemektedir [6]. Diğer bir yandan; çeşitli firmalar, yakıt pillerini günlük hayatımıza sokmak maksadıyla yine deneme amaçlı olarak, diz üstü bilgisayar, cep telefonu, alkol ölçme aleti ve benzeri taşınır küçük aletleri yakıt piliyle çalışacak şekilde üretmektedir.

Her ne kadar gemilerin sevki göz önüne alındığında hali hazırda hiçbir yakıt pili uygulaması yer almasa da; yakıt pili sistemini rekabetçi koşullara çekmek üzere ciddi çalışmalar mevcuttur. Çalışmalardan sonuç alındığı takdirde potansiyel pazarın engin oluşu çalışmaların en büyük motivasyon aracıdır.

Yakıt pilleri en basit manada kullanılan elektrolit tipine göre, polimer elektrolit yakıt pilleri, alkalın yakıt pilleri, fosforik asitli yakıt pilleri, eriyik karbonat yakıt pilleri ve katı oksit yakıt pilleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Daralan enerji arzına rağmen global manada enerji talebinin hızla artması neticesinde gerek mevcut gerekse alternatif güç kaynaklarının verimlerinin iyileştirilmesi gerektiği gerçeği nedeniyle verim analizlerinin yapılması da giderek önem kazanmıştır.

¹ AB, 1998-2002 ve 2003-2006 yılları arasında yenilenebilir güç kaynaklarında kullanılmak üzere 250 milyon € kaynak ayırmıştır[4]

Tüm dünyada, bu kadar ilgi çeken ve gelecekte içten yanmalı makinelerin yerini almasının beklendiği yakıt pilleri, ne yazık ki, ülkemizin içerisinde bulunduğu sosyo-ekonomik yapı nedeniyle hakkettiği ilgiyi görememiştir. 40 yıldır ciddi şekilde, ele alınan konunun bundan böyle genelde ülkemizdeki bilim çevreleri, özelde ise gemi inşaat mühendisleri tarafından ele alınıp, teknolojiyle bir an önce tanışılması gerektiği kanısı hakimdir.

Bu çalışmada amaç, bir polimer elektrolit yakıt pilinin (PEM) termo-ekonomik analizini gerçekleştirmektir. Çalışma esnasında, Ballard tarafından üretilmiş 5 kW kapasiteli MK5 tipi polimer elektrolit yakıt pili kullanılmıştır. Bu sayede belirtilen yakıt pilinin maliyeti ve termodinamik bazlı verimi üzerine çalışma sıcaklığı ve çalışma basıncı gibi değişkenlerin etkisi gözlemlenmektedir.

Bu çalışma kapsamında ikinci bölümde ilk önce yakıt pillerinin termodinamiğin ikinci yasasına göre yapılan verim analizlerinin ele alındığı çalışmalar taranmıştır [9-13]. Daha sonra elektrokimya temelli değişik yakıt pili modelleri hakkında yazılmış yakıt pillerinin termodinamik analizlerine dönük analitik, yarı ampirik ve teorik modellemeleri konu edinen çalışmalar incelenmiştir [14-22]. Yapılan modelleme çalışmalarını kaynak alıp yakıt pili performansının yakıt pilinin çalışma parametrelerine etkisinin incelendiği çalışmalara [23,24] değinildikten sonra son olarak tezde de ele alınmış olan PEM yakıt pilleri üzerine yapılmış termo-ekonomi analizler sunulmuştur [25-28].

Çalışmanın geri kalan kısmı ise 3 ana başlık altında toplanacaktır. Yakıt pilleri ana başlığı altında; yakıt pillerinin ve dünya üzerindeki yakıt pilleri uygulamalarının tarihsel süreç içerisindeki gelişiminin sunulduğu ikinci bölümün ardından üçüncü ve dördüncü bölümlerde yakıt pili tarihçesi ve teknolojisi tanıtılacak, beşinci bölümde ise yakıt pillerinin temel çalışma prensibi ele alınacaktır. Altıncı bölümde tezimizde inceleyeceğimiz polimer elektrolit zar yakıt pillerini inceledikten sonra yedinci bölüm dahilinde değişik yakıt pili türleri birbirleriyle kıyaslanacaktır.

Yakıt pillerinin gemicilik sektöründeki yerinden bahsedilen sekizinci bölümde yakıt pillerinin dizel makineler ve gaz türbinleriyle karşılaştırması yapılmıştır.

Termo-ekonomik analiz ana başlığı altında ise dokuzuncu bölümde, termodinamik analiz ve ekonomik analiz kavramına ait teorik altyapı sunulacaktır.

Çalışmaya temel oluşturmak adına sunulan ilk dokuz bölüm sonrasında son ana başlığımız olan yakıt pillerinin termo-ekonomik analizi adı altında onuncu bölüm olarak 5 kW kapasiteli bir polimer elektrolit yakıt pilinin termo-ekonomik anlamda analizi yapılacaktır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geride bıraktığımız 30 sene boyunca yakıt pillerine olan ilgi giderek artmıştır. Yüksek güç yoğunluğu, verim, dayanıklılık ve uzun ömürlülük gibi yüksek performans kriterlerine ulaşmak adına, araştırma-geliştirme çalışmaları yakıt pillerinin dizayn, malzeme, kullanılan yakıt ve benzeri yönlerine yoğunlaşmıştır.

Yapılan araştırmalar sonucu, uçucu organik bileşenler (VOC) ve NO_x emisyonlarının %31'i yerleşik sistemlerden kaynaklanırken, geri kalan %69'luk kısmı hareketli sistemlerden kaynaklanmaktadır [7]. O zaman, sadece hareketli uygulamalarda emisyon miktarını sıfıra çekebilirsek, toplam emisyonu yaklaşık olarak $\frac{3}{4}$ oranında azaltabiliriz. Bu veriler ışığında son çeyrek yüzyılda birçok çalışma boyutu ve teknik özellikleri nedeniyle hareketli sistemlerde çoğunlukla tercih edilmekte olan Polimer Elektrolit Zar yapılı yakıt pillerine yönelmektedir.

Günümüze gelinceye dek yakıt pilleri üzerine sayısız çalışma yayınlanmıştır. Ancak bu tez çerçevesinde biz sadece yakıt pillerinin verimini elektrokimyasal yönden analiz eden ve teknik açıdan uygun sistemler arasından ekonomik bakımdan en uygununu araştıran çalışmalar üzerine yoğunlaşacağız.

Stambouli, yakıt pillerinin çalışma ilkesini, yapısını ve türlerini incelediği çalışmasında [8], yakıt pillerinin mevcut güç üretim sistemlerine nazaran çevresel açıdan, gürültü ve titreşim açısından ve performans açısından üstün olduğunu ifade etmiş ve bilim çevrelerince yakıt pillerinin temel güç sistemi olacağına dair öngörülerine yer vermiştir.

Günümüze gelinceye dek yakıt pilleri üzerine sayısız çalışma yayınlanmıştır. Ancak bu tez çerçevesinde biz sadece yakıt pillerinin verimini termodinamik analiz çerçevesinde ele alan ve teknik açıdan uygun sistemler arasından ekonomik bakımdan en uygununu araştıran çalışmalar üzerine yoğunlaşacağız.

Yakıt pili performans analizlerini enerji bazlı, ekserji bazlı ve elektrokimyasal yakıt pili modelleri yardımıyla yapılan çalışmalar olmak üzere sınıflandırmak mümkündür.

Yakıt pilleri konusunda performans analizleri ve ekonomik analizler iki ana yakıt pili türü üzerinde yoğunlaşmaktadır. Yerleşik güç üretim sistemlerinde bileşik ısı uygulamalarına yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle elverişli olması dolayısıyla tercih edilen katı oksit yakıt pilleri (SOFC) ve daha çok otomobil gibi ulaşım dönük uygulamalarda düşük çalışma sıcaklıkları ve yüklemelere hızlı cevap verebilmeleri nedeniyle polimer elektrolit zar yakıt pilleri (PEMFC) üzerine çalışmalar literatürde yer almaktadır.

Literatürde yer alan, yakıt pillerinin enerji ve ekserji bazlı performans analizleri farklı yakıt türlerine ve değişik çalışma koşullarına göre yapılmıştır. Yakıt olarak saf hidrojen, metan gazı veya etanolün yakıt olarak kullanıldığı çalışmalarda SOFC ve PEMFC sistemleri için değişik çalışma koşullarında ekserji ve enerji verimlerinin değişimini teorik olarak incelenmiştir [9-12].

Yakıt piliyle sistem arasındaki karmaşık etkileşimlerin teorik olarak gösterilemeyeceğini düşünen Au [13], Cycle-Tempo adlı Delft Üniversitesince geliştirilmiş bir bilgisayar programı kullandığı çalışmada, 250 kW kapasiteli bir MCFC için, elektriksel verimin sıcaklıkla birlikte arttığını ve 675°C için azami değerine ulaştığını, aynı şekilde genel verimin sıcaklıkla arttığını, yardımcı güç harcanmasının ise sıcaklık artışıyla %25 mertebesinde azaldığını belirlemiştir.

Literatürde son 15 yılda, elektrokimya bazlı yakıt pili modellerine olan ilginin yakıt pili içerisinde gerçekleşenleri anlamak adına yoğunlaştığı görülmektedir. Deneysel çalışmaların zaman alıcı ve pahalı olması mühendis ve tasarımcıları parametrik çalışmalar yardımıyla belli geometrik parametreler çalışma koşulları ve malzeme özelliklerinde yakıt pili performansını ölçmeye yöneltmiştir.

Yakıt pili modellerini analitik, yarı-ampirik ve kuramsal olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür.

Analitik model kullandığı çalışmada Standaert [14], daha kesin analitik bir akım potansiyel ilişkisi kurabilmek için kabuller yapmaktadır. Öte yandan izotermal ve izotermal olmayan hücreler için suyun yönetimini incelemektedir. Ancak potansiyel

kayıplarının kesin olarak hesaplanması sağlanamamış ve daha çok basit sitemler için çabuk cevap veren bir model oluşturulabilmiştir.

Yarı ampirik modellerde, kuramsal olarak çıkarılan diferansiyel ve cebir denklemleri ile ampirik denklemleri birleştirmektedir. Ampirik denklemler, çoğunlukla fiziksel olayın modellenmesinin güç olduğu veya olayı tanımlayan kuramın anlaşılmadığı durumlarda kullanılmaktadır.

Tamamen suya doyurulmuş yerine kısmi suya doyurulmuş zar için ampirik model kullandığı çalışmasında Springer [15], Nafion zar ile benzerlik gösteren iletkenlik ve elektrot geçirgenliği değerleri elde etmiştir. Elde edilen bu benzerlikler, daha sonraki birçok çalışmada referans teşkil etmektedir.

Amphlett [16], potansiyel kayıplarını ölçmek ve verilen akım yoğunluğunda hücre potansiyelini öngörmek için gerekli sabit sayıları bulmak için yarı ampirik modellemeyi kullanmıştır. Bu model aktivasyon ve omik kayıpları yansıtırken, difüzyon kayıplarını içermemektedir. Hidrojen ve oksijene ait kısmi basınç ve konsantrasyon değerleri sıcaklık basıncın ve gaz kanlındaki mol oranlarının fonksiyonu olarak sunulurken, tersinir potansiyel ve aktivasyon kayıpları sıcaklık, kısmi basınçlar, konsantrasyon değerleri ve çalışma akım yoğunluğu cinsinden tanımlanmaktadır.

Benzer şekilde Pisani [17], katot bölgesindeki iletim limitleri dahilinde aktivasyon ve omik kayıpları tanımlayan bir yarı ampirik modelden yararlanmaktadır.

Yarı ampirik model yardımıyla yakıt pili içerisinde suyun taşınmasını incelediği çalışmasında Maggio [18], katot gaz geçirgenliğini akım yoğunluğunun ampirik fonksiyonu kabulüyle konsantrasyon kayıplarını modellemiştir. Maggio, akım yoğunluğunun artışının gaz geçirgenliğini azaltıcı yönde etkilediğini bulmuştur.

Yakıt olarak saf hidrojen yerine iyileştirilmiş yakıt kullanılan bir yakıt pili sistemini inceleyen Chan [19], anoda olan hidrojen beslemesi üzerine CO kinetiğinin etkisini yarı ampirik olarak modellemiştir. CO'nun katalizör yüzeyce tutulması neticesinde hidrojenin tepkimeye gireceği aktif alanın azaldığını belirten Chan, düşük elektrot kinetiği nedeniyle aktivasyon kayıplarının arttığı sonucunu elde etmiştir.

Tek bir hücre yerine hücre yığının yarı ampirik olarak modellendiği çalışmada Maxoulis [20], bir otomobil için geliştirilen polimer elektrolit yakıt pili yığınınına dair yaptığı modellemede, Amphlett [16] tarafından geliştirilen modeli ADVISOR isimli bir yazılıma uygulayan Maxoulis, yığın başına hücre sayısı, elektrot kinetiği ve zar yapısındaki su konsantrasyonunun yakıt tüketimine etkisini incelemiştir. Maxoulis'in bulgularına göre, yığın içerisindeki hücre sayısının artması neticesinde yığın verim değeri artmaktadır.

Yakıt pili modellerinden teorik modellemede, diferansiyel ve cebir denklemleri hücre içerisinde gerçekleşen olayın fizikini ve elektrokimyasını temsil edecek şekilde türetilmektedir. Bu denkleme takımlarının çözümü için bilgisayar yazılımlarından yararlanılmaktadır. Teorik modeller tek ve çok bölgeli olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

Gaz dağıtıcıları (gaz akış kanalları), katalizör yüzeyler ve zar olmak üzere 3 bölgenin alındığı çok noktalı teorik modellemede Gurau [21], yakıt pili içerisindeki bileşen konsantrasyonların ve gaz dağıtıcı geçirgenliği, gaz kanallarındaki hava akış hızı ile sıcaklığın yakıt pili performansı üzerine etkisini incelemektedir.

Çok bölgeli teorik modellemenin aksine tek bölgeli modellemenin yapıldığı çalışmada Zhou ve Li [22], bütün sistemi tek bir bölge olarak değerlendirmektedir. Denge denklemleri yazıldıktan sonra farklar kaynak ve kuyu terimleri olarak ifade edilmektedir. Bütün denklemlerin genel difüzyon-konveksiyon denklemleri olarak yazıldığı modellemede, çözüm CFD bilgisayar yazılımlarıyla çözülmektedir.

Yaptığı deneysel çalışmalar neticesinde elde ettiği sonuçlar ışığında Ballard MK5-E PEMFC için polarizasyon eğrisini sıcaklığın fonksiyonu olarak modelleyen Laurencelle [23], en yüksek performans değerlerine 70°C ve üzeri sıcaklıklarda ulaşıldığını vurgulamaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda kayıpların arttığı, özellikle kütle taşınım kayıplarının % 20 oranında attığı sonucuna ulaşmıştır.

Yakıt pili performansının sıcaklık ve basınçla birlikte nasıl değiştiğini inceleyen Al-Baghdadi [24], kurduğu yarı ampirik modelin Laurencelle'in [23] MK5-E PEMFC için daha önce yapmış olduğu polarizasyon eğrisine yönelik deneysel çalışma sonuçları için 3 atm basınç ve 24°C-72°C çalışma sıcaklığı aralığında uyumlu

sonuçlar verdiğini görmüştür. Çalışma sıcaklığı aralığı olarak 24°C-72°C ve çalışma basıncı olara 1-5 atm alan Al-Baghdadi, azami güç yoğunluğu noktasında çalışılmasının o noktada verim değerlerinin çok düşük olması nedeniyle akılcı olmayacağını vurgulamaktadır.

Yakıt pillerinin yapısı, kullanılan malzemeler, yakıt seçenekleri ve performanslarını arttırmak üzere çalışma koşullarının belirlenmesi gibi çeşitli bilimsel çalışmalar var olsa da yakıt pillerinin termo-ekonomik analizine yönelik çalışmalar ne yazık ki kısıtlı sayıdadır. Literatürde karşımıza ilk çıkan çalışmada Barbir ve Gomez [25], Energy Partners şirketince yapılmış 10 kW DC güç kapasiteli bir PEM (Polimer Elektrolit Zar) yakıt pilini incelemiş ve yakıt pili çalışma verimini yakıt pili ekonomisi ile ilişkilendirilmiştir. Barbir ve Gomez'in elde ettiği bulgulara göre yakıt pilinin teknik ve ekonomik açıdan kullanılabilir olduğu bir çalışma verimi aralığı tanımlanmalıdır. Diğer bir deyişle, yıllık yakıt maliyetinin ve elektrik maliyetlerinin yakıt pili performansındaki değerikliklerden etkilenmediği bir yakıt pili verim aralığı seçilmelidir.

Polimer elektrolit yakıt pillerinin gemilere uygulanabilirliğini sorgulayan çalışmasında Frangopoulos [26], Ballard MarkV tipi bir PEMFC'nin kullanıldığı bir sistem için sıcaklığın yakıt pilinde hücre verimi, hidrojen tüketim hızı, güç yoğunluğu ve sistem verimine etkisini incelemiştir. Frangopoulos çalışmasının devamında ise yakıt pili sistemini ekonomik olarak analiz etmiş ve sıcaklık maliyet ilişkisini ortaya koymuştur. Güç yoğunluğunu maksimum yapan akım değerleri eğrisi ile yakıt pilinin net bugünkü değerı arasında optimizasyon çalışmasıyla çalışmasını sonlandıran Frangopoulos, elektrik üretim maliyetini kWh başına 20  olarak hesaplamıştır.

Polimer Elektrolit Zar yakıt pillerinin değerik akım alanlarındaki davranışlarını ele aldığı doktora çalışmasında [27] Kazım, olaya ekonomik boyuttan da yaklaşmış ve yakıt maliyetinin değerştirilmesinin değerik akım alternatifleri için yakıt pili performansına nasıl etki ettiğini incelemiştir.

Kazım daha önce yaptığı 3 çalışmayı ekserji maliyeti açısından PEM yakıt pillerini inceleyerek tamamlamıştır. Yine aynı 10 kW'luk PEM yakıt pilinin ele alındığı çalışmada [28] Kazım potansiyel, sıcaklık, basınç ve stokiyometrik oran gibi

değişkenlerin ekserji maliyetine etkisini araştırmıştır. Kazım elde ettiği bulgular neticesinde sıcaklığın ekserji maliyetine etkisinin önemsiz olduğunu ancak diğer 3 parametrenin değiştirilmesinin ekserji maliyetinde iyileşmelere neden olacağını ifade etmektedir.

Literatür araştırmasına başlarken, termo-ekonomi kavramı ilk başta termodinamik ve ekonomi olarak ayrılmıştır. Olayın termodinamik bazlı temelini anlayabilmek adına yakıt pilleri konusunda termodinamik anlamda yapılan analizler incelenmiştir. Yakıt pillerinin ekserji ve enerji bazlı analizlerinin yapıldığı çalışmalar tarandıktan sonra, yakıt pillerini elektrokimyasal olarak modelleyerek performans analizlerini yapan çalışmalar incelenmiştir. Yakıt pilleri elektrokimyasal açıdan modellenirken analitik, yarı ampirik ve teorik modellerden yararlanıldığı görülmüştür. Daha sonra yakıt pilleri için termodinamik ve ekonomik analizlerinin nasıl yapıldığı bu analizlerde kullanılan sistem parametrelerinin neler olabileceği araştırılmıştır.

3. TARİHÇE:

3.1 Yakıt Pili Teoreminin Ortaya Çıkışı ve Yakıt Pili Uygulamalarının Geçmişi

18'inci yüzyılın son çeyreğinden başlayarak 19'uncu yüzyılın ilk yıllarına kadar bilim adamları elektriğin varolabileceği yönündeki belirtiler karşısında adeta büyülendiler. Günümüzden çok önceleri araştırmacılar ileride yakıt pillerindeki gelişimlerin temelini oluşturacak belirtileri gördüler ve tanımladılar. Bu öncülerin arasında Şekil 3.1'deki bilim adamları bulunur.



Alessandro Volta, Pavia
1745-1827



Johann Wilhelm Ritter, Jena
1776-1810



Christian Friedrich Schoenbein,
Basel
1799-1868



William Robert Grove, Oxford
1811-1896

Şekil 3.1: Yakıt Pili Teoreminin Kurucuları [38]

Volta elektrik olgusunun bilimsel dayanakların üzerine oturtan ilk bilim adamıdır. Ritter, erken ölümüne rağmen elektriğin anlaşılması yönünde yaptığı çok sayıda deneyle olgunun gelişimine yardımcı olmuş, ve günümüzde elektro-kimyanın kurucusu olarak kabul edilir. Schoenbein ve Grove, bugün bizlerin yakıt pili olarak adlandırdığımız olguyu sistemli bir şekilde araştırmışlardır. O günlerde onlar gaz pili olarak adlandırıyorlardı. Bu terim, teorik yakıt pili adlandırmasına nazaran daha açıklayıcıdır ve temel olguyu tarif eder [29].

Schoenbein'in 1838 yazında Basle Üniversitesi'ndeki enstitüsünde yürüttüğü çalışmalar rahatlıkla anlaşılır ve geliştirilebilirdir. Sonuçlar kuvvetli ve rahatça görülebilirdir, bir çok kaynak Ritter'in de bu sonuçlardan yararlandığını gösterir. Ancak, o zamanlarda en hassas ölçüm araçları taze kurbağa ayağı, birinin kendi dili, ve birinin parmağıydı. Ritter, 1801 Şubat'ında yaptığı deneylerde şiddetli ve sürekli elektrik şoklarına maruz kaldığını anlatır. Bu olaylardan sonra, Ritter hasta yatağına düşmüş, ve on gün sonra dahi kendini iyi hissedememiştir [29]. Hiç şüphe yoktur ki, ileriki günlerde deney araçlarını daha fazla kullanmamayı yeğlemiştir. Günümüzde bilim adamları açısından işler bu kadar da zor değildir. Deney araçlarını tamamlamak uğruna alacakaranlık yollara düşüp bataklıklarda canlı avına çıkmaları ve hatta kendi hayatlarını tehlikeye atmaları gerekmemektedir.

150 yılı aşkın bir süreden beri, bilim adamları yakıt pili olgusu üzerinde sayısız çalışma yürütmekte ve geçmişten günümüze değin yakıt-elektrolit-elektrot üçgeninde çeşitli olasılıklar üzerinde çalışmaktadır.

İlk yakıt pilinin, 1839'da hukuk adamı ve mucit Sir William Grove tarafından elektrot olarak platin ve elektrolit olarak da sülfürik asit (H_2SO_4) kullanılarak oluşturulduğu kabul edilir [30]. İleriki zamanlarda William White Jaques, tesadüfen ilk olarak *yakıt pili* terimini kullanmıştır, tarafından hazırlanan düzeneklerde elektrolit görevini fosforik asit (H_3PO_4) üstlenmiştir.

Seramik yakıt pillerinin ortaya çıkışı ise Nernst'in 1899'daki katı oksit elektrolitleri keşfine dayanmaktadır [31]. İlk seramik yakıt pili uygulaması ise 1937'de Baur ve Preis'in geliştirdiği 1000 °C çalışma sıcaklığına sahip yakıt pilleridir [32].

En belirgin yakıt pili araştırmaları arasında 1920’lerde Almanya tarafından yapılan ve katı oksit yakıt pillerinin ve karbonat çevriminin gelişimine zemin hazırlayan deneyler zinciri gösterilebilir. 1945 yılında ABD, Almanya ve SSCB çalışmaları endüstriyel gelişim amacıyla Siemens ve Pratt & Wittney gibi kuruluşlar aracılığıyla bir dizi jeneratör üzerinde yoğunlaştırmıştır [33].

Belki de 20’inci yüzyılın en önemli yakıt pili araştırması Dr. Francis T. Bacon (doğrudan doğruya Francis Bacon’ın soyundan gelmektedir) tarafından Bacon Pili’nin bulunmasıdır. Dr. Bacon, elektrolit olarak kullanılan asitlerin yerine alkali kökenli elektrolit olan potasyum hidroksit (KOH) kullanmıştır. KOH elektrolit olarak en az asitler kadar iyi görev yapmasının yanı sıra elektrolitler üzerinde asit kadar aşındırıcı etki yapmamıştır. Bacon’ın bu buluşu NASA tarafından 1960 yılında Apollo projesinde ve STS mekiklerinde güç kaynağı olarak kullanılmıştır [34].

1980’li yılların başından itibaren ise ABD, Kanada ve Japonya’daki devlet kurumları yakıt pillerinin Ar-Ge çalışmalarına yönelik bütçelerinde ciddi artışlara gitmişlerdir. 1990 yılında ise yakıt pili üretiminde lider kuruluşlardan Ballard hidrojenle çalışan otobüs prototipleri geliştirmiş, ilk otobüs 1993 yılında kamuoyunun huzuruna çıkarılmış, 1990’lı yılların sonuna gelindiğinde ise altı adet yakıt piliyle çalışan otobüs Vancouver ve Chicago caddelerinde çalışmak üzere sefere konulmuştur [35].

Günümüze geldiğimizde ise çeşitli otomobil firmaları (ABD’de Ford, Almanya’da Volkswagen ve BMW) yakıt piliyle çalışan otomobilleri piyasaya sunmaya başlanmıştır. Ulaşım, uzay yolculuklarında, taşınabilir aygıtlarda, evsel güç üretiminde ve geniş çaplı enerji üretimlerinde yakıt pillerine yönelik çalışmalar ise hızla devam etmektedir. Gemi inşaat sektöründe ise henüz ticari boyutlarda uygulamalarla karşılaşmasak da gerek Amerikan ordusunun denizaltı uygulamaları gerekse AB’nin FCShip çalışmaları sürmektedir.

4. TANIM

4.1 Yakıt Pili'nin Tanımlanması

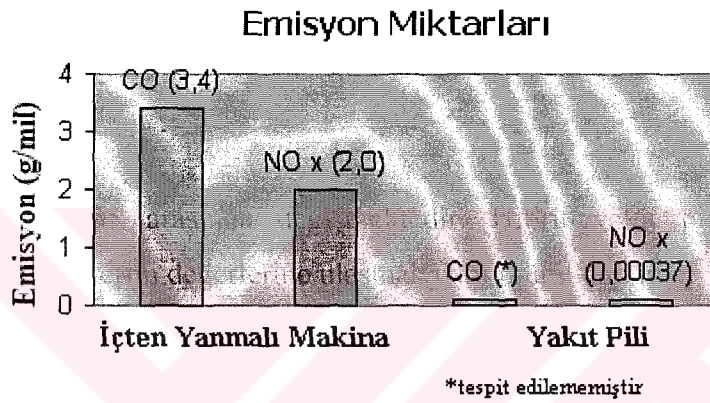
Yakıt pili, kimyasal enerjiyi doğrudan doğruya elektrik enerjisine çeviren bir cihazdır. Tam bir çevrim ele alındığında Yakıt Pili Araçlar yüksek bir verime sahiptirler. Hatta kimi hallerde geleneksel araba motorlarına nazaran iki ile üç kat daha fazla verime sahiptirler. Örneğin, içten yanmalı bir motorda kimyasal yakıt – benzin- silindir içerisinde yanar, ve ısı enerjisine dönüşür. Daha sonra bu ufak patlama sonucunda açığa çıkan ısı enerjisi pistonun bağlı bulunduğu mile iletilir ve o da mekanik enerjiye dönüştürür. Böylece aracımız hareket eder veya daha hızlı gitmeye başlar. Geleneksel içten yanmalı motorlarda verimi sınırlayan işte bu ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümüdür.

Klasik termodinamikte, bu ısı işlemlerden oluşan en verimli ısı çevrimin verimi Carnot Çevrimi ile sınırlıdır. Yakıt pillerinin en can alıcı özelliklerinden biri de böylesi bir ısı çevrim ile sınırlandırılmamış olmaları ve yakıt verimlerinin 80°C gibi düşük çalışma sıcaklıklarında bile Carnot Çevrimi'nin verim limitlerini aşabilmeleridir.

Yakıt pilleri birçok özelliği nedeniyle enerji çevrim aygıtı olarak alternatiflerine nazaran üstünlüklere sahiptir. Teknolojinin yeryüzü uygulamaları için ilgi çekmesinde başrol oynayan iki özellik nispi yüksek verimlerinin düşük çevresel zararlarıdır. Yakıt pilleri yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan doğruya elektrik enerjisine dönüştürürler. Böylece, yakıtın ısıya, ısının mekanik enerjiye, son olarak da mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü sırasında gözlemlenen alışılmış kayıplar önlenmiş olur. Yakıt pillerinin, hali hazırda yüksek olan verimleri tepkime sırasında yan ürün olarak açığa çıkan ısı enerjisinden de çeşitli şekillerde tamamıyla yararlanıldığı takdirde daha da artması olasıdır. Yakıt pillerinin yakıtın alt ısı değeri

bazlı verimleri %40-55 arasında değişmektedir. Hibrit yakıt pili-gaz tribünü uygulamalarında %70 verim değerlerine ulaşmak dahi mümkündür.

Yakıt pilleri, yakıt olarak çevreye olan zararları cüzi seviyelerde olan yakıtları kullanırlar. Ana kirleticilerin emisyonu geleneksel güç jeneratörlerine kıyasla yok denecek kadar azdır. NO_x ve SO_x gibi istenmeyen ürünlerin emisyonu ya ihmal edilebilecek seviyelerde ya da tespit dahi edilemeyecek seviyelerdedir. Tipik bir yakıt pilinde ölçülen emisyon değerleri NO_x için < 1 ppm, CO için 4 ppm ve reaktif organik gazlar için < 1 ppm seviyelerindedir. (Bakınız Şekil 4.1)



Şekil 4.1: İçten Yanmalı Makineler ve Yakıt Pilleri İçin Kara Mili² Başına Emisyon Miktarları [36]

Yüksek çevrim veriminin yanı sıra yakıt pillerinin diğer özgün özellikleri çevreyle uyumu, modüler olması, oturma esnekliği ve birden fazla yakıtla çalışabilmesidir. Yakıt pillerinin diğer önemli özelliği de modülerliğidir, yani modüler boyutlarda yapıldıkları için kolaylıkla kapasiteleri artırılır veya azaltılabilir. Yakıt pilleri boyutlarından bağımsız olarak yaklaşık olarak sabit verimde çalıştıkları için gelen yük talebine göre gerekli boyutlarda üniteler inşa edilir. Bu nedenle birkaç vattan megavatlara kadar değişen bir aralıkta yakıt pilleri üretmek mümkündür.

Yakıt pilleri değişik boyutlarda üretilebildiği için farklı konumlara asgari oturma kısıtlaması ile yerleştirilebilirler. Yakıt pilleri, hareketli parçalara sahip olmadıkları için sessiz çalışırlar, tek ses yapan yardımcı araç gereçlerdir. Sonuç olarak, yakıt pilleri şehir içi yerleşim alanlarında bile rahatlıkla kullanılabilirler.

² 1 kara mili = 1609,35 m

Birçok yakıt pili çeşidi birden fazla yakıtla çalışabilirler. Yüksek ısı yakıt pilleri, hidrokarbon yakıtları kendi içinde kullanacağı forma dönüştürür, ve bu esnada herhangi bir pahalı ek sisteme gerek duymaz. Tablo 4.1’de değişik yakıtların yakıt pili türleri için ne mana ifade ettiği gösterilmektedir [37].

Yakıt pillerinin yaygın kullanımı önündeki 2 büyük engel ise yüksek ilk yatırım maliyetleri ve yüksek sıcaklık pillerinin dayanım sorunudur. Üreticiler bu iki sorun üzerinde odaklanmaktadır.

Tablo 4.1: Yakıt İçerisindeki Gazların Değişik Yakıt Pili Çeşitleri İçin Anlamları [37]

Gaz Çeşidi	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Yakıt	Yakıt	Yakıt	Yakıt	Yakıt
CO	Zararlı (>10 ppm)	Zararlı	Zararlı (>0.5 ppm)	Yakıt	Yakıt
CH ₄	Seyreltici	Seyreltici	Seyreltici	Seyreltici	Seyreltici
CO ₂ ve H ₂ O	Seyreltici	Zararlı	Seyreltici	Seyreltici	Seyreltici
S (H ₂ S veya COS)	Araştırılıyor	Bilinmiyor	Zararlı (>50 ppm)	Zararlı (>0.5 ppm)	Zararlı (>1 ppm)

Yakıt pillerinin sunduğu özellikleri şu şekilde derleyebiliriz:

- Dolaysız enerji dönüşümü (yanma olayı olmaksızın)
- Enerji dönüşümü esnasında hareketli parçaların olmayışı
- Sessiz oluşları
- Düşük sıcaklık yakıt pillerinin ispatlanmış yüksek uygulanabilirliği
- Yakıt esnekliği
- Düşük sıcaklıklı yakıt pillerinin ispatlanmış dayanıklılığı
- Dizayn dışı yüklemelerde iyi performans sergileyebilmesi
- Modüler olmaları nedeniyle yükleme ve güvenlik değişimlerine tepki verebilmeleri
- Boyut esnekliği
- Yüklemelere hızlı cevap verebilmeleri

Yakıt pillerinin sahip olduğu olumsuz özellikleri ise şu şekilde özetlenebilir:

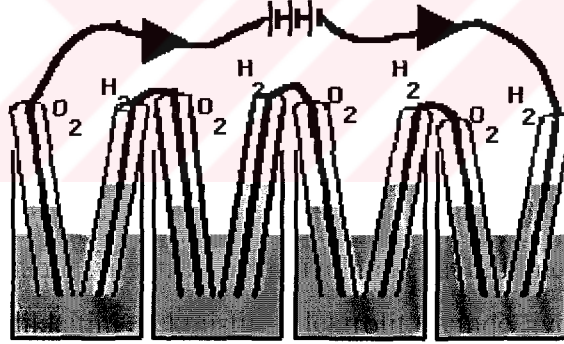
- Pazara giriş maliyetinin yüksek olması ve maliyet hedeflerinin hala tutturulmamış olması
- Güç sanayii için tanıdık bir teknoloji olmaması
- Altyapı eksikliği



5. TEMEL YAPI VE ÇALIŞMA İLKESİ

5.1 Elektroliz ve Gaz Piline Geçiş

Elektroliz, aynı zamanda suyun ayrışması olarak da bilinmektedir, her dönemde bilim adamlarının dikkatini çekmiştir. Elektrolit, içinde iyonları bulunduran bir maddedir. Bu asit, alkali veya tuz çözeltisi de olabilir. İyonlar, polar su moleküllerinin etkisiyle yüklenmiş parçacıklardır, bu olay ayrışma olarak da adlandırılır. Metaller ve hidrojen artı yüklü iyonlar oluştururken, ametaller ise eksi yüklü iyonlar meydana getirir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Suyun Elektrolizi [38]

Tablo 5.1’de ayrışma olayına örnekler verilmektedir.

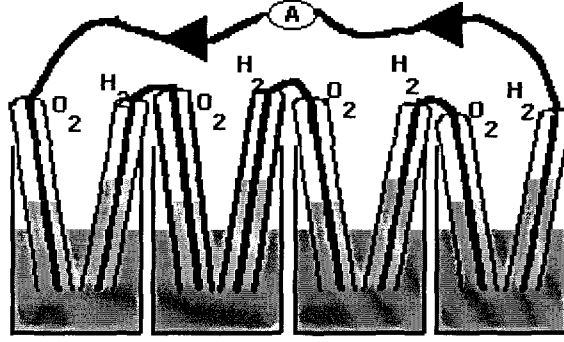
Tablo 5.1: Değişik Bileşiklerin Ayrışması Sonucu Oluşan Ürünler

Çözeltideki madde	İsmi	Artı yüklü iyonlar	Eksi yüklü iyonlar
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit	H ⁺ , H ⁺	SO ₄ ²⁻
NaOH	Sert soda	Na ⁺	OH ⁻
NaCl	Sofra tuzu	Na ⁺	Cl ⁻

Elektrolize devam ederken, çözelti içerisinde benzer iki elektrotta kullanılabilir. Bu iki elektrot, doğru akım kaynağının (pil gibi) uçlarına bağlanır. Artı yüklenen iyonlar (katyon) katot olarak da bilinen eksi kutba doğru hareket eder. Eksi yüklü iyonlar ise anot olarak da bilinen artı kutba doğru ilerlerler. Elektrotlarda, her iki tip iyon da boşalır ve nötr parçacıklar (atom veya moleküller şeklinde) bulunur. Bu halleriyle çevreyle kimyasal tepkime içine girerler: elektrotun üzerinde yoğunlaşabilirler, gaz halinde ortamdan kaçabilirler, veyahut da ikincil bir tepkimeye girerler. Bu olay daha iyi anlaşılabilmesi için bir örnekle anlatılacak olursa;

Örnek olarak, , hem hazırlanması en kolay, hem de diğer kimyasallara göre en zararsız çözelti olan sofra tuzunun çözeltisi kullanılacak olursa; sofra tuzu, suyun içerisinde çözünür, sodyum ve klorür iyonlarına (Na^+ ile Cl^-) ayrışır. Cl^- , artı yüklü elektroda (anot) ilerler, nötrlenir (bir elektron verir) ve su yüzeyine baloncuklar halinde yükselen gaz moleküllerini oluşturur (Cl_2). Yüzme havuzlarında kokusunu duyduğumuz şey işte bu gazın kokusudur. Diğer bir taraftan ise, Na^+ da eksi yüklü elektroda (katot) ilerler, nötrlenir (bir elektron alır). Yüksek aktifliğe sahip sodyum metali su içerisinde kararsız bir yapıya sahiptir. Anında ikinci bir tepkimeye girer ve sodyum-hidroksite dönüşür. Bu tepkimenin gerçekleşmesi için su moleküllerinde OH^- iyonlarının H^+ iyonlarından ayrışması gerekir. Açıkta kalan H^+ iyonları birleşerek hidrojen moleküllerini oluşturur ki bunlar da katottan baloncuklar halinde ayrılır. Sonuç olarak böyle bir sofra tuzu çözeltisinde tepkime ürünleri olarak klor gazı (Cl_2) ve hidrojen gazı (H_2) açığa çıkar.

Eğer biri elektroliz sırasında dış potansiyel kaynağını kaldırırsa, çıkan hava kabarcıklarının akımı duracaktır, fakat birçok hava kabarcığı elektroda yapışmaya devam edecektir. J. W. Ritter, dış potansiyel kaynağı kaldırıldığında böyle pilde elektrik potansiyelinin ölçülebileceğine dair yaptığı deneylerle tanınır. Gaz ile kaplı elektrotların elektrik sağlaması, yakıt pilinin sonuçlarından biri olsa da bu olay gaz pili veya ters elektroliz olarak da tanımlanır (bakınız Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Suyun Oluşması [40]

5.2 Galvanik Öğeler

Basit olarak galvanik bir öğe ‘Anot – Elektrolit – Katot ‘tan oluşur. Bu tip öğeler kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlar. En çok rastlanan durum, anot ve katodun birbirinden farklı maddelerden seçilmiş olmasıdır (örneğin çinko ve bakır). Kararsız metal, burada çinko ele alınırsa, aşınır: artı yüklenmiş Zn^{2+} iyonları iki elektronu çinko elektrotta bırakarak çözeltiye karışır. Bu durumda çinko elektrot eksi kutup haline gelir. Zn^{2+} iyonları bakır elektroda yapışır, nötr hale gelebilmek için iki elektrona ihtiyacı vardır. Bundan dolayı, bakır elektrotta elektron açığı oluşur ve dolayısıyla artı kutup haline gelir. Bu tip bir elektriksel dengesizliğin giderilmesi gerekir. Elektronlar elektrolit üzerinden doğrudan eksi kutuptan artı kutba doğru gitmek ister, fakat elektrolit yapısı gereği sadece iyonları iletirken, elektronların geçişine olanak tanımaz. Dolayısıyla, yüklerin eşitleninceye kadar iki elektrot arasında dış devre üzerinden bir yol oluşturmak gerekir.

Çinkonun, kendiliğinden oluşan bu ekzotermik aşınma tepkimesi neticesinde elektrik enerjisi açığa çıkar. Günlük hayatta kullandığımız tüm elektrikli ve elektronik taşınır araç gereçte kullandığımız piller bu ilkeye göre çalışır.

5.2.1 Galvanik öğe olarak yakıt pilleri

Yakıt pilimiz bu ilke doğrultusunda nasıl çalışıyor? Elimizde farklı iki elektrot olmadıkça dolayısı potansiyel oluşmayacaktır. Elektroliz sonucunda elektrotların üzerinde gaz baloncukları oluşmamış olsaydı, bu yaklaşım çok doğru bir tespit

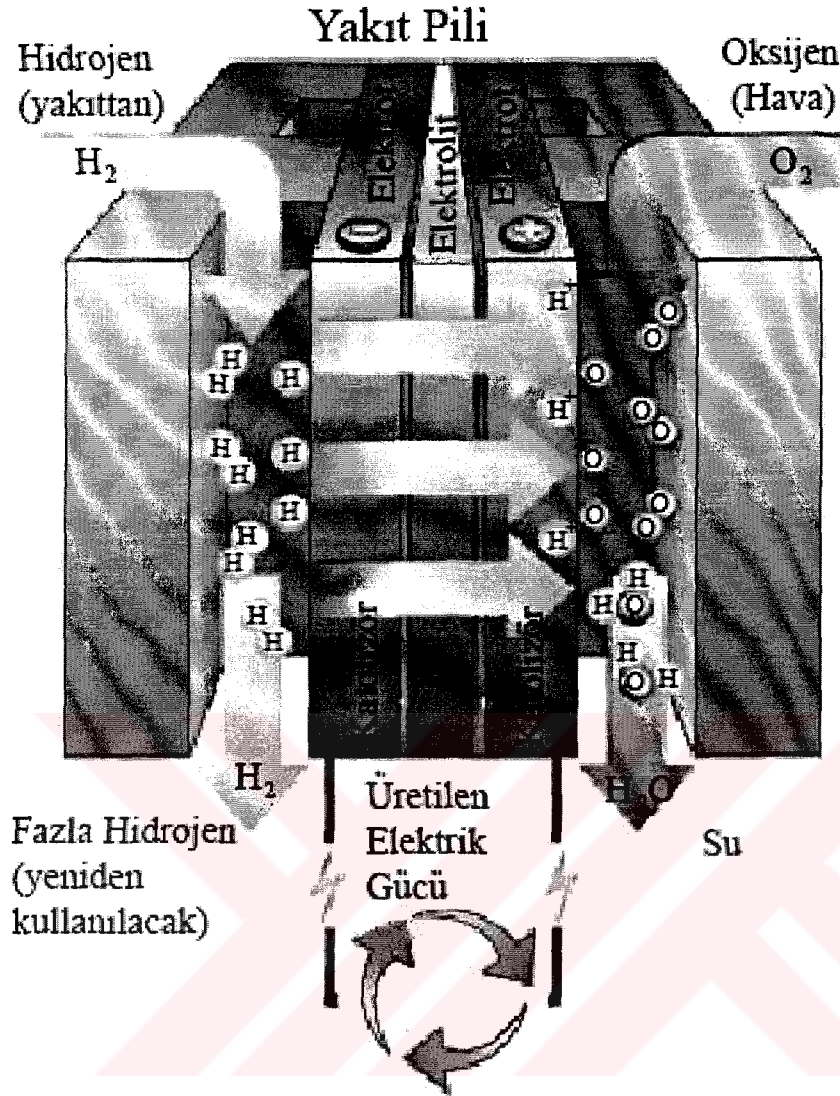
olurdu. Tuz çözeltisinin kullanıldığı örnekte, netice olarak hidrojen ve klor gazları oluşmuştu, yani iki birbirinden farklı elektrot oluşmuştu.

5.2.2 Tersine elektroliz olarak yakıt pilleri

Gaz ile kaplı elektrotta ve elektrolit çözeltisinde tersine elektroliz olayı gerçekleşir. Elektrolizin sonucu elimizde klor ve hidrojen gazları vardı, bunlar birleşerek hidroklorik asidi (HCl) oluşturur. Ancak burada dikkate alınması gereken bir kısıtlama var ki o da hidroklorik asidin oluşumu için platin elektrotların kullanım zorunluluğudur. Platin yüzeyin katalitik etkisi olmaksızın tepkime kendiliğinden (ekzotermik olarak) oda sıcaklığında gerçekleşemeyecektir. Bu olayın bilimsel adı ise 'heterojen kataliz'dir.

5.3 Yakıt Pilinin Yapısı

Yakıt pilleri bir çok parçanın bir araya gelmesi ile oluşur. Fakat yakıt pilinin kalbi olarak yığın gösterilebilir. Bu yığın birçok ince düz hücrenin bir araya gelmesiyle oluşur.(Yakıt pili esasen tüm sisteme denilse de açıkçası konuşmalarda tek bir hücre olarak kabul edilir.) Her hücre kendi başına elektrik üretir ve tüm hücrelerin çıktısı birleşerek aracı besler. Her bir hücre değişik maddelerden yapılan plakalardan oluşur. Bazı plakalar, elektrik üretimini sağlamak amacıyla tepkimeyi başlatır, ki bunlara katalizör denir. Her bir hücre dış ortamdan alınan oksijen ve yakıttan elde edilen hidrojenle beslenir. Hidrojen hücre içerisinde ilerler ve iki katalizör levhadan ilki ile karşılaşır. Katalizör, hidrojen moleküllerinin elektronlarını ve protonlarını terk ederek arabayı beslemek üzere elektrik akımı oluşturmalarını sağlar. Protonlar (hidrojen iyonları) elektrolitin içinde ilerleyerek ikinci katalizör levhaya ulaşır ve burada oksijen ile tepkimeye girerek su moleküllerini oluştururlar. Suyun büyük bölümü toplanarak sistem içerisinde yeniden kullanılırken, az bir miktarı da su buharı olarak ortamı terk eder. Diğer plakalar çift kutuplu olarak adlandırılır ve hava ile yakıtı sisteme girmesini sağlar ve elektriği hücreden iletir.



Şekil 5.3: Tek Bir Yakıt Pili Hücresinin Yapısı [40]

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 yakıt pilinin temel çalışma ilkesini göstermekte olduğu daha önce de belirtilmişti, fakat üretilen elektrik akımı cüzi seviyelerdedir. Bu az akımın başlıca nedenleri olarak ; gaz, elektrot ve elektrolit arasında temas yüzeyinin düşük olması ve elektrotların arasındaki mesafe farkının fazlalığıdır. Bu sorunları bertaraf etmek üzere elektrotları düz levhalar olarak seçilmesi ve ince bir elektrolit tabaka ile ayrılmaları uygun görülmüştür. Elektrotun yapısı geçirgen olduğu için, hem elektrolit bir yüzünden, hem de gaz diğer yüzünden rahatlıkla geçebilir. Bu şekilde, elektrot, gaz ve elektrolit arasında azami temas yüzeyi oluşturulur [41].

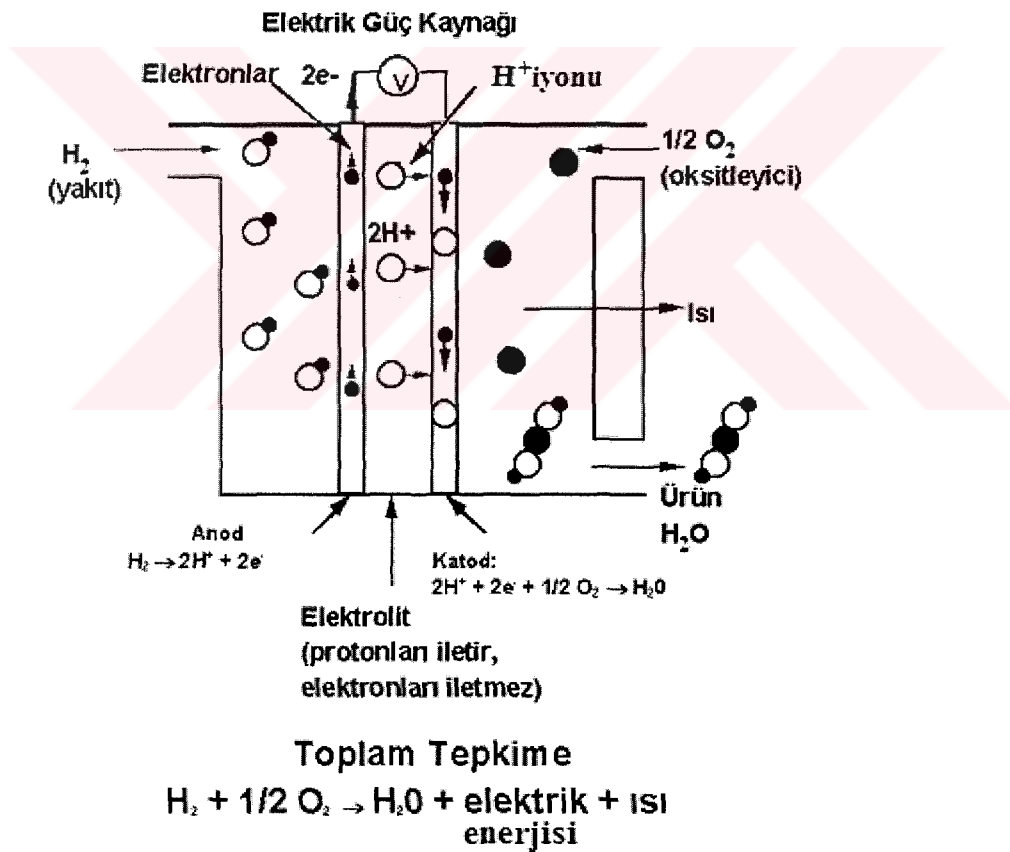
Oksijenle hidrojenin kimyasal tepkimesinden nasıl elektrik akımı oluştuğunu ve elektronların nereden geldiğini daha iyi anlayabilmek için elektrotlarda gerçekleşen

tepkimleri ayrı ayrı incelememiz gerekir. Bu ayrıntılar her yakıt pili çeşidi için farklılık gösterse de başlangıç olarak, Grove'un yaptığı gibi asit elektrolitli bir hücre ele alınırsa, temel mantık rahatlıkla anlaşılmış olur.

Asit elektrolitli bir yakıt pilinin anodunda hidrojen gazı iyonla dönüşür (elektronlardan ayrışarak H^+ iyonlarını -protonları- oluşturur)



Bu tepkime neticesinde enerji açığa çıkar. Katotta, oksijen elektrottaki elektronlarla ve elektrolitteki H^+ iyonlarıyla tepkimeye girer. Sonuç olarak su açığa çıkar.



Şekil 5.4: Temel Tepkime [34]

Her iki tepkimenin de devamlı olarak birbirini takip etmesi için, anotta açığa çıkan elektronların elektrik devresi aracılığıyla katoda gitmesi gerekir. Ayrıca, H^+ iyonlarının da elektrolitten geçerek katoda ulaşması gerekmektedir. Asitler, serbest

H⁺ iyonlarını bünyelerinde bulunduran bileşiklerdir ve dolayısıyla bu görevi başarıyla gerçekleştirebilirler. Birçok polimer de serbest H⁺ iyonları taşıyacak şekilde üretilir. Bu tip maddelere proton değişim zarları denir ki H⁺ iyonları da birer protondur.

(5.1) ve (5.2) tepkimeleri kıyaslanırsa, sistemin denge halinde tutulabilmesi için her bir oksijen molekülüne karşılık iki hidrojen molekülünün gerektiği görülecektir. Ayrıca, elektrolitin sadece H⁺ iyonlarının geçişine izin verip, elektronların geçişine izin vermemesi gerektiğine de dikkat edilmelidir. Aksi takdirde, elektronlar dış devre yerine elektrolitin içinden geçecek ve hepsi kayıp olacaktır.

Alkali elektrolitli yakıt pillerinde toplam tepkime yine aynıdır, fakat her bir elektrotta gerçekleşen tepkime farklılık gösterir. Alkali hidrokside OH⁻ iyonları serbest halde mevcuttur. Anotta, bunlar hidrojenle tepkimeye girer, enerji ve elektron verip su oluştururlar.



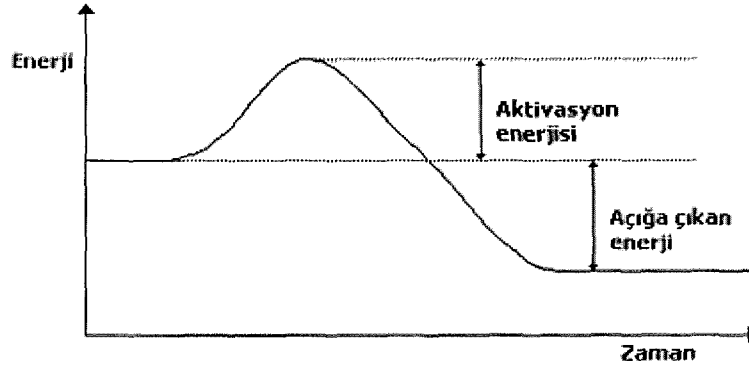
Katotta ise oksijen elektrottaki elektronlarla ve elektrolitteki su ile birleşerek yeni OH⁻ iyonları açığa çıkar.



Bu tepkimelerin devamlı olarak birbirini takip ederek oluşabilmesi için OH⁻ iyonlarının elektrolit içersinden geçebilmesi ve elektronların akması için anot ile katot arasında elektrik devresi olması gerekir. Ayrıca, (5.3) ve (5.4) tepkimeleri kıyaslanırsa asit elektrolitte olduğu gibi oksijenin iki katı kadar hidrojene ihtiyaç vardır.

5.3.1 Elektrik akımını sınırlayan unsurlar:

Hidrojen anotta tepkimeye girer ve enerji açığa çıkar. Fakat, enerjinin açığa çıkması tepkimenin sınırsız ölçülerde gerçekleşmesini gerektirmez. Tepkime açığa çıkması formuna sahiptir (Şekil 5.5).



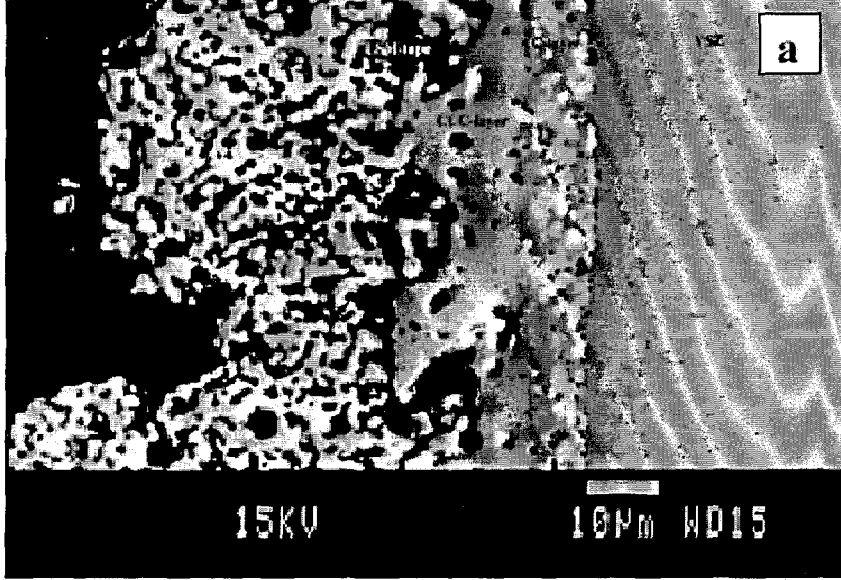
Şekil 5.5: Enerji - Zaman Grafiği [40]

Enerji tepe noktasını aşabilmek için aktivasyon enerjisinin sağlanması gerekir. Molekül düşük enerji potansiyeline sahipse tepkime yavaş gerçekleşecektir. Bunun neticesinde de elektrik akımı sınırlanacaktır. Çok yüksek sıcaklıklar dışında, bu durum yakıt pilleri için de geçerlidir.

Bu gibi yavaş tepkimelerle baş edebilmek için üç ana yöntem mevcuttur [40]:

- katalizör kullanımı
- sıcaklığı arttırmak
- elektrot yüzey alanını arttırmak

İlk iki yöntem her türlü kimyasal tepkime için geçerlidir. Fakat, üçüncüsü sadece yakıt pillerine özgüdür ve en etkinleridir. (5.3) tepkimesini ele alırsak, yakıt olarak kullanılan gaz ve elektrottan gelen OH^- iyonları aktivasyon enerjisi için bir araya gelmelidir. Bu bir araya gelme elektrot yüzeyinde gerçekleşir. Tepkimenin gerçekleşme hızı elektrodun yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Bilindiği üzere, elektrotlar geçirgen malzemeden yapılmaktadır, bu mikro yapıları da onlara geometrik yüzey alanlarının (uzunluk x genişlik) yüzlerce hatta binlerce katı daha fazla bir yüzey alanı sağlar (Şekil 5.6).

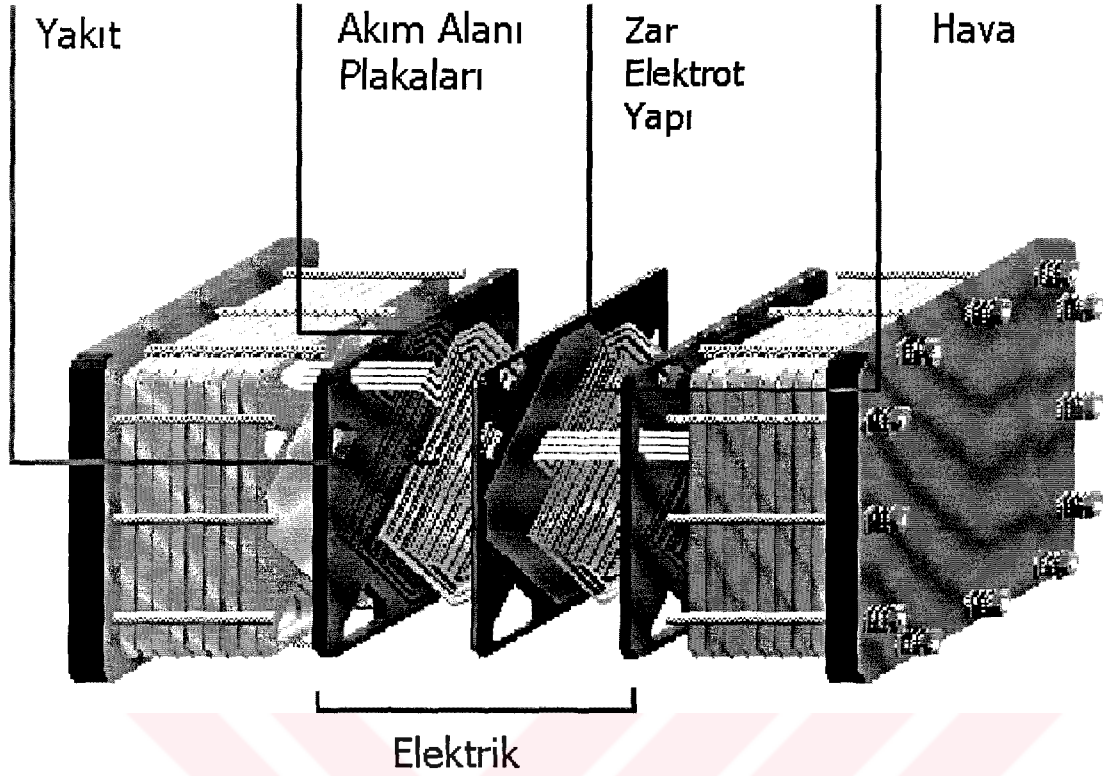


Şekil 5.6: Yakıt Pillerinde Kullanılan Elektrotun Mikroskop Altındaki Görünümü [40]

5.3.2 Hücrelerin seri bağlanması

Tek bir yakıt pili hücresinin potansiyeli açığa çıkan tüm elektrotları devreden geçtiği kabulüyle 0.7 voltuttur. Bu da demek oluyor ki, herhangi bir aracı sevk edebilmek için yüzlerce hücrenin seri olarak bağlanması gerekmektedir. Bu tip seri bağlanmış hücreler topluluğu yığın olarak adlandırılmaktadır. Bu bağlantıyı yapmanın en bilinen yolu her bir anodu diğer hücrenin katoduyla bir doğru boyunca bağlamaktır (Grove'un Şekil 5.2'de yaptığına benzer şekilde). Bu yöntem tek bir hücrenin ürettiği potansiyelin çok düşük olması ve elektronların elektrot yüzeyinden akımın toplandığı bağ noktasına kadar akışını gerektirdiği için pek de kullanışlı değildir.

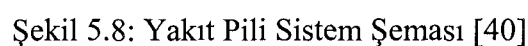
Hücrelerin bağlanmasında çift kutuplu plakaların kullanımı daha etkindir. Bu yöntemde, tüm hücrelerin katodu ve anodu bir sonraki hücreninkilerle birleştirilmektedir. Aynı zamanda, çift kutuplu plakalar katoda oksijen, anoda da yakıt gazı sağlar. İki elektrot arasında iyi bir elektrik bağlantısı yapılması gerektiği halde, gaz kaynakları birbirinden kati suretle ayrılmalıdır. Genel olarak görünümü Şekil 5.7'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7: PEM Yakıt Pili Yapısı [46]

Her iki yöntem kıyaslandığında çift kutuplu plakaların daha verimli bir akım akışına sahip olduğu görülmektedir. Akım, sadece köşelerden değil elektrot yüzeyinin her noktasından toplanmaktadır. Aynı zamanda, elektrotlar eskisine göre daha iyi desteklenmekte, yani sistem daha sağlam bir hal almaktadır. Ancak, çift kutuplu plakaların dizaynı hiç de kolay değildir. Elektriksel irtibat arttırılmak istendiğine göre, temas noktaları mümkün olduğunca geniş olmalıdır. Ancak, bu da elektrotlara gelen gaz akışını azaltacaktır. Temas noktaları küçük olacaksa, en azından sık olmalıdır. Ancak bu sefer de plakaların imalatı daha karmaşık, daha zor ve daha pahalı olacaktır. İdeal çift kutuplu plaka yakıt pili yığını daha küçük yapmak ve elektriksel direnci azaltabilmek için olabildiğince ince olmalıdır. Ancak, bu gaz akışının sağlandığı kanalları daraltacak, ki bu da pile gazın yollanmasını güçleştirecektir. Oysa ki hava yerine saf oksijen kullanıldığı vakit bu akışın yüksek hızla yapılması gerekecektir. Düşük sıcaklık yakıt pillerinde dolaşan hava buharlaşmalı ve yan ürün suyu sistemden uzaklaştırmalıdır, bu da sistemde soğutucu suyu taşıyan yeni kanallar gerektirecektir.

Yakıt pili güç sistemlerinde çekirdek yapı elektrotlar, elektrolit ve daha önce bahsedilen çift kutuplu plakalardan oluşur. Ancak, çoğunlukla diğer parçalar sistemdeki mühendisliğin büyük oranını oluşturur. Yüksek sıcaklık pillerinde yığın sistemin küçük bir parçasını oluşturur. Gereken bu diğer bileşenler tamamen yakıt pilinin türüne bağlıdır. Fakat, tüm pillerde yakıt ve hava, sistemde pompalar, kompresörler aracılığıyla dolaşmak ister. Pilden alınan doğru akım çıktı çoğunlukla doğrudan doğruya kullanılamaz. Bunun için doğru akımı alternatif akıma çevirmek gerekir. Pompaları çalıştırmaya yarayan elektrik motorları da sistemin önemli parçalarıdır. Yakıt depolanması da önemli bir sorundur. Yakıt pili hidrojen kullanmıyorsa yakıt işleme ünitesi gerekecektir. Örnek olarak benzinden hidrojen eldesi gerektiği zaman ters sülfürleme lazım olacaktır. Bu işlem de oldukça büyük ve karmaşık yapılarla sağlanmaktadır. Öte yandan, bir çok kontrol vanaları da gerekebilir (basınç düzenleyiciler gibi). Birçok durumda sistemi kontrol altında tutabilmek için kontrol ünitesi de gerekebilir. Tüm küçük sistemlerde soğutma ısı değiştiricilerle yapılmaktadır. Bu işlem sırasında amaç ısıyı dışarı atmak değil farklı bir konumda tekrar yararlanabilmektir. Örnek olarak yüksek sıcaklık pillerinde ısının bir kısmı hava ve yakıtın ön ısıtımında kullanılmaktadır. Şekil 5.8’de şematik olarak tüm sistem gösterilmektedir.

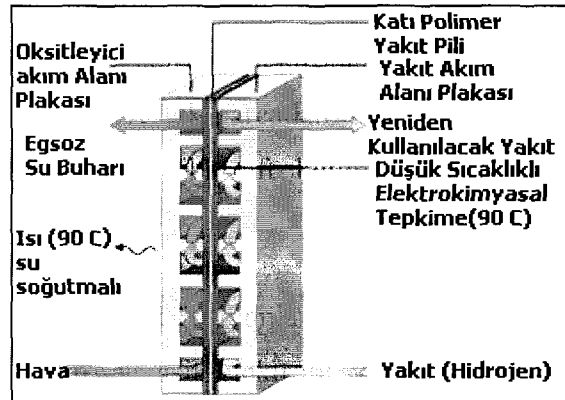


6. KATI POLİMER YAKIT PİLLERİ

6.1 Giriş

Katı polimer yakıt pilleri (SPFC) ilk olarak 1960'lı yıllarda General Electric tarafında NASA'nın ilk insan yerleştirilmiş uzay araçlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [41]. Elektrolit olarak iyon iletkenliği olan polimerler kullanılır. Her iki tarafta da kataliz edilmiş geçirgen elektrotlar bağlıdır. Anot-elektrolit-katot Şekil 6.1'de görüldüğü üzere ince ve tek parçadan oluşur. Bu ince zar elektrot oluşumları önceki bölümlerde anlatıldığı gibi çift kutuplu plakalar yardımıyla seri olarak bağlanır (bakınız Şekil 5.7).

Elektrolitteki serbest iyon olarak H^+ iyonları yani protonlar kullanılır. Bu şekliyle de temel çalışma şekli itibarıyla asit elektrolit yakıt pilleriyle benzerlik gösterirler. Polimer elektrolitler düşük sıcaklıklarda çalışabilme yetisine sahiptir. Bu da SPFC'ye çabuk çalışma özelliğini kazandırır. Yapı taşlarının inceliği istenen boyutlarda ve şekillerde yakıt pilleri imalini kolaylaştırır. Diğer üstünlükler ise aşındırıcı sıvı hasarlarının olmayışı ve ünitenin her türlü yönde çalışma olanağıdır. Bu da demek oluyor ki SPFC araçlarda ve taşınabilir aletler için uygun birer güç sistemleridir.



Şekil 6.1: Katı Polimer Yakıt Pili

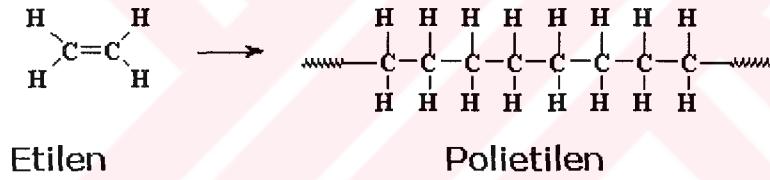
SPFC'nin ilk uygulaması, Gemini uzay aracında sadece 500 saatlik bir görev yaptı. Bu kısıtlı zaman o günkü amaçlar için hiç de yetersiz değildi [42], çalışmalar Dupont tarafından geliştirilen ve Nafion adı verilen polimer zar ile devam etti [43]. Bu teknoloji günümüzde de en çok rağbet gören zar çeşididir.

6.2 Polimer Elektrolit Zar Yapısı

6.2.1 Elektrolit yapısı

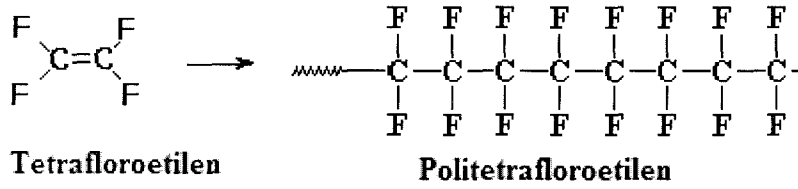
Polimer elektrolit zar üreten tüm firmaların kendilerine has sırları var. Ancak ortak noktaları floroetilen benzeri kükürtoksitlenmiş floropolimerler kullanmalarıdır. bunların içinde en fazla tercih edilen Dupont'un tescilli markası olan Nafion'dur [44].

Elektrolitin yapısını incelemeye en basit insan yapımı polimer olan polietileni inceleyerek başlayalım. Bu maddenin temel taşı etilendir (Şekil 6.2).



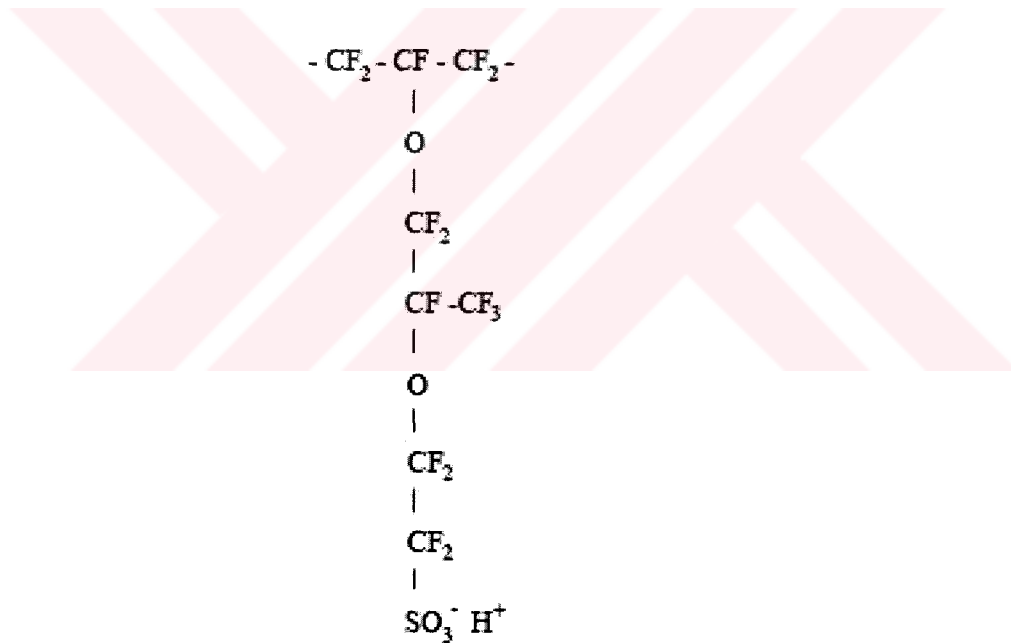
Şekil 6.2: Polietilenin Kimyasal Yapısı [44]

Bu ilk polimer hidrojenin atomlarının flor atomları ile yer değiştirmesi ile geliştirilmiştir. bu işlem diğer birçok bileşiğe uygulanmış ve perflorizasyon denmektedir. bu yeni oluşan polimer ise politetrafloroetilen olarak adlandırılmıştır. Bu yeni oluşan polimer halk arasında teflon olarak da bilinmektedir. Bu dikkat çekici madde yakıt pillerinin gelişiminde büyük bir rol oynamıştır. Karbon ve flor atomları arasındaki güçlü bağ malzemeye mekanik dayanıklılık kazandırmıştır. bir diğer önemli özelliği ise yapısının güçlü bir hidrofobiye sahip olması, dolayısıyla da yan ürün olarak elektrotlarda açığa çıkan suyu sistemde tutmayı şıdır. Bu özelliği günlük hayatta yağmurluklarda da kendini göstermektedir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3: Politetrafloroetilenin Kimyasal Yapısı [44]

Gelişimin bir sonraki aşamasında, araştırmacılar polimeri kükürt oksitlemiş yani sonu sülfonik asitle biten yeni bir halka eklemişlerdir. Kükürt oksitleme karmaşık moleküllerin kimyasal işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. En bilinen kullanım yeri de deterjan üretimidir. Şekil 6.4'te Nafion'un zincir dizilimi gösterilmektedir.



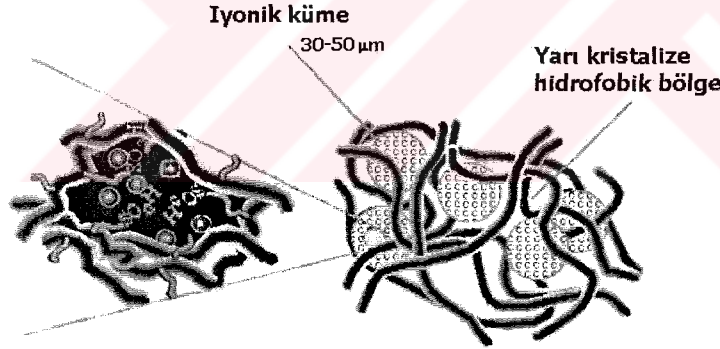
Şekil 6.4: Nafion'un Kimyasal Yapısı [44]

Nafion, katı bir organik polimerdir. tipik olarak üç ana bölümden oluşur.

- (1) Teflon benzeri florokarbon dış zincir, boyu yönünde yüzlerce kez tekrar eden
 $-\text{CF}_2-\text{CF}-\text{CF}_2-$ zinciri
- (2) dış zinciri üçüncü bölüme bağlayan yan zincirler,
 $-\text{O}-\text{CF}_2-\text{CF}-\text{O}-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$,
- (3) sülfonik asit iyonlarından, $\text{SO}_3^- \text{H}^+$, oluşan iyon takımı

SO_3^- ve H^+ iyonlarının oluşu moleküller arasında + ve - iyonları arasında güçlü bir karşılıklı çekim oluşmasına neden olur. Bunun sonucu olarak da yan zincir moleküllerinin tüm yapı içerisinde bu iyon kümesine eğilim gösterir. Sülfonik asidin en önemli özelliği hidrofil bir yapıya sahip olmasıdır, yani suyu çeker. Bu özelliğini daha iyi canlandırabilmek için deterjanlar incelenmelidir. Bu sayede bir ucuyla suya bağlanırken diğer ucu ile de kire bağlanır. Suyun dışarı atılımı sırasında kir de suyla beraber ortamdan ayrılır. Sonuç olarak diyebiliriz ki, Nafion'da hidrofobik bir yapının içerisinde hidrofil alanlar yaratılmıştır.

İyon takımının etrafındaki hidrofil alanlar büyük oranlarda suyu emer, ve malzemenin kuru ağırlığını %50'ye varan oranlarda arttırabilir. Bu suyla kaplı alanlarda H^+ iyonları SO_3^- iyonlarıyla bağları zayıflar negatif SO_3^- iyonları zincire daimi olarak bağlı kalırken protonlar serbest iyon halini kolaylıkla alırlar. Şekil 6.5'te Nafion'un mikroskobik yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Suyu emen kısım her ne kadar ayrı bir yapı olarak gözüксе de H^+ iyonları için uzun destek moleküler yapı içerisinde hareket olasıdır.

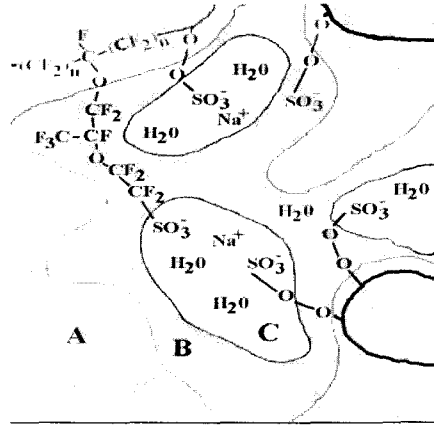


Şekil 6.5: Nafionun Mikroskobik Yapısı [44]

Sonuç olarak, Nafion ve tüm diğer florosülfonat iyonomerlerin ana özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- yüksek kimyasal dirence sahip oluşları
- mekanik olarak sağlamlıkları, dolayısıyla 50 µm'lik ince tabakalar halinde üretime uygun oluşları (bu kalınlık ölçüsünü dosya kağıtlar cinsinden ele alırsak bir dosya kağıdının kalınlığı yaklaşık olarak 25 mikrondur. Bu da demek oluyor ki kullanılan yapı sadece iki dosya kağıdı kalınlığındadır.)

- asidik olmaları
- büyük miktarda suyu emebilmeleri
- yeteri kadar su emdirildiğinde çok iyi proton iletken oluşları



Şekil 6.6: Nafion'un Su Emdirilmiş Haldeki Kimyasal Yapısı [44]

6.2.2 Elektrot yapısı

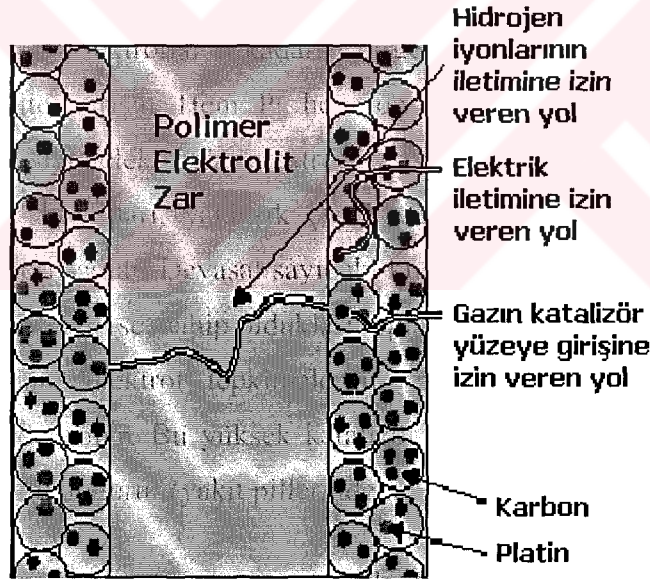
Anot ve katot için de en iyi katalizör pahalı bir metal olan platindir. Her iki elektrotta da gerçekleşen yarı tepkimeler ancak Pt katalizörün yüzeyinde yüksek hızda gerçekleşir. Platin tartışılmaz tektir, çünkü elektrot işlemlerini gerçekleştirmesini sağlamak için hidrojen ve oksijeni birleştirme de yeterli bir reaktiftir ve son ürünün oluşması için yarı mamulü serbest bırakma da etkilidir. Örnek verilecek olursa, katot H_2 molekülleri tepkimeye girdikleri zaman Pt atomlarının H atomlarıyla bağ kurmasına ve daha sonra H atomlarını $H^+ + e^-$ şeklinde serbest bırakmasına ihtiyaç duyar [45].



Bu H atomlarına optimum bir bağ gerektirir, ne çok zayıf ne de çok güçlü, işte bu da katalizörün ne kadar iyi olduğunun göstergesidir. Polimer elektrolit zar yakıt pilleri için en uygun katalizörün maliyeti göz önüne alındığı takdirde kullanılan Pt katalizör miktarını asgari seviyelerde tutmak önemli bir hedef olmalıdır. Bu amaca ulaşmanın

en etkin yolu katalizör tabakayı azami temas yüzeyine sahip olacak şekilde oluşturabilmektir. Her elektrot geçirgen karbon ve ona bağlanmış çok küçük Pt parçacıklardan oluşur. Elektrotlar o kadar geçirgendir ki gaz kolaylıkla elektrodun içerisinden elektrolite karışır. Hem Pt hem de C elektron iletkenlikleri yüksek elementlerdir, dolayısıyla elektronlar elektrot içerisinde serbestçe hareket ederler. Pt parçacıkların küçük boyutları, yaklaşık çapları 2 nm'dir, gaz moleküllerine çok büyük temas yüzeyleri sağlar. Devasal sayıdaki küçük parçacıkların sunduğu toplam yüzey alanı ne kadar büyükse, sahip oldukları toplam kütle de o boyutlarda azdır. Bu geniş Pt yüzey alanı elektrot tepkimelerinin aynı anda bir çok Pt yüzeyde gerçekleşmesine neden olur. Bu yüksek katalizör dağılımı da belirgin bir elektron akımının yaratılmasını doğurur (yakıt pillerindeki akım gibi).

Şekil 6.7'de düzenli olarak karbon parçacıklarla desteklenmiş platin parçacıklardan oluşan geçirgen elektrotlar polimer elektrolit zar yapının içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 6.7: PEM Yakıt Pillerinin Mikroskobik Yapısının Şematik Gösterimi [41]

PEMFC araştırmalarının ilk yıllarında 28 mg/cm²'lik platin katalizörler kullanılmaktaydı. Platinin PEMFC maliyetinde en büyük unsur olduğu göz önüne alınırsa bu inanılması güç bir rakamdır. (platinin uluslar arası pazarlardaki fiyatı 380 \$/oz'dur). Son yıllarda bu rakam güç arttırıldığı halde yaklaşık olarak 0.2 mg/cm²'ye kadar geriletilebilmiştir.

6.3 Gelecekle İlgili Beklentiler

Polimer elektrolit zar yakıt pilleri suyun sıvı fazda kaldığı sıcaklık aralığında çalışma olanağına sahiptir. Zar su içermeli ki hidrojen iyonları zar içinde yük taşıyabilsinler. Polimer elektrolit zar yakıt pillerinin 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışması uygun basınç altında olanak verir. Basıncı azalarak normal şartlar altında suyun kaynama sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda suyu sıvı fazda muhafaza edebiliriz, ama aynı zamanda yakıt pilinin ömrünü de kısaltmış oluruz [40].

Polimer elektrolit zar yakıt pillerindeki bir diğer rahatsız edici hususta maliyetidir. Günümüzde polimer elektrolit zarın maliyeti yaklaşık olarak 1100 \$/m² civarındadır. Fiyatların, polimer elektrolit zar yakıt pillerine olan müşteri ilgisinin artmasına paralel bir şekilde azalacağı beklenmektedir.

Sonuç olarak, elektrolit konusundaki sorunların aşılabilmesi için:

- proton iletimini sağlayacak başka bir kimyasal mekanizma geliştirmek suretiyle suyun sıvı fazda kalma sıcaklık aralığından bağımsız olarak faaliyet gösterecek elektrolit üretilmeli
- değişik zar kimyaları geliştirilerek zar maliyetini asgari seviyelere indirmek gerekmektedir.

Elektrot konusundaki beklentiler ise

- H₂ yakıt buharı beslemesi sırasında çoğunlukla istenmeyen pislikler ortama gelir ve anotta bulunan Pt katalizörün yüzeyine yapışır. Bundan dolayı da katalizör tam verimle çalışıp H₂ moleküllerinin okside olmalarını sağlayamaz. Öyleyse, pil performansını arttırabilmek için, gelen pisliklerden etkilenmeksizin H₂ moleküllerinin okside olmalarını sağlayabilecek yeni katalizörlere ihtiyaç vardır.
- Bugüne kadar geliştirilmiş Pt katalizörlerle dahi elektrotta gerçekleşen havadaki oksijenin harcanması işlemi gayet yavaş bir hızda gerçekleşmektedir. Bu da dolayısıyla gözle görülür performans kayıplarına sebebiyet vermektedir. Buna göre, yakıt hücresi performansını

daha ilerilere taşıyacak, oksijen harcanma hızını arttıracak yeni katalizörler geliştirilmelidir.

Yakıt pillerinin maliyetini azaltmak amacıyla bugün kullanımda olan platin katalizörlere göre daha ucuz katalizörler üzerinde çalışılmalıdır.



7. DİĞER YAKIT PİLİ TÜRLERİ VE YAKIT PİLLERİNİN KARSILAŞTIRILMASI

7.1 Giriş

Teoride kimyasal okside olma özelliğine sahip her madde, akışkan halinde sürekli olarak sağlanabildiği takdirde yakıt pilinin anodunda galvanik olarak yakılabilir [46]. Benzer şekilde, oksitleyici olarak yeterli miktarda harcanabildiği müddetçe her türlü akışkan kullanılabilir. Bir çok uygulamada gaz formundaki hidrojen uygun katalizörler kullanıldığı takdirde gösterdiği yüksek tepkime yetisi, yeryüzü uygulamaları için hidrokarbonlardan elde edilebiliyor olması ve uzay uygulamaları için düşük sıcaklıkta depolanabildiği hallerdeki yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle yakıt olarak tercih edilmektedir. Aynı şekilde, yeryüzü uygulamalarında hali hazırda havadan ekonomik olarak temin edilebildiği ve uzay uygulamalarında depolanabilir olması nedeniyle en yaygın oksitleyici olarak oksijen gazı tercih edilmektedir.

Çeşitli yakıt pilleri farklı gelişim aşamasındadır. Yakıt pillerini kategorilere ayırmak istersek, kullanılan yakıt ve oksitleyici kombinasyonuna göre, yakıtın yakıt pili içerisinde mi yoksa yakıt pili dışında mı iyileştirildiğine göre, elektrolit türüne göre, çalışma sıcaklıklarına göre ve tepkimeye giren ürünlerin yakıt pili içinde mi yoksa dışında mı yer alan manifoldlarca pile getirildiğine göre sınıflandırabiliriz [47]. En yaygın olarak kullanılan sınıflandırma kriteri ise, pil içerisinde kullanılan elektrolit tipine göredir. Buna göre yakıt pilleri polimer elektrolit yakıt pilleri (PEFC), alkalın yakıt pilleri (AFC), fosforik asitli yakıt pilleri (PAFC), eriyik karbonat yakıt pilleri (MCFC) ve katı oksit yakıt pilleri (SOFC) şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sıralama, yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları göz önüne alınarak yapılmıştır. PEFC ~80 °C, AFC ~100°C, PAFC ~200°C, MCFC ~650°C ve SOFC ~800-1000°C çalışma sıcaklığına sahiptir. Çalışma sıcaklığı ve yakıt pilinin kullanılabilir ömrü pil bileşenlerinin fizikokimyasal ve termo-mekanik özelliklerine de doğrudan etki etmektedir. Su bazlı elektrolitler, yüksek sıcaklıklarda hızlı aşınmaları ve yüksek su

buharı basınçları nedeniyle 200 °C ve altı çalışma sıcaklıklarında kullanılabilir. Öte yandan yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları tercih edilecek yakıt üzerinde de önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı bazlı elektrolit kullanılan düşük sıcaklık yakıt pilleri, birçok uygulamada hidrojen kullanımıyla sınırlandırılmışken; yüksek sıcaklık yakıt pilleri CO ve hatta CH₄ doğal hızlı elektrot kinetikleri ve yüksek sıcaklıkta yüksek katalitik aktivitelere daha az ihtiyaç duymaları nedeniyle kullanılabilir. Hatta yüksek sıcaklık yakıt pillerinde CO ve CH₄'ün hidrojene dönüştürülerek kullanılması eşdeğer hidrojenin kullanımına nazaran tercih edilmektedir [48].

7.2 Alkalın Yakıt Pilleri

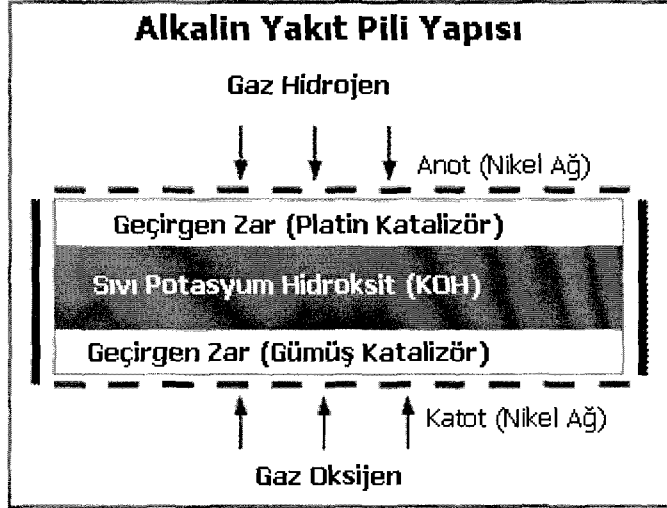
Alkali elektrolitli yakıt pillerinde toplam tepkime polimer elektrolitle aynıdır, fakat her bir elektrotta gerçekleşen tepkime farklılık gösterir. Alkali hidroksilde OH⁻ iyonları serbest halde mevcuttur. Anotta, bunlar hidrojenle tepkimeye girer, enerji ve elektron verip su oluştururlar.



Katotta ise oksijen elektrottaki elektronlarla ve elektrolitteki su ile birleşerek yeni OH⁻ iyonları açığa çıkar.



Bu tepkimelerin devamlı olarak birbirini takip ederek oluşabilmesi için OH⁻ iyonlarının elektrolit içerisinden geçebilmesi ve elektronların akması için anot ile katot arasında elektrik devresi olması gerekir. Ayrıca, (7.1) ve (7.2) tepkimeleri kıyaslanırsa polimer elektrolitte olduğu gibi oksijenin iki katı kadar hidrojene ihtiyaç vardır.



Şekil 7.1: Alkali Yakıt Pilinin Yapısı [40]

Alkali yakıt pilleri, 1902'den beri araştırılıyor olsa da ilk güç ünitesi olarak kullanılmaları 1940'larda ve 1950lerde Cambridge Üniversitesinden F.T. Bacon tarafından mümkün kılınmıştır [49]. NASA tarafından ilk insan kullanılan uzay aracı için PEM yakıt pilleri tercih edildiyse de, aya insanoğlunu Apollo projesi doğrultusunda alkali yakıt pilleri sayesinde ayak basmıştır. Alkali yakıt pillerinin bu görev sırasında gösterdiği başarı ve Bacon'ın çalışmakta olan yüksek güçteki yakıt pilleri 1960 ve 1970'lerde alkali yakıt pilleri üzerine çeşitli araştırmalar ve deneyler yapılmasına neden oldu [50]. İlk yıllarında alkali yakıt pilleri, tarımsal traktörlerde, arabalarda, açık deniz yön bulma aletlerinde, botlarda, fork lift kamyonları gibi çeşitli araçlarda arz karşılayıcı olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu sistemler arz karşılayıcı olarak beklenen başarıyı gösterdilerse de; maliyet, güvenilirlik, kullanım kolaylığı, güvenlik ve kabalık gibi sorunlar da baş göstermiştir. Bu mühendislik çıkmazlarını gidermeye yönelik teşebbüsler ortaya çıkınca, görüldü ki yakıt pilleri mevcut rakip enerji dönüşüm sistemleri ile yarışacak seviyede değildir. Bu sebeple araştırmalar ve gelişmeler hız kesmek zorunda kalmıştır. Son yıllarda PEM yakıt pillerine olan ilgi de alkali yakıt pillerine olan ilgiyi iyice azaltmıştır. Sadece birkaç firma ve kuruluş bu konu üzerine araştırmalarına devam etmektedir. Geçmişteki uzay programı da alkali yakıt pillerinin tarihinde parlak bir yıldız olarak yerini almıştır. Ancak, alkali yakıt pilleri uzay programında gösterdikleri başarı sayesinde 20. yüzyılın son çeyreğine kadar yakıt pilleri teknolojisinin ayakta kalmasını sağlamıştır. Öte yandan, var olan problemler çözülebildiği takdirde alkali yakıt pilleri tekrar gündeme oturabilir. Örneğin hidrojen kaynağı olarak solar paneller vasıtasıyla suyun

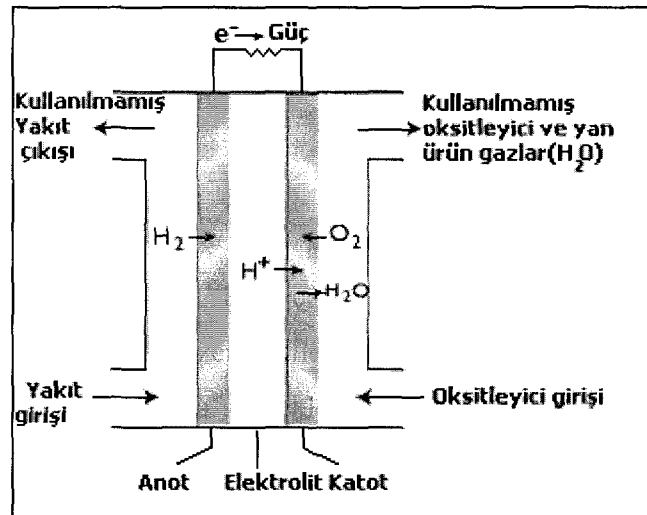
elektrolizi kullanılabildiği takdirde alkali yakıt pilleri yeniden çekiciliğini kazanacaktır.

Alkali yakıt pillerinin en önemli özelliği, katottaki aktivasyon aşırı potansiyel değerlerinin asit elektrolit yakıt pillerine göre genellikle düşük olmasıdır. Öte yandan, elektrot olarak pahalı ve ilginç metaller kullanmaya da gerek yoktur.

Elektrolitin alkali çözeltisi olması gerektiği aşıkardır. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit çözeltileri düşük fiyatları, yüksek çözünürlükleri, ve aşırı aşındırıcı olmamaları nedeniyle birincil tercihlerdir. Potasyum karbonatın sodyum karbonata göre daha çözünürlüğe sahip olduğunun ortaya çıkması ve aralarındaki fiyat farkının önemsenecek seviyelerde olmaması nedeniyle potasyum hidroksit çözeltiler elektrolit olarak tercih edilmektedir [40].

7.3 Fosforik Asitli Yakıt Pilleri

Fosforik asitli yakıt pillerinin (PAFC) çalışma prensibi PEM yakıt pilleri ile benzerdir. PEM yakıt pillerine benzer şekilde iki elektrot arasında proton geçirgen bir elektrolit vardır. Anot ve katotta gerçekleşen tepkimeler ise (5.1) ve (5.2) no'lu denklemlerde verildiği gibidir. Elektro kimyasal tepkimeler karbon destek üzerine dağıtılmış katalizör parçacıklar da gerçekleşir. Katalizör olarak platin veya platin alaşımları kullanılır. Elektrolit olarak ise proton geçişine izin veren ve inorganik asit olan fosforik asit kullanılır. PAFC'nin yapısı Şekil 7.2'de görülmektedir.

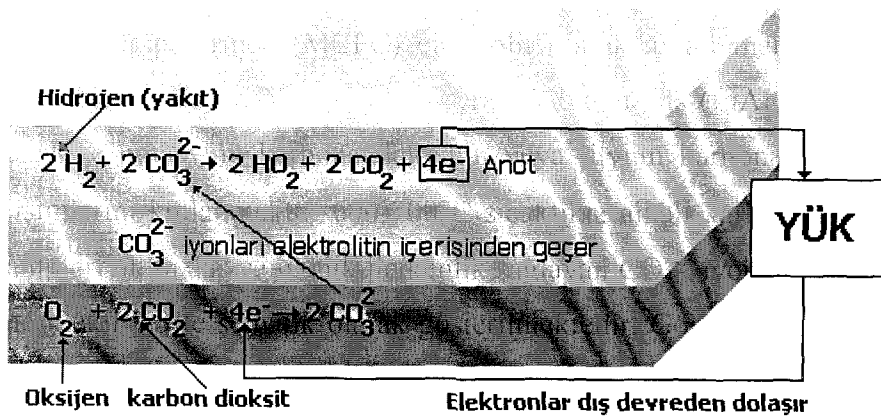
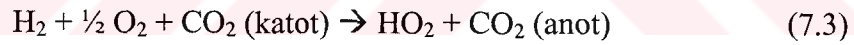


Şekil 7.2: PAFC Yapısı [40]

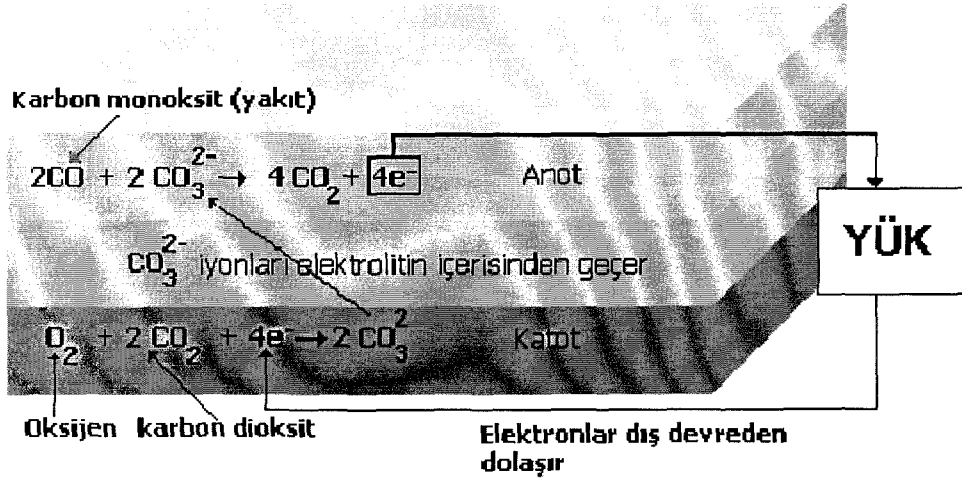
Fosforik asit bilinen inorganik asitler içerisinde 150°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yakıt pillerinde elektrolit olarak kullanılmaya uygun yeterli ısı, kimyasal ve elektro kimyasal dengeye ve düşük uçuculuğa sahip tek asittir. En önemlisi fosforik asit alkali yakıt pillerinin aksine yakıttaki ve oksitleyicideki CO₂'ye müsaade eder [36]. Bu bakımdan fosforik asit 1970'li yıllarda kara uygulamalarında kullanılmak üzere tercih edilmeye başlamıştır.

7.4 Eriyik Karbonat Yakıt Pilleri

Eriyik karbonat yakıt pillerinde (MCFC) elektrolit olarak alkali metallerin eriyik karbonat karışımları kullanılır. Yaygın olanı seramik bir matris (LiAlO₂) içerisinde lityum karbonat ve potasyum karbonat karışımı veya lityum karbonat ve sodyum karbonat karışımlarını kullanmaktır. 600-700°C sıcaklıkta alkali karbonatlar yüksek iletkenliğe sahip eriyik tuzlar ve iyonik iletkenlik sağlayan CO₃²⁻ iyonlarını oluşturur [51]. Tepkime, Şekil 7.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Görüleceği üzere diğer tüm yakıt illerinin aksine CO₂ de oksijen gibi katoda gelmelidir. Burada karbonat iyonlarına dönüşür, ve anotla katot arasında elektrik akımı ortaya çıkmasına neden olur. Anotta, karbonat iyonları tekrar karbon dioksit dönüşecektir. MCFC için toplam tepkime şu şekilde yazılabilir:



Şekil 7.3 Yakıt Olarak Hidrojen Kullanıldığı Takdirde Anot ve Katotta Meydana Gelen Tepkimeler



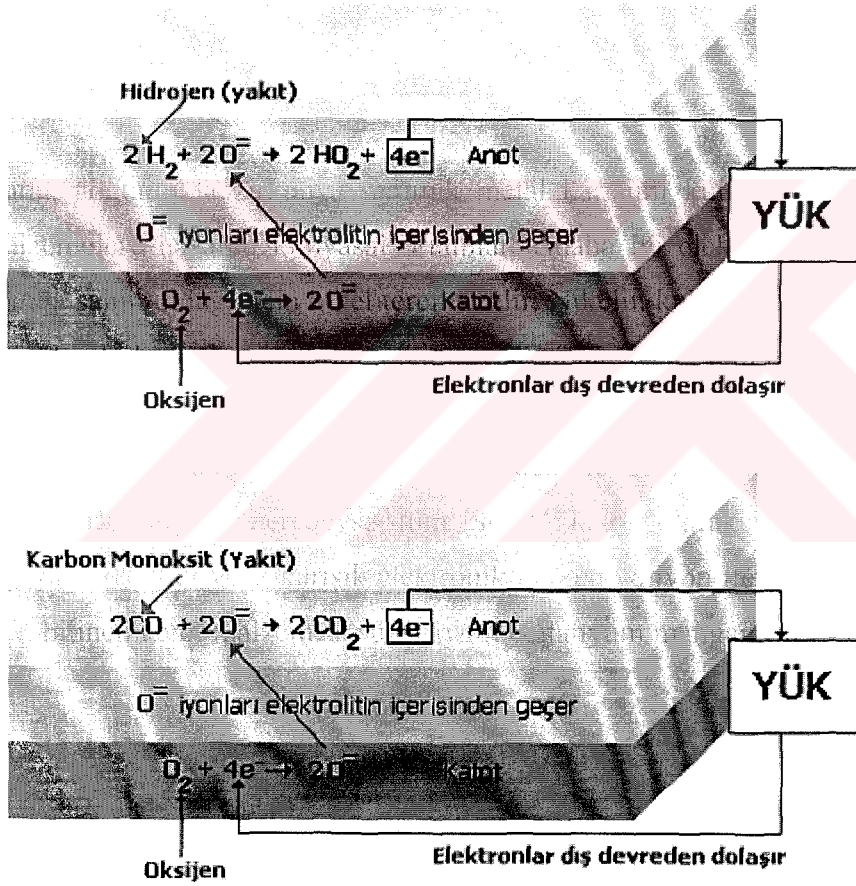
Şekil 7.4 Yakıt Olarak Karbon Monoksit Kullanıldığı Takdirde Anot ve Katotta Meydana Gelen Tepkimeler

7.5 Katı Oksit Yakıt Pilleri

Katı oksit yakıt pilleri (SOFC), elektrolit olarak iyon geçirgenliği olan bir çeşit seramik madde kullanan tamamen katı fazlı bir sistemdir. Bu özelliği nedeniyle de diğer yakıt pili türlerine nazaran daha basit bir yapıya sahiptir. PAFC ve MCFC'de karşılaşılan elektrolit kontrol sorunlarıyla karşılaşmaz. Öte yandan, yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle değerli metallerin elektro katalizör olarak kullanımına gerek duyulmaz. MCFC'de olduğu gibi SOFC'de de hem hidrojen hem de karbonmonoksit yakıt olarak kullanılabilir.

SOFC'de negatif yüklü O^- iyonunun elektrolit aracılığıyla katottan anoda iletilir. Bu özelliği ile MCFC ile benzerlik gösterir. Anotta yan ürün olarak su açığa çıkar. Sistemin ilk geliştirilmesi Nernst'in 1899'da zirkonyanın (zirkonyum oksit) oksijen iletkenliğinin olduğunu tanımlamasına dayanır günümüze değin, SOFC'nin tümü düşük oranlarda yitriya (yitriyum oksit) eklenerek dengelenen zirkonya elektrolit kullanmaktadır [31]. 800°C sıcaklıkta, zirkonya oksijen iyonlarını iletmeye başlar [52]. Bu tip yakıt pilleri için en uygun sıcaklık dilimi 800 ile 1100°C arasındır. Bu tüm yakıt pilleri arasında en yüksek çalışma sıcaklığına denk gelir. Sonuç olarak, değişik yapı olanakları ve dayanıklılık gibi faydalar ortaya çıkar.

Anot olarak çoğunlukla zirkonya seramik metal karışımı kullanılır. Metal olarak, diğer malzemelere nazaran kimyasal ortamlarda daha iyi elektronik iletkenliğe ve dayanıklılığa sahip olduğu için nikel tercih edilir. Nikelin kullanılması, iç iyileştirme katalizörü olarak da görev yapabildiği için fayda sağlar. Katot için ise çalışmalar hala devam etmektedir. Araştırmaların ilk yıllarında katot olarak soymetaller kullanıldıysa da ileriki yıllarda artan maliyet unsurları nedeniyle soymetaller kullanılmamaya başlanmıştır. Bugün ise neredeyse tüm SOFC katot olarak yüksek elektronik iletkenliği olan oksitler veya karışık elektronik iletken ve iyon iletken seramiklerden yapılır. En bilinen katot malzemesi stronsiyum lantanyum manganittir [53].



Şekil 7.5: Yakıt Olarak Karbon Monoksit veya Hidrojen Kullanıldığında Gerçekleşen Katot ve Anot Tepkime Gösterimleri

7.6 Beş Yakıt Pili Teknolojisinin Karşılaştırılması

Yakıt pillerinde, çalışma sıcaklığı gibi kilit özellikleri elektrolit belirler. Bu nedenle, yakıt pili teknolojileri kullandıkları elektrolite göre adlandırılır. Katı oksit dışındaki en belirgin diğer yakıt pili teknolojileri:

- polimer elektrolit zar yakıt pilleri
- alkali yakıt pilleri
- fosforik asitli yakıt pilleri
- eriyik karbonat yakıt pilleri

Tüm bu yakıt pilleri değişik çalışma sıcaklıklarına sahiptir, ve her biri belirli bir uygulama için daha uygundur. Yukarıda adları verilen yakıt pili teknolojilerinin ana özellikleri Tablo 7.1’de verilmektedir.



Tablo 7.1: Değişik Yakıt Pili Teknolojilerinin Karşılaştırılması [37,39]

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Elektrokimyasal Tepkimeler	Uygulamaları	Yük Taşıyıcı	Katalizör
Polymer Elektrolit (PEM)	Katı organik polimer (polieterosülfonik asit)	60-100	Anot $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Katot $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ Hücre $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Elektrik Ulaşım Taşınabilir güç	H^+	Platin
Alkali (AFC)	Potasyum hidroksit matris içindeki sulu çözeltisi	90-100	Anot $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2 H_2O + 2e^-$ Katot $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ Hücre $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Ordu Uzay	OH^-	Platin
Fosforik asitli (PAFC)	Matris içerisinde sıvı fosforik asit	175-200	Anot $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Katot $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ Hücre $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Elektrik Ulaşım	H^+	Platin
Eriyik Karbonat (MCFC)	Matris içerisinde sıvı lityum/sodyum/potasyum karbonat çözeltisi	600-1000	Anot $H_2 + CO_3 \rightleftharpoons H_2O + CO_2 + 2e^-$ Katot $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3 \rightleftharpoons$ Hücre $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Elektrik	$CO_3 \rightleftharpoons$	Nikel
Katı Oksit (SOFC)	Az miktarda yitiriyum oksit eklenmiş zirkonyum oksit	600-1000	Anot $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ Katot $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ Hücre $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Elektrik	O^{2-}	Preovskit

Tablo 7.1: Değişik Yakıt Pili Teknolojilerinin Karşılaştırılması (devam) [37,39]

Yakıt Pili	CH ₄ İçin Dış İyileştirme	Ana Pil Bileşenleri	Suyun Yönetimi	Isı Yönetimi	Avantajları	Dezavantajları
Polimer Elektrolit (PEM)	Gerekmektedir	Karbon içerikli	Buhar olarak	Proses Gazları + Bağımsız Soğutma	Katı elektrolit aşınma ve kontrol sorunlarını azaltır Düşük sıcaklık Çabuk çalışma	Düşük sıcaklık nedeniyle pahalı katalizörlere ihtiyaç duymaları Yakıtın saf olmamasına karşı aşırı duyarlılıkları
Alkali (AFC)	Gerekmektedir	Karbon içerikli	Buhar olarak	Proses Gazları + Elektrolit	Alkali elektrolit kullanımında katot tepkimesi daha hızlı gerçekleşir. Yüksek performans	Yakıt ve havadaki karbondioksitin ortadan kalkması maliyetleri artırır
Fosforik asitli (PAFC)	Gerekmektedir	Grafit içerikli	Buhar olarak	Proses Gazları + Bağımsız Soğutma	Bileşik elektrik ısı üretiminde %85'e oran verim Yakıt olarak saf hidrojene bağımlı olmamak	Platin katalizörler Düşük akım ve güç yoğunluğu Büyük boyut/kütle
Eriyik Karbonat (MCFC)	Gerekmemektedir	Paslanmaz Çelik içerikli	Gaz olarak	İç İyileştirme + Proses Gazları	Yüksek sıcaklık avantajları ³	Yüksek sıcaklık bileşenleri kırılan yapılar ve aşındırır
Katı Oksit (SOFC)	Gerekmemektedir	Seramik içerikli	Gaz olarak	İç İyileştirme + Proses Gazları	Yüksek sıcaklık avantajları ³ Katı elektrolit avantajları ⁴	Yüksek sıcaklık nedeniyle kırılan bileşenler

³ Yüksek verim, değişik tipte yakıtlar kullanabilme, pahalı katalizörlere ihtiyaç duymama

⁴ Aşınma ve kontrol sorunları azalması

8. GEMİLERDE YAKIT PİLİ UYGULAMALARI

8.1 Denizcilik Sektöründe Emisyon Problemi

Deniz taşıtları için temel tahrik pervaneyi döndüren bir krank şaftını hareket ettiren motor tarafından sağlanmaktadır. Tüm motor gücünün sevk için kullanıldığı taşıtlar için elektrik ihtiyaçları ise jeneratörler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Geminin büyüklüğüne bağlı olarak bu elektrik gereksinimi ciddi boyutlarda olabilmektedir. Büyük deniz taşıtları için bu motor ve jeneratör alışılmış olduğu üzere dizelle çalışan ağır iş makineleridir. Her ne kadar bu tip makineler, sağlam güvenilir ve test koşullarında iyi sonuçlar veriyor olsa da, ağırdırlar ve kabul edilemez seviyelerde kirlilik üretmekte, gürültülü çalışmakta, büyük hacimler kaplamaktadırlar.

Deniz taşıtı kaynaklı emisyonların kaynağı temel olarak taşıtın sevk ve ek elektrik ihtiyaçlarının tedarikidir. Bu emisyon değerlerinin ölçülmesi, bu tip taşıtların kullanım alanlarının ve içerdikleri makinelerin çeşitlilik göstermesi nedeniyle hafif taşıtların sebep olduğu emisyonlar gibi kolaylıkla tahmin edilememektedir. Avrupa Birliği (AB) tarafından yakın tarihte yapılan çalışmada gemi kaynaklı sülfür oksit emisyonları ele alınmıştır [54].

Tablo 8.1'de harcanan yakıt başına üretilen emisyon miktarları bazı gemi tipleri için sunulmaktadır. Tablodaki değerlerin daha anlamlı hale gelmesi için sadece Avrupa Birliği karasularında harcanan yakıtın yüz bin metrik tondan⁵ fazla olduğunu belirtmek yeterli olacaktır [54]. Her ne kadar bu çalışma sadece 4 gemi tipi için yapılmış dahi olsa elde edilen veriler emisyon açısından gemi taşımacılığının da dikkate alınması gerektiği sonucunu doğurmaktadır [55].

⁵ 1 metrik ton = 1150 litre

Tablo 8.1: Değişik Gemi Tipleri İçin Emisyon Değerleri [54]

	NO _x kg/ton (g/l)	SO ₂ kg/ton (g/l)	CO ₂ kg/ton (g/l)	HC kg/ton (g/l)	Partiküller kg/ton (g/l)
<i>Seyirde</i>					
Petrol Tankeri	75 (65)	54 (47)	3179 (2764)	2.5 (2.2)	
Konteyner Gemisi	89 (77)	54 (47)	3179 (2764)	3.0 (2.6)	
Yolcu Gemisi	62 (54)	54 (47)	3179 (2764)	2.2 (1.9)	
Balıkçı Gemisi	65 (57)	53 (46)	3179 (2764)	2.1 (1.8)	
<i>Limanda</i>					
Petrol Tankeri	55 (48)	54 (47)	3179 (2764)	6.3 (5.5)	9.6 (8.3)
Konteyner Gemisi	62 (54)	54 (47)	3179 (2764)	6.7 (5.8)	6.7 (5.8)
Yolcu Gemisi	50 (43)	54 (47)	3179 (2764)	4.4 (3.8)	7.7 (6.7)
Balıkçı Gemisi	59 (51)	54 (47)	3179 (2764)	1.8 (1.6)	3.6 (3.1)

Daralan kaynaklar ve çevresel konulara olan ilginin artması neticesinde son yıllarda geminin sevki ve idaresi için yeni bir alternatif güç üretim sistemine ihtiyaç duyulması söz konusu olmuştur. Yakıt pilleri bu alternatif sistem arama çalışmalarında ciddi gelişim potansiyelleri sayesinde başrolde yer almaktadırlar. Yakıt pillerinin konvansiyonel denizaltılar üzerindeki üstünlüğü havasız sevk konusunda çok önceleri fark edilse de; hali hazırda gemilerde yakıt pili uygulamaları yakıt pili sistemleri, konvansiyonel sistemlere yakın maliyet ve teknik güvenilirlik değerlerine ulaşana kadar ertelenmiş bulunmaktadır.

8.2 Gemi Makineleri Pazarında Yakıt Pillerinin Yeri

Gemi makineleri pazarında önemli pazar payı mevcut güç ünitelerinin sayı olarak da güç kapasitesi olarak da % 95'i ile dizel makineler tarafından elde bulundurulmaktadır. Bu pazar payının % 80'ini düşük hızlı dizel makineler, %15'ini orta hızlı makineler kalan %5'lik kısmını ise yüksek hızlı makineler temsil etmektedir. Son 25 seneye bakıldığında, düşük hızlı dizellerin payı %60'lardan % 85'lere

çıkarken; orta hızlı dizellerin payı %20'den % 15'e, yüksek hızlı dizellerin payı ise yine %20'den % 5'e gerilemiştir [56].

Gaz türbinleri son 10 yılda küçük bir atılım yapmış olsa dahi gemi makineleri pazarında belirgin bir pazar payına ulaşamamış ve hacimle ağırlığın önemli olduğu özel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Gemi dizel makinelerine rakip olarak görülmekte olan gaz türbinlerinin dizel makinelere karşı başlıca üstünlükleri özellikle yüksek güç seviyelerindeki belirgin güç yoğunlukları, iyi çevresel performansları ve azaltılmış veya basitleştirilmiş gemide bakım özellikleridir.

Gaz türbinlerinin başlıca eksiklikleri ise özellikle kısmi yüklemelerdeki yüksek yakıt tüketimleridir. Bu eksiklik gaz türbinlerinin performanslarının iyileştirilmesine dönük çalışmalarda kilit role sahiptir. Gaz türbinlerinin ısı performanslarını arttırmaya yönelik atık ısı dönüşümü ve içsel soğutma çalışmaları yapılmaktadır [57].

Gemi makineleri ve gemi servis gücü üreticileri pazarında yer alabilmeleri için, yakıt pillerinin, konvansiyonel sistemlerin günümüzdeki ve gelecekte ulaşılması planlanan ekonomik ve teknik verileriyle rekabet edecek seviyelere ulaşması gerekmektedir.

8.3 Yakıt Pillerinin Dizel Makineler ve Gaz Türbinleriyle Kıyaslanması

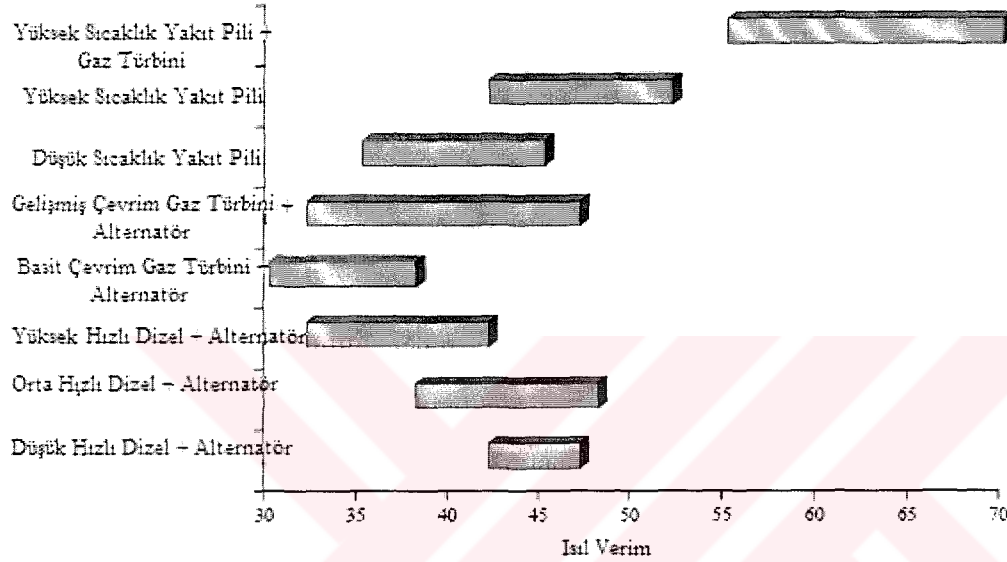
Konvansiyonel sistemler ve yakıt pilleri arasında performans kriterlerine göre değişik kıyaslama çalışmaları yapılabilir. Bu kıyaslama yapılırken dikkat edilmesi gereken husus yakıt pili sisteminin verilen pazarda baskın teknolojiyle rekabet edebilmesidir. Bundan dolayı, belli bir pazarda baskın sistem doğrudan sevk sistemi ise yakıt pillerinin performansı sevk sisteminin elektriksel bileşenleri cinsinden ele alınmalıdır.

8.3.1 Isıl Verim ve Yakıt Tüketimi

Değişik sevk sistemleri için karakteristik ısı verimleri Şekil 8.1'de verilmiştir. Bu ısı verim değerlerine göre şu yorumlar yapılabilir:

- Yüksek sıcaklık yakıt pilleri orta ve düşük hızlı dizellerle rekabet edebilmekte ve basit gaz türbinlerine nazaran daha verimlidirler.

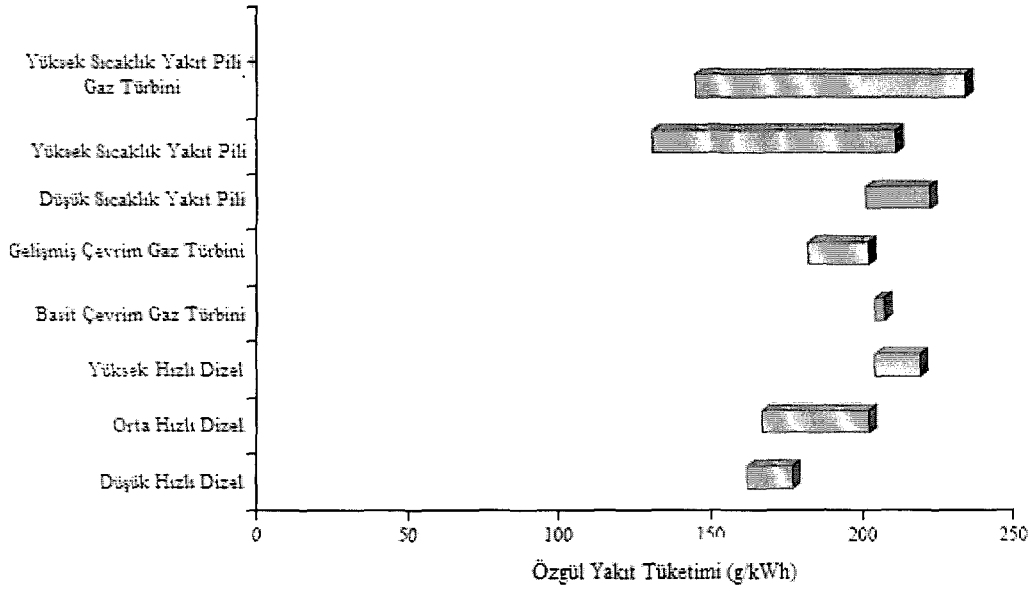
- Düşük sıcaklık yakıt pilleri konvansiyonel teknolojilerle rekabet konusunda zorlanmaktadır.
- Gaz türbiniyle bileşik kullanılacak yüksek sıcaklık yakıt pilleri en yüksek verim değerlerine sahiptir.



Şekil 8.1: Değişik Sevk Sistemleri İçin Isıl Verim Değerleri [57]

Şekil 8.2’de ise değişik sevk sistemlerinin yakıt tüketimi verileri sunulmuştur. Buna göre:

- Yüksek sıcaklık yakıt pillerinin yakıt tüketimi konvansiyonel teknolojilere nazaran oldukça iyi seviyelerdedir. Ek olarak, elektrik motorunun sistemle birleşmesi yakıt verimini azalttığı halde yüksek sıcaklık yakıt pilleri en iyi konvansiyonel sistemden bile daha üstündürler.
- Düşük sıcaklık yakıt pilleri sadece yüksek hızlı dizeller ve basit çevrimli gaz türbinleriyle rekabet edebilmektedir. Bu sistemler genellikle birincil dizayn kısıdının yakıt tüketimi değil hacim ve ağırlık olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir.

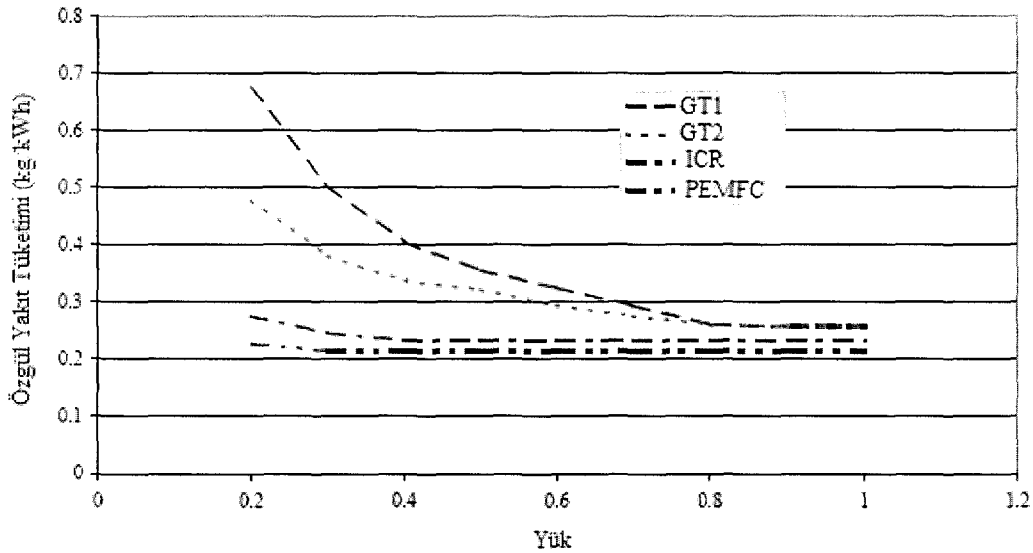


Şekil 8.2: Değişik Sevk Sistemleri İçin Özgül Yakıt Tüketimleri [57]

8.3.1 Kısmi yük verimi

Dökme yük gemileri gibi kimi gemiler sabit yükte çalışırken, yolcu gemileri değişken yüke maruz kalabilmektedir. Kısmi yüklemde çalışan gemiler için kısmi yük performans karakteristikleri de önem kazanmaktadır.

Şekil 8.3'te iki değişik gaz türbini (GT1 ve GT2), bir adet yeni nesil ara soğutmalı üretici gaz türbini (ICR) ve polimer elektrolit zar yapılı yakıt pilinin (PEMFC) yakıt tüketimleri verilmektedir.



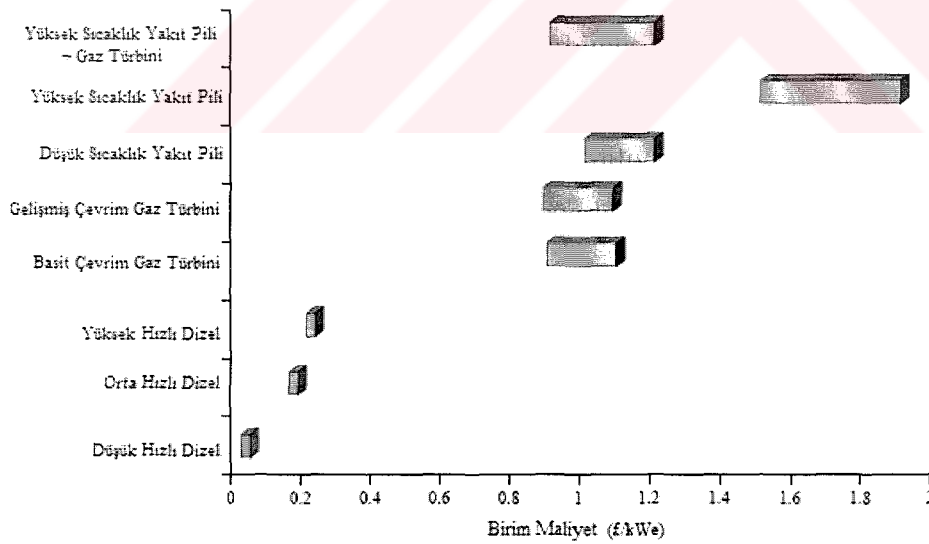
Şekil 8.3: Değişik Teknolojiler İçin Yakıt Tüketimi Yük Grafiği [58]

Buna göre;

- Konvansiyonel gaz türbinleri için kısmi yük nominal yükün %80'inden fazla durumlarda özgül yakıt tüketimi sabit iken, %50'nin altındaki yüklerde keskin bir şekilde artmaktadır.
- PEMFC için yakıt tüketimi gaz türbinlerine nazaran daha düşüktür ve %20 yük seviyesinin üzerinde sabitlenmektedir.
- Yeni nesil gaz türbini yakıt piliyle benzer yakıt tüketimi karakteristiklerine sahiptir, ancak değerler yakıt pili değerlerine göre biraz daha yüksektir.

8.3.2 Ekonomi

Sevk sistemi seçiminin ekonomik boyutu alış maliyeti ve kullanım maliyetinden oluşmaktadır. Gemi makine maliyetinin toplam gemi maliyetine etkisinin yaklaşık olarak % 10 seviyelerinde olduğu göz önüne alınırsa gemi makinelerinin önemi daha da ortaya çıkacaktır.

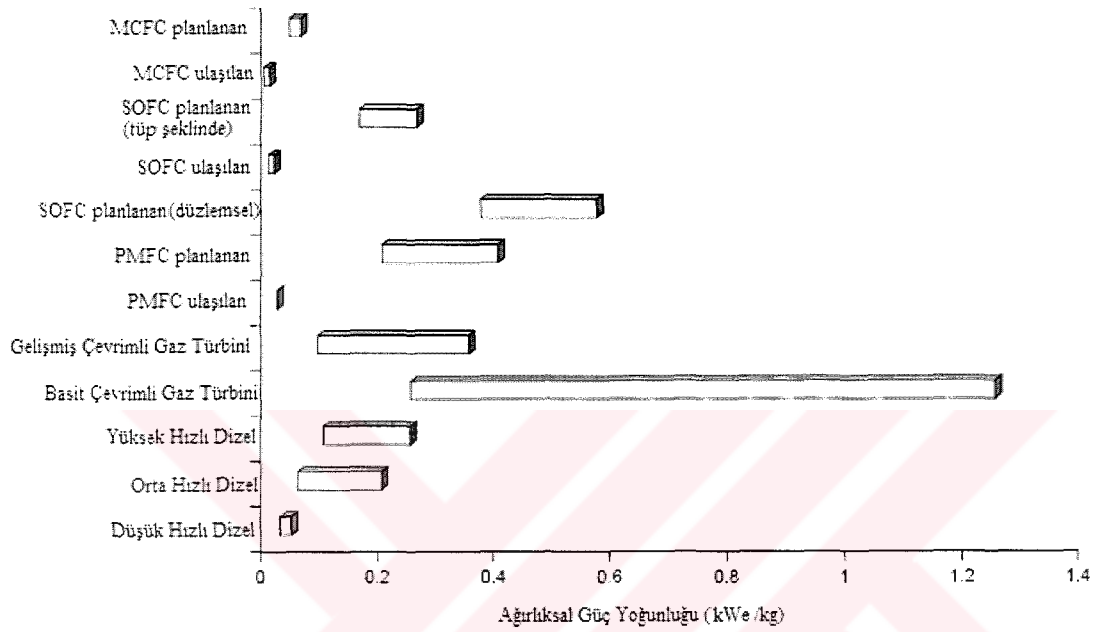


Şekil 8.4: Değişik Sevk Sistemleri İçin Birim Maliyetler [57]

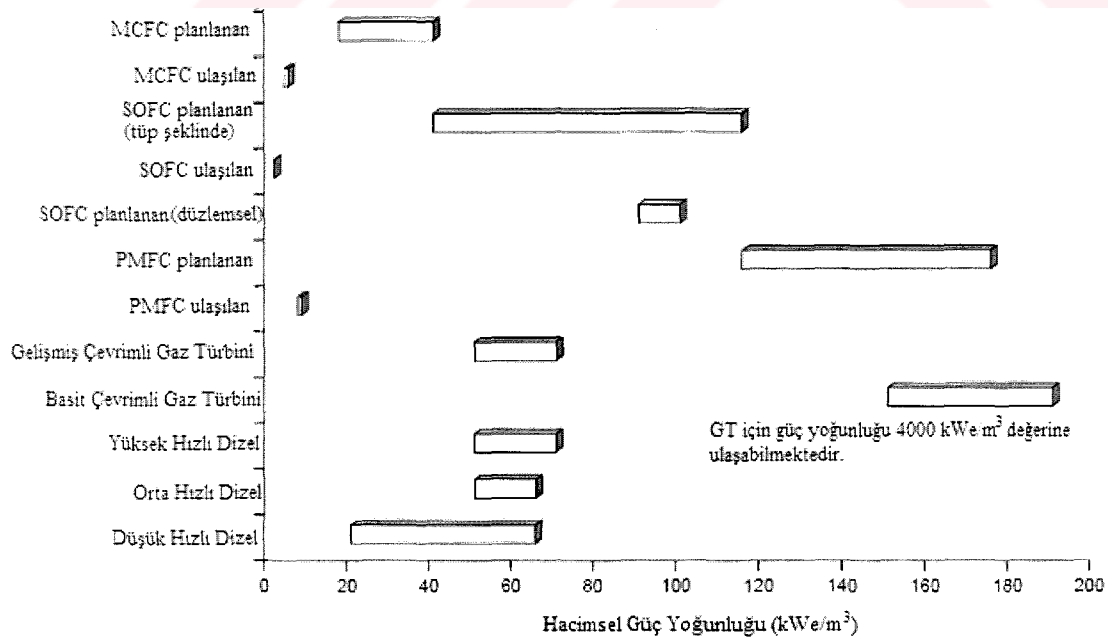
Şekil 8.4'te sevk cihazlarının satın alma maliyetleri verilmektedir. Şekildeki verilere göre, düşük sıcaklık yakıt pili maliyetleri basit çevrimli gaz türbinleriyle benzer boyutlarda; orta hızlı dizellerden çok yüksek seviyelerde, düşük hızlı dizellerin maliyetlerini ise katlamaktadır.

8.3.3 Ağırlıksal ve hacimsel güç yoğunluğu

Şekil 8.5’de değişik teknolojilerin ağırlıksal güç yoğunlukları sunulmaktadır. Hacimsel güç yoğunlukları ise bölüm 8.3.1’de verilen performans değerlerine benzerdir.



Şekil 8.5: Değişik Sevk Sistemleri İçin Ağırlıksal Güç Yoğunlukları [57]



Şekil 8.6: Değişik Sevk Sistemleri İçin Hacimsel Güç Yoğunlukları [57]

Şekil 8.6’da değişik gemi sevk sisteminin hacimsel güç yoğunlukları verilmektedir. Konvansiyonel sevk sistemlerine ait veriler genel olup her gemi tipi için değişiklik göstermektedir. Konvansiyonel sistemler yakıt olarak ağır fuel oil kullanmakta ve alternatör barındırmamaktadır.

Yakıt pilleri için verilen değerler yerleşik sistemlerden elde edilen verilere dayanmaktadır. Böyle bir yol seçilmesinin nedeni yerleşik güç üretim sistemlerine dönük daha fazla geliştirme çalışması yapılması ve dolayısıyla elde edilen verilerin daha güvenilir olmasıdır. Tüm yakıt pillerinin doğal gaz ile çalıştığı kabul edilmiştir. Yakıt olarak sıvı yakıtların kullanılması yakıt dönüşüm işlemleri için ilave yük ve hacim gereksinimine neden olacaktır.

Öte yandan dikkate alınmalıdır ki, yakıt pilleri alternatif akım motorları ile bütünleşik oldukları için DC/AC dönüştürücü kullanmaktadır. Bu nedenle de ünitenin ağırlığı ve kapladığı hacim artmaktadır. Gemilerin doğru akımla çalışması durumunda üniteler basitleşecek ve ağırlık ile hacim bakımından iyileşecektir.

Tüm yakıt pili teknolojileri için değerler mevcut kullanılan sistemlerden elde edilmiş olup güvenilirlikleri tartışılmazdır. Bu sistemler her ne kadar kullanılmakta olsa da henüz olgunluk aşamasında ürünler olmaması nedeniyle hacimsel ve ağırlık bakımından iyileştirmeler gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Ancak sistemler gene de konvansiyonel sistemlere nazaran 4 ile 30 kat daha az daha düşük hacimsel güç yoğunluğuna sahiptir.

Şekilden elde edilen bilgilere göre hacimsel güç yoğunluğu bakımından;

- PEMFC ve SOFC dizel makinelerle benzer performansa sahip olsalar da, gaz türbinlerinin performans seviyelerine ulaşmaları mümkün değildir.
- MCFC ve PAFC dizel makinelerle rekabet edememektedir.

Sonuç olarak, yakıt pilleri hacim ve ağırlık konularında zayıf kalmaktadır. Sadece düşük hızlı dizeller ve büyük boyutlu orta hızlı dizellerle rekabet edebilmektedirler. Yüksek hızlı dizeller ve basit çevrimli gaz türbinlerine ait veriler ise yakıt pillerinin sunduğu değerlerin çok üzerindedir.

8.3.4 Bakım

Eşdeğer bir konvansiyonel sisteme nazaran yakıt pili sisteminin daha az bakım gerektirmesi beklenmektedir. Yakıt sistemi dışındaki, yardımcı sistemlerin daha karmaşık olmayışı ve yakıt pillerinin dönen parçalara sahip olmayışı nedeniyle yakıt pilleri konvansiyonel içten yanmalı makinelerle nazaran daha az bakım gerektirmektedir.

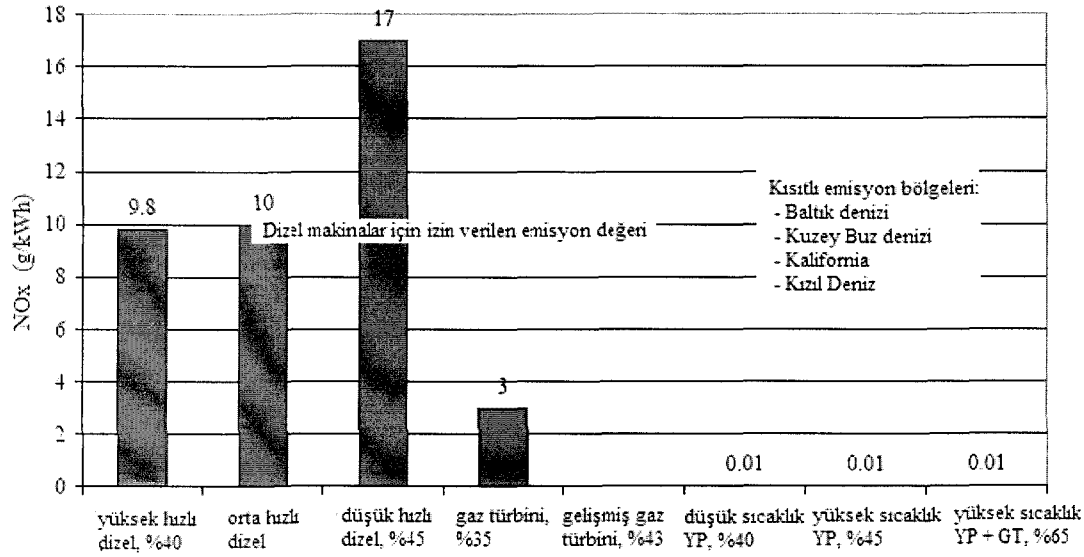
İlaveten, yakıt pili sisteminde dönen parçaların olmayışı dolayısıyla yağlama yağına da ihtiyaç duyulmamaktadır. İşte bu temiz doğa nedeniyle gemi temizlik yükü de ortadan kaldırmaktadır. Tüm bu faktörlerin bileşiminde bakım maliyetleri ciddi oranda azalma göstermekte ve hem maddi açıdan hem de insan gücü açısından tasarruf sağlanmaktadır.

8.3.5 Emisyon

Yakıt pillerinin konvansiyonel sistemlerle kıyas çalışmaları çerçevesinde değişik gemi sevk sistemleri NO_x , SO_x ve CO_2 gazlarının emisyonu cinsinden de kıyaslanmaktadır.

8.3.5.1 NO_x emisyonları

NO_x oluşumu yakıt içerisindeki veya ortamda bulunan hava içerisinde yer alan nitrojen gazının tepkimeye girmesiyle gerçekleşir. Ağır fuel oil doğal gaza nazaran daha fazla miktarda nitrojen içermektedir öte yandan NO_x oluşumu tepkime sıcaklığı ve süresinin de fonksiyonudur.



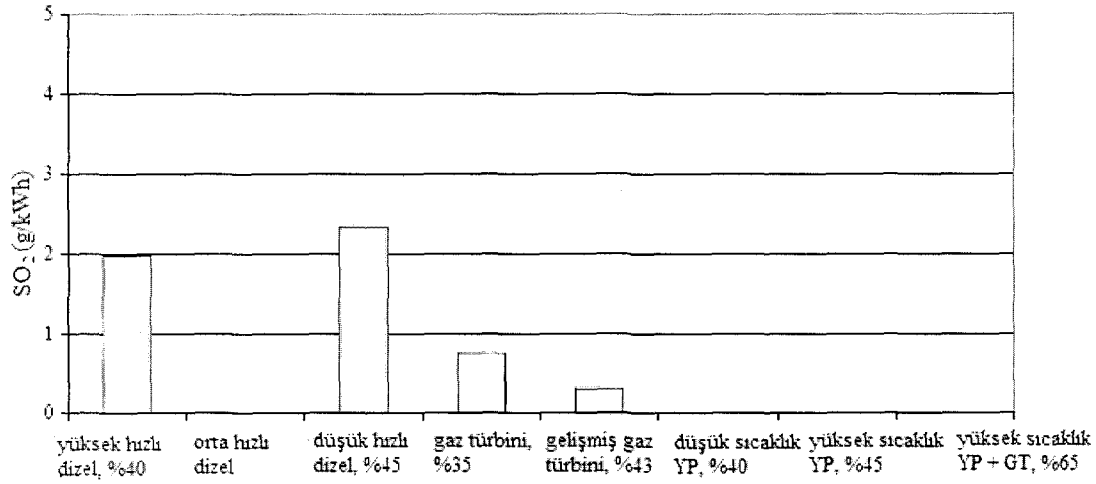
Şekil 8.7: Değişik Sevk Sistemlerine Ait NO_x Emisyon Değerleri [59]

Buna göre, yakıt pillerinde NO_x daha kaliteli yakıt kullanımı ve NO_x oluşumunun düşük olduğu sıcaklıklarda çalışmaları nedeniyle daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Dizel makineleri kendi içinde inceleyecek olursak ise, çalışma sıcaklığı hepsinde aynı olduğu halde, yanma zamanları dönme hızına bağlı olduğundan dolayı düşük hızlı dizelerde NO_x oluşumu daha fazla olacaktır.

8.3.5.2 SO_x emisyonları

Yakıt pilleri SO_x emisyonu açısından diğer sistemlere karşı üstündür. Ancak unutulmamalıdır ki, yakıt pilleri sülfürün zararlı etkileri nedeniyle düşük sülfür içerikli yakıtlarla çalışmaktadır. Düşük sülfür içerikli yakıtların pahalı oluşu nedeniyle veya kullanılan yakıttaki sülfürün giderilmesine yönelik işlemlere gerek duyulması nedeniyle maliyetler, hacim ve ağırlık kalemlerinde artışlar söz konusudur.

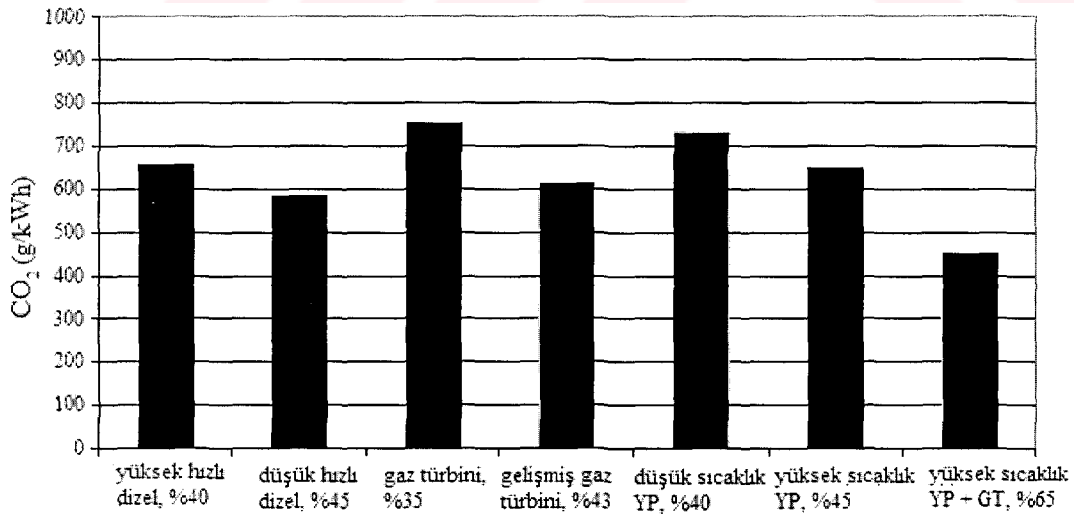
Temiz yakıt kullanıldığı takdirde, konvansiyonel sistemler içinde benzer veriler elde edilmesi mümkündür. Ancak, konvansiyonel sistemlerin düşük sülfür içerikli yakıtlara ihtiyacı olmaması kendilerine lojistik bir avantaj sağlamaktadır. Hatta, k,mi sistemlerde sülfür iç yağlayıcı olarak kullanılması açısından düşük sülfürlü yakıtlar makineye zarar verecektir.



Şekil 8.8: Değişik Sevk Sistemlerine Ait SO₂ Emisyon Değerleri [57]

8.3.5.3 CO₂ emisyonları

CO₂ emisyonları sadece yakıt tipine ve sevk sisteminin verimine bağlıdır. Yakıt pilleri doğal gazla çalıştıkları zaman dizel makinelerle nazaran daha yüksek verim değerlerine sahiplerdir. Yakıt olarak hidrojen kullanıldığında ise verim değerleri belirgin seviyede üstünlük sağlamaktadır. Lakin motorinin yakıt olarak seçilmesi durumunda, iyileştirici veriminin de dikkate alınması gerekmektedir.

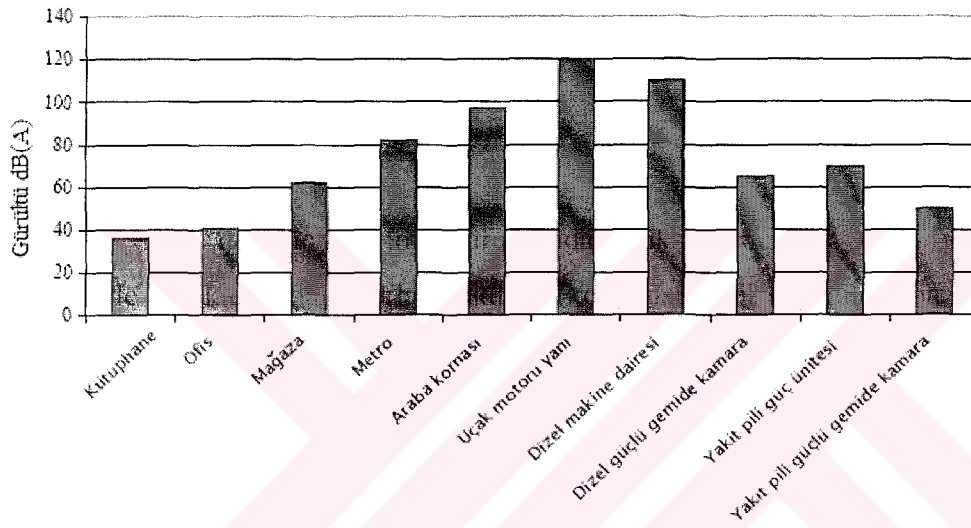


Şekil 8.9: Değişik Sevk Sistemlerine Ait CO₂ Emisyon Değerleri [57]

Hem sevk hem de güç üretimi durumunda, yüksek sıcaklık yakıt pilleri gaz türbinleriyle birlikte kullanıldıkları takdirde konvansiyonel sistemlere nazaran daha düşük CO₂ emisyonu değerlerine sahiptirler.

8.3.6 Gürültü

Dizel makine dairesindeki gürültü uçak motorunun yanındaki gürültü seviyesine yakinken, gemide yer alan kamarada gürültü seviyesi ise alışveriş merkezindeki gürültüyle eşdeğer seviyelerdedir.



Şekil 8.10: Değişik Kaynaklarca Üretilen Gürültü Seviyeleri [57]

Yakıt pili ile çalışan bir gemi ele alındığında ise, kamarada hissedilecek olan gürültü normal konuşma seviyelerindendir. Bu düşük gürültü seviyesi gemi içerisindeki konforu arttırmakta ve makine dairesine yakın yerlere ilave kamaralar konmasını da sağlamaktadır. Şekil 8.10 incelenirken dikkat edilmesi gereken husus gürültü ölçeğinin logaritmik olması nedeniyle küçük farklılıklar insan kulağı için büyük farklılık ifade etmektedir.

8.4 Yakıt Pili Maliyetleri

İçten yanmalı makinelerle nazaran yakıt pilleri daha temiz teknolojilerdir. Sırf çevresel politikalar dolayısıyla dahi yakıt pilleri diğer güç sistemleriyle rekabet eder duruma gelebilmektedir. Yakıt pillerinin temizliği gerek yüksek verimleri gerekse yakıt olarak kullandığı hidrojen ve benzeri yakıtların diğer fosil yakıtlara nazaran daha az kirletici içermesinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, yanma esnasında bir

patlama olmaması nedeniyle gürültü sadece kompresör ve pompalardan açığa çıkmaktadır. Yakıt pillerinin bu özelliği, iç deniz gemiciliğinde, yolcu gemilerinde ve askeri uygulamalarda özellikle önem kazanmaktadır. Çevreye verilen zararların vergilendirilmesinin öngörüldüğü bir ortamda, yakıt pillerinin düşük ses ve kirletici emisyon özelliği dolayısıyla gelecekte işletim maliyetlerinde ciddi bir tasarruf sağlaması beklenmektedir. Kyoto protokolü uyarınca getirilmesi öngörülen karbon vergisi dahi yakıt pillerini diğer teknolojiler karşısında üstün kılmaktadır. Öte yandan yakıt pilleri uluslar arası gemicilikteki sifıra yakın emisyon rejimine en kolay uyum sağlayacak teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Avrupa Birliği tarafından yakın gelecekte getirilmesi beklenen bu rejim, yakıt pillerinin gemi uygulamalarına dönük çalışmalarında, her ne kadar kurulum maliyetleri çok yüksek olsa dahi hızlı bir artış gerektirecektir.

8.4.1 Yatırım maliyetleri

Yakıt pili teknolojisinin kullanıldığı sevk sistemlerinin günümüzdeki yatırım maliyeti kilovat başına 4000\$ ile 7000\$ arasında değişirken, hedeflenen fiyat aralığı ise yine kilovat başına 100\$ ile 1500\$'dır [60]. Gemi için kullanılabilecek eşdeğer güç kapasiteli (5,5 MW) güç sistemlerinin kıyas çalışmasında yakıt pili maliyeti kilovat başına 6500\$-6800\$ aralığında hesaplanmıştır. Bulunan bu değer, benzer bir entegre dizel makinenin yaklaşık % 50 fazlası, konvansiyonel bir dizel sistemin ise nerdeyse 3 katı mertebesindedir [61].

Maliyet tahminlerinde görülen bu istikrarsızlığın nedeni her ne kadar uygulamadan uygulamaya maliyet hesapları değişse de, günümüz koşullarında yakıt pillerine dair kesin ve güvenilir maliyet tahmini yapmak mümkün değildir.

Yakıt pillerinin ilk uygulamaları için biçilen ömür 40000 saattir, ki bu da 5 yıla tekabül etmektedir. Yakıt olarak doğal gazın kullanılması durumunda bu hedefe ulaşmak çok daha olası olacaktır. Ancak, unutulmamalıdır ki, bakım maliyetinde bir artış kabullenilerek belli aralıklarla yıgın değişimi yapıldığı takdirde, yakıt pillerinin ömrü konvansiyonel sistemlerde olduğu üzere 20-30 yılı bulacaktır.

8.4.2 İşletim maliyetleri

Yakıt pili güç üretiminin başlıca üstünlüğü, işletim maliyetlerinin düşük olma potansiyelidir. Bu düşüşün kaynağı ise yakıt seçimi konusundaki esnekliğidir. Sistemin tek bir yakıtla çalışmak zorunda olmayışı yakıt fiyatlarındaki değişimlerden olumsuz etkilenilmemesini sağlamaktadır.

Yakıt pilleri ve entegre dizel makineler arasında yapılan bir karşılaştırma çalışması göstermiştir ki, yakıt pili sistemleri entegre dizel sistemlere nazaran %25 daha az yakıt tüketmektedir. Öte yandan, genel beklenti, yakıt pillerinin %50 oranında yakıt tasarrufu sağlaması yönündedir [62].

Motorin fiyatlarının ton başına 270\$ olduğu durumda, yakıt pilleri için yakıt maliyetinin kW başına 80\$, entegre dizel bir sistem için ise yine kW başına 110\$ olduğu görülmüştür. Bu maliyet avantajı günümüz koşullarında yakıt pillerinin yüksek kurulum maliyetlerini karşılamaya yetmemektedir. 25 yıllık bir yaşam çevrimi için, motorin fiyatlarının 600\$ olması gerekmektedir ki, yakıt pilleri entegre dizel sistemlerle rekabet edebilsin. Dünya pazarında motorin fiyatlarının bu değerinde altında olması, yakıt pillerinin değişik değişken maliyetlerinin bir kombinasyonu neticesinde alternatif sistemlerle rekabet edebileceğini göstermektedir [61].

8.4.3 Altyapı

Altyapı ihtiyacı, yakıt pillerinin ulaşım sektöründe hızla yayılabilmesi için bir engeldir. Kara taşımacılığı ele alındığında, uzun vadede benzin için gerekli altyapı maliyetlerinin hidrojen için gerekli olandan daha düşük olması öngörülmektedir [63]. Ancak, araç başına altyapı yatırımının 1000\$ oluşu nedeniyle bu farklılığın fazla büyütülmesine gerek yoktur. Deniz taşımacılığı konusunda benzer bir çalışma yapılamamış olsa da taşımacılık ağında daha az nokta olması nedeniyle altyapı maliyetlerinin daha düşük olması beklenebilir.

Gemideki boş alan ihtiyaçları da kritik olmasa da bir altyapı maliyet engeli yaratmaktadır. Yakıt pili sistemi için gerekli hacmin kW başına 0.07 metreküp ile diğer sistemlerle benzerlik göstermesi beklenmektedir [62].

8.4.4 Sektördeki belirsizlikler

Gemicilik pazarı, stokastik ve elastik olmayan taşımacılık talebi, kapasiteye bağlı arz ve faktör fiyatlarının istikrarsızlığının bileşik etkisi dolayısıyla kararsız bir yapıya sahiptir. Petrol fiyatlarındaki değişimler, arz ve talebin aynı yönde hareket etmesi dolayısıyla navlun oranlarında ve gelirlerinde beklenmedik etkiler yaratabilir. Petrol fiyatlarını artması bazı ürünlerdeki talebin azalmasına neden olacaktır, ama öte yandan optimum hızın azalması nedeniyle arz da azalacaktır. Bu etki, sektörü çoğu orta doğu menşeli OPEC kararları benzeri dış olaylara daha bağımlı hale getirmektedir [64].

Hidrojen bazlı güç üretiminin sektördeki bu belirsizliklere son verebilecek mi sorusu akıllara gelmektedir. Bu sorunun cevabı pazarın değişik kesimleri için farklılık göstermesinin yanında çeşitli ekonomik güçlerin etkisinde olması nedeniyle pek açık değildir. Öte yandan yakıt pilleri gemicilik sektörünü daha da sermaye yoğun ve geri dönmeyen yatırım ve kapasite kısıtlarına günümüzden daha bağımlı hale getirmektedir. Bu da toplam risk ve belirsizlikleri arttırmaktadır.

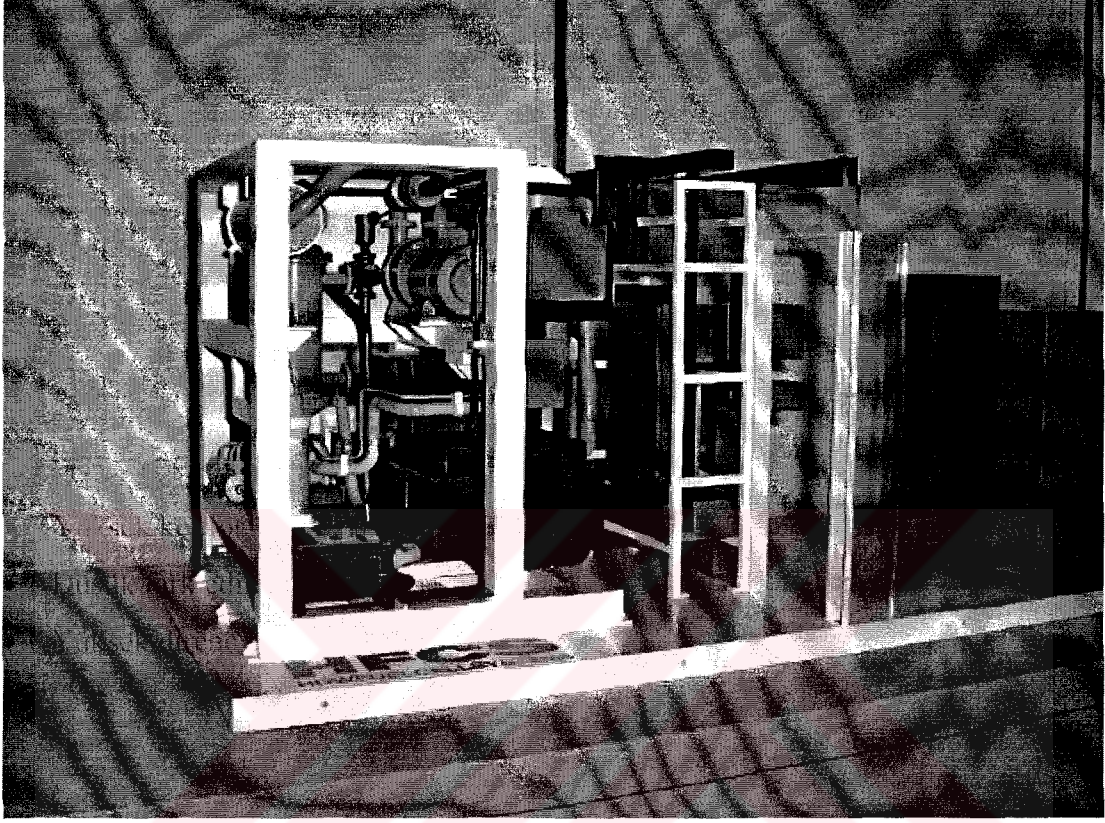
Günümüzde yakıt pilleri çoğunlukla doğalgazdan elde edilen hidrojenle çalışmaktadır. Gelecekte metanol ve motorinin de doğal gazla birlikte alternatif yakıtlar olarak yakıt pillerinde kullanılması beklenmektedir [60]. Yakıt olarak doğalgazın kullanılması, küresel enerji pazarında OPEC'in etkisinin zayıflamasına ve değişik gaz rezervlerinin ulaşılabilirliği dağıtım ağı nedeniyle daha rekabetçi hale gelmesine yol açacaktır.

8.5 Yakıt Pillerinin Gemilerde Kullanımı

Günümüzde gemi inşa sektörü yeni taleplere maruz kalmaktadır. Çevresel düzenlemeler git gide sıkılaşmakta ve konfor yeni müşteriler kazanma adına gittikçe daha da önemli bir hal almaktadır. Askeri gemilerde ise gizli görevler için azami teknolojiye ulaşmak yönünde çalışmalar sürmektedir. Yakıt pilleri, gemi sahiplerine şu müşteri değerlerini sunmaktadır:

- Çok düşük zehirleyici emisyonu
- Düşük yakıt tüketimi

- Yüksek konfor
- Düşük fark edilebilirlik
- Yüksek direnç ve savaş kabiliyeti



Şekil 8.11: Gemilerde Kullanılmak Üzere Tasarlanmış 160 kW Kapasiteli Bir Yakıt Pili [65]

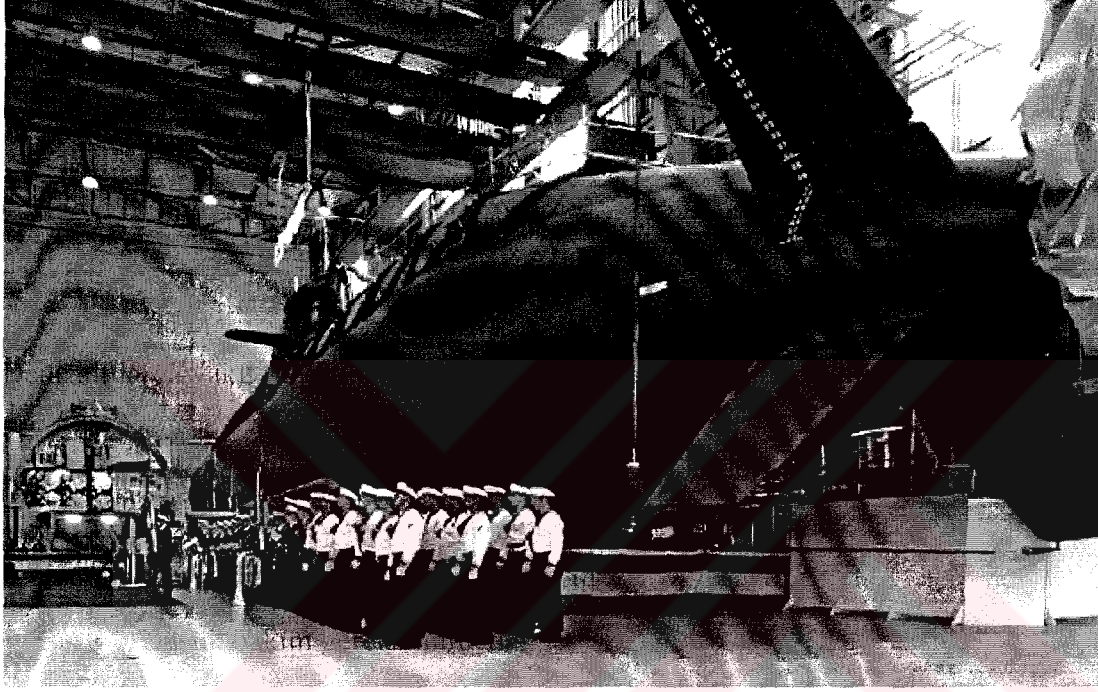
8.5.1 Yakıt pillerinin askeri uygulamaları

Askeri anlamda yakıt pilleriyle denizaltılarda kullanılmak üzere Amerika Birleşik devletleri olmak üzere Alman, Yunan, Japon ve Güney Kore donanmaları ilgilenmektedir. Savaş gemilerinde yakıt pili uygulamalarına dönük ise yine Amerikan donanmasının çalışmaları sürmektedir.

20 yıllık çalışma neticesinde Almanya'daki HDW tersanesi ticari olarak havasız tahrik ilkesine çalışan PEM yakıt pillerinin denizaltılarda kullanılmak üzere geliştirmiştir. Bu çalışmalar mevcut denizaltıları yakıt piliyle çalışır hale getirmeyi de kapsamaktadır.

Denizaltılarda yakıt pili kullanımının avantajları şu şekilde ifade edilebilir:

- Çok yüksek verim (özellikle değişken yüklerde)
- Sessiz enerji üretim süreci
- En düşük kızıllötesi fark edilebilirlik
- Düşük bakım gereksinimleri

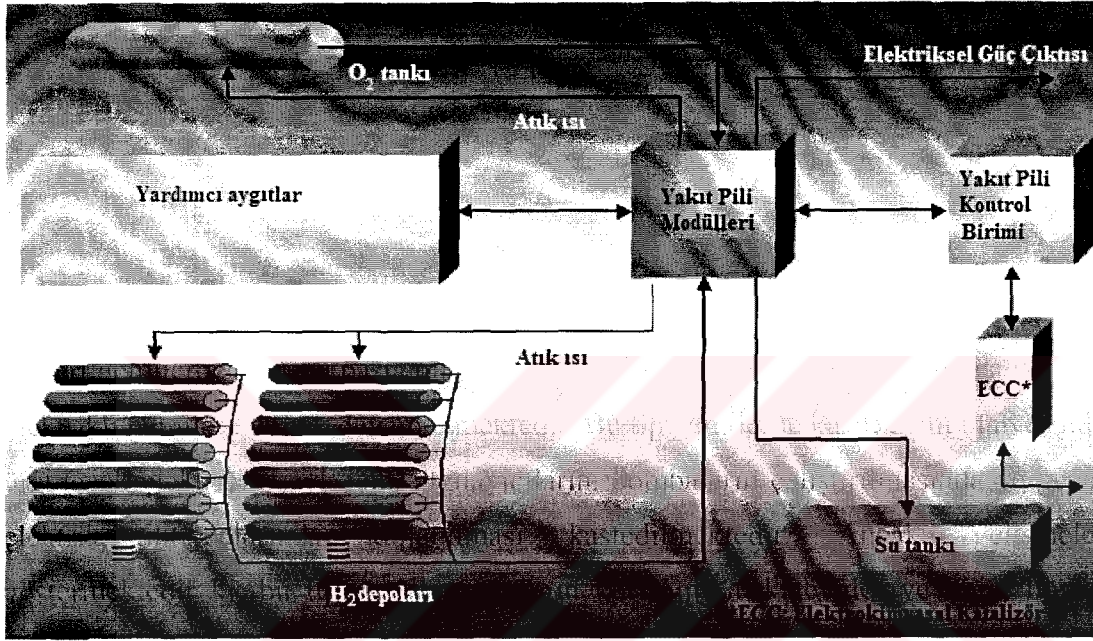


Şekil 8.12: İlk Yakıt Pili Sistemli Sevk Sistemli Denizaltının Denize İndirilme Töreni [66]

Bugüne kadar Alman donanmasında kullanılmak üzere 4, İtalyan donanmasında kullanılmak üzere ise 2 yakıt piliyle çalışan denizaltı inşasına İtalya'daki Fincantieri tersanesinde başlanmıştır.

Şekil 8.13'te taslağı gösterilen yakıt pili sistemiyle çalışan denizaltılarda Siemens tarafından üretilen yakıt pili modülleri kullanılmaktadır. Yakıt olarak kullanılmakta olan hidrojen metal hidritler şeklinde, oksitleyici olarak kullanılan oksijen ise sıvılaştırılarak taşınmaktadır. HDW tarafından Yunan ve Güney Kore donanmalarında kullanılmak üzere denizaltı sınıfları geliştirilmektedir.

Askeri gemilerde Avrupa başta olmak üzere çeşitli ülke donanmalarındaki çalışmalar elektrikli gemilere dönük devam etmektedir. Bu tip gemilerde kasıt, gemi bünyesinde üretilen elektriğin sevk için, algılayıcıların, bombaların çalıştırılmasında ve genel elektrik ihtiyaçlarında kullanılması kastedilmektedir. Ancak, gelişmeler göstermektedir ki, bu tip gemilerin yaygın kullanımı firkateynler ve diğer büyük savaş gemilerinde yakın gelecekte mümkün olmayacaktır.



Şekil 8.13: Denizaltı Yakıt Pili Sistemi Gösterimi [65]

Ticari sektördeki avantajların yanında yakıt pillerinin askeri gemilerde kullanılmasını teşvik eden özellikler şunlardır:

- Düşük fark edilebilirlik (ses ve kızılötesi)
- Yüksek direnç ve savaş mukavemeti

Avrupa ve Kanada donanmaları PEM yakıt pilleri üzerinde yoğunlaşırken, Amerikan donanmasında ilgi odağı olan teknoloji MCFC'dir.

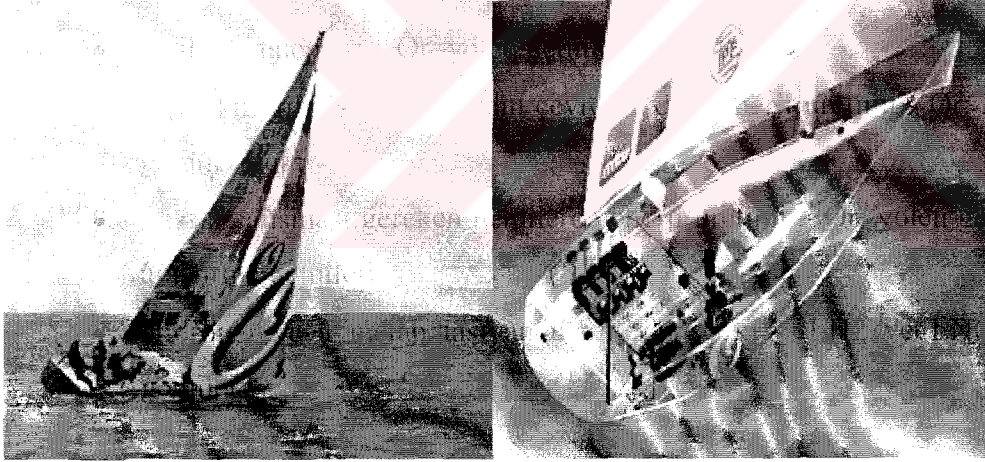
8.5.2 Yakıt pillerinin ticari uygulamaları

Ticari gemiler için yakıt pillerinin avantajları, yüksek yakıt tasarrufu, azaltılmış zehirli emisyonlar, düşük işletme maliyetleri ve sessiz ve temiz sevk özellikleridir.

Yapılan çalışmalar neticesinde yakıt pillerinin ticari anlamda gemilerde kullanım alanları şu şekilde ifade edilmiştir: [67]

- Acil güç talepleri – Ör: yolcu gemileri ve feribotlar
- Aşırı kirletilmiş limanlar için çevreyle dost enerji üretimi - Ör: konteynır gemileri için
- Sessiz çalışması gereken gemilerde enerji üretimi – Ör: yolcu gemileri ve araştırma gemileri
- Hidrojen veya metan taşıyan gemilerin sevki – LH2 ve LNG taşıyıcı gemiler

Yakıt pillerinin yelkenli teknelerde sevk birimi olarak kullanımı giderek ilgi çekmektedir. Bu tip teknelerde, güç ihtiyacının düşük oluşu, yakıt pilinin boyutunun ve maliyetlerinin asgari seviyelerde tutulmasını sağlamaktadır. Sıradan bir yelkenli için günlük güç ihtiyacı 1.5 kWh ile sınırlıdır.



Şekil 8.14: 20 kW Kapasiteli Bir PEM Yakıt Piliyle Sevk Edilen Yelkenli (Yelkenli 225 km mesafeyi 6 km/s hızla alabilmektedir.) [55]

Yelkenli tekne pazarını yöneten değişkenler yasalar ve ekonomidir. Birçok ülkede kıyı bölgelerinde ve göllerde elektrikli tekneler harici tekne kullanımı yasaktır. Özellikle yıllık 10 milyon avroluk bir pazara sahip olan Amerika ve Kanada da bir çok göl veya su yolunda sadece elektrikli teknelerin kullanımı serbesttir.

Diğer değişken olan ekonomi bakımından olaya bakıldığında ise her ne kadar dizel sistemler yakıt pillerine nazaran daha ucuz olsa da, yakıt pillerinin yaşam çevrimi boyunca bakıldığında ekonomik açıdan çekici bir hal alacağı beklenmektedir [55].

Lüks yolcu gemileri, dünya turu için kişi başına yarım milyon dolara yakın bir ücret talep etmektedir. Bunun neticesinde, yolcuların en yüksek kalitede istek ve beklentilerine cevap vermek zorundadırlar. Motorin yakıtlı jeneratörler sağlam olmalarına rağmen istenmeyen ses, titreşim ve koku yayması nedeniyle sorun çıkarmaktadır. Yakıt pillerinin sessiz, titreşimsiz ve kokusuz çalışabiliyor olması, lüks yolcu gemilerinde yakın gelecekte tercih edilmesine vasıta olacaktır.



proton geçirgen zar(PEM)
yakıt pili güç modülü



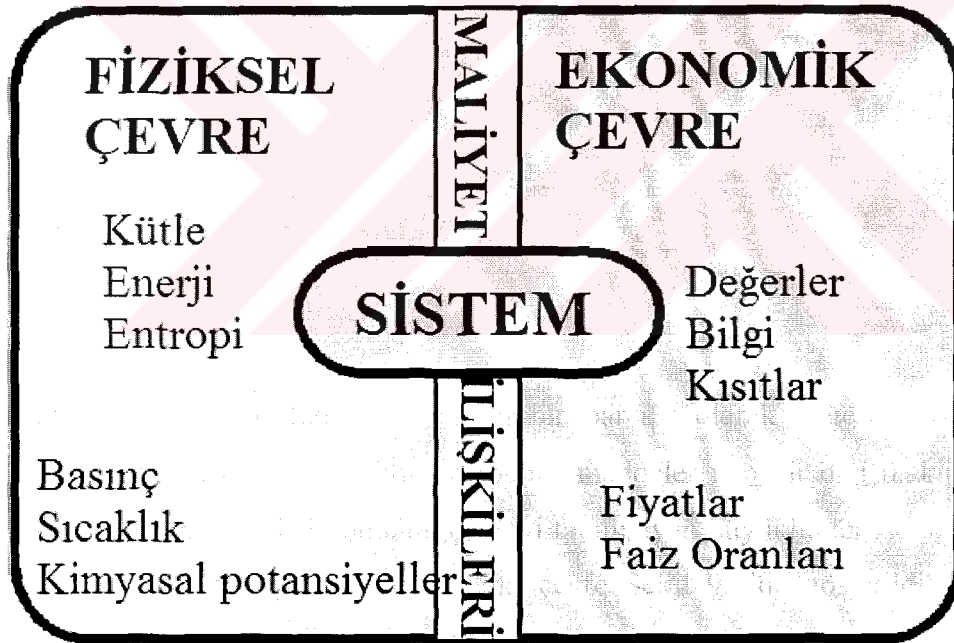
elektrik motoru

proton geçirgen zar (PEM)
elektroliz birimi

9. TERMO-EKONOMİK ANALİZ

9.1 Tanım

Bir sistem ekonomik ve fiziksel çevrenin bir parçası olarak değerlendirilebilir. Fiziksel çevre, P_0 basıncı T_0 sıcaklığı ve belirli maddeler için bir dizi μ_0 kimyasal potansiyelleriyle tanımlanır. Ekonomik çevreyi tanımlayan büyüklükler ise, malların referans fiyatları ve faiz oranlarıdır. Bu iki çevre Şekil 9.1’de gösterildiği üzere maliyet ilişkileriyle ilişkilendirilmektedir.



Şekil 9.1: Fiziksel ve Ekonomik Çevrenin Etkisindeki Sistem

Fiziksel çevreyle etkileşim içerisindeki sistemde, her bileşen için sistemin performansını tanımlamak adına kütle ve enerji dengeleri yazmak mümkündür. Asgari maliyeti hedefleyen şirketler için, maliyet ilişkilerini bilmek fiziksel ve ekonomik çevreler arasında bağlantıyı tanımlamayı sağlayacaktır. Çoğu zaman bakım ve ekipmanların sermaye maliyetleri doğrusal fonksiyonlar şeklinde tanımlanamadığı için karmaşık bir yapıya sahiplerdir. Sistemi optimize

edemediğimiz durumlarda, enerji ile maliyet arasında bir ilişki tanımlayarak uygun sistem aranır ve buna termo-ekonomi denir. Diğer bir deyişle, teknik olarak mümkün sistemler içerisinde ekonomik açıdan en uygun olanı bulmak kaydıyla teknik sistemleri verimli hale getirmenin etkin yoluna “termo-ekonomi” denilmektedir.

9.2 Termodinamik Analiz

Termodinamik analiz yapılırken ilk önce ideal performans tanımlanmış daha sonra kayıplar hesaba katılarak çalışma performansı belirlenmiş ve sonrasında matematiksel model oluşturulmuştur.

9.2.1 İdeal performans

Yakıt pilinin çalışma prensibini anlamak adına ilk mantıklı adım ideal performansının tanımlanması aşamasıdır. İdeal performans belirlendikten sonra kayıplar hesaplanır ve ideal performanstan çıkartılarak çalışma performansı belirlenir.

Yakıt pilinin ideal performansı Tablo 9.1’de verilen elektro kimyasal tepkimelerle ilişkilidir. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (polimer elektrolit, alkali ve fosforik asitli) anotta ve katotta istenen tepkime hızlarına ulaşabilmek için soy metal katalizörlere ihtiyaç duyarlar ve yakıt olarak sadece hidrojenle çalışırlar. Yüksek sıcaklıklı yakıt pillerinde (eriyik karbonat ve katı oksit) ise katalizör seçimi daha esnektir. Bu nedenle kullanılan yakıtlar da çeşitlenmektedir. Karbon monoksit, düşük sıcaklıklarda platin gibi soy metal katalizörlerin çalışmasını engellerken, nikel gibi soy metal olmayan katalizörün kullanıldığı yüksek sıcaklıklı yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılabilir.

Yakıt pilinin ideal performansı hücre potansiyeli olarak da ifade edilen Nernst potansiyeli ile tanımlanır. Toplam hücre tepkimeleri ve bu tepkimelere karşılık gelen Nernst denklemleri Tablo 9.2’de verilmektedir. Nernst denklemi hücre tepkimeleri için ideal standart potansiyel (E_0)⁶ ile değişik sıcaklık ve ürün ile girdi kısmi basınçları için ideal denge potansiyeli (E) arasında bir ilişki kurmaktadır. Standart

⁶ İdeal Nernst potansiyeli (E^0) 25 °C sıcaklık ve 1 atm basıncındaki ideal hücre potansiyeline eşittir. Çalışmakta olan bir yakıt pilinde ortaya çıkan kayıpları içermemektedir. Bu nedenle açık devre potansiyeli olarak da düşünülebilir.

koşullarda ideal potansiyel bilindiği takdirde diğer sıcaklık ve basınçlardaki potansiyel değerleri bu denklemler kullanılarak bulunabilir. Hidrojen tepkimeleri için Nernst denklemine göre; belli bir sıcaklıkta ideal hücre potansiyeli daha yüksek tepkime basınçlarında çalışıldığı takdirde arttırılabilir veya diğer bir deyişle yüksek sıcaklıklarda yakıt pili performansında daha ciddi iyileştirmeler gözlemlenmektedir.

Tablo 9.1: Yakıt Pillerinde Gerçekleşen Elektrokimyasal Tepkimeler

Yakıt Pili	Anot Tepkimesi	Katot Tepkimesi
Polimer Elektrolit Zar (PEMFC) & Fosforik asitli (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alkalın (AFC)	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Eriyik Karbonat (MCFC)	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Katı Oksit (SOFC)	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

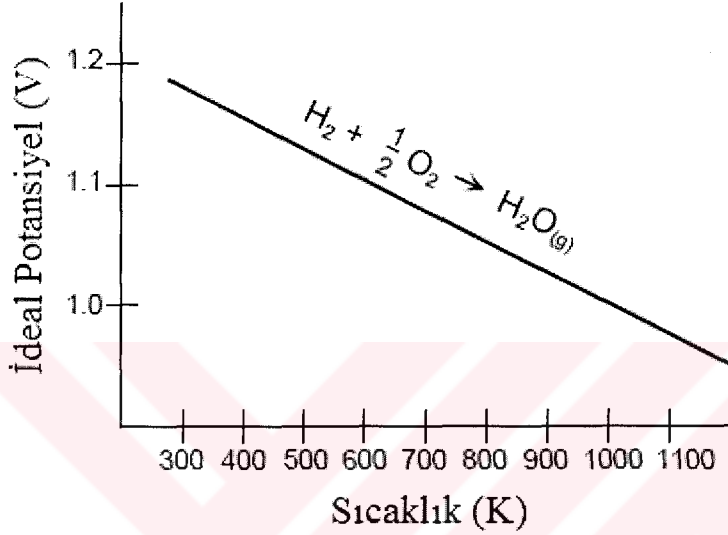
Tablo 9.2: Yakıt Pili Tepkimeleri ve Karşılık Gelen Nernst Denklemleri [68]

Hücre Tepkimeleri	Nernst Denklemi
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E_0 + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 + CO_2, \text{anot} \rightarrow H_2O + CO_2, \text{katot}$	$E = E_0 + (RT/2F) \ln [P_{H_2} / P_{H_2O} P_{CO_2, \text{anot}}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2} P_{CO_2, \text{katot}}]$
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$E = E_0 + (RT/2F) \ln [P_{CO} / P_{CO_2}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E = E_0 + (RT/8F) \ln [P_{CH_4} / P_{H_2O}^2 P_{CO_2}] + (RT/8F) \ln [P_{O_2}^2]$

Bir H_2/O_2 yakıt pilinde ideal standart potansiyel (E^0), ürünün sıvı halde su olduğu durumda 1.229 volt, gaz halinde su olduğu durumda ise 1.18 volttur. Bu değer aynı zamanda hidrojenin oksitlenme potansiyeli olarak da tanımlanabilir [69]. Şekil 9.2’de E^0 ile sıcaklığın ilişkisi verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere suyun gaz haline geçme sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda E^0 1.229 volt’un altına düşmektedir. İdeal potansiyel değerlerinin Tablo 9.3’te sıcaklığa göre nasıl değiştiği verilmektedir.

Tablo 9.3: Hücre Sıcaklığının Fonksiyonu Olarak İdeal Potansiyel

Sıcaklık	25 °C	80 °C	100 °C	205 °C	650 °C	800 °C	1100 °C
Pil Tipi	-	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	SOFC
İdeal Potansiyel	1.18	1.17	-	1.14	1.03	-	0.91



Şekil 9.2: Sıcaklığın Fonksiyonu Olarak H_2/O_2 Yakıt Pilleri İçin İdeal Potansiyel [68]

9.2.2 Çalışma performansı

Hücre bileşenlerinin malzeme tasarımı aşamasında yakıt pilinin çalışmasını betimleyecek geniş ve karmaşık bilgisayar modelleri kullanılmaktadır. Bu tip yazılımlar her ne kadar tasarım aşamasında gerekli olsa da, sistem analizi modelleri için kullanılmaları çok zaman almakta ve kullanışsız kalmaktadır. Bu tip analizler de daha basit ve daha kullanışlı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm beklenen koşullar için yakıt pilinin davranışlarını belirleyici deneyler yapmak da bir yaklaşım olsa da yüksek maliyeti nedeniyle tercih edilmemektedir. Bunun yerine, termodinamik modellemeye dayanan yakıt pilinin değişik çalışma koşullarındaki performans değerlerini verecek korelasyonlar geliştirmek daha akılcıdır. Termodinamik modelleme, belli bir denklem betimlemeyi amaçladığı için sadece tasarım kısıtlarını belirlemeye yönelik deneyler yapmak yeterlidir. İstenen koşullardaki performans değerlerine belli bir ortamdaki referans performans değerleri yardımıyla ulaşmak mümkün olmaktadır.

Termodinamik modelleme kapsamında kullanılan yakıt pili potansiyel modelinde, aktivasyon, omik ve difüzyon potansiyel kayıpları dikkate alınmaktadır. En çok kullanılan Tafel yarı ampirik modelinde aktivasyon ve omik kayıplar dikkate alınırken difüzyon kayıpları göz ardı edilmektedir [70]. Ballard Mark IV modeli yakıt pili performansını daha hassas bir şekilde betimleyebilmek üzere geliştirilmiştir. Omik kayıplar daha detaylı ele alınmakta ve modelde oksijenin kısmi basıncı da hesaba katılmaktadır [16].

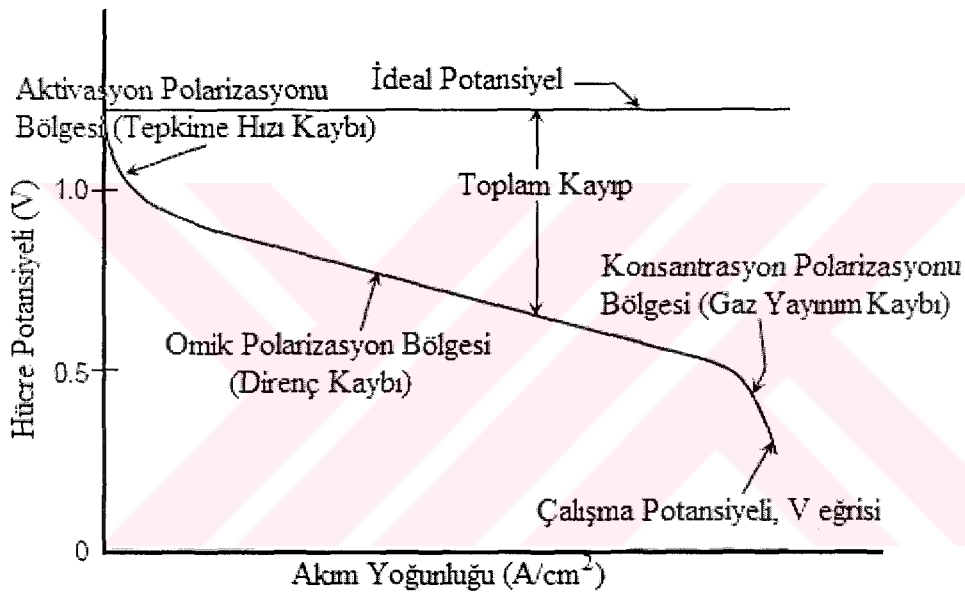
Noponen [72] ve Ballard Mark V [73] modellerinde ise difüzyon kayıpları da ele alınmaktadır. Noponen Tafel modeline difüzyon kayıplarını eklerken, Ballard Mark V modelinde ise Ballard Mark IV modeli difüzyon kayıplarını da içerecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Difüzyon kayıpları çoğunlukla sıcaklıktan bağımsız modeller için kullanılmaktadır. Tablo 9.4'te değişik PEM yakıt pili modelleri verilmektedir.

Tablo 9.4: Değişik Yakıt Pili Modelleri

Model	Denklem
Tafel [74]	$A_0 + A_1T + (B_0 + B_1T) \ln(i) + (R_0 + R_1T)i$ (9.1)
Ballard Mark IV [16]	$A_0 + A_1T + B_0T \ln(C_{O_2}^*) + B_1T \ln(i) + R_0i + R_1Ti + R_2T^2 + R_3i^2$ (9.2)
Fosforik asitli [74]	$A_0 + A_1\tau + B_0 \ln(i) + \frac{R_0}{\tau} i$ (9.3)
Noponen [72]	$A_0 + A_1T + (B_0 + B_1T) \ln(i) + (R_0 + R_1T)i + M \exp(Ni)$ (9.4)
Ballard Mark V [73]	$A_0 + A_1T + B_0T \ln(C_{O_2}^*) + B_1T \ln(i) + R_0i + R_1Ti + R_2T^2 + R_3i^2 + M \exp(Ni)$ (9.5)

9.2.3 Matematiksel model

Bir yakıt pilinde yararlı iş (elektrik enerjisi) sadece kabul edilebilir bir akım değerinde elde edilebilir ancak şekil 9. 3'ten de görüldüğü üzere çalışma potansiyeli belli bir denge potansiyelinden tersinmez kayıplar nedeniyle düşüş göstermektedir. Basit bir yakıt pilinde bu tip kayıplara neden olan değişik kaynaklardan açığa çıkar. Başlıca kayıp kaynakları aktivasyon polarizasyonu (v_{act}), omik polarizasyon (v_{ohm}) ve difüzyon polarizasyonudur (v_{diff}). Bu kayıplar neticesinde ideal potansiyelden (E) daha düşük bir hücre potansiyeli (V) elde edilmektedir.



Şekil 9.3: İdeal ve Çalışma Yakıt Pili Potansiyel / Akım Karakteristiği

Aktivasyon polarizasyon kayıpları düşük akım yoğunluğu değerlerinde daha baskındır. Bu noktada, başta akım ve iyon akışı olmak üzere elektronik engellerle başa çıkmak gerekmektedir. Aktivasyon kayıpları akımın artmasıyla küçük bir artış göstermektedir. Omik polarizasyon (kayıp) akımla doğru orantılıdır. Hücre direnci değişmediği için akımın artışıyla beraber tüm akım aralığında artış göstermektedir. Gaz taşınım kayıpları tüm akım aralığında görülse de, yeterli girdi akışının sağlanmasının güçleştiği yüksek akım değerlerinde daha fazla önem kazanmaktadır.

Buna göre, tek bir hücredeki potansiyel ifadesi şu şekildedir:

$$V_{cell} = E + v_{act} + v_{omik} + v_{diff} \quad (9.6)$$

Tersinir termodinamik potansiyel $H_2 + O_2$ tepkimesinde Nernst denklemi uyarınca şu şekilde yazılabilir:

$$E = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln[P_{H_2}^* (P_{O_2}^*)^{0.5}] \quad (9.7)$$

Burada, E_0 referans potansiyeldir ve kısmi basınç değerleri anotla katottaki oksijen ve hidrojen konsantrasyonları ile ilişkilidir. Bu denklem yeniden düzenlenecek olunursa şu hali alır [75,20]:

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (9.8)$$

Aktivasyon kayıpları, elektrot ile elektrolit ara yüzeyleri arasında gerçekleşen yük transfer tepkimesinin kinetiği neticesinde açığa çıkmaktadır. Diğer bir ifadeyle, elektron transfer tepkimesini yürütmek adına gerçekleşen elektrot potansiyel kaybıdır. Aktivasyon kaybı doğrudan elektro kimyasal tepkimelerin doğasıyla ilişkilidir ve tepkimenin akım vasıtasıyla istenen hızda gerçekleşmesi neticesindeki aktivasyon enerjisinin büyüklüğünü temsil eder.

Aktivasyon kaybı, anot ve katot kayıpları olmak üzere ikiye bölünebilir. Anot kayıpları için eşitlik şöyledir:

$$v_{act,a} = - \frac{\Delta G_{ec}}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln(4FAk_a^0 C_{H_2}^*) - \frac{RT}{2F} \ln(i) \quad (9.9)$$

Bu ifadeye karşı gelen katot kayıplarını veren ifade ise şöyledir:

$$v_{act,c} = \frac{RT}{a_c zF} \left[\ln(zFAk_c^0 \exp\left(\frac{-\Delta G_e}{RT}\right) (C_{O_2}^*)^{(1-a_c)} (C_{H^+}^*)^{(1-a_c)} (C_{H_2O}^*)^{a_c}) - \ln(i) \right] \quad (9.10)$$

Katot ve anot kayıplarını içeren tek bir aktivasyon kaybı ifadesi yazılacak olursa;

$$v_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T [\ln(C_{O_2}^*)] + \xi_4 T [\ln(i)] \quad (9.11)$$

şeklinde parametrik bir ifade elde edilir. Burada, ξ_i yarı ampirik sabitleri ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\xi_1 = \left(\frac{-\Delta G_e}{a_c zF} \right) + \left(\frac{-\Delta G_{ec}}{2F} \right) \quad (9.12)$$

$$\xi_2 = \frac{R}{a_c zF} \ln \left[zFAk_c^0 (C_{H^+}^*)^{(1-a_c)} (C_{H_2O}^*)^{a_c} \right] + \frac{R}{2F} \left[\ln (4FAk_a^0 C_{H_2}^*) \right] \quad (9.13)$$

$$\xi_3 = \frac{R}{a_c zF} (1 - a_c) \quad (9.14)$$

$$\xi_4 = - \left(\frac{R}{a_c zF} + \frac{R}{2F} \right) \quad (9.15)$$

Ballard IV⁷ ve Ballard V⁸ hücreleri için yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, ξ_i sabitleri için elde edilen deneysel değerler Tablo 9.5'te verilmektedir.

Tablo 9.5: Ballard IV ve Ballard V'e Ait Deneysel ξ_i Sabitleri

Yakıt pili Türü	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
Ballard Mark IV	-0.9514	0.00312	7.4×10^{-5}	-0.000187
Ballard Mark V	-0.944	0.00354	7.8×10^{-5}	-0.000196

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sabitler,

$$\xi_1 = -0,948 \pm 0.004 \quad (9.16)$$

$$\xi_2 = 0.00286 + 0.0002 \ln A + 4.3 \times 10^{-5} C_{H_2}^* \quad (9.17)$$

$$\xi_3 = (7.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \quad (9.18)$$

$$\xi_4 = -(1,93 \pm 0.05) \times 10^{-4} \quad (9.19)$$

şeklinde ifade edilmektedir [73].

Anot ve katottaki su konsantrasyon miktarı yakıt pilinde gerçekleşen aktivasyon kayıplarında önemli bir role sahiptir. Bunun nedeni, anotta reaksiyona giren hidrojen

⁷ Ballard Mark IV yakıt pili, 50.6 cm² aktif hücre alanına sahip 12 hücreden oluşmaktadır.

⁸ Ballard Mark V yakıt pili, 232 cm² aktif hücre alanına sahip 35 hücreden oluşmaktadır.

ve katotta reaksiyona giren oksijenin aktif katalizör alana su filmi içinden geçerek yayılmasıdır. Zarin anot tarafında düşük su konsantrasyonu olması beklenirken, katot tarafında suyun bu tarafta açığa çıkıyor olmasından dolayı daha kalın bir su filmi beklenebilir.

Katalizör alanın anot tarafındaki etkin hidrojen konsantrasyonu, anottaki su-gaz ara yüzeyindeki hidrojen konsantrasyonu olarak alınabilir, ve şu şekilde ifade edilir [20]:

$$C_{H_2}^* = \frac{P_{H_2}^*}{1.09 \times 10^6 \exp\left(\frac{77}{T}\right)} \quad (9.20)$$

Benzer şekilde, katalizör alanının katot tarafındaki etkin oksijen konsantrasyonu, katottaki su-gaz ara yüzeyindeki oksijen konsantrasyonu olarak alınabilir, ve şu şekilde ifade edilir [20]:

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (9.21)$$

Anottaki hidrojen gazının ve katottaki oksijen gazının kısmi basınçları ($P_{H_2}^*$ ve $P_{O_2}^*$) anot ve katot basınçları (P_A ve P_C) ile hidrojen ve oksijen mol kesirleri (x_{H_2} ve x_{O_2}) cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [77]:

$$P_{H_2} = x_{H_2} P_A \quad (9.22)$$

$$P_{O_2} = x_{O_2} P_C \quad (9.23)$$

Hidrojen ve oksijen mol kesirleri Rowe ve Li tarafından şu şekilde tanımlanmıştır [78]:

$$x_{H_2} = \frac{1 - x_{H_2O,A}}{1 + (x_A / 2)(1 + \zeta_A / (\zeta_A - 1))} \quad (9.24)$$

$$x_{O_2} = \frac{1 - x_{H_2O,C}}{1 + (x_C / 2)(1 + \zeta_C / (\zeta_C - 1))} \quad (9.25)$$

Anot ve katottaki su mol kesirleri ($x_{H_2O,A}$ ve $x_{H_2O,C}$) basit olarak belli bir yakıt pili çalışma sıcaklığında suyun doyma basıncı (P_{sat}) ile anot ve katot basınçlarının oranı olarak şu şekilde yazılabilir:

$$x_{H_2O,A} = \frac{P_{sat}}{P_A} \quad (9.26)$$

$$x_{H_2O,C} = \frac{P_{sat}}{P_C} \quad (9.27)$$

Su buharının doyma basıncı ise Berning tarafından şu ifadeyle verilmektedir [79]:

$$\log_{10} P_{H_2O}^{sat} = -2.1794 + 0.02953(T - 273.15) - 9.1837 \times 10^{-5} \times (T - 273.15)^2 + 1.4454 \times 10^{-7} (T - 273.15)^3 \quad (9.28)$$

Omik kayıplarının kaynağı hücre içindeki elektriksel direnç kayıplarıdır. Bu dirençler tüm yakıt pili aşağı yukarı tüm yakıt pili bileşenlerinde görülür. Örnek verilecek olursa;

- Zardaki iyonik direnç
- Elektrotlardaki iyonik ve elektronik direnç
- Gaz difüzyon destekleri, çift kutuplu plakalar ve uç bağlantılarındaki elektronik dirençler

Omik kayıplar şu şekilde verilebilir:

$$v_{ohm} = -iR^{int} \quad (9.29)$$

Toplam direnç ifadesi sıcaklık ve akımın karmaşık bir fonksiyonudur. Tüm önemli zar parametrelerini içerecek şekilde iç direnç,

$$R^{int} = \frac{r_M l}{A} \quad (9.30)$$

şeklinde ifade edilir [80].

Nafion zar öz direnci için,

$$r_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{i}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{i}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[14 - 0.634 - 3 \left(\frac{i}{A} \right) \right] \exp \left(4.18 \left[\frac{T - 303}{T} \right] \right)} \quad (9.31)$$

ifadesi verilmektedir [80].

Difüzyon kaybı, kütle transfer kısıtlarının reaksiyona giren maddelerin elektrot civarında bulunabilmesine dönük etkisinden kaynaklanmaktadır. Elektrot tepkimeleri, sürekli bir akım akışı sağlamak için sabit girdiye gereksinim duyarlar. Difüzyon sınırlamaları tepkimeye giren maddelerin bulunabilirliğini azaltıcı yönde çalışmaktadır. Bunun sonucu olarak da mevcut enerjini bir kısmı kütle transferini gerçekleştirmek için kullanılmaktadır, bu da potansiyel çıktısında bir kayba neden olmaktadır. Benzer problemler tepkime ürünleri elektrot yüzeyi yakınında toplanması ve difüzyon yollarını tıkanması veya reaksiyona giren maddeleri seyreltmesi neticesinde de görülmektedir.

Toplam difüzyon kaybı, Berning [79], Chachine [23] ve Hamelin [82] tarafından,

$$v_{diff} = M \exp(Ni) \quad (9.32)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Difüzyon kaybı reaksiyona giren gazlardaki konsantrasyon düşüşü ile doğrudan ilişkilidir. Bunun neticesinde de, katalizör katmandaki, akım alanlarındaki ve elektrot boyunca gerçekleşen elektrokimyasal tepkime sonucunda açığa çıkan yan ürünlerde artış görülür. Kütle transfer sabitleri (M ve N için bir fiziksel tanım verilmemiştir. Ancak, Berning yaptığı çalışmada [79], M sabitinin elektrolit iletkenliği, N abitinin ise gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği ile korelasyon gösterdiğini bulmuştur.

Kısmi kurutulmuş elektrolit zar iletkenlikte düşüşe neden olmaktadır, öte yandan fazla su ise gözeneklilikte bir artış getirmektedir.

Kütle transfer sabitlerinden M'nin hücre sıcaklığının artışı ile birlikte düşüşe geçmektedir, ve çalışılan sıcaklık aralığına göre iki farklı şekilde ifade edilmektedir, N ise yapılan çalışmalar sonucu 0.7 ile 0.9 arasında değişmektedir [23]:

$$M = 1.1 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-6} (T - 273.15); \quad T \geq 312.15K \quad (9.33)$$

$$M = 3.3 \times 10^{-3} - 8.2 \times 10^{-5} (T - 273.15); \quad T < 312.15K \quad (9.34)$$

Herhangi bir yakıt pili için verim ifadesi elektrik gücü çıktısı ile yakıt girdisinin birbirine oranı şeklinde verilebilir:

$$\eta_{fc} = \frac{P_{fc}}{F_{in}} \quad (9.35)$$

elektrik güç çıktısı ise basit olarak akım ve potansiyelin çarpımıdır:

$$P_{fc} = V \times I \quad (9.36)$$

Watt cinsinden yakıt girdisi hidrojen tüketim hızı ve enerji içeriğinin (entalpisi ve üst ısı değer) çarpımı şeklinde ifade edilir. $H_2 + O_2$ tepkimesi için hidrojenin üst ısı değeri 142000 J/g alınabilir. Hidrojen tüketim hızı ise Faraday Yasası gereğince:

$$q_{H_2} = \frac{mI}{zF} \quad (9.37)$$

şeklinde yazılabilir. Buna göre, yakıt girdisi;

$$F_{in} = q_{H_2} \cdot \Delta h = \frac{m\Delta h}{zF} I \quad (9.38)$$

$H_2 + O_2$ tepkimesi için $\frac{m\Delta h}{nF}$ ifadesi 1.482 V değerini almaktadır. Bu değer, $H_2 + O_2$ tepkimesinden elde edilebilecek azami enerjiye (hem ısı hem de elektrik) karşılık gelen tersinir potansiyeldir.

Buna göre, (9.31), (9.32), (9.33) ve (9.34) denklemleri birleştirilirse, yakıt pili verimi çalışma potansiyelinin 1.482 V'ye oranına dönüşür:

$$\eta_{fc} = \frac{V}{1.482} \quad (9.39)$$

atmosferik basınç ve 25 °C sıcaklık altındaki enerjiye denk gelen azami teorik potansiyel 1.229 V'dir. Buna göre, hidrojenle çalışan bir yakıt pilinde standart koşullarda yakıt pili verimi 0.83 değeriyle sınırlıdır.

9.3 Ekonomik Analiz

Genel olarak bir yakıt pili için elektrik maliyetleri üç bileşene sahiptir:

- Sermaye maliyeti
- Yakıt maliyeti
- İşletim ve bakım maliyeti

Sermaye ve yakıt maliyetleri yakıt pilinin verimiyle ilişkiliyken; işletim ve bakım maliyetleri verimden bağımsızdır. Bu nedenle ekonomik analiz yapılırken işletim ve bakım maliyetlerinin ihmal edilmesinde bir sakınca yoktur [25].

Buna göre elektrik maliyeti için,

$$C_{el} = \frac{ACC + AFC}{AEP} \quad (9.40)$$

ifadesi yazılabilir.

Sermaye maliyeti olarak yakıt pillerinin maliyeti kastedilmektedir. Toplam maliyeti sermaye geri dönüş faktörü yardımıyla yıllık baza dönüştürmek mümkündür. Sermaye geri dönüş faktörü, aşınma ve paranın bugünkü değerini temsil etmektedir. Buna göre yıllık sermaye maliyeti,

$$ACC = C_{fc} \times CRF \quad (9.41)$$

şeklinde ifade edilir.

Sermaye geri dönüş faktörü için ise,

$$CRF = \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1} \quad (9.42)$$

formülü yazılabilir.

Polimer elektrolit zar yapılı yakıt pillerinde dayanıklılığı belirleyen tek önemli bileşen polimer zar yapısıdır. Yakıt pillerinde kullanılan bu polimer yapının kullanıldığı diğer bir alan ise klor-alkalin sanayidir. Yakıt piline göre çok daha fazla yıpratıcı çalışma koşullarına sahip bu sanayi kolunda polimer elektrolit zar yapının 40000 çalışma saatini aşan kullanılabilirliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir [25]. Bir diğer önemli bileşen platin ise % 80 oranında yeniden kullanıma müsaittir. Yakıt pili içerisinde hareketli parçaların olmaması nedeniyle, kalan yakıt pili bileşenleri daha uzun ömre sahiplerdir.

Bir yakıt pili yığını, birbirinden bağımsız hücrelerin iki uç plaka arasında sandviç şeklinde birbirine bağlanması ile oluşur. Yığından akımsa, yığının iki ucundaki elektrik çubukları aracılığıyla çekilir. Tüm yakıt, oksitleyici ve soğutucu bağlantıları ise yığın uç plakalarında gerçekleşmektedir. Yakıt pili yığını maliyeti (C_{fc}), yığın sabit maliyeti (C_{fix}) ve hücre maliyetinin (C_{cell}) fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$C_{fc} = C_{fix} + C_{cell} \times N_{cell} \quad (9.43)$$

Burada geçen yığın sabit maliyeti, maliyetleri hücre sayısı ile değişmeyen, uç plakaları elektrik çubukları akışkan bağlantıları gibi yığın bileşenlerinin maliyetini temsil etmektedir.

Bir hücre, polimer zar ve iki gaz geçirgen elektrotun kolektör/ayırıcı plakalarca sıkıştırılmasından oluşmaktadır (bakınız Şekil 9.4). Bir yığındaki kolektör/ayırıcı plaka sayısı hücre sayısından bir fazladır. Kolektör/ayırıcı plaklar genellikle grafitin sıkıştırılması ile şekillendirilmekte ve birim başına maliyeti düşük üretim hacimleri



Şekil 9.4: Yakıt Pili Yapısı

nedeniyle 100 \$ seviyelerindedir. Üretim hacminin artması ve daha ileri teknolojiler kullanılması neticesinde bu plakaların maliyetinin birim başına 10 \$'a kadar gerilemesi öngörülmektedir. Aynı zamanda, bugün için m^2 başına 780 \$ maliyete sahip polimer zarın maliyetinin de üretim hacminin artması neticesinde daha aşağı seviyelere gerilemesi beklenmektedir [25]. Yakıt pili yığınının en pahalı bileşenler yüksek katalizörlük özellikleri nedeniyle elektrotlardır. Bir yakıt pilinde, günümüzde cm^2 başına 4 mg platin içeren elektrotlar kullanılmaktadır. Bunun neticesinde, hücre başına platin maliyeti 125 \$'ı bulmaktadır. İlerleyen teknolojiyle birlikte cm^2 başına 2 mg platin içeren elektrotlar da kullanılmaya başlamıştır. Birim alan başına 0.1 mg platin kullanıldığı takdirde yakıt pillerinde platin maliyetleri hücre başına 7 \$ seviyelerine kadar gerileyebilecektir [25].

Yığın içerisindeki hücre sayısı nominal güç çıktısı (P_{fc}), seçilen hücre güç yoğunluğu (P'_{cell}) ve hücre aktif alanının (A) bir fonksiyonudur:

$$N_{cell} = \frac{P_{fc}}{P'_{cell} A} \quad (9.44)$$

Yıllık bazda yakıt pilince üretilecek elektrik miktarı, yakıt pilinin çalışma rejimi (kapasite faktörü) ile ilişkilidir:

$$AEP = P_{fc} \times 8760 \times CF / 1000 \quad (9.45)$$

Kapasite faktörü, mevcut üretilen enerjinin üretilebilecek azami enerjiye oranı şeklinde tanımlanabilir. Elektrik santrallerinde kullanılan yakıt pilleri için bu değer 0.9 alınabilecekken, araba gibi değişken yüklemeler yapılan uygulamalarda 0.5 veya daha düşük değerler almak mümkündür. Gemi uygulamalarında ise geminin yük gemisi veya römorkör olmasına göre değişiklik gösterebilecektir.

Yakıt pilinin ekonomisi kapasite faktörüyle yakından alakalıdır. Çok düşük kapasite faktörüne sahip uygulamalarda üretilen birim güç başına sabit maliyet sadece zamanın küçük bir kısmında yakıt pili kullanıldığı için yüksek çıkacak, lakin zamanın büyük bölümü kısmi yükte çalışması nedeniyle toplam yakıt pili verimi yüksek olacaktır.

Yıllık yakıt maliyeti için;

$$AFC = C_f \cdot AEP / \bar{\eta} \quad (9.46)$$

ifadesi kullanılabilir.

Yakıt pili maliyeti, (9.35) no'lu denklemden de görüldüğü üzere hücre potansiyeliyle doğru orantılıdır. Mevcut potansiyel güç seviyesinin fonksiyonu olması nedeniyle yük profiliyle değişim gösterecektir. Buna göre ortalama verim ifadesi:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{1.482} \sum_j [(V(\xi_j) \tau_j)] \quad (9.47)$$

halini alacaktır.

10. TEORİK BULGULAR VE SONUÇLAR

Çalışmada Ballard firması tarafından geliştirilen MK5-E tipi polimer elektrolit zar yapılı yakıt pili kullanılmıştır. Yakıt pili aktif hücre alanı 232 cm^2 , yakıt pili polimer zar kalınlığı $178 \text{ }\mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Yakıt pili 5 kW güç kapasitesinde ve tek yığın içerisinde 33 hücreden oluşmaktadır. Termodinamik anlamda performans analizi sırasında başlangıç koşulu olarak Laurencelle tarafından yapılmış deneysel çalışmalar [23] referans olarak alınmış ve çalışma basıncı 3 atm seçilmiştir. Bu çalışma basıncında, sıcaklık 30°C ile 90°C arasında değiştirilerek sabit çalışma basıncında sıcaklığın hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın devamında, sıcaklık Laurencelle'in yaptığı deneysel çalışma [23] sonucunda elde ettiği en yüksek performans değerlerine 70°C ve üzeri sıcaklıklarda ulaşıldığı sonucu gereğince 75°C olarak seçilmiş, ve sabit çalışma sıcaklığında çalışma basıncının 1 atm ile 20 atm arasında değiştirilmesinin hücre potansiyeli, hücre verimi ve güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir.

Sıcaklık ve basıncın termodinamik anlamda yakıt pili performansına etkisi incelendikten sonra yapılan ekonomik analiz dahilinde ise, Barbir tarafından yapılmış çalışmada [25] verilen başlangıç değerleri kullanılmıştır. Buna göre, sabit çalışma basıncı (3 atm) ve sabit çalışma sıcaklığında (75°C) yakıt pili yığın maliyeti, yakıt pili hücre maliyeti, yakıt maliyeti (hidrojen) gibi parametrelerin elektrik üretim maliyetine etkisi incelenmektedir.

10.1 Sabit Çalışma Basıncında Çalışma Sıcaklığının Değişimi

Çalışmada 3 atm sabit çalışma basıncında çalışma sıcaklığı 30°C , 45°C , 60°C , 75°C ve 90°C alınarak sıcaklık değişiminin yakıt pilinde hücre potansiyeline, hücre verimine ve güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir. Tablo 10.1' de 3 atm sabit basınç

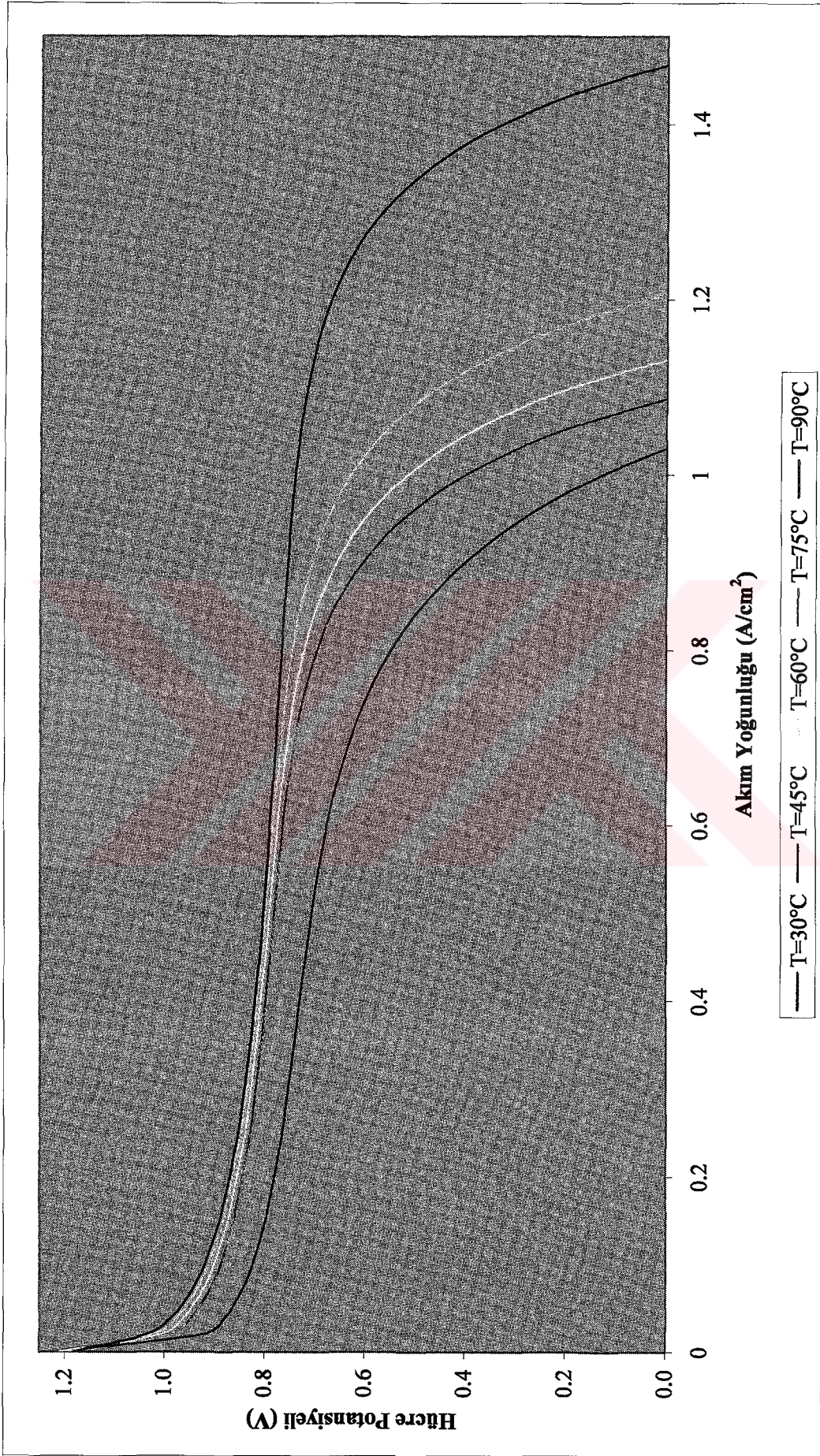
değerinde, çalışma sıcaklığı değişiminin hücre potansiyeline etkisine dair sonuçlar verilmektedir. Tüm sıcaklıklara ait tablolar ise Ek-A'da yer almaktadır.

Tablo 10.1: P = 3 atm Sabit Basınç Altında Sıcaklık Değişiminin Hücre Potansiyeline Etkisi

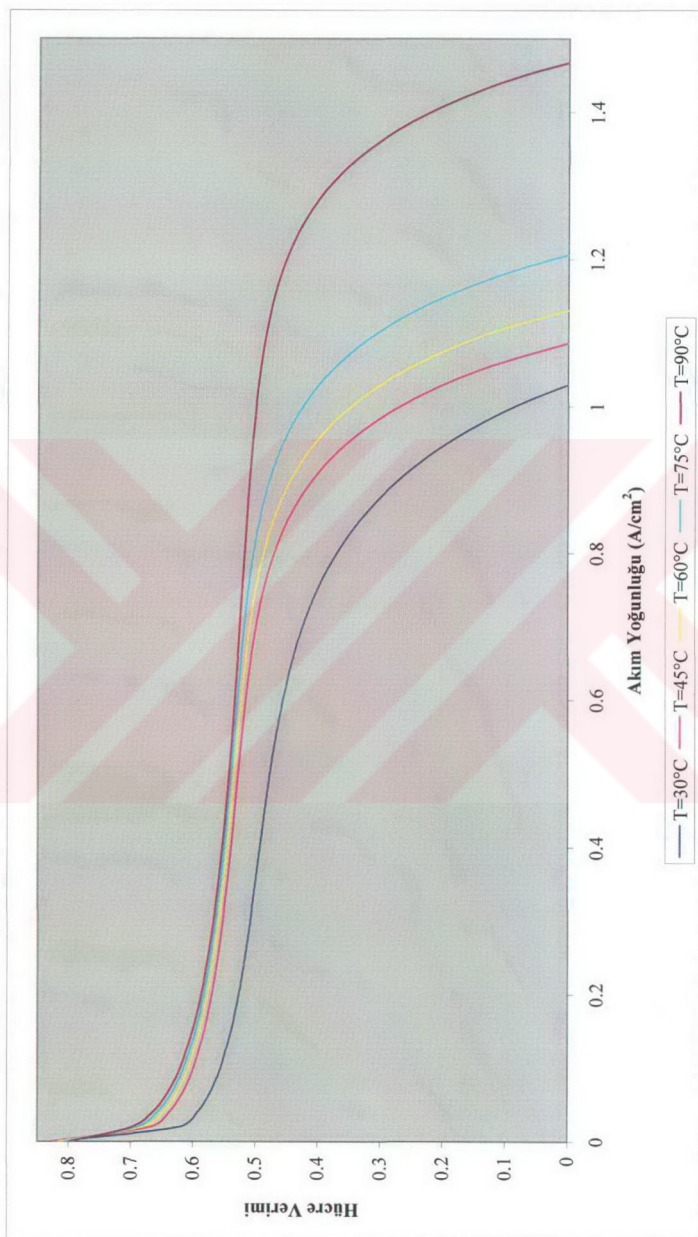
i	Hücre Potansiyeli (V)				
	T=30 C	T=45 C	T=60 C	T=75 C	T=90 C
0	1,21255	1,222009	1,208975	1,19516	1,179859
0,02	0,91838	0,98655	1,0042	1,02013	1,03277
0,04	0,87704	0,943289	0,9589	0,97279	0,983391
0,06	0,85278	0,917965	0,932383	0,94508	0,954489
0,08	0,83549	0,899983	0,913556	0,92540	0,93397
0,1	0,82202	0,886021	0,89894	0,91013	0,918045
0,15	0,79726	0,860601	0,872338	0,88235	0,889078
0,2	0,77926	0,842485	0,853401	0,86259	0,868494
0,25	0,76476	0,828331	0,838635	0,84721	0,8525
0,3	0,75224	0,816628	0,82647	0,83458	0,839409
0,35	0,74076	0,806533	0,816044	0,82383	0,828318
0,4	0,72963	0,797495	0,806809	0,81439	0,818686
0,45	0,71824	0,789085	0,798363	0,80591	0,810163
0,5	0,70592	0,780903	0,790356	0,79808	0,802504
0,55	0,69188	0,772501	0,782431	0,79063	0,79553
0,6	0,67514	0,763308	0,77416	0,78328	0,7891
0,65	0,65440	0,752525	0,76497	0,77568	0,783094
0,7	0,62789	0,738981	0,754044	0,76737	0,777399
0,75	0,59321	0,720915	0,740166	0,75768	0,771894
0,8	0,54707	0,69564	0,721499	0,74562	0,76644
0,85	0,48494	0,65903	0,69523	0,72969	0,76085
0,9	0,40056	0,604729	0,657036	0,70760	0,754867
0,95	0,28528	0,522928	0,600252	0,67583	0,748116
1	0,12715	0,398472	0,514588	0,62896	0,740032
1,05	-	0,207938	0,384143	0,55860	0,729761
1,1	-	-	0,18434	0,45182	0,715994
1,15	-	-	-	0,28860	0,696716
1,2	-	-	-	0,03802	0,668823
1,25	-	-	-	-	0,627523
1,3	-	-	-	-	0,565411
1,35	-	-	-	-	0,471043
1,4	-	-	-	-	0,326724
1,45	-	-	-	-	0,105097
1,5	-	-	-	-	-

Sabit basınç altında sıcaklığın artması hücre potansiyelinde bir artışa neden olmaktadır. Bunun en önemli nedeni sıcaklık arttıkça, kayıpların azalıyor olmasıdır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte özellikle difüzyon kayıplarında %20'lere varan düşüş görülmektedir (Bakınız Ek – A'da verilen hesaplama tablolarına).

Şekil 10.1'de sabit basınç altında sıcaklık değiştiği takdirde akım yoğunluğuna göre hücre potansiyelinin değişimi verilmektedir. Verim ifadesi tanım gereği hücre potansiyeliyle doğru orantılı olduğu için hücre potansiyelindeki artış hücre verimine de yansımaktadır. Şekil 10.2'de ise sıcaklık-hücre verim ilişkisi görülmektedir.



Şekil 10.1: P= 3 atm İçin Sıcaklık Değişiminin Hücre Potansiyeline Etkisi



Şekil 10.2: P= 3 atm için Sıcaklık Değişiminin Hücre Verimine Etkisi

Şekil 10.1 ve Şekil 10.2'den görüldüğü üzere sıcaklığın artmasıyla birlikte maksimum çalışma akım limiti de artmaktadır. Aktivasyon ve difüzyon kayıplarındaki düşüşün sıcaklıkla doğrudan bağlantılı olmasının yanında, sıcaklığın artışı hücre içerisinde kütle transferini de kolaylaştırmaktadır. Sıcaklığın artışıyla birlikte metallerdeki iyon iletkenliğindeki düşüşün aksine elektrolitlerde iyon iletkenliğinin artmaktadır. Bunun neticesinde de hücre direncinde doğrudan düşüş gerçekleşmektedir. Tüm bu kayıplardaki düşüş ise yakıt pili hücresinin performansına olumlu etki yapmaktadır.

Sıcaklık artarken, akımın artması sonucunda potansiyel eğrilerin öteleniyor olmasının nedeni benzer şekilde zar yapısının iletkenliğindeki artıştır.

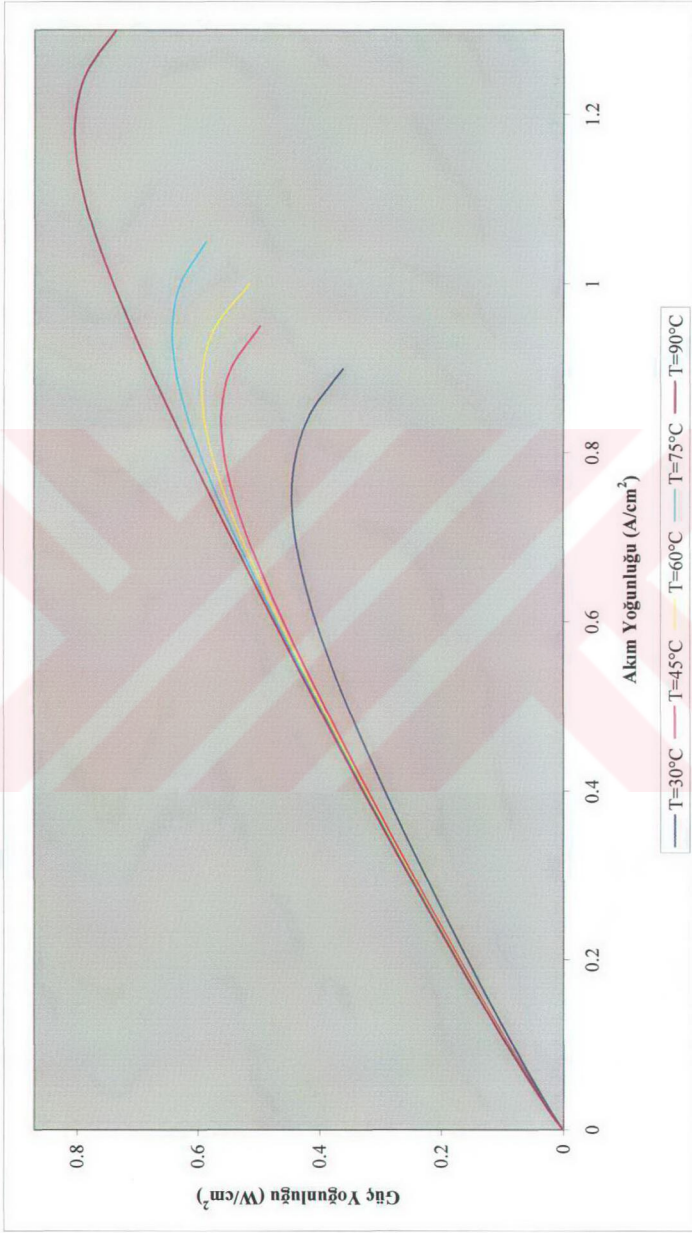
Yakıt pili hücresindeki güç yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi incelendiğinde de benzer şekilde sıcaklık artışının güç yoğunluğunun artmasına neden olduğu söylenebilir. Bu artışın nedeni olarak, hücre potansiyeli ve hücre veriminde olduğu gibi omik kayıplardaki düşüşü göstermek mümkündür.

Şekil 10.3'te basınç 3 atm olarak sabitlendiği takdirde, sıcaklık değişimi neticesinde güç yoğunluğunun akım yoğunluğu ile ilişkisi gösterilmektedir.

Sıcaklığın artmasıyla omik kayıplardaki düşüş, maksimum güç yoğunluğu değerlerinin daha yüksek akım yoğunluğu değerlerine doğru ötelenmesine neden olmaktadır. Öte yandan maksimum güç yoğunluğunun sıcaklık artışıyla birlikte arttığı Tablo 10.2'de sunulmaktadır.

Tablo 10.2: Sabit Basınç Altında Maksimum Güç Yoğunluğu Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

T (K)	P' (W/cm ²)
303,15	0,444906
318,15	0,560175
333,15	0,591332
348,15	0,642042
363,15	0,766249

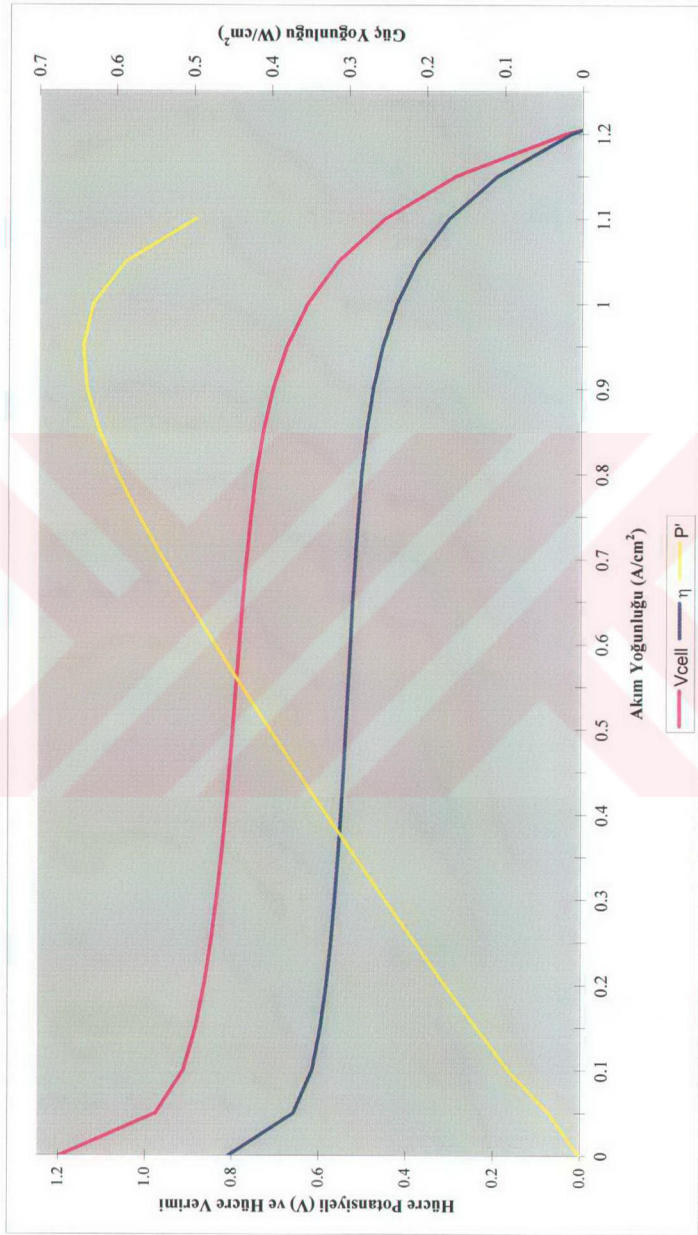


Şekil 10.3: P=3 atm İçin Sıcaklık Değişiminin Güç Yoğunluğuna Etkisi

Şekil 10.1 – 10.3 incelendiğinde, akım yoğunluğunun artışı neticesinde hücre potansiyeli ve dolayısıyla hücre veriminde bir düşüşle karşılaşılırken, güç yoğunluğunun bir tepe noktasına kadar arttığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir. Buna göre, maksimum güç yoğunluğu değeriyle göreceli olarak yüksek akım yoğunluklarında karşılaştığı söylenebilir. Güç yoğunluğunun maksimum olduğu bu noktada, hücre direnci, dış devrenin elektriksel direncine eşit olmaktadır. Ancak, akımın artışı ile birlikte verimdeki düşüş bir seçim yapılmasını gerektirmektedir. Yakıt pili tasarımcıları bu noktada gerekli güç yoğunluğunu istenen uygulamada güç veya verimden hangisinin daha önemli olduğuna göre seçmek zorundadır.

Akım yoğunluğundaki artışın belli bir basınç ve sıcaklıkta verim, potansiyel ve güç yoğunluğu üzerindeki etkisini görmek üzere Şekil 10.4 incelenmelidir.

Şekil 10.4'ten görüldüğü üzere akım yoğunluğu arttıkça verim ve potansiyel düşerken, güç yoğunluğu ise akım yoğunluğunun yaklaşık olarak 0.95 A/cm^2 değerine kadar artış gösterip bir maksimum değere ulaşmakta ve sonrasında düşüşe geçmektedir. Buna göre, 0.95 A/cm^2 'nin üstündeki akım yoğunluklarında çalışmak hem verimin hem de güç yoğunluğunun düşüşe geçmesi nedeniyle akılcı olmayacaktır.



Şekil 10.4: $T = 75^{\circ}\text{C}$ ve $P = 3 \text{ atm}$ için Hücre Potansiyeli, Hücre Verimi ve Güç Yoğunluğu Eğrileri

10.2 Sabit Çalışma Sıcaklığında Çalışma Basıncının Değişimi

Çalışma basıncının yakıt pili performansı üzerine etkisi incelenirken, 75°C sabit çalışma sıcaklığında çalışma basıncı 1 atm, 3 atm, 5 atm, 10 atm, 15 atm ve 20 atm alınarak basınç değişiminin yakıt pilinde hücre potansiyeline, hücre verimine ve güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir. Çalışma sıcaklığı Laurencelle'nin yapmış olduğu deneysel çalışmalar [23] neticesinde elde ettiği 70°C ve üzeri sıcaklıklarda yakıt pili performansında artış görüldüğüne dair bulgular ışığında 75°C olarak seçilmiştir. Tablo 10.3'te 75°C sabit sıcaklıkta, çalışma basıncı değişiminin hücre potansiyeline etkisine dair sonuçlar verilmektedir. Tüm sıcaklıklara ait tablolar ise Ek-B'de yer almaktadır.

Sabit sıcaklıkta basıncın artması, sıcaklık değişiminde olduğuna benzer bir şekilde hücre potansiyelinde bir artışa neden olmaktadır. Bunun en önemli nedeni (9.7) ve (9.8) no'lu denklemlerle verilmekte olan Nernst denklemi gereğince, basıncın artışıyla birlikte açık devre potansiyelinin de artıyor olmasıdır. Basınç değişimi tersinir potansiyel ilişkisi Tablo 10.4'te verilmektedir.

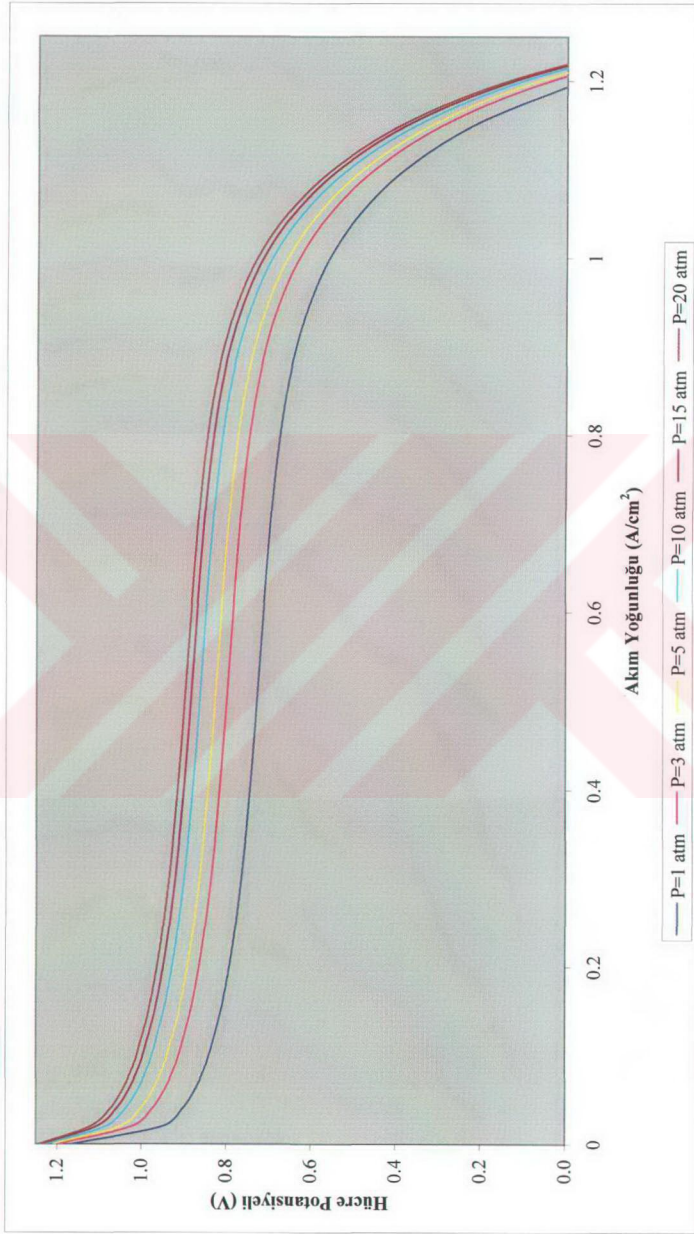
Tablo 10.3: T = 75°C Sabit Sıcaklıkta Basınç Değişiminin Hücre Potansiyeline Etkisi

i	Hücre Potansiyeli (V)					
	P=1 atm	P=3 atm	P=5 atm	P=10 atm	P=15 atm	P=20 atm
0	1,16287	1,19516	1,207904	1,22439	1,233808	1,240425
0,02	0,94886	1,02013	1,048251	1,08464	1,105418	1,120021
0,04	0,90152	0,97279	1,000912	1,03730	1,058079	1,072682
0,06	0,87381	0,94508	0,973203	1,00960	1,03037	1,044973
0,08	0,85414	0,92540	0,95353	0,98992	1,010697	1,0253
0,1	0,83887	0,91013	0,93826	0,97465	0,995427	1,010029
0,15	0,81108	0,88235	0,910476	0,94687	0,967643	0,982246
0,2	0,79132	0,86259	0,890715	0,92711	0,947882	0,962485
0,25	0,77595	0,84721	0,875336	0,91173	0,932504	0,947106
0,3	0,76332	0,83458	0,862709	0,89910	0,919876	0,934479
0,35	0,75256	0,82383	0,851951	0,88834	0,909118	0,92372
0,4	0,74313	0,81439	0,842518	0,87891	0,899685	0,914288
0,45	0,73464	0,80591	0,834033	0,87043	0,891201	0,905803
0,5	0,72681	0,79808	0,826201	0,86259	0,883368	0,897971
0,55	0,71936	0,79063	0,818752	0,85514	0,875919	0,890522
0,6	0,71201	0,78328	0,811402	0,84779	0,868569	0,883172
0,65	0,70441	0,77568	0,803805	0,84020	0,860972	0,875575
0,7	0,69610	0,76737	0,795494	0,83189	0,852662	0,867264
0,75	0,68641	0,75768	0,785804	0,82220	0,842971	0,857574
0,8	0,67435	0,74562	0,773743	0,81014	0,830911	0,845513
0,85	0,65842	0,72969	0,757814	0,79421	0,814982	0,829584
0,9	0,63634	0,70760	0,735727	0,77212	0,792894	0,807497
0,95	0,60457	0,67583	0,70396	0,74035	0,761127	0,775729
1	0,55770	0,62896	0,657086	0,69348	0,714254	0,728856
1,05	0,48734	0,55860	0,586729	0,62312	0,643896	0,658499
1,1	0,38055	0,45182	0,479944	0,51634	0,537111	0,551714
1,15	0,21733	0,28860	0,316725	0,35312	0,373892	0,388495
1,2	-	0,03802	0,066141	0,10253	0,123309	0,137911
1,25	-	-	-	-	-	-

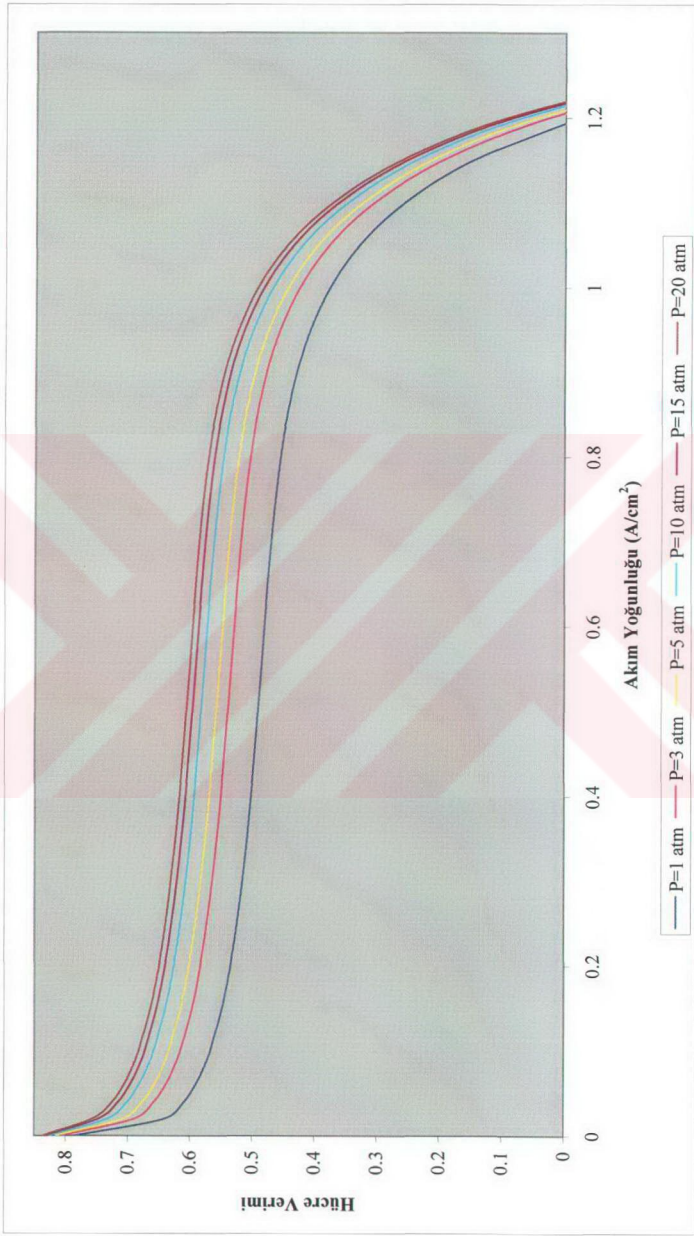
Tablo 10.4: Sabit Sıcaklıkta Çalışma Basıncı – Tersinir Potansiyel İlişkisi

P (atm)	E (V)
1	1,16287
3	1,19516
5	1,2079
10	1,22439
15	1,23381
20	1,24042

Sabit sıcaklıkta basıncın artması hücre potansiyeli eğrilerinin olumlu yönde ötelenmesine neden olmaktadır. Bunun en önemli nedeni basınç arttıkça, reaksiyona giren gazların kısmi basınçlarının da artıyor olmasıdır. Verim ifadesi tanım gereği hücre potansiyeliyle doğru orantılı olduğu için hücre potansiyelindeki artış hücre verimine de yansımaktadır. Şekil 10.5 –10.6'de sabit sıcaklıkta basınç değiştiği takdirde akım yoğunluğuna göre hücre potansiyeli ve hücre verimi değişimi verilmektedir.



Şekil 10.5: T= 75°C için Çalışma Basıncındaki Değişimin Hücre Potansiyeline Etkisi

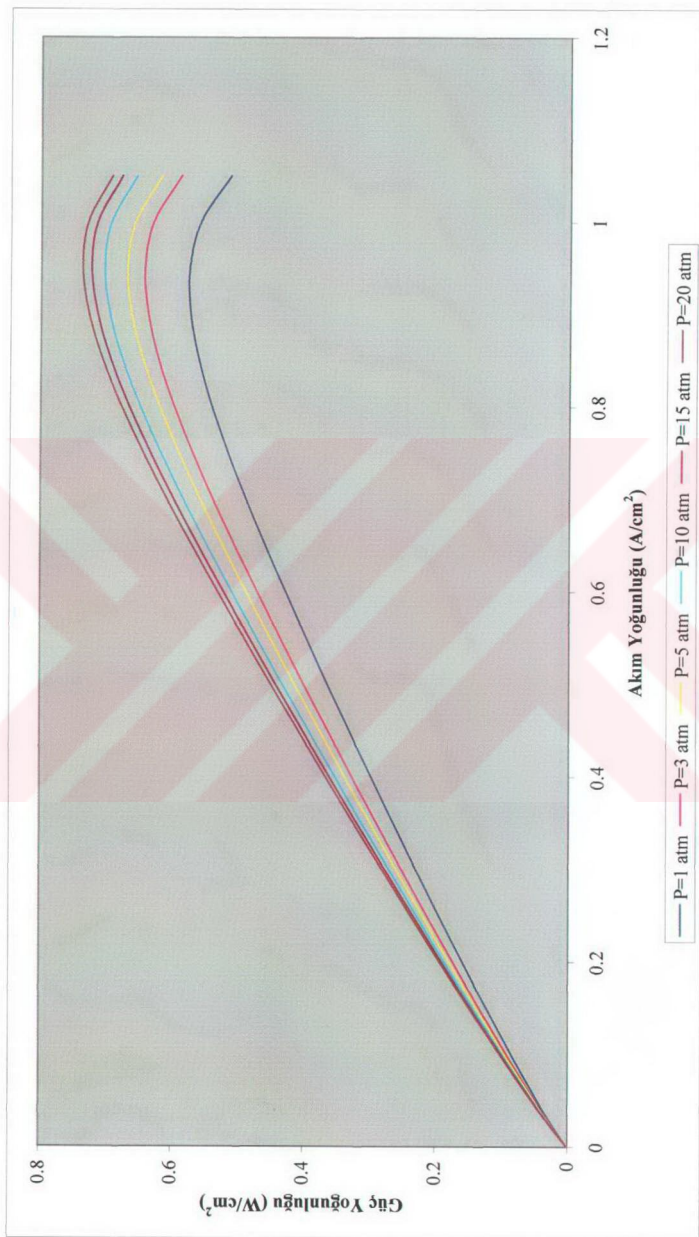


Şekil 10.6: $T=75^{\circ}\text{C}$ için Çalışma Basıncındaki Değişimin Hücre Verimine Etkisi

Çalışma basıncındaki değişiklikler giriş bileşiminde ciddi bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla da, basınç değişimi güç yoğunluğunu da etkilemektedir. Şekil 10.7’de sabit sıcaklıkta basıncın artırılmasının güç yoğunluğu eğrilerini daha yüksek değerlere doğru ötelediği görülmektedir. Basıncın artması neticesinde, reaksiyon gerçekleşme hızının reaksiyona giren gazların (hidrojen ve oksijen) kısmi basınçlarıyla doğru orantılı olması neticesinde maksimum güç yoğunluğu değerleri de artış göstermektedir (Bakınız Tablo 10.5). Bu nedenle, saf oksijen yerine havanın oksitleyici olarak kullanıldığı durumlarda basınç artışı daha belirgin neticeler vermektedir. Yüksek basınç altında, hidrojen ve oksijen gazları elektrolitle temasa zorlanmaktadır, ve dolayısıyla reaksiyon daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir.

Tablo 10.5: Sabit Sıcaklıkta Maksimum Güç Yoğunluğu Değerlerinin Basınçla Değişimi

P (atm)	P' (W/cm ²)
1	0,57434005
3	0,64204245
5	0,66876173
10	0,70333474
15	0,72307063
20	0,736943



Şekil 10.7: $T=75^\circ\text{C}$ için Çalışma Basıncındaki Değişimin Güç Yoğunluğuna Etkisi

10.3 Ekonomik Parametrelerdeki Değişim

Yakıt pili için elektrik üretim maliyeti ifadeleri Bölüm 9.3'te verilmişti. Bu ifadelere göre yakıt pili için elektrik üretim maliyetlerini etkileyen faktörler olarak;

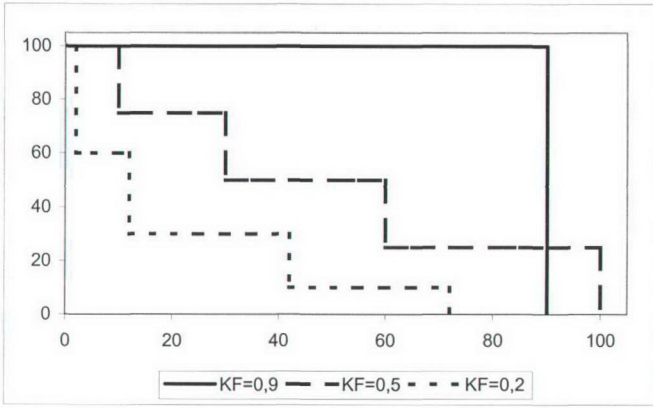
- Yakıt pili yığın maliyeti
- Yakıt pili hücre maliyetleri
- Yakıt maliyeti
- Faiz oranı
- Yakıt pili ömrü
- Kapasite faktörü

verilebilir.

Faiz oranı ve yakıt pili ömrü parametreleri ülke ve kullanım şekline göre sabit değerler olarak alınacak olursa, elektrik üretim maliyeti üzerine yakıt pili yığın maliyeti, yakıt pili hücre maliyetleri ve yakıt maliyeti etki edecektir. Türkiye koşullarında faiz oranı piyasadaki en yüksek borçlanma faiz oranı olan % 16 olarak alınabilir⁹. Yakıt pili ömrü ise, yakıt pilinde kullanılan zarin kullanım ömrüyle aynı olarak alınacak olursa 5 yıl olarak seçilebilir.

Yıllık üretim maliyeti ve yıllık yakıt maliyeti doğrudan kapasite faktörüyle ilişkilidir. Bu nedenle, kapasite faktörü yakıt pili ekonomisi üzerinde ciddi şekilde etkilidir. Düşük kapasite faktörlü uygulamalarda üretilen yıllık elektrik miktarı düşeceği için üretilen birim güç miktarına denk gelen sabit maliyetler yüksek çıkacaktır. Şekil 10.8'da değişik uygulamalar için geliştirilen yük profilleri verilmektedir. Bu profillerden kapasite faktörünün 0.9 olduğu uygulama olarak belli bir rotada çalışan yük gemileri, kapasite faktörünün 0.5 olduğu uygulama olarak liman içerisinde çalışan römorkörler kapasite faktörünün 0.2 olduğu uygulama olarak ise, yelkenli tekneler örnek olarak gösterilebilir.

⁹ Piyasada aylık tüketici kredisi faiz oranı % 1.25 olup, yıllık bileşik faiz %16'ya denk gelmektedir.

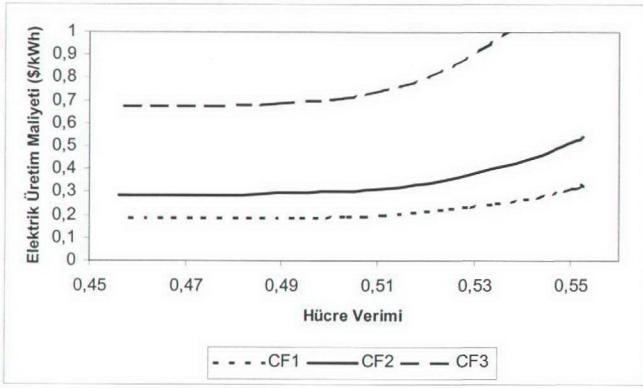


Şekil 10.8: Yük Profilleri

10.3.1 Mevcut koşullarda elektrik üretim maliyetleri

Yakıt pillerinin üretim maliyetlerine dair yapılan çalışmalarda birim güç başına yakıt pili maliyeti 324 \$ ile 9000 \$ arasında değişmektedir [83]. Buna göre, başlangıç koşulları için yakıt pili hücre maliyeti olarak 500 \$ ve yakıt pili yığın maliyeti olarak 1000 \$ alınması mevcut üretim maliyetlerini temsil edebilecektir. Mevcut hidrojen maliyeti olarsa GJ başına 20 \$ alınabilir [84].

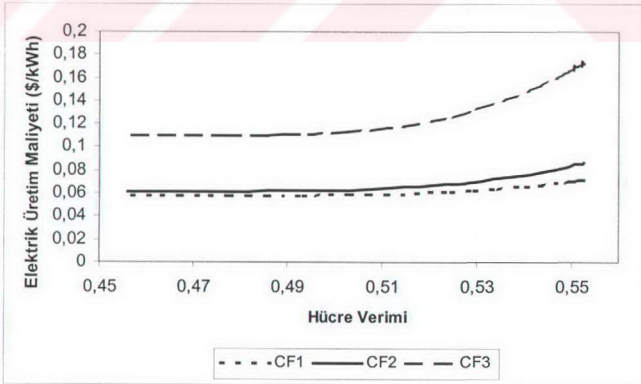
Şekil 10.9'da mevcut koşullardaki elektrik üretim maliyetleri 3 ayrı kapasite faktörü için verilmektedir. Beklendiği üzere, daha yakıt pillerinin de hidrojeninde seri üretime geçmemesi nedeniyle yüksek olan girdi maliyetleri elektrik üretim maliyetlerinin teknolojinin tercih edilmesini engelleyici derecede yüksektir. Kapasite faktörünün 0.2 olduğu uygulamalarda elektrik üretim maliyeti kWh saat başına 0.7\$ - 1\$ arasında değişirken, sabit yükleme durumunda ($CF = 0.9$) ve nispeten değişken yükleme görülen durumda ($CF = 0.5$) elektrik üretim maliyetleri kWh saat başına 0.18\$ - 0.54\$ arasında değişmektedir. Her üç uygulama içinde maksimum güç yoğunluğunda çalışmak en ekonomik neticeleri vermektedir.



Şekil 10.9: Mevcut Koşullarda Elektrik Üretim Maliyeti

10.3.2 Yakıt pili maliyetlerindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi

Yakıt pili üretim maliyetleri hakkında yapılan çalışmalar neticesinde, hem yakıt pili hücre maliyetlerinin hem de yakıt pili hücre maliyetlerinin mevcut maliyetlerin 1/10'una kadar indirilebileceği öngörülmüştür [83]. Buna göre, yakıt maliyeti sabit kalacak şekilde yakıt pili yığın maliyeti 100\$ seviyelerine, yakıt pili hücre maliyetleri ise 50\$ seviyelerine indiği takdirde, elektrik üretim maliyetleri kWh saat başına 0.06\$ -0.17\$ arasında değişmektedir (Bakınız Şekil 10.10).

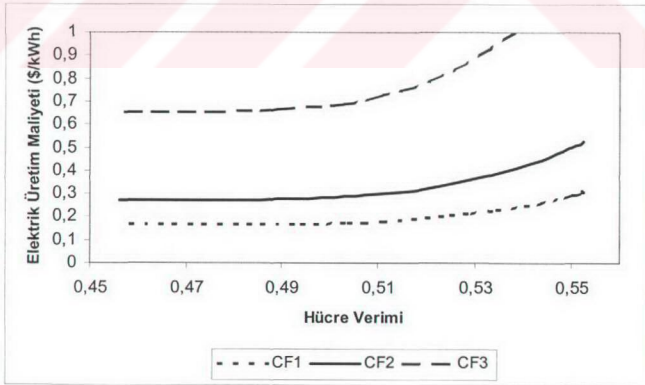


Şekil 10.10: Yakıt Pili Maliyetlerindeki Düşüşün Elektrik Üretim Maliyetlerine Etkisi

10.3.3 Hidrojen maliyetindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi

Yakıt pillerinin yaygın anlamda kullanımının önündeki en büyük engel, hidrojenin ulaşılabilirliğinin düşük olması ve hidrojen üretim yöntemlerinin henüz yeterli derecede gelişmemesidir. Günümüzde hidrojenin fiyatı GJ başına 20\$ seviyelerindedir¹⁰. Bu sorunla başa çıkmak adına kimi yakıt pili üreticileri metanol ya da doğalgazı iyileştirerek hidrojen elde etmek üzerine çalışmaktadır. Ancak, bu yöntem de hidrojen fiyatının yakıt pilleri sistemlerinin uygulanması önünde teşkil ettiği engeli kaldırmaya yeterli değildir. 2010 yılı itibarıyla, hidrojen üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve hidrojene olan talebin artması neticesinde gelişecek olan dağıtım ağları dolayısıyla hidrojen maliyetlerinin 12\$ seviyelerine gerilemesi öngörülmektedir [85].

Yakıt pili maliyetleri sabit tutulmak kaydıyla hidrojen maliyetlerindeki düşüşün elektrik üretim maliyetlerine etkisi incelenecek olursa, Şekil 10.11’de verildiği üzere, sürekli yük profiline sahip uygulamalar (CF=0.9) için kWh saat başına 0.17\$ - 0.31\$ arasında, göreceli olarak değişken yük profiline sahip uygulamalar (CF=0.5) için kWh saat başına 0.27\$ - 0.52\$ arasında, değişken yüklemeye yapılan kısmi yük profiline sahip uygulamalar (CF=0.2) için ise kWh saat başına 0.65\$ - 1.28\$ arasında değişmektedir.

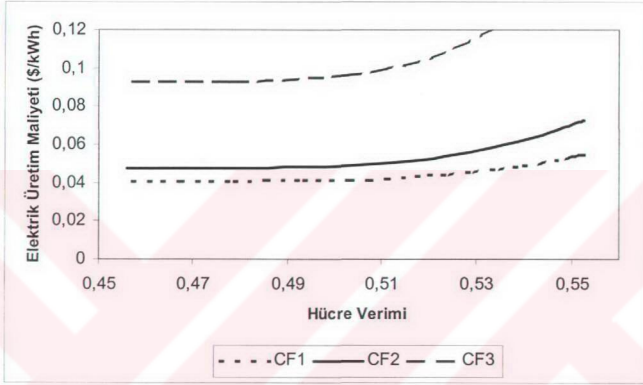


Şekil 10.11: Hidrojen Maliyetindeki Düşüşün Elektrik Üretim Maliyetlerine Etkisi

¹⁰ Hidrojen satış fiyatı GJ başına 20\$ veya diğer bir ifadeyle kg başına 2.80\$ seviyelerindedir.

10.3.4 Gelecekte ulaşılması hedeflenen elektrik üretim maliyetleri

Bölüm 10.3.1 –Bölüm 10.3.2 arasında mevcut koşullarda ve girdilerden birinin maliyeti sabit tutulurken diğerinin maliyetinde bir iyileştirme gerçekleşirse kWh başına elektrik üretim maliyetleri incelenmiştir. Her iki girdi maliyetinde de gelecekte ulaşılması hedeflenen seviyelere gerilediği durum için yapılacak analizde elde edilen sonuçlar Şekil 10.12’te verilmektedir.

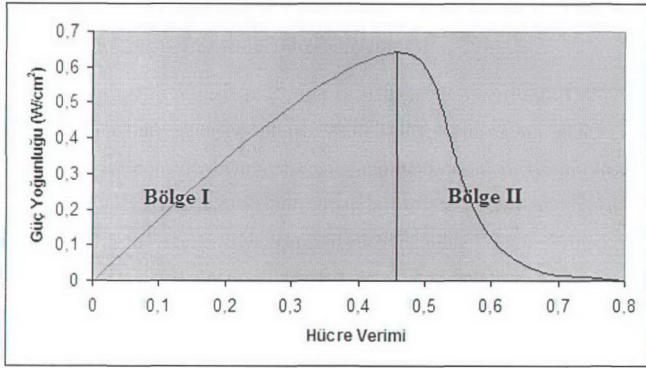


Şekil 10.12: Gelecekte Hedeflenen Elektrik Üretim Maliyetleri

Girdi maliyetleri hedeflenen seviyelere çekildiği takdirde, hem sürekli sabit yüklemde çalışmayı temsil eden uygulama (CF = 0.9) hem de göreceli değişken yüklemde çalışmayı temsil eden uygulama (CF = 0.5) için kWh başına 0.04\$ – 0.07\$ arasında bir elektrik üretim maliyetinden söz etmek mümkündür. Kısmi yüklemde (CF = 0.2) ise elektrik üretim maliyetleri kWh başına 0.09\$ - 0.16\$ arasında değişmektedir.

10.4 Uygun Çalışma Koşullarının Belirlenmesi

Yakıt pili için belli bir sıcaklık (75°C) ve belli bir basınç (3 atm) değerinde hücre verimiyle değişimi çizilecek olursa, Bölge I’de çalışmanın akılcı olmayacağı görülecektir. Bu bölgede, hem güç yoğunluğu hem de hücre verimi düşük değerler almaktadır. Bölge II’de ise verimin artışıyla birlikte güç yoğunluğu düşmektedir. Bölge II içerisinde seçilen uygulamada güç yoğunluğu veya verim kriterlerinden hangisi daha önemli görülüyorsa ona göre seçim yapılmalıdır.



Şekil 10.13: $P=3$ atm ve $T=75^{\circ}\text{C}$ 'de Verim-Güç Yoğunluğu İlişkisi

Yakıt pilinin yapısı hatırlanacak olursa, yakıt pili hücrelerin yığın içerisine yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Mevcut teknoloji, 70 hücre yerleştirilecek boyutlarda yığın üretimini gerektirmektedir. Buna göre, istenen nominal güç ve mevcut yakıt pili aktif hücre alanı değerleri ışığında güç yoğunluğunuz bir alt limitle sınırlıdır.

11. SONUÇ

Artan enerji talebine karşılık mevcut petrol rezervlerindeki azalış ve her geçen gün daha tehlikeli bir hal alan emisyon problemleri, toplumu daha temiz ve petrol harici yakıtlarla çalışan sistemleri aramaya yöneltmektedir.

Mevcut alternatif güç kaynakları arasında yakıt pilleri, verim, temizlik, güvenilirlik, geniş çalışma sıcaklığı ve basıncı aralığı, değişik yakıt türlerini kullanabilme, istenen formda üretilebilme esnekliği gibi avantajlar her geçen gün yakıt pillerine olan ilgiyi arttırmaktadır. Her ne kadar bu gün için yakıt pilleri konvansiyonel güç üretim sistemlerine göre ekonomik olmasa da, gerek özel sektör gerekse devletler teknolojiye bir adı daha atılabilmek pahasına servet harcamaktadır.

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan doğruya elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır ve çalışma sıcaklığı ve kullanılan elektrolite göre sınıflandırılmaktadır. Mevcut tüm yakıt pili çeşitlerinin kendine özgü avantajları ve yine kendilerine has dezavantajları vardır. Tüketicinin, doğru yakıt pili uygulamasını seçmeden önce sistemin gereksinimlerini en iyi şekilde belirlemesi gerekir. Sistemin çalışma sıcaklığı birincil öneme sahip seçim kriterlerinden biridir. Gelişmiş soğutma sistemine olanak vermeyen sistemlerde çalışma sıcaklığı olan katı oksit veya eriyik karbonat yakıt pillerinin kullanımı doğru olmayacaktır. Yakıt pillerinin ulaşım için kullanıldığı düşük sıcaklıkta çalışan polimer elektrolit zar yakıt pillerini kullanımı daha doğru olacaktır. Ancak, büyük güç santrallerinde geniş alanda bir tesisiniz varsa, seçeceğiniz yakıt pili türü tabi ki birleşik ısı güç üretim sistemi olarak adlandırılan ve yüksek sıcaklık yakıt pillerinde, yan ürün olarak yaklaşık 800°C'de su buharını türbinlerden geçirmek suretiyle kaybı minimuma indiren, yaklaşık % 85 yakıt-elektrik dönüşüm oranına sahip, hibrit sistemlerin kullanımı daha uygun olacaktır. Bu durumda, çalışma esnasında düşük sıcaklıkta çalıştıkları için tepkimeyi başlatacak, hızlandırıp yavaşlatacak pahalı katalizörlere ihtiyaç duyan suyun sıvı

olduğu sıcaklıklarda (60-100°C) çalışan PEM yakıt pillerinin kullanımı akılcı olmayacaktır.

Gemi kaynaklı emisyonu karşı uluslararası kural kuruluşlarının aldığı önlemler, gemicilik sektöründe de, dizel makinelerden yakıt pillerine geçişi teşvik etmektedir. Mevcut gemi makineleri pazarında, dizel makineler en büyük paya sahip olsa ve bütün pazar gaz türbinleri ve dizel makineler arasında paylaşıyor olsa da, hem askeri hem de sivil platformlarda gemilerde yakıt pili uygulamalarını dizel uygulamalarıyla rekabet edecek seviyelere çekmek adına geniş bütçeli ciddi çalışmalar yürütülmektedir.

Günümüzde gemi inşa sektörü yeni taleplere maruz kalmaktadır. Çevresel düzenlemeler git gide sıkılaşmakta ve konfor yeni müşteriler kazanma adına gittikçe daha da önemli bir hal almaktadır. Askeri gemilerde ise gizli görevler için azami teknolojiye ulaşmak yönünde çalışmalar sürmektedir. Yakıt pilleri, gemi sahiplerine çok düşük zehirleyici emisyonu, düşük yakıt tüketimi, yüksek konfor, düşük fark edilebilirlik ve yüksek direnç ile savaş kabiliyeti gibi müşteri değerlerini sunmaktadır.

Askeri anlamda yakıt pilleri daha çok özellikle değişken yüklerde elde edilen yüksek verimleri, sessiz çalışmaları, asgari kızıltesi fark edilebilirlikleri ve bakım gereksinimlerinin düşük olması nedeniyle denizaltılarda tercih edilmektedir. Ticari gemiler için yakıt pillerinin avantajları ise, yüksek yakıt tasarrufu, azaltılmış zehirli emisyonlar, düşük işletme maliyetleri ve sessiz ve temiz sevk özellikleridir.

Bir enerji sistemini sadece termodinamik yönden incelemek ya da sadece ekonomik yönden incelemek anlamlı sonuçlar vermemektedir. Termodinamik açıdan uygun bir sistem ekonomik kriterler göz önüne alındığında tercih edilemeyeceği gibi, ekonomik bir sistem de termodinamik açıdan verimsiz çıkabilecektir. Günümüzde, mühendislerin büyük bir heyecanla ilgi duyduğu termo-ekonomi, teknik olarak mümkün sistemler içerisinde ekonomik açıdan en uygun olanı bulmak kaydıyla teknik sistemleri verimli hale getirmenin yollarını aramaktadır. Elektrokimya bazlı performans analizleri sonrası elde edilen değerlerin maliyet unsuru da katılarak incelenmesi daha gerçekçi sonuçlar doğurmaktadır.

Polimer elektrolit zar yapılı yakıt pili performansı üzerinde çalışma sıcaklığı ve çalışma basıncı büyük rol oynamaktadır. Bu iki termodinamik parametrenin performansa etkisini görmek adına geliştirilen ampirik model sonucunda, sıcaklık ve basıncın artmasının hücre potansiyeli ve dolayısıyla hücre verimi ve güç yoğunluğunda üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sıcaklığın ve basıncın artışı neticesinde hücre içerisinde gerçekleşen potansiyel kayıpları düşmekte dolayısıyla yakıt pili hücresi daha verimli bir hal almaktadır.

Buna göre, yakıt pilleri mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlarında çalışılması performansı arttıracaktır. Ancak, sıcaklığın artması neticesinde elektrolit zar yapıdaki su oranı azalacak ve zar yapı geçirgenliğini yitirecektir. Benzer şekilde, yüksek basınç altında daha kalın boru devreleri ve ilave sıkıştırma nedeniyle ilave maliyetlere maruz kalınacaktır.

Yakıt pili verimi doğrudan doğruya hücre potansiyeliyle doğru orantılıdır. Dolayısıyla güç yoğunluğu da verim üzerinde etkilidir. Güç yoğunluğunun maksimum olduğu akım yoğunluğu için hücre potansiyeli ve verimi düşük değerlere sahiptir. Buna göre, yakıt pilini kullanacağınız uygulamada istenen koşullara göre bir ideal güç yoğunluğu ve hücre verimi seçmek gerekecektir. Özellikle sabit yüklemde çalışılan uygulamalarda, yakıt pilini maksimum güç yoğunluğu değerlerinde çalıştırmak yerine verimin daha yüksek olduğu bölgede çalıştırmak önerilebilir. Ancak bu da ilave hücre gerektireceği için maliyetleri yukarı çekecektir.

Yapılan ekonomik çalışmalar neticesinde, mevcut girdi maliyetlerinde elektrik üretim maliyetlerinin kWh başına 20¢ seviyesinde olduğu görülmektedir. Oysa dizel makineler için kWh başına elektrik üretim maliyetleri 5¢ civarındadır. Bu durumda, günümüzde yakıt pillerinin güç üretim pazarında yaygınlıkla kullanılan dizel makinelerle baş edebilmesi olası gözükmemektedir. Gelecek 10 yıl içerisinde yakıt pili maliyetlerinde ve yakıt (hidrojen) maliyetlerinde hedeflenen seviyelere geri çekilme olduğu takdirde kWh başına elektrik üretim maliyetleri 5¢'nin altına inecek ve yakıt pilleri güç üretim pazarında dizel makinelerin karşısındaki en güçlü aday olması beklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **World Energy Council**, (1998), "Survey of Energy Resources"
- [2] **World Bank** (2000), "A Better World For All - Progress Towards the International Development Goals", Vol. 1
- [3] **Mæstad, O. , Evensen, A.J., Mathisen, L. ve Olsen, K.** (2000), "International Climate Policy – Consequences for Shipping", SNF Report no. 82, Foundation for Research in Economics and Business Administration, Bergen
- [4] **www.platinuminfo.net**, "European Fuel Cell Research is Lagging, Warns Industry", 11 Mart 2003,
- [5] **media.vw.com**, "Power of the Future: VolksWagen Van with Fuel Cell", 17 Eylül 2004,
- [6] **Ohi, J.** (2000), "Transportation Technology for the 21st Century: Fuel Cells", Natioanal Renewable Energy Laboratory Center for Transportation Technologies and Systems, China Study Tour Report
- [7] **Rant, Z.;** "Exergie, ein neues Wort für 'technische Arbeitsfähigkeit'", Forschungen im Ingenieurwesen, 1956, vol.22, no.1, pp.36-7
- [8] **Stambouli, A. B.; Traversa, E.** (2002) "Fuel Cells, An Alternative to Standard Sources of Energy", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 6, pp. 297–306
- [9] **Hussain, M. M., Dincer, I.; Li, X.** (2004), "Energy and Exergy Analysis of an Integrated SOFC Power System" CSME Forum, pp.1-10
- [10] **Bedringas, K. W., Ertesvag, I. S., Byggstøyl, S., and Magnussen, B. F.** (1996), "Exergy Analysis of Solid-Oxide Fuel-Cell (SOFC) Systems", Exergy, vol. 22(4), pp.403-12
- [11] **Douvartzides, S. L., Coutelieris, F.A., Tsiakaras, P.E.** (2003), "Exergy Analysis of a Solid Oxide fuel Cell Power Plant Fed by Either Ethanol or Methane", Journal of Power Sources, vol. 131, pp.224-230
- [12] **Hussain, M. M.; Baschuk, J.J.; Li, X.; Dincer, I.** (2005), " Thermodynamic Analysis of a PEM Fuel Cell Power System", International Journal of Thermal sciences, vol. 44, pp. 903-911

- [13] **Au, S.F.; McPhail, S.J.; Woudstra, N.; Hemmes, K.** (2003), "The Influence of Operating Temperature on the Efficiency of a Combined Heat and Power fuel Cell Plant", *Journal of Power Sources*, vol.122 , pp.37-46
- [14] **Standaert, F.; Hemmes, K.; Woudstra, N.** (1998), "Analytical Fuel Cell Modeling; Non-isothermal Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, vol. 70, pp. 181-189.
- [15] **Springer, T.E.; Zawodzinski, T.A.; Gottesfeld, S.** (1991), "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model", *Journal of Electrochemical Society*, vol. 138, pp. 2334-2342.
- [16] **Amphlett, J.; Baumert, R.; Mann, R.; Peppley, B.; Roberge, P. ve Harris, T.** (1995), "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell", *Journal of Electrochemical Society, Inc.*, Vol. 142(1), pp. 1 – 8.
- [17] **Pisani, L.; Murgia, G.; Valentin, M.; D'Aguanno, B.** (2002), "A New Semiempirical Approach to Performance Curves of Polymer Electrolyte Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, vol. 108, pp. 192-203.
- [18] **Maggio, G.; Recupero, V.; Pino, L.** (2001), "Modeling Polymer Electrolyte Fuel Cells: An Innovative Approach", *Journal of Power Sources*, vol. 101, pp. 275-286.
- [19] **Chan, S.H.; Goh, S.K.; Jiang, S.P.** (2003); "A Mathematical Model of Polymer Electrolyte Fuel Cell with Anode CO Kinetics", *Electrochimica. Acta*; vol. 48, pp. 1905-1919.
- [20] **Maxoulis, C.N.; Tsinoglou, D.N.; Koltsakis G.C.** (2004), "Modeling of Automotive Fuel Cell Operation in Driving Cycles", *Energy Conversion Management*, vol. 45, pp. 559-573
- [21] **Gurau, V.; Liu, H.; Kakac, S.** (1998), "Two-Dimensional Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 44, pp. 2410-2422.
- [22] **Zhou, T.; Liu, H.** (2001), "A General Three-Dimensional Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *International Journal of Transport Phenomena*, vol. 3, pp. 177-198
- [23] **Laurencelle, F.; Chahine, R.; Hamelin, J.; Agbossou, K.; Fournier, M.; Bose, T.K.; Laperriere, A.** (2001), "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack", *Fuel Cells* 2001, vol.1, pp.66-71
- [24] **Al-Baghdadi, M.A.R.S.** (2005), "Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based on Semi-Empirical Equations", *Renewable Energy*, vol. 30 (10), pp. 1587-1599

- [25] **Barbir, F. ve Gomez, T.** (1997), "Efficiency and Economics of Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22(10), pp.1027-1037
- [26] **Frangopoulos, C. A., Nakos, L. G.** (2005), "Development of a Model for Thermoeconomic Design and Operation Optimization of a PEM Fuel Cell System", *Energy*, In Press, pp. 1-19
- [27] **Kazim, A.** (1998), "Investigations on Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Different Configurations and Flow Fields", *Doktora Tezi*, University of Miami
- [28] **Kazim, A.** (2004), "Exergoeconomic Analysis of a PEM Fuel Cell at Various Operating Conditions", *Energy Conversion and Management*
- [29] **Aykut, Ahmet Şafak** (2002), "Yeşil Güç: Yakıt Pilleri", *Lisans Bitirme Çalışması, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi*
- [30] **Grove W. R.** (1839), "On Voltaic Series and the Combination of Gases by Platinum", *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 14, pp. 127-30
- [31] **Nernst W.** (1899), *Zeitung Electrochemical*, vol. 6, pp. 41-3
- [32] **Baur E.; Preis H.** (1937), "Über Brennstoff-Ketten mit Festleitern," *Zeitung Electrochemical*, vol. 4, pp.727-32
- [33] **Beziau J. J.** (1998), "Report from the Centre d'energetique de L'Ecole des Mines de Paris", p.1-44
- [34] **Linden, D.**, *Handbook of Batteries and Fuel Cells*, McGraw-Hill, New York
- [35] **Stambouli, B.A., Traversa, E.** (2002), "Fuel cells, an alternative to standard sources of energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.6, pp:297-306
- [36] **King, J.M., Ishikawa, N.** (1996), "Phosphoric Acid Fuel Cell Power Plant Improvements and Commercial Fleet Experience", *Fuel Cell Seminar*
- [37] **Department of Energy**, "Fuel Cell Handbook", EG&G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation, , 6th Edition
- [38] **Schmidt, M.** (2000), "Discovering the Principle of the Fuel Cell at Home or in Scholl", *FuelCellKit 2000*, www.usfcc.com/fuel-cell-science-project.pdf
- [39] **Thomas, S., Zalbowitz, M.** (1999), "Fuel Cells-Green Power", *Los Alamos National Laboratory*, New Mexico

- [40] **Larminie, J., Dicks, A.** (2000), "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, Chichester
- [41] **Bellis, M.** (2002) "Hydrogen Fuel Cells: Innovation For The 21st Century", inventors.about.com/od/fstartinventions/a/Fuel_Cells.htm
- [42] **Warshay M., Prokopius, P. R.** (1990) "The Fuel Cell in Space: Yesterday, Today and Tomorrow", *Journal of Power Sources*, Vol. 29, No.1 ve 2, pp. 193-200
- [43] **Lee, S.C.** (2003), "DuPont & Sustainable Growth: Fuel Cells Strategy - A Path To Fuel Cell Economy", www.cleanair.org/Energy/Sung_Lee.pdf
- [44] **Payne, J.** (2003), "Nafion® - Perfluorosulfonate Ionomer", www.psre.usm.edu/mauritz/nafion.html
- [45] **Wilkinson, D., Steck, A.** (1997) "General Progress in the Research of Solid Polymer Fuel Cell Technology at Ballard", 2nd International Symposium on New Materials for Fuel Cells & Batteries, Montreal, PQ.
- [46] **Appleby, A. J., Foulkes, F. R.** (1989), "Fuel Cell Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York
- [47] **Report of the DOE Advanced Fuel-Cell Commercialization Working Group**, Edited by S.S. Penner, DOE/ER/0643, prepared by the DOE Advanced Fuel Cell Working Group (AFC2WG) or the United States Department of Energy, Under contract No. DEFG03-93ER30213, Mart 1995.
- [48] **Piwetz M.M., Larsen, J.S., Christensen, T.S.** (1996) "Hydrodesulfurization and Pre-reforming of Logistic Fuels for Use in Fuel Cell Applications," *Fuel Cell Seminar Program and Abstracts*, Courtesy Associates, Inc.
- [49] **Bacon, F.T.** (1969), "Electrochim.", *Acta*, 14, pp.569-585
- [50] **Tseung, A.C.C.** (2002), "Fuel Cells--Past, Present and Future", Seminar Program, University of Greenwich School of Chemical & Life Sciences London United Kingdom
- [51] **Blomen, L., Mugerwo, M.** (1993), "Fuel Cell Systems", Plenum Press, New York
- [52] **Williams, G.J., Siddle, A., Pointon, K.** (2001), "Design Optimization of a Hybrid Solid Oxide Fuel Cell & Gas Turbine Power Generation System", Alstom Power Technology Centre, DTI Sustainable Energy Programmes

- [53] **Blum, L.** (2001), "SOFC – Status Planning", Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany
- [54] **Entec UK**, (2002) "Quantification of Emissions from Ships Associated with Ship Movements Between Ports in the European Community", europa.eu.int/comm/environment/air/background.htm#transport.
- [55] **Adamson, K.A.** (2005), "Fuel Cells and Marine Applications", Fuel Cell Today, www.fuelcelltoday.com
- [56] **Man B&W Report** (Aralık 1999), "Trends in the Volume and Nature of Propulsion Machinery Demand – the Low Speed Sector"
- [57] **Bourne, C., Nietsch, T., Griffiths, D. ve Morley, J.** (2001), "Application of Fuel Cells in Surface Ships", Rolls-Royce Strategic Systems Engineering
- [58] **Satzberg, S. R.** (1999), "Naval Fuel Cell Programs", Joint Fuel Cell Technology Review, www.netl.doe.gov
- [59] **www.dieselnets.com**, (13 Temmuz 2005), "Marine Diesel Engines"
- [60] **Bolind, A.M.** (2000), "An Evaluation of Fuel Cells for Commercial Ship Applications", Technical and Research Report 55, The Society of Naval Architects and Marine Engineers
- [61] **Karni, Z., Willigan, R., Artze, C., Badal, M., Gordon, W., Haider, J., Levesque, R. ve Forsyth, W.** (2000), "Comparative Life Cycle Costs of Fuel Cells and Other Propulsion Systems", US Coast Guard Research & Development Center, Report CG-D-19-00
- [62] **Allen, S., Ashey, E., Gore, D. ve Cervi, M.** (Ocak 1998), "Marine Applications of Fuel Cells", Naval Engineers Journal
- [63] **Thomas, C.E., Reardon, J.P., Lomax, F.D., Pinyan, J. ve Kuhn, I.F.** (2001), "Distributed Hydrogen Fuel Systems Analysis", Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Power Review
- [64] **Wergeland, T. ve Wijnolst, N.** (1996), "Shipping", Delft University Press.
- [65] **Kickulies, M., Krummrich, S., Sattler, G.** (2004), "Maritime Fuel Cell Applications", HDW - Fuel Cell Systems GmbH
- [66] **www.ch2bc.org/index16.htm**, (25 Temmuz 2005), "Hydrogen Ships & Subs - Is The Real Secret of Fuel Cell Breakthroughs and the Key to the Advent of the Hydrogen Economy Hidden in Top Secret Military Research?"
- [67] **Sattler, G.** (2000), "Fuel Cells Going On Board", Journal of Power Resources, vol.86, pp.61-67

- [68] **Department of Energy**, Fuel Cell Handbook, EG&G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation, 6th Edition
- [69] **Atkins, P.W.** (1998), "Physical Chemistry", 6th edition, Oxford University Press, Oxford
- [70] **Møller-Holst, S.** (1996), "Solid Polymer Fuel Cells, Electrode and Membrane Performance Studies", Doktora Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim
- [72] **Noponen, M.** (2000), "Experimental Studies and Simulations on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based Energy Storage Systems", Doktora Tezi, Helsinki University Of Technology, Espoo
- [73] **Amphlett, J.; Baumert, R.; Mann, R.; Peppley, B.; Roberge, P. ve Harris, T.** (1994), "Parametric Modelling of the Performance of a 5-kW Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Stack", Journal of Power Sources, Vol. 49(1-3), pp. 349-356
- [74] **Vanhanen J.** (1996), "On Performance Improvements of Small-Scale Photovoltaic-Hydrogen Energy Systems", Doktora Tezi, Helsinki University Of Technology, Espoo
- [75] **Mann, R.F.; Amphlett, J.C.; Hooper, M.A.; Jensen, H. M.; Peppley, B.A. and Roberge, P.R.** (2000), "Development and Application of a Generalised Steady-State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell", Journal of Power Sources, vol. 86(1-2), pp. 173-80
- [77] **Ay, M.; Midilli, A. ve Dinçer, İ.** (2005), "Exergetic Performance Analysis of a PEM Fuel Cell", International Journal of Energy Research, www.interscience.wiley.com
- [78] **Rowe, A.; Li, X.** (2001), "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", Journal of Power Sources, vol. 102, pp.82-96
- [79] **Berning, T.; Djilali, N.** (2003), "Three-dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell – A Parametric Study", Journal of Power Sources, vol. 124(2), pp. 440-52
- [80] **Fowler, M.W., Mann, R.F.; Amphlett, J.C.; Peppley, B.A. ve Roberge, P.R.** (2002), "Incorporation of Voltage Degradation Into a Generalised Steady State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell", Energy Conversion Management, vol.106(1-2), pp. 274-83
- [82] **Hamelin, J.; Agbossou, K.; Laperriere, A. ve Bose, T.K.** (2001), "Dynamic Behaviour of a PEM Fuel Cell Stack for Stationary Applications", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26(6), pp.615-23

- [83] **Cacciola, G.; Antonucci, V.; Freni, S.** (2001), "Technology Up Date and New Strategies on Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, vol. 100(1-2), pp. 67-79
- [84] **Weinert, J.; Lipman, T.; Unnasch, S.** (2004), "Bridging the Gap Between Transportation and Stationary Power: Hydrogen Energy Stations and their Implications for the Transportation Sector", *Transportation Research Board 2005 Annual Conference Proceedings*, Washington D.C.
- [85] **Rothwell, G.** (2005), "Can the Modular Helium Reactor Compete in the Hydrogen Economy", *Stanford Institute for Economic Policy Research*, No. 05-001

T	303.15 K	0.0178 cm	X _{ind,a}	0.01396																			
P _{sat}	0.042437 bar <td>232 cm³<th>X_{ind,s}</th><td>0.01396<th colspan="10"></th></td></td>	232 cm ³ <th>X_{ind,s}</th> <td>0.01396<th colspan="10"></th></td>	X _{ind,s}	0.01396 <th colspan="10"></th>																			
X _a	0 <td>1.5<th>X_{az}</th><td>0.896036<th colspan="10"></th></td></td>	1.5 <th>X_{az}</th> <td>0.896036<th colspan="10"></th></td>	X _{az}	0.896036 <th colspan="10"></th>																			
P _a	3.76 <td>3<th>X_{oz}</th><td>0.172359<th colspan="10" rowspan="3"></th></td></td>	3 <th>X_{oz}</th> <td>0.172359<th colspan="10" rowspan="3"></th></td>	X _{oz}	0.172359 <th colspan="10" rowspan="3"></th>																			
P _a	3 atm <th colspan="12"></th>																						
S _a	0.003349 <th colspan="13"></th>																						
I	P _{sat}	C _{ind}	P _{oz}	C _{oz}	τ _{ind}	g _{ind}	m	n	U _{ind}	U _{unk}	U _{sat}	E	V _{sat}	η	P [*]								
0.00	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.616443	0.0010469192	0.0084	0.0065	-0.296529	0	-2.98922E-05	0.00095692	1.234632	0.833085623	0								
0.02	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61541145	0.0010446791	0.0084	0.0065	-0.307714	-4.78932E-05	-0.00095692	1.234632	1.234632	0.833085623	0.01934252								
0.04	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61544012	0.0010446791	0.0084	0.0065	-0.307714	-4.78932E-05	-0.00108942	1.234632	1.234632	0.833085623	0.03703141								
0.06	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61578879	0.0010446656	0.0084	0.0065	-0.31805	-8.25793E-05	-0.00124096	1.234632	1.234632	0.833085623	0.05409141								
0.08	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61603748	0.0010446791	0.0084	0.0065	-0.348899	-8.35743E-05	-0.00141729	1.234632	1.234632	0.833085623	0.07073896								
0.1	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61633618	0.001044702	0.0084	0.0065	-0.362157	-0.00010447	-0.00160905	1.234632	1.234632	0.833085623	0.087077613								
0.15	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61706298	0.001044759	0.0084	0.0065	-0.386249	-0.000156714	-0.00222698	1.234632	1.234632	0.833085623	0.12689992								
0.2	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61782986	0.001044816	0.0084	0.0065	-0.403342	-0.000208963	-0.00308221	1.234632	1.234632	0.833085623	0.16559973								
0.25	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61857682	0.001044874	0.0084	0.0065	-0.419601	-0.000261218	-0.00425657	1.234632	1.234632	0.833085623	0.20337603								
0.3	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.61932385	0.001044931	0.0084	0.0065	-0.427434	-0.000313479	-0.0059041	1.234632	1.234632	0.833085623	0.240294171								
0.35	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62007096	0.001044988	0.0084	0.0065	-0.439593	-0.000365746	-0.00817145	1.234632	1.234632	0.833085623	0.27632356								
0.4	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62081815	0.001045046	0.0084	0.0065	-0.444527	-0.000418018	-0.01139954	1.234632	1.234632	0.833085623	0.311359907								
0.45	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62156534	0.001045103	0.0084	0.0065	-0.457786	-0.000470287	-0.0166815	1.234632	1.234632	0.833085623	0.345142538								
0.5	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62231271	0.00104516	0.0084	0.0065	-0.47786	-0.00052529	-0.0216615	1.234632	1.234632	0.833085623	0.378043357								
0.55	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62306018	0.001045218	0.0084	0.0065	-0.463449	-0.00057487	-0.02698348	1.234632	1.234632	0.833085623	0.41074333								
0.6	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62380768	0.001045275	0.0084	0.0065	-0.468619	-0.000627165	-0.0344806	1.234632	1.234632	0.833085623	0.44332752								
0.65	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62455527	0.001045332	0.0084	0.0065	-0.473375	-0.000679468	-0.05743458	1.234632	1.234632	0.833085623	0.47603057								
0.7	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62530293	0.00104539	0.0084	0.0065	-0.477778	-0.000731773	-0.07949122	1.234632	1.234632	0.833085623	0.50873362								
0.75	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62590668	0.001045447	0.0084	0.0065	-0.481877	-0.000784085	-0.11001829	1.234632	1.234632	0.833085623	0.541436164								
0.8	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.6267965	0.001045504	0.0084	0.0065	-0.485972	-0.000836807	-0.15228668	1.234632	1.234632	0.833085623	0.574138699								
0.85	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62754641	0.001045562	0.0084	0.0065	-0.489314	-0.000889427	-0.21074452	1.234632	1.234632	0.833085623	0.60684119								
0.9	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62829439	0.001045619	0.0084	0.0065	-0.492711	-0.000941957	-0.29167688	1.234632	1.234632	0.833085623	0.639543717								
0.95	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62904246	0.001045677	0.0084	0.0065	-0.495923	-0.000993393	-0.40369974	1.234632	1.234632	0.833085623	0.67224624								
1.0	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.62979051	0.001045734	0.0084	0.0065	-0.498971	-0.01045734	-0.55871897	1.234632	1.234632	0.833085623	0.70494975								
1.05	2.958107	2.1E-06	0.518966	5.28E-07	13.63053865	0.001045791	0.0084	0.0065	-0.50167	-0.01096561	-0.77329418	1.234632	1.234632	0.833085623	0.73765228								

Table A.1: P_a = 3 atm; T = 30°C İçin Termodinamik Performans Hesap Tablosu

T	318.15 K	I	0.0178 cm	X _{HOAc}	0.03118	n	0.00872	U _{act}	0	U _{unk}	0	U _{ref}	E	1.22009	V _{ref}	1.22001	η	0.824667302	P ^r
T	318.15 K	I	0.0178 cm	X _{HOAc}	0.03118	n	0.00872	U _{act}	0	U _{unk}	0	U _{ref}	E	1.22009	V _{ref}	1.22001	η	0.824667302	P ^r
P _{tot}	0.054766 bar	A	232 cm ²	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
X ₁	0	α	1.5	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
X ₂	0	α	1.5	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
X ₃	3.76	α	3	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
P ₁	3 atm	β	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
P ₂	3 atm	β	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₁	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₂	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₃	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₄	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₅	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₆	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₇	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₈	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₉	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.235366	-5.54408E-05	-6.667E-05	1.22009	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.98555	0.019731009
ξ ₁₀	0.003949	P ₂	3 atm	X _{HOAc}	0.03118	m	0.00056	0.00872	-0.23536										

T	P _{at}	I	A	0.0178 cm	X _{iso}	R ^{int}	m	n	i	I _{best}	0	V _{bank}	0	V _{bank}	E	V _{best}	π	P
348.45 K	0.379966 bar	1	X _{iso}	232 cm2	X _{iso}	0.01792549	0.00002	0.00872	0.0	0.0	0.0	-3.58518E-05	-0.2811E-05	1.19516	1.19516	0.806540795	0	
0	X _a	2.5	X _{iso}	232 cm2	X _{iso}	0.01792588	0.00002	0.00872	0.02	0.4	0.222472	-7.17051E-05	-2.8347E-05	1.19516	1.02013	0.888343777	0.020420508	
1.5	X _a	3	X _{iso}	232 cm2	X _{iso}	0.01792628	0.00002	0.00872	0.034	0.0	-0.222472	-7.17051E-05	-2.8347E-05	1.19516	0.97279	0.856940140	0.038911458	
3	X _a	3	X _{iso}	232 cm2	X _{iso}	0.01792667	0.00002	0.00872	0.06	0.249494	-0.00010756	-3.748E-05	-0.00010756	-3.748E-05	1.19516	0.94508	0.856704639	0.056704033
3 atm	P _a	3	X _{iso}	232 cm2	X _{iso}	0.01792706	0.00002	0.00872	0.08	0.249494	-0.00012927	-0.7834E-05	-0.00012927	-0.7834E-05	1.19516	0.92540	0.824249384	0.074032348
0.003949	P _a	3 atm	P _a	232 cm2	X _{iso}	0.01792745	0.00002	0.00872	0.1	0.284799	-0.000143417	-4.7794E-05	-0.000143417	-4.7794E-05	1.19516	0.91013	0.814125573	0.091013417
						0.01792784	0.00002	0.00872	0.15	0.312467	-0.00023558	-7.3973E-05	-0.00023558	-7.3973E-05	1.19516	0.88235	0.858231561	0.123245563
						0.01792842	0.00002	0.00872	0.2	0.332097	-0.00034826	-0.00017693	-0.00034826	-0.00017693	1.19516	0.86729	0.850204301	0.172581931
						0.01793041	0.00002	0.00872	0.25	0.337424	-0.00044826	-0.000202736	-0.00044826	-0.000202736	1.19516	0.84521	0.856314656	0.25037496
						0.01793139	0.00002	0.00872	0.35	0.359765	-0.000637942	-0.000242315	-0.000637942	-0.000242315	1.19516	0.82363	0.855887405	0.288338799
						0.01793237	0.00002	0.00872	0.35	0.375936	-0.000677534	-0.00065441	-0.000677534	-0.00065441	1.19516	0.81539	0.845822497	0.327576936
						0.01793434	0.00002	0.00872	0.45	0.387433	-0.000807045	-0.00156514	-0.000807045	-0.00156514	1.19516	0.80901	0.834971242	0.362658502
						0.01793634	0.00002	0.00872	0.45	0.394623	-0.000868766	-0.002042051	-0.000868766	-0.002042051	1.19516	0.79603	0.838482652	0.399037772
						0.017939331	0.00002	0.00872	0.55	0.401126	-0.000986457	-0.00242051	-0.000986457	-0.00242051	1.19516	0.78068	0.833486252	0.434846464
						0.017937329	0.00002	0.00872	0.55	0.407064	-0.001167528	-0.00374334	-0.001167528	-0.00374334	1.19516	0.76328	0.825832738	0.469696976
						0.017939326	0.00002	0.00872	0.6	0.412526	-0.00116588	-0.0057819	-0.00116588	-0.0057819	1.19516	0.75758	0.825202073	0.504191483
						0.017939326	0.00002	0.00872	0.7	0.417583	-0.001255748	-0.0084529	-0.001255748	-0.0084529	1.19516	0.76737	0.817926564	0.5371581
						0.01794025	0.00002	0.00872	0.75	0.422291	-0.001345519	-0.0138457	-0.001345519	-0.0138457	1.19516	0.75768	0.815253855	0.568296866
						0.01794123	0.00002	0.00872	0.85	0.430361	-0.001435299	-0.02141255	-0.001435299	-0.02141255	1.19516	0.74562	0.802357646	0.596454143
						0.01794223	0.00002	0.00872	0.85	0.434342	-0.001614888	-0.03311216	-0.001614888	-0.03311216	1.19516	0.72959	0.450215842	0.620235564
						0.0179432	0.00002	0.00872	0.95	0.437322	-0.001704688	-0.07920064	-0.001704688	-0.07920064	1.19516	0.70760	0.477463743	0.63684114
						0.01794419	0.00002	0.00872	0.95	0.441921	-0.001794517	-0.12248358	-0.001794517	-0.12248358	1.19516	0.67583	0.445028944	0.642044447
						0.01794516	0.00002	0.00872	1.05	0.445251	-0.001884347	-0.18842194	-0.001884347	-0.18842194	1.19516	0.62896	0.4250296924	0.628960688
						0.01794617	0.00002	0.00872	1.1	0.448425	-0.001974186	-0.259294269	-0.001974186	-0.259294269	1.19516	0.55860	0.376952529	0.596653335
						0.01794714	0.00002	0.00872	1.15	0.451458	-0.002064035	-0.45303845	-0.002064035	-0.45303845	1.19516	0.45162	0.304875079	0.497000011
						0.01794813	0.00002	0.00872	1.2	0.454362	-0.002153894	-0.70062794	-0.002153894	-0.70062794	1.19516	0.28860	0.194736379	0.371880012
						0.01794911	0.00002	0.00872	1.2	0.454362	-0.002153894	-0.70062794	-0.002153894	-0.70062794	1.19516	0.38002	0.025651688	0.045618661
						0.01795011	0.00002	0.00872	1.25	0.457148	-0.002243762	-1.08352728	-0.002243762	-1.08352728	1.19516			

EK-B

T	348.15 K	A	0.0178 cm	X _{NO2}	0.37509		
P _{sat}	0.379956 bar	I	232 cm ²	X _{NO2}	0.37509		
X _{NO2}	0	E _{NO2}	1.5	X _{NO2}	0.6249102		
X _{NO}	3.76	ζ _{NO2}	3	X _{NO}	0.1096334		
P _c	1 atm	ζ _c	1 atm	X _{NO}			
ζ _c	0.003949						
i	P _{NO2}	C _{NO2}	P _{O2}	C _{O2}	T _{NO2}	R ^{int}	m
0.0	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.363564	0.001762549	0.00002
0.02	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36407394	0.001762588	0.00002
0.04	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36458645	0.001762628	0.00002
0.06	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36509899	0.001762667	0.00002
0.08	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36561155	0.001762706	0.00002
0.1	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36612413	0.001762746	0.00002
0.15	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36740568	0.001762844	0.00002
0.2	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36868735	0.001762942	0.00002
0.25	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.36996910	0.001763040	0.00002
0.3	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37125110	0.001763138	0.00002
0.35	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37372513	0.001763236	0.00002
0.4	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37631854	0.001763334	0.00002
0.45	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37891854	0.001763432	0.00002
0.5	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37909776	0.001763531	0.00002
0.55	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37638025	0.001763629	0.00002
0.6	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.37662888	0.001763728	0.00002
0.65	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38022957	0.001763826	0.00002
0.7	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38151163	0.001763925	0.00002
0.75	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38279483	0.001764023	0.00002
0.8	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38407817	0.001764121	0.00002
0.85	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38536166	0.001764219	0.00002
0.9	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38664529	0.001764317	0.00002
0.95	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38792906	0.001764415	0.00002
1	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.38921289	0.001764513	0.00002
1.05	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.39049705	0.001764611	0.00002
1.1	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.39178127	0.001764710	0.00002
1.15	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.39306563	0.001764807	0.00002
1.2	0.62491	4.60E-07	0.109633	9.02E-08	23.39435014	0.001764911	0.00002

Table B.1: P = 1 atm; T = 75°C [in Termodinamik Performans Hesap Tablosu]

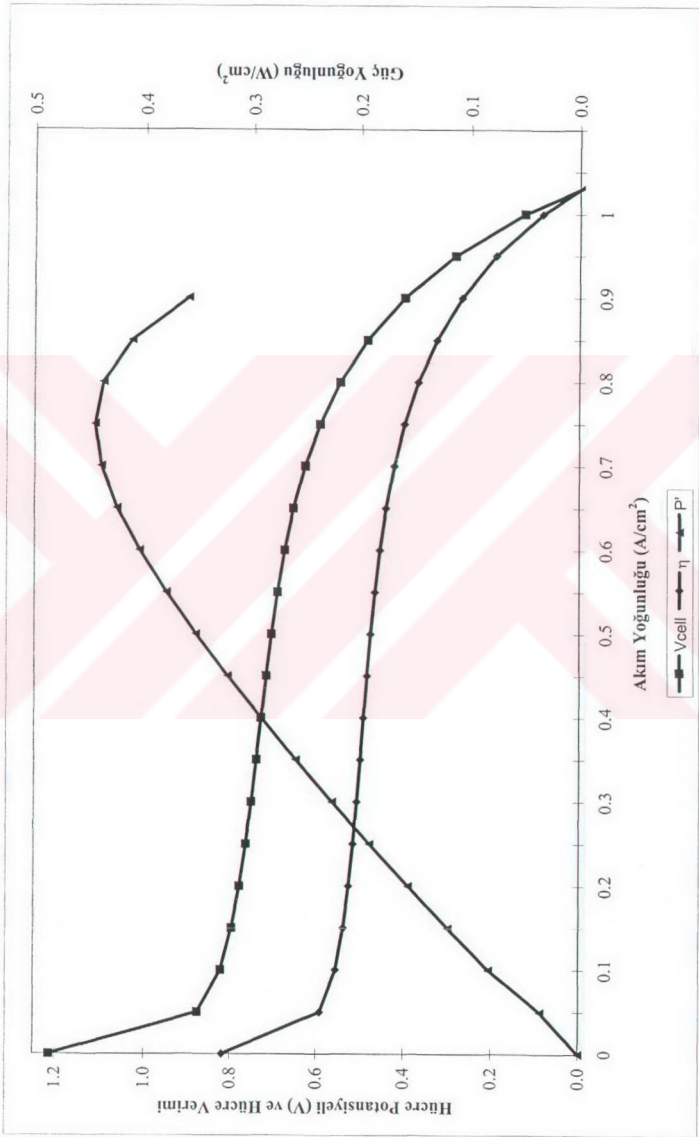
Tablo B.2: P= 5 atm; T= 75°C için Termodinamik Performans Hesap Tablosu

[illegible]

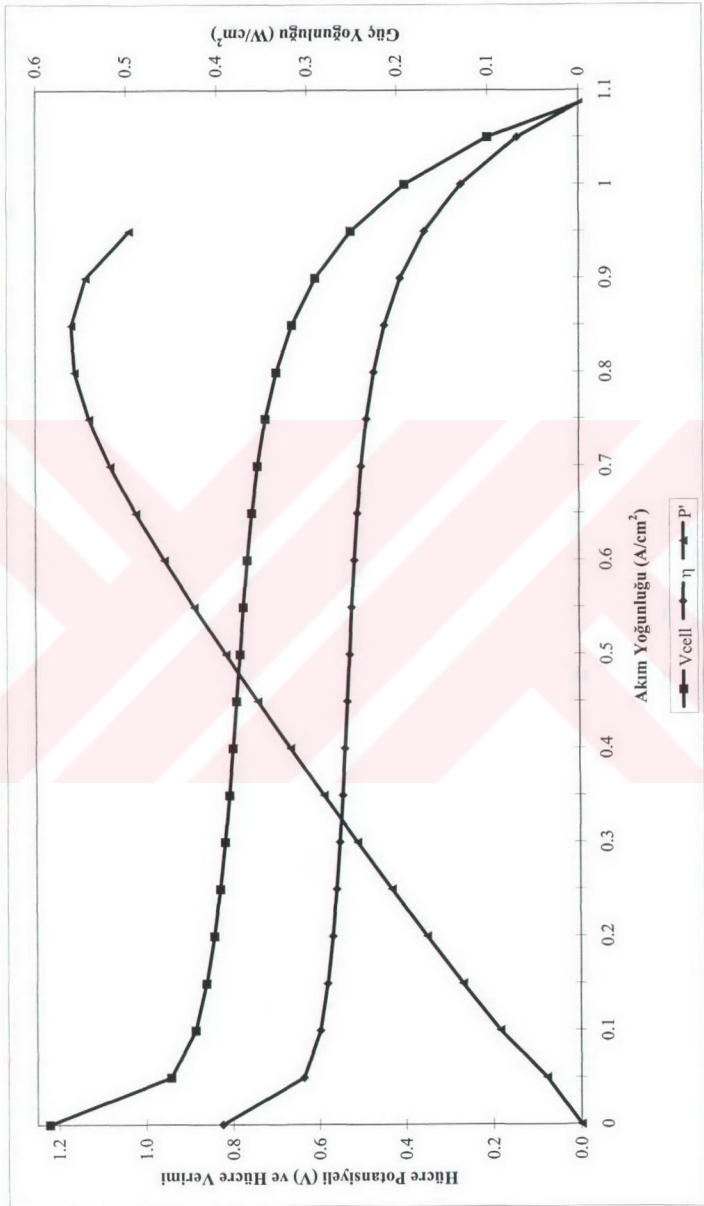
T	348.15 K	I	0.0178 cm	X _{H2O,a}	0.01875
P _{sat}	0.379966 bar	A	232 cm2	X _{H2O,c}	0.01875
X _s	0	ξ _a	1.5	X _{H2}	0.9812455
X _c	3.76	ξ _c	3	X _{O2}	0.1721483
P _s	20 atm	P _c	20 atm		
ξ _s	0.003949				

i	P _{sat}	C _{sat}	P _{sat}	C _{sat}	E _a	R ^{sat}	m	n	U _{sat}	U _{max}	U _{surf}	E	V _{sat}	η	P [*]
0.0	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.363564	1.792549307	0.00002	0.00872	0	-3.58518E-05	-2.3811E-05	0	1.21042	0.836993691	0
0.02	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36407304	0.001792958	0.00002	0.00872	-0.120344	-7.17051E-05	-2.8471E-05	0	1.21002	0.755749475	0.022400414
0.04	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36458945	0.001792628	0.00002	0.00872	-0.167643	-0.00017656	-3.3748E-05	1.2404247	1.07268	0.723806953	0.0428007271
0.06	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36509699	0.001792667	0.00002	0.00872	-0.198311	-0.00014341	-4.0179E-05	1.2404247	1.04497	0.705109737	0.0626963558
0.08	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36561155	0.001792706	0.00002	0.00872	-0.216841	-0.000176275	-4.8179E-05	1.2404247	1.02530	0.68155133	0.0820233973
0.1	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36612413	0.001792746	0.00002	0.00872	-0.23168	-0.000268927	-5.7397E-05	1.2404247	1.01003	0.661531321	0.1014002942
0.15	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36740568	0.001792844	0.00002	0.00872	-0.257836	-0.00035658	-7.00017683	1.2404247	0.96225	0.62276339	0.147336861
0.2	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36868716	0.001793041	0.00002	0.00872	-0.277407	-0.00044626	-8.00027362	1.2404247	0.92372	0.604900049	0.192496995
0.25	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.36996916	0.001793139	0.00002	0.00872	-0.292693	-0.000537942	-9.000605441	1.2404247	0.94711	0.639072903	0.236776511
0.3	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.3712511	0.001793237	0.00002	0.00872	-0.305135	-0.000627633	-0.001071205	1.2404247	0.93448	0.630552308	0.280343556
0.4	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.37253318	0.001793336	0.00002	0.00872	-0.315653	-0.000717334	-0.00156514	1.2404247	0.92372	0.622393153	0.323302159
0.45	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.3738154	0.001793434	0.00002	0.00872	-0.324765	-0.000807045	-0.002042051	1.2404247	0.91429	0.616928246	0.365715064
0.5	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.37509776	0.001793533	0.00002	0.00872	-0.332602	-0.000896766	-0.002542051	1.2404247	0.90580	0.612033712	0.407611395
0.55	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.37638025	0.001793631	0.00002	0.00872	-0.340496	-0.000986497	-0.003042051	1.2404247	0.89797	0.606591891	0.4449895379
0.6	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.37894566	0.001793729	0.00002	0.00872	-0.348496	-0.001076238	-0.00354334	1.2404247	0.89052	0.600892001	0.48978707
0.65	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.3822857	0.001793828	0.00002	0.00872	-0.357895	-0.001165968	-0.004042051	1.2404247	0.88317	0.595932487	0.5299903768
0.7	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.38151163	0.001794025	0.00002	0.00872	-0.367895	-0.00125748	-0.004542051	1.2404247	0.87557	0.590806021	0.569712344
0.75	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.38279483	0.001794123	0.00002	0.00872	-0.376766	-0.001345319	-0.005042051	1.2404247	0.86726	0.585198403	0.607008423
0.8	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.38407817	0.001794222	0.00002	0.00872	-0.376204	-0.001435299	-0.005542051	1.2404247	0.85757	0.579659604	0.64318015
0.85	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.38636166	0.001794322	0.00002	0.00872	-0.380101	-0.001525088	-0.006042051	1.2404247	0.84551	0.5750521991	0.676410398
0.9	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.38864529	0.001794419	0.00002	0.00872	-0.382979	-0.001614888	-0.006542051	1.2404247	0.82958	0.559773412	0.705146567
0.95	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.38929006	0.001794517	0.00002	0.00872	-0.38379	-0.001704698	-0.007042051	1.2404247	0.80750	0.544869491	0.728746528
1	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.39049705	0.001794616	0.00002	0.00872	-0.387291	-0.001794517	-0.007542051	1.2404247	0.77573	0.523434193	0.739643007
1.05	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.39294705	0.001794717	0.00002	0.00872	-0.39062	-0.001884347	-0.008042051	1.2404247	0.72886	0.49180673	0.728856007
1.1	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.39178127	0.001794816	0.00002	0.00872	-0.393794	-0.001974186	-0.008542051	1.2404247	0.68500	0.444330078	0.691423435
1.15	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.39360563	0.001794913	0.00002	0.00872	-0.396828	-0.002064035	-0.009042051	1.2404247	0.55171	0.372276323	0.60684862
1.2	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.39435014	0.001794911	0.00002	0.00872	-0.399732	-0.002153984	-0.009542051	1.2404247	0.38849	0.262142127	0.444676828
1.25	19.62491	1.4E-05	3.442967	2.93E-06	23.3956348	0.00179501	0.00002	0.00872	-0.402517	-0.002243762	-0.009542051	1.2404247	0.13791	0.093057436	0.165493345

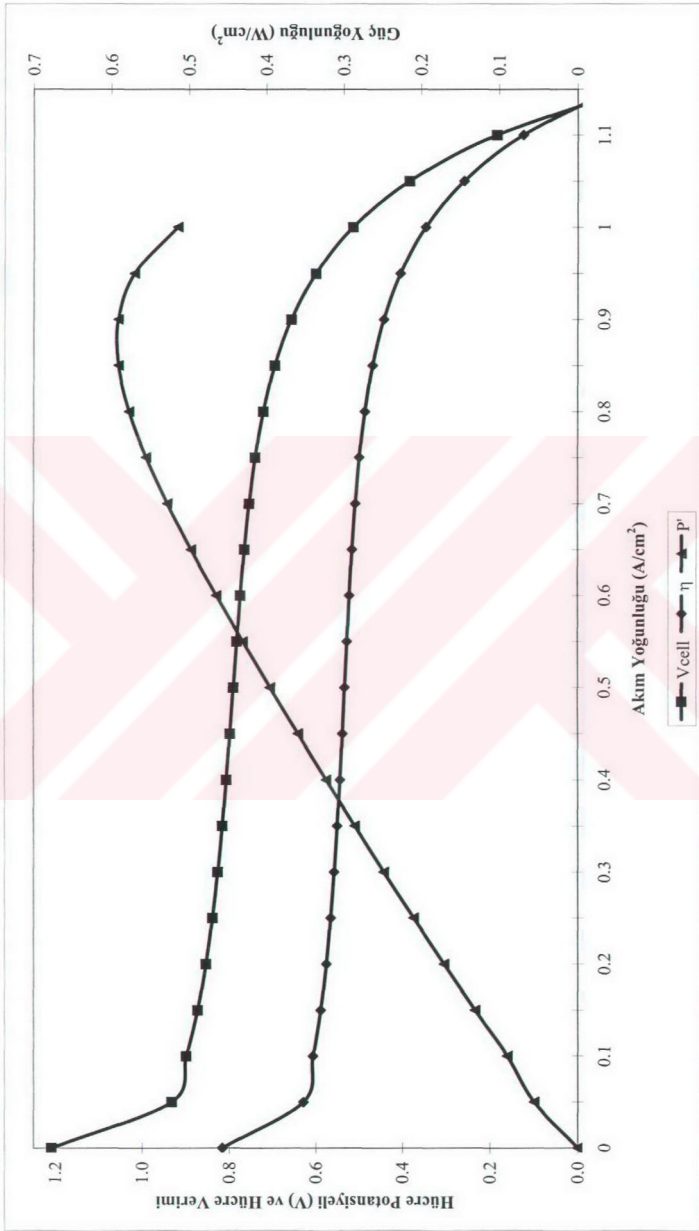
Tablo B.5. P= 20 atm; T= 75°C için Termodinamik Performans Hesap Tablosu



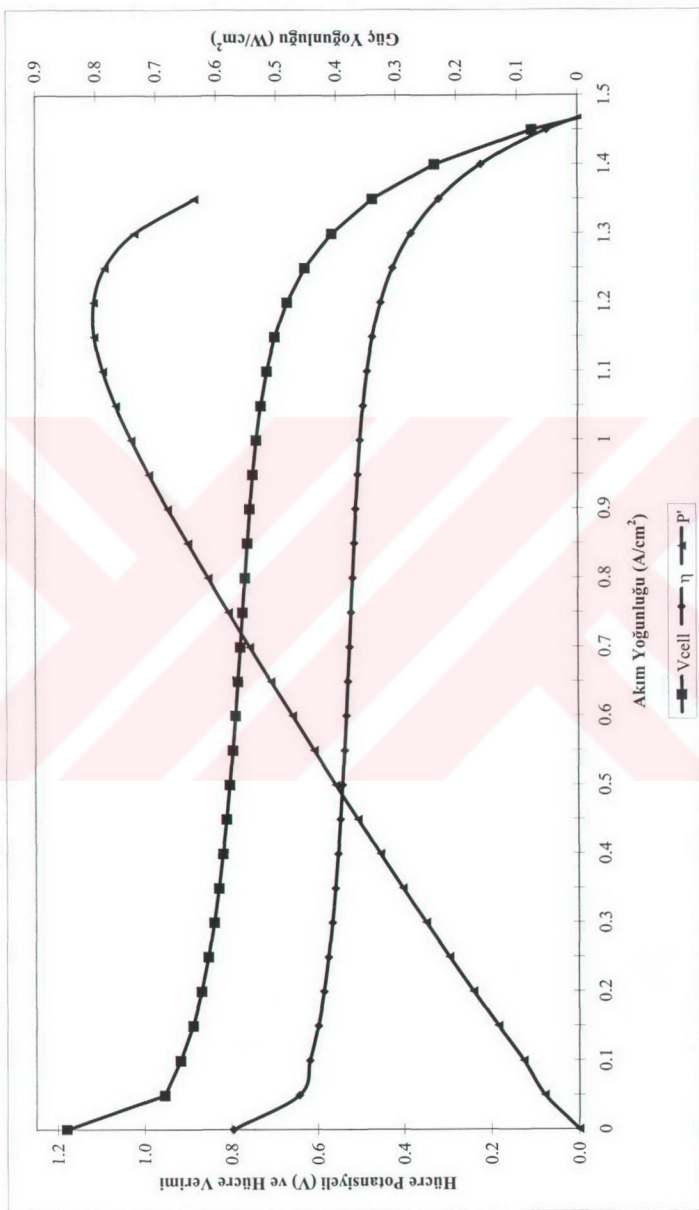
Şekil C.1: $T = 30^\circ\text{C}$ ve $P = 3$ atm için Hücre Potansiyeli, Hücre Verimi ve Güç Yoğunluğu Eğrileri



Şekil C.2: $T = 45^{\circ}\text{C}$ ve $P = 3 \text{ atm}$ için Hücre Potansiyeli, Hücre Verimi ve Güç Yoğunluğu Eğrileri



Şekil C.3: $T = 60^\circ C$ ve $P = 3$ atm için Hücre Potansiyeli, Hücre Verimi ve Güç Yoğunluğu Eğrileri



Şekil C.4: $T = 90^\circ\text{C}$ ve $P = 3 \text{ atm}$ için Hücre Potansiyeli, Hücre Verimi ve Güç Yoğunluğu Eğrileri

EK-D

CF	0.9	C_{cell}	500 \$/hücre
d	0.16	C_{stack}	1000 \$/yığın
L	5 sene	C_f	20 \$/GJ
CRF	0.305409	V_{ort}	0.675834 V
AEP	39420 kWh/sene		
P_{fc}	5 kW		

P'	η	N_{cell}	C_{FC}	ACC	AFC	C_{el}
0.307882	0.55248	70	36000	10994.74	1728.84	0.32277
0.310853	0.551979	69	35500	10842.03	1728.84	0.318896
0.318315	0.550737	68	35000	10689.33	1728.84	0.315022
0.325757	0.549522	66	34000	10383.92	1728.84	0.307274
0.362659	0.543797	59	30500	9314.986	1728.84	0.280158
0.399038	0.538512	54	28000	8551.463	1728.84	0.260789
0.434845	0.533486	50	26000	7940.644	1728.84	0.245294
0.469966	0.528527	46	24000	7329.825	1728.84	0.229799
0.504191	0.5234	43	22500	6871.711	1728.84	0.218177
0.537158	0.517793	40	21000	6413.597	1728.84	0.206556
0.568259	0.511254	38	20000	6108.188	1728.84	0.198808
0.596494	0.503116	36	19000	5802.778	1728.84	0.191061
0.620236	0.492368	35	18500	5650.074	1728.84	0.187187
0.636841	0.477464	34	18000	5497.369	1728.84	0.183313
0.642042	0.456028	34	18000	5497.369	1728.84	0.183313

CF	0.5	C_{cell}	500 \$/hücre
d	0.16	C_{stack}	1000 \$/yığın
L	5 sene	C_f	20 \$/GJ
CRF	0.305409	V_{ort}	0.81654 V
AEP	39420 kWh/sene		
P_{fc}	5 kW		

P'	η	N_{cell}	C_{FC}	ACC	AFC	C_{el}
0.307882	0.55248	70	36000	10994.74	1728.84	0.32277
0.310853	0.551979	69	35500	10842.03	1728.84	0.318896
0.318315	0.550737	68	35000	10689.33	1728.84	0.315022
0.325757	0.549522	66	34000	10383.92	1728.84	0.307274
0.362659	0.543797	59	30500	9314.986	1728.84	0.280158
0.399038	0.538512	54	28000	8551.463	1728.84	0.260789
0.434845	0.533486	50	26000	7940.644	1728.84	0.245294
0.469966	0.528527	46	24000	7329.825	1728.84	0.229799
0.504191	0.5234	43	22500	6871.711	1728.84	0.218177
0.537158	0.517793	40	21000	6413.597	1728.84	0.206556
0.568259	0.511254	38	20000	6108.188	1728.84	0.198808
0.596494	0.503116	36	19000	5802.778	1728.84	0.191061
0.620236	0.492368	35	18500	5650.074	1728.84	0.187187
0.636841	0.477464	34	18000	5497.369	1728.84	0.183313
0.642042	0.456028	34	18000	5497.369	1728.84	0.183313

CF	0.2	C_{cell}	500 \$/hücre
d	0.16	C_{stack}	1000 \$/yığın
L	5 sene	C_f	20 \$/GJ
CRF	0.305409	V_{ort}	0.631391 V
AEP	39420 kWh/sene		
P_{fc}	5 kW		

P'	η	N_{cell}	C_{FC}	ACC	AFC	C_{el}
0.307882	0.55248	70	36000	10994.74	1728.84	0.32277
0.310853	0.551979	69	35500	10842.03	1728.84	0.318896
0.318315	0.550737	68	35000	10689.33	1728.84	0.315022
0.325757	0.549522	66	34000	10383.92	1728.84	0.307274
0.362659	0.543797	59	30500	9314.986	1728.84	0.280158
0.399038	0.538512	54	28000	8551.463	1728.84	0.260789
0.434845	0.533486	50	26000	7940.644	1728.84	0.245294
0.469966	0.528527	46	24000	7329.825	1728.84	0.229799
0.504191	0.5234	43	22500	6871.711	1728.84	0.218177
0.537158	0.517793	40	21000	6413.597	1728.84	0.206556
0.568259	0.511254	38	20000	6108.188	1728.84	0.198808
0.596494	0.503116	36	19000	5802.778	1728.84	0.191061
0.620236	0.492368	35	18500	5650.074	1728.84	0.187187
0.636841	0.477464	34	18000	5497.369	1728.84	0.183313
0.642042	0.456028	34	18000	5497.369	1728.84	0.183313

Tablo D.1: Mevcut Koşullar İçin Elektrik Maliyeti Hesaplama Tabloları

CF	0.9	C _{cell}	50 \$/hücre
d	0.16	C _{stack}	100 \$/yığın
L	5 sene	C _f	20 \$/GJ
CRF	0.305409	V _{ort}	0.675834 V
AEP	39420 kWh/sene		
P _{fc}	5 kW		

P'	η	N _{cell}	C _{FC}	ACC	AFC	C _{el}
0.307882	0.55248	70	3600	1099.474	1728.84	0.071748
0.310853	0.551979	69	3550	1084.203	1728.84	0.071361
0.318315	0.550737	68	3500	1068.933	1728.84	0.070973
0.325757	0.549522	66	3400	1038.392	1728.84	0.070199
0.362659	0.543797	59	3050	931.4986	1728.84	0.067487
0.399038	0.538512	54	2800	855.1463	1728.84	0.06555
0.434845	0.533486	50	2600	794.0644	1728.84	0.064001
0.469966	0.528527	46	2400	732.9825	1728.84	0.062451
0.504191	0.5234	43	2250	687.1711	1728.84	0.061289
0.537158	0.517793	40	2100	641.3597	1728.84	0.060127
0.568259	0.511254	38	2000	610.8188	1728.84	0.059352
0.596494	0.503116	36	1900	580.2778	1728.84	0.058577
0.620236	0.492368	35	1850	565.0074	1728.84	0.05819
0.636841	0.477464	34	1800	549.7369	1728.84	0.057803
0.642042	0.456028	34	1800	549.7369	1728.84	0.057803

CF	0.5	C _{cell}	50 \$/hücre
d	0.16	C _{stack}	100 \$/yığın
L	5 sene	C _f	20 \$/GJ
CRF	0.305409	V _{ort}	0.81654 V
AEP	39420 kWh/sene		
P _{fc}	5 kW		

P'	η	N _{cell}	C _{FC}	ACC	AFC	C _{el}
0.307882	0.55248	70	3600	1099.474	1728.84	0.071748
0.310853	0.551979	69	3550	1084.203	1728.84	0.071361
0.318315	0.550737	68	3500	1068.933	1728.84	0.070973
0.325757	0.549522	66	3400	1038.392	1728.84	0.070199
0.362659	0.543797	59	3050	931.4986	1728.84	0.067487
0.399038	0.538512	54	2800	855.1463	1728.84	0.06555
0.434845	0.533486	50	2600	794.0644	1728.84	0.064001
0.469966	0.528527	46	2400	732.9825	1728.84	0.062451
0.504191	0.5234	43	2250	687.1711	1728.84	0.061289
0.537158	0.517793	40	2100	641.3597	1728.84	0.060127
0.568259	0.511254	38	2000	610.8188	1728.84	0.059352
0.596494	0.503116	36	1900	580.2778	1728.84	0.058577
0.620236	0.492368	35	1850	565.0074	1728.84	0.05819
0.636841	0.477464	34	1800	549.7369	1728.84	0.057803
0.642042	0.456028	34	1800	549.7369	1728.84	0.057803

CF	0.2	C _{cell}	50 \$/hücre
d	0.16	C _{stack}	100 \$/yığın
L	5 sene	C _f	20 \$/GJ
CRF	0.305409	V _{ort}	0.631391 V
AEP	39420 kWh/sene		
P _{fc}	5 kW		

P'	η	N _{cell}	C _{FC}	ACC	AFC	C _{el}
0.307882	0.55248	70	3600	1099.474	1728.84	0.071748
0.310853	0.551979	69	3550	1084.203	1728.84	0.071361
0.318315	0.550737	68	3500	1068.933	1728.84	0.070973
0.325757	0.549522	66	3400	1038.392	1728.84	0.070199
0.362659	0.543797	59	3050	931.4986	1728.84	0.067487
0.399038	0.538512	54	2800	855.1463	1728.84	0.06555
0.434845	0.533486	50	2600	794.0644	1728.84	0.064001
0.469966	0.528527	46	2400	732.9825	1728.84	0.062451
0.504191	0.5234	43	2250	687.1711	1728.84	0.061289
0.537158	0.517793	40	2100	641.3597	1728.84	0.060127
0.568259	0.511254	38	2000	610.8188	1728.84	0.059352
0.596494	0.503116	36	1900	580.2778	1728.84	0.058577
0.620236	0.492368	35	1850	565.0074	1728.84	0.05819
0.636841	0.477464	34	1800	549.7369	1728.84	0.057803
0.642042	0.456028	34	1800	549.7369	1728.84	0.057803

Tablo D.2: Yakıt Pili Maliyetleri Değiştiği Takdirde Elektrik Üretim Maliyeti Hesap Tabloları

CF	0.9	C _{cell}	500 \$/hücre
d	0.16	C _{stack}	1000 \$/yığın
L	5 sene	C _f	12 \$/GJ
CRF	0.305409	V _{ort}	0.675834 V
AEP	39420 kWh/sene		
P _{fc}	5 kW		

P'	η	N _{cell}	C _{FC}	ACC	AFC	C _{el}
0.307882	0.55248	70	36000	10994.74	1037.304	0.305227
0.310853	0.551979	69	35500	10842.03	1037.304	0.301353
0.318315	0.550737	68	35000	10689.33	1037.304	0.297479
0.325757	0.549522	66	34000	10383.92	1037.304	0.289732
0.362659	0.543797	59	30500	9314.986	1037.304	0.262615
0.399038	0.538512	54	28000	8551.463	1037.304	0.243246
0.434845	0.533486	50	26000	7940.644	1037.304	0.227751
0.469966	0.528527	46	24000	7329.825	1037.304	0.212256
0.504191	0.5234	43	22500	6871.711	1037.304	0.200635
0.537158	0.517793	40	21000	6413.597	1037.304	0.189013
0.568259	0.511254	38	20000	6108.188	1037.304	0.181266
0.596494	0.503116	36	19000	5802.778	1037.304	0.173518
0.620236	0.492368	35	18500	5650.074	1037.304	0.169644
0.636841	0.477464	34	18000	5497.369	1037.304	0.16577
0.642042	0.456028	34	18000	5497.369	1037.304	0.16577

CF	0.5	C _{cell}	500 \$/hücre
d	0.16	C _{stack}	1000 \$/yığın
L	5 sene	C _f	12 \$/GJ
CRF	0.305409	V _{ort}	0.81654 V
AEP	39420 kWh/sene		
P _{fc}	5 kW		

P'	η	N _{cell}	C _{FC}	ACC	AFC	C _{el}
0.307882	0.55248	70	36000	10994.74	1037.304	0.305227
0.310853	0.551979	69	35500	10842.03	1037.304	0.301353
0.318315	0.550737	68	35000	10689.33	1037.304	0.297479
0.325757	0.549522	66	34000	10383.92	1037.304	0.289732
0.362659	0.543797	59	30500	9314.986	1037.304	0.262615
0.399038	0.538512	54	28000	8551.463	1037.304	0.243246
0.434845	0.533486	50	26000	7940.644	1037.304	0.227751
0.469966	0.528527	46	24000	7329.825	1037.304	0.212256
0.504191	0.5234	43	22500	6871.711	1037.304	0.200635
0.537158	0.517793	40	21000	6413.597	1037.304	0.189013
0.568259	0.511254	38	20000	6108.188	1037.304	0.181266
0.596494	0.503116	36	19000	5802.778	1037.304	0.173518
0.620236	0.492368	35	18500	5650.074	1037.304	0.169644
0.636841	0.477464	34	18000	5497.369	1037.304	0.16577
0.642042	0.456028	34	18000	5497.369	1037.304	0.16577

CF	0.2	C _{cell}	500 \$/hücre
d	0.16	C _{stack}	1000 \$/yığın
L	5 sene	C _f	12 \$/GJ
CRF	0.305409	V _{ort}	0.631391 V
AEP	39420 kWh/sene		
P _{fc}	5 kW		

P'	η	N _{cell}	C _{FC}	ACC	AFC	C _{el}
0.307882	0.55248	70	36000	10994.74	1037.304	0.305227
0.310853	0.551979	69	35500	10842.03	1037.304	0.301353
0.318315	0.550737	68	35000	10689.33	1037.304	0.297479
0.325757	0.549522	66	34000	10383.92	1037.304	0.289732
0.362659	0.543797	59	30500	9314.986	1037.304	0.262615
0.399038	0.538512	54	28000	8551.463	1037.304	0.243246
0.434845	0.533486	50	26000	7940.644	1037.304	0.227751
0.469966	0.528527	46	24000	7329.825	1037.304	0.212256
0.504191	0.5234	43	22500	6871.711	1037.304	0.200635
0.537158	0.517793	40	21000	6413.597	1037.304	0.189013
0.568259	0.511254	38	20000	6108.188	1037.304	0.181266
0.596494	0.503116	36	19000	5802.778	1037.304	0.173518
0.620236	0.492368	35	18500	5650.074	1037.304	0.169644
0.636841	0.477464	34	18000	5497.369	1037.304	0.16577
0.642042	0.456028	34	18000	5497.369	1037.304	0.16577

Tablo D.3: Yakıt Maliyetleri Değiştiği Takdirde Elektrik Üretim Maliyetlerini Hesaplama Tabloları

CF	0.9	C_{cell}	50 \$/hücre
d	0.16	C_{stack}	150 \$/yığın
L	5 sene	C_f	12 \$/GJ
CRF	0.305409	V_{ort}	0.675834 V
AEP	39420 kWh/sene		
P_{fc}	5 kW		

P'	η	N_{cell}	C_{FC}	ACC	AFC	C_{el}
0.307882	0.55248	70	3650	1114.744	1037.304	0.054593
0.310853	0.551979	69	3600	1099.474	1037.304	0.054205
0.318315	0.550737	68	3550	1084.203	1037.304	0.053818
0.325757	0.549522	66	3450	1053.662	1037.304	0.053043
0.362659	0.543797	59	3100	946.7691	1037.304	0.050332
0.399038	0.538512	54	2850	870.4167	1037.304	0.048395
0.434845	0.533486	50	2650	809.3349	1037.304	0.046845
0.469966	0.528527	46	2450	748.253	1037.304	0.045296
0.504191	0.5234	43	2300	702.4416	1037.304	0.044134
0.537158	0.517793	40	2150	656.6302	1037.304	0.042971
0.568259	0.511254	38	2050	626.0892	1037.304	0.042197
0.596494	0.503116	36	1950	595.5483	1037.304	0.041422
0.620236	0.492368	35	1900	580.2778	1037.304	0.041035
0.636841	0.477464	34	1850	565.0074	1037.304	0.040647
0.642042	0.456028	34	1850	565.0074	1037.304	0.040647

P'	η	N_{cell}	C_{FC}	ACC	AFC	C_{el}
0.307882	0.55248	70	3650	1114.744	1037.304	0.054593
0.310853	0.551979	69	3600	1099.474	1037.304	0.054205
0.318315	0.550737	68	3550	1084.203	1037.304	0.053818
0.325757	0.549522	66	3450	1053.662	1037.304	0.053043
0.362659	0.543797	59	3100	946.7691	1037.304	0.050332
0.399038	0.538512	54	2850	870.4167	1037.304	0.048395
0.434845	0.533486	50	2650	809.3349	1037.304	0.046845
0.469966	0.528527	46	2450	748.253	1037.304	0.045296
0.504191	0.5234	43	2300	702.4416	1037.304	0.044134
0.537158	0.517793	40	2150	656.6302	1037.304	0.042971
0.568259	0.511254	38	2050	626.0892	1037.304	0.042197
0.596494	0.503116	36	1950	595.5483	1037.304	0.041422
0.620236	0.492368	35	1900	580.2778	1037.304	0.041035
0.636841	0.477464	34	1850	565.0074	1037.304	0.040647
0.642042	0.456028	34	1850	565.0074	1037.304	0.040647

P'	η	N_{cell}	C_{FC}	ACC	AFC	C_{el}
0.307882	0.55248	70	3650	1114.744	1037.304	0.054593
0.310853	0.551979	69	3600	1099.474	1037.304	0.054205
0.318315	0.550737	68	3550	1084.203	1037.304	0.053818
0.325757	0.549522	66	3450	1053.662	1037.304	0.053043
0.362659	0.543797	59	3100	946.7691	1037.304	0.050332
0.399038	0.538512	54	2850	870.4167	1037.304	0.048395
0.434845	0.533486	50	2650	809.3349	1037.304	0.046845
0.469966	0.528527	46	2450	748.253	1037.304	0.045296
0.504191	0.5234	43	2300	702.4416	1037.304	0.044134
0.537158	0.517793	40	2150	656.6302	1037.304	0.042971
0.568259	0.511254	38	2050	626.0892	1037.304	0.042197
0.596494	0.503116	36	1950	595.5483	1037.304	0.041422
0.620236	0.492368	35	1900	580.2778	1037.304	0.041035
0.636841	0.477464	34	1850	565.0074	1037.304	0.040647
0.642042	0.456028	34	1850	565.0074	1037.304	0.040647

Tablo D.4: Gelecekte Beklenen Elektrik Maliyetleri Hesaplama Tabloları

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İstanbul'da doğan Ahmet Şafak AYKUT, ilkokul eğitimini İstanbul'da Özel Kültür İlkokulu'nda 1991 yılında, orta öğrenimini ise Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi'nde 1998 yılında tamamlamış, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Mühendisliği'nde lisans eğitimine başlamıştır. Lisans eğitimini 2002 yılında "Bölüm İkincisi" olarak tamamladıktan sonra İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı Mühendisliği yüksek lisans programı ve İTÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme yüksek lisans programlarına kabul edilen Ahmet Şafak AYKUT 2005 yılında İTÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme yüksek lisans programından "Finans Uzmanı" olarak mezun olmuştur ve İngilizce bilmektedir.