

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT
HÜCRELERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI VE
BULANIK MANTIK METOTLARIYLA
MODELENMESİ

Derya TARCAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

GEBZE

2007

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

DOĞRUDAN METANOLLÜ YAKIT
HÜCRELERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI VE
BULANIK MANTIK METODLARIYLA
MODELLENMESİ

Derya TARCAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

GEBZE

2007



GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Derya TARCAN ' ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun Tarih ve / sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Yıldırım ERBİL

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DELİGÖZ

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... Tarih ve / sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Yapay Sinir Ağları
Ve Bulanık Mantık Metotları İle Modellenmesi

YAZAR ADI : Derya TARCAN

Yakıt hücreleri kimyasal enerjiyi elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren elektrokimyasal düzeneklerdir. Son yıllarda PEM (Polimer Elektrolit Membran) yakıt hücrelerinin iki türü, hidrojen PEM yakıt hücreleri ve DMFC (Doğrudan Metanollü Yakıt Hücresi) araştırmacıların ilgisini büyük ölçüde çekmektedir.

Yakıt hücrelerinin modellenmesi, analizi ve simulasyonu, performanslarının geliştirilmesi açısından önemlidir. PEM yakıt hücrelerinin performansının tahmini için değişik düzeylerde ayrıntı içeren matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ancak ayrıntılı modellerin analitik çözümleri mümkün değildir, nümerik çözüm gerektirmektedirler, çok sayıda parametre içerdiklerinden uygulanabilirlikleri zordur. Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık modelleri; sistem parametrelerinin birbirleriyle ilişkilerini inceleyen ve hücrenin performansının tahmin etmede kullanılan parametrik olmayan bir tekniktir. Bu teknik incelenen sistemin lineer olmayan davranışlarını içerebilen çok kolay bir metottur.

Bu çalışmada akım yoğunluğu, sıcaklık, metanol konsantrasyonu, metanol debisi ve hava debisi incelenen yakıt hücresi performansında değişkenler olarak kullanılmış ve istatistiksel metotlarla tasarlanmış deney planı çerçevesinde polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra, hücrenin gerilim ve güç değerleri, değişkenlerin fonksiyonu olarak Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık metotlarıyla modellenmiştir

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS : Modelling Of Direct Methanol Fuel Cells With Artificial Neural Network And Fuzzy Logic

AUTHOR : Derya TARCAN

Fuel cells are electrochemical devices that convert chemical energy to electrical and thermal energy. In the past decades, primarily two types of PEM (Polymer Electrolyte Membrane) fuel cells, hydrogen PEM fuel cell and DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) have attracted significant amount of research interest.

Modeling, analysis and simulation of fuel cells are very important in terms of improving their performance. Mathematical models that have details of different approaches were developed to predict PEM fuel cell performance. But, analytical solutions of detailed models are not possible, they require numerical solutions and they are difficult to apply as they have many parameters. Artificial Neural Network and Fuzzy Logic models are non-parametric techniques that analyse relationships between system parameters, employed to estimate the cell performance. These techniques are very simple methods as they can include non-linear characteristics of systems analyzed.

In this study, current density, temperature, concentration of methanol solution, methanol and oxidant flow rate were used as variables of analyzed fuel cell performance and polarization curves were obtained within the framework of an experimental design that was designed by statistical methods. Subsequently, cell potential and power values were modelled with Artificial Neural Network and Fuzzy Logic methods as a function of system variables.

TEŞEKKÜR

Engin bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU' na,

İlk günden bu yana her konuda bana destek olan, dostluklarını esirgemeyen Araş. Gör. Abdulkadir CİVAŞ' a, Araş. Gör. Hikmet OKKAY' a, Uzman Başak TEMUR' a, Kimya Mühendisliği Bölümündeki bütün hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Beni yetiştiren bugünlere gelmemde emeği büyük olan aileme, her zaman her konuda desteklerini ve sevgilerini yanı başımda hissettiren Yıldırım ve Özlem'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Yakıt Hücreleri	3
2.1.1. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi	4
2.1.2. Yakıt Hücrelerinin Termodinamiği	6
2.1.3. Yakıt Hücresinin Kullanım Alanları ve Türleri	7
2.1.4. Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Yakıtlar	11
2.2. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFC)	12
2.2.1. Hücre Bileşenleri	12
2.2.1.1. Elektrolit	14
2.2.1.2. Gözenekli Destek Tabakası	14
2.2.1.3. Elektrot-Katalizör Tabakası	14
2.3. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri	17
2.3.1. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Uygulama İlkeleri	17
2.3.2. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Yapısı ve Bileşenleri	18
2.3.3. Yakıt Hücresi Kinetiği	20
2.3.4. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Modellenmesi	23
2.3.5. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Uygulama Alanları	26
2.4. Yapay Sinir Ağları	27
2.4.1. Yapay Sinir Ağlarının Özellikleri	28
2.4.2. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı	29
2.4.2.1. Geri Beslemeleri Yapay Sinir Ağları	32
2.4.2.2. İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları	33

2.4.3. Yapay Sinir Ağlarının Uygulama Alanları	34
2.5. Bulanık Mantık	35
2.5.1. Niçin Bulanık Mantık?	38
2.5.2. Bulanık Kümeler	38
2.5.3. Üyelik Fonksiyonları	39
2.5.4. Uyarlamalı Neuro-Fuzzy Çıkarım Sistemi: ANFİS	41
2.5.5. Bulanık Mantığın Kullanıldığı Bazı Uygulamalar	43
3. MATERYAL-METOT	44
3.1. Deney Düzenegi	44
3.2. Deney Planlaması	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
4.1. Yapay Sinir Ağları ile Modelleme	48
4.1.1. Gerilim Modellemesi	50
4.1.2. Güç Modellemesi	53
4.2. ANFİS ile Modelleme	55
4.2.1. Gerilim Modellemesi	57
4.2.2. Güç Modellemesi	65
4.3. Modellerin Tahmin Performanslarının Karşılaştırılması	71
5. SONUÇ	76
KAYNAKLAR	78
EK-I	
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	Reaktanların aktivitesi
C	:	Konsantrasyon (M)
E	:	Hücre Voltajı
E_{OCV}	:	Açık devre voltajı
E_T	:	Hücresinin terminal voltajı
F	:	Faraday sabiti (96.487 coulombs/g-mol elektron) (j/s)
i	:	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)
i_L	:	Limit akım değeri (mA/cm ²)
i_o	:	Değiş-tokuş akım yoğunluğu (mA/cm ²)
I	:	Akım (mA)
k_o	:	Reaksiyon hız sabiti
n	:	Transfer edilen elektron sayısı
N	:	Veri sayısı
N_{in}	:	Girdi değişken sayısı
N_{lp}	:	Lineer parametre sayısı
N_{mf}	:	Her bir girdi değişkeninin üyelik fonksiyon sayısı
N_n	:	Gizli tabaka nöron sayısı
N_{nlp}	:	Nonlineer parametre sayısı
N_{tp}	:	Toplam parametre sayısı
P_{H_2O}	:	Suyun kısmi basıncı
P_{H_2}	:	Hidrojenin kısmi basıncı
P_{O_2}	:	Oksijenin kısmi basıncı
q	:	Sıvı akış debisi (ml/dak)
Q	:	Gaz akış debisi (ml/dak)
Q	:	Reaksiyon gazlarının kısmi basınçları oranı
R	:	Korelasyon katsayısı
R	:	Toplam hücre direnci
T	:	Hücre sıcaklığı (°C)
V	:	Hücre voltajı (mV)
V_{model}	:	Modelleme ile elde edilen hücre voltajı
V_{deney}	:	Deneysel olarak gözlemlenen hücre voltajı

w	:	Güç yoğunluğu (mW/cm ²)
W	:	Güç (mW)
Y_{exp}	:	Deneysel çıktı değeri
Y_{model}	:	Model çıktı değeri
Y_{ort}	:	Ortalama çıktı değeri
α	:	Transfer sabiti
ΔH	:	Reaksiyon Entalpisi (değişimi) (J/mol)
ΔG	:	Reaksiyon Gibbs serbest enerjisi (değişimi) (J/mol)
ΔS	:	Reaksiyon Entropi (değişimi) (J/mol K)
$^{\circ}$	:	Standart koşullar (25 °C ve 1 atm)
η	:	Polarizasyon, aşırı potansiyel
η_{act}	:	Aktivasyon polarizasyonu
η_{ohm}	:	Ohmik polarizasyon
η_{conc}	:	Konsantrasyon polarizasyonu

KISALTMALAR:

AFC	:	Alkali Yakıt Hücresi
DMFC	:	Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri
MCFC	:	Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi
MEA	:	Membran-Elektrot Bileşkesi
MSSE	:	Hata Kareler Toplamı Ortalamasının Karekökü
PEM	:	Polimer Elektrolit Membran
SOFC	:	Katı Oksit Yakıt Hücresi
SSE	:	Hataların Kareler Toplamı
SST	:	Ortalama Düzeltilmiş Kareler Toplamı
YSA	:	Yapay Sinir Ağları
ADV	:	Açık Devre Voltajı (OCV)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Yakıt hücresinin şematik resmi	5
2.2 Yakıt hücresi türlerine göre yük cinsi ve taşınma yönü	10
2.3 PEM Yakıt Hücresinin Şematik Gösterimi	13
2.4 PEM Yakıt Hücresinin Yapısı	13
2.5 Yakıt hücresinin akış kanalları ve MEA	15
2.6 DMFC şematik gösterimi	18
2.7 İdeal ve gerçek yakıt hücresi voltajı	21
2.8 Tafel bölgesine bir örnek	22
2.9 $\text{Logsig} = 1 / (1 + e^{-x})$ transfer fonksiyonu	30
2.10 $\text{Tansig} = 2/(1+e^{-2x})-1$ transfer fonksiyonu	30
2.11 Purelin transfer fonksiyonu	30
2.12 İleri beslemeli yapay sinir ağları modeli	33
2.13 Triangular üyelik fonksiyonu (Trimf)	39
2.14 Trapezoidal üyelik fonksiyonu (Trapmf)	40
2.15 Gaussian üyelik fonksiyonu (Gaussmf)	40
2.16 Disigmoidal üyelik fonksiyonu (Dsigmf)	40
2.17 İki girdili üç kurallı ANFIS modeli	43
3.1 Deney düzeneği	44
3.2 Yakıt hücresinin akış kanalları	45
4.1 Birinci deneyin polarizasyon eğrisi	48
4.2 Girdi değişkenleri T, C, I, q, Q ile eğitim boyunca performans ilerlemesi (gizli tabaka nöron sayısı= 10)	52
4.3a Girdi değişkenleri T, C, I, q, Q ile son regresyon grafikleri (gizli tabaka nöron sayısı= 10)	52
4.3b Girdi değişkenleri T, C, I, q, Q: toplam deneysel data ile model tahminleri arasındaki uyum	53
4.4 Dört girdili iki üye fonksiyonlu 16 kurallı ANFIS yapısı	63

4.5	Dört girdili ANFİS modelinde 16 adet kural seti	63
4.6	Dört girdili doğrusal triangular üyelik fonksiyonu ile elde edilen eğitme sonuçların model ile uyum grafiği	64
4.7	Dört girdili doğrusal triangular üyelik fonksiyonu ile edilen test sonuçların model ile uyum grafiği	64
4.8	Dört girdili lineer triangular üyelik fonksiyonu elde edilen toplu sonuçlar ile model uyumu grafiği	65
4.9	Polarizasyon eğrisi simulasyon grafiği (16. deney, deney şartları: $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C = 2.5\text{ M}$, $q = 11\text{ cc/dak}$, $Q = 950\text{ cc/dak}$)	72
4.10	Güç simulasyon grafiği (16.deney , deney şartları: $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C = 2.5\text{ M}$, $q = 11\text{ cc/dak}$, $Q = 950\text{ cc/dak}$)	72
4.11	Deneysel açık devre voltajı sonuçları ile yapay sinir ağları modeli ile elde edilen sonuçların grafiği	75
4.12	Deneysel açık devre voltajı sonuçları ile ANFİS modeli ile elde edilen sonuçların grafiği	75

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Yakıt hücresi türleri ve özellikleri	9
2.2 MEA Bileşenleri ve Görevleri	16
2.3 Üyelik fonksiyonları ve denklemleri	41
3.1 Hücre değişkenlerinin değişim aralığı	46
3.2 Döndürülebilir blok için değişken aralıkları	46
3.3 Dikey blok için değişken aralıkları	46
3.4 Deney Planı	47
4.1 Farklı girdiler ile gerilim tahmini R değerleri (gizli tabaka nöron sayısı=14)	50
4.2 Girdiler I, T, C, q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri	51
4.3 Girdiler I, T, C, q, Q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri	51
4.4 Farklı girdiler ile güç tahmini R değerleri (gizli tabaka nöron sayısı=14)	53
4.5 Girdiler I, T, C, q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri	54
4.6 Girdiler I, T, C, q, Q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri	54
4.7 Üyelik fonksiyonlarının nonlinear parametre sayısı denklemleri	56
4.8 Çıktı değişken üyelik fonksiyonunun lineer parametre sayısı denklemleri	56
4.9 Üyelik fonksiyonlarının değişken sayısına göre parametre sayıları	57
4.10 Girdiler: (I), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	57
4.11 Girdiler: (I), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	58
4.12 Girdiler: (T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	58
4.13 Girdiler: (T, C), çıktı değişkenin üyelik fonksiyonu: doğrusal	58
4.14 Girdiler: (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	58
4.15 Girdiler: (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	59

4.16	Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	59
4.17	Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	59
4.18	Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	59
4.19	Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	60
4.20	Girdiler: (I, T, C, q), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	60
4.21	Girdiler: (I, T, C, q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	60
4.22	Girdiler: (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	60
4.23	Girdiler: (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	61
4.24	Hedef (çıkıtı) değişken olarak hücre gerilimi durumunda farklı üyelik fonksiyonu tipleri için test MSSE değerleri	62
4.25	Girdi: (I), çıktı değişkenin üyelik fonksiyonu: sabit	65
4.26	Girdi: (I), çıktı değişkenin üyelik fonksiyonu: doğrusal	66
4.27	Girdiler: (T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	66
4.28	Girdiler: (T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	66
4.29	Girdiler: (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	66
4.30	Girdiler: (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	67
4.31	Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	67
4.32	Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	67
4.33	Girdiler: (T, C, I), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	67
4.34	Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	68
4.35	Girdiler: (I, T, C, q), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	68
4.36	Girdiler: (I, T, C, q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	68
4.37	Girdiler: (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit	68
4.38	Girdiler: (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal	69
4.39	Çıkıtı olarak yakıt hücresi gücü alınması durumunda farklı üyelik fonksiyonu tipleri için test sonuçları	70
4.40	Hücre değişkenlerine karşılık ölçülen deneysel gerilim değerleri ve model tahmini değerleri	74

1.GİRİŞ

Yakıt hücresi 1839 yılında Friedrich Wilhelm ve William Grove tarafından suyun elektrolizinin tersine döndürülmesi ile hidrojen ve oksijenden elektrik enerjisi üreten bir düzenek olarak keşfedilmiştir. Tanım olarak, hücreye sürekli bir şekilde beslenen yakıt ve yakıcı (yükseltgen) akımlarıyla taşınan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine (az miktar ısı enerjisi ile birlikte) çeviren bir elektrokimyasal düzendir.

PEM (Polimer Elektrolit Membran) yakıt hücresi, yüksek enerji yoğunluğu, basit ve güvenli yapısı, kolay ve düşük sıcaklıklarda çalıştırılabilmesi gibi avantajları sebebiyle değişik yakıt hücreleri arasında son yıllarda üzerinde en fazla araştırılan bir türdür.Özellikle mobil güç jeneratörlerinde, elektrikli cihaz ve araçlarda kullanımı amaçlanmıştır. PEM yakıt hücreleri, kullanılan yakıt türüne bağlı olarak günümüzde üstünde en çok durulanlar, doğrudan metanollü yakıt hücreleri (DMFC) ve hidrojen PEM yakıt hücreleridir. [Shadoduan and Luke, 2005]

Son yıllarda yakıt hücresi performansının ölçülmesi ve tahmin edilmesi oldukça önem kazanmıştır. Bu çerçevede, hücre performansını belirleyen voltaj-akım (polarizasyon) ilişkisinin tahmin edilmesini amaçlayan matematiksel modeller geliştirilmektedir. Yakıt hücresinin performansı; hücre sıcaklığı, giriş akımlarının bileşimi ve debileri, hava (oksijen) basıncı ve nemi gibi işletim değişkenlerinin yanında, membran-elektrot bileşkesi (MEA) 'nın yapısını ve bileşimini yansıtan çok sayıda değişkene bağlıdır. Ayrıca, hücre içinde meydana gelen kompleks elektrokimyasal-fiziksel olayların bu değişkenlere doğrusal olmayan bir şekilde tabii olmaları, modellerin analitik çözümünü imkansız kılmaktadır. Bu alanda en gelişmiş modeller hücre içinde akışkanların dinamiğini de dikkate almakta ve ancak özel programlarla nümerik olarak çözülebilmektedir. Diğer taraftan, model gelişip karmaşılaştıkça, artan parametre sayısı ile birlikte model sonuçlarının parametre değerlerinin doğruluğuna olan duyarlılıkları da artmakta, ve parametre değerlerinin bir kısmı için yaklaşık değerlerin kullanılması bu modellerin güvenilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca, karmaşık modellerin bilgisayarda çözümleri günümüzde bile oldukça zaman almaktadır. Bütün bu dezavantajlar, özellikle gerçek zaman

uygulamalarda, (örneğin süreç denetimi) önem kazanmaktadır. Sonuç olarak, yeterli güvenilirlikte ve hızda sonuç veren ampirik, yarı-ampirik analitik modellere olan ihtiyaç günümüzde de sürmektedir.

Sistemlerin matematiksel modelleri, “parametrik” ve “parametrik olmayan” modeller olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Parametrik modeller bilimsel teorilerine dayanılarak hazırlanırken, parametrik olmayan uygulamalar, veri setlerine bağlı olarak sistem davranışını tahmin eden daha genel modellerdir. Günümüzde, çok sayıda nonlinear parametreler içeren sistemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan “parametrik olmayan” tekniklerin başında “Yapay sinir ağları” ve “Bulanık mantık” teknikleri gelmektedir. [Won Yong Lee at al, 2003]

Genel anlamda yapay sinir ağları metodu; beynin nörolojik işlevini yerine getirme yöntemini örnek alır. İlk hücre modeli 1942 yılında McCulloch ile Pitts tarafından geliştirilmiştir Diğer taraftan, bulanık mantık (Fuzzy Logic) kavramı, ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A.Zadeh'in (Lütfü Askerzade) bu konu üzerindeki çalışmalarıyla duyulmuştur. Günümüzde bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. Klasik matematiksel yöntemlerle karmaşık sistemleri modellemek ve kontrol etmek için verilerin tam olması gerekirken, bulanık mantık kişiyi bu zorunluluktan kurtarır ve daha niteliksel bir tanımlama olanağı sağlar. Bu kapsamda, yapay sinir ağları ve bulanık mantık modellerinin, PEM yakıt hücrelerinin performans analizi ve tahmininde etkili bir şekilde kullanılabilmeleri mümkündür.

Bu çalışmanın amacı, geleneksel ayrıntılı modelleme yaklaşımlarına alternatif olarak, yakıt hücresinden elde edilen deneysel verileri kullanarak hücre performansını tahmin eden yapay sinir ağları ve bulanık mantık modellerinin geliştirilmesi ve karşılaştırılmalı olarak en uygun yöntemin ortaya konulmasıdır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yakıt Hücreleri

Yakıt hücresi, enerji üretiminde kullanılan verimli, sessiz, çevre ile uyumlu ve elektrokimyasal prensipte yakıt enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güç üretim elemanıdır. İlk gerçek uygulaması NASA tarafından yapılmış, alkali yakıt hücreleriyle, Gemini ve Apollo uzay programları boyunca enerji sağlamada kullanılmıştır.

Klasik çevirim teknolojisinde, kimyasal (iç) enerji yanma tepkimesi ile ısıya, ısı da bir güç çevirimi ile (Rankine çevirimi) mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Mekanik enerji jeneratörlerle elektriğe dönüştürülürken de yeni kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıplar sistemin verimini düşürmekte ve kalabalık bir makine topluluğu gerektirmektedir. Oysa yakıt hücreleri, tipine göre 25- 1000 °C’ arasında değişik sıcaklıklarda, çok az gürültü ile çalışabilen ideal çevirim araçlarıdır. [Blomen et al 1993, Özdemir ve Kılıçaslan 1995, Tüsiad 1998]

Yakıt hücrelerinin diğer ikincil (sekonder) pillerle benzerlikleri olsa da, onlardan farklı olarak sürekli çalışırlar, tekrar şarj edilme gibi bir sorunları yoktur, elektrod tepkimelerinden elektrotların ve elektrolitin bileşimleri etkilenmez, ayrıca kullanım ömrü sonunda atılması söz konusu değildir. Yakıt beslemesi yapıldığı sürece akım verebilmeleri yakıt hücrelerinin en önemli avantajlarından biridir. Ayrıca çevresel kirlilik oranı çok düşüktür. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında ortaya sadece enerji ve saf su çıkar, bu sebeple onlara sıfır emisyonlu makineler de denilebilir. Yakıt hücrelerinde sadece elektron alışverişi olduğundan, yani kimyasal enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesine gerek olmadığından yüksek verimle çalışırlar. Ayrıca düşük sıcaklıklarda çalışılabilmesi yakıt hücrelerinin önemli bir avantajıdır.

Yakıt hücreleri; otomotiv sektörü, elektrik enerjisi üreteçleri ve taşınabilir sistemler olmak üzere özellikle üç ana sektörde geliştirilmektedir. Ana çalıştırılma

prensipleri aynı kalmasına rağmen, her bir uygulamada farklı sistem gereksinimleri olmakta ve bu sebeple de farklı yakıt hücresi tipleri kullanılmaktadır.

2.1.1. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi

Bir yakıt hücresi, elektrolit tabakasının iki yanına yerleştirilen bir anot (negatif elektrot) ve bir de katot (pozitif elektrot) olmak üzere iki elektrottan meydana gelir. Elektrotlar gözenekli metal veya karbondan yapılmış olup, aradaki elektrolit sadece iyonların içerisinden geçişine izin veren bir yapıdadır. Bu elektrolit; sodyum veya potasyum gibi bir bazik çözelti, erimiş karbonat, seramik veya polimerik bir katı olabilmektedir. Elektrolitin kullanılma amacı; elektronik bir ayırma sağlamak ve elektrokimyasal potansiyelleri farklı olduğu düşünülen iki elektrot arasındaki iyonik bağlantıyı sağlamaktır. Anot ve katot arasındaki potansiyel farkı (daha doğru bir deyimle kimyasal aktivite farkı), kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüşmesini sağlamaktadır.

Yakıt hücresinin çalışması kısaca şu şekilde özetlenebilir; Sistem içerisinde bulunan anoda yakıt gönderilir. Bu yakıt hidrojen, etanol veya metanol olabilir. Katoda ise hava veya oksijen gönderilir. Yakıttan ayrılan elektronlar, bir dış devre üzerinden katoda doğru devam ederken, iyonlar da elektrolit üzerinden katoda doğru hareket eder. İyonlar burada katottan gelen elektronlar ve hava ile reaksiyona girer ve devre tamamlanır. Böylelikle dış devreden dolaştırılan elektronların bulunduğu akım kolunda elektrik akımı oluşur. Yakıt hücresinde tek bir hücre gerilimi 1 volttan az olduğundan, gerekli elektrik enerjisini üretmek için birden fazla yakıt hücresini seri halde bağlanarak kullanması yoluna gidilmektedir.

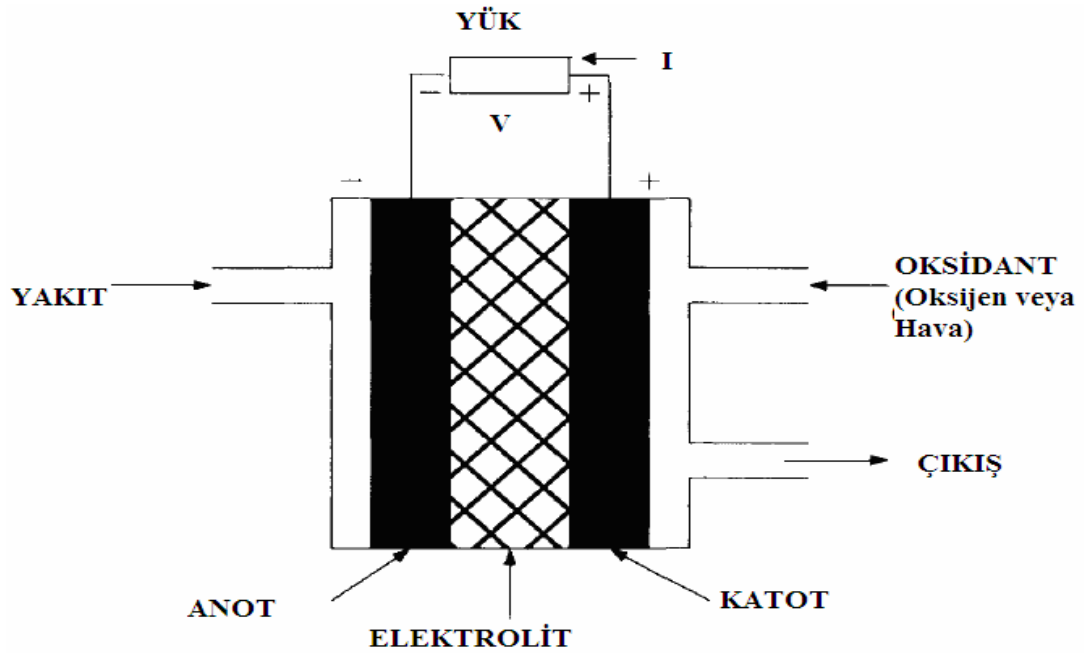
Hidrojen yakıt hücresinde, Anot ve katot tabakasındaki reaksiyonlar en temel haliyle aşağıdaki şekilde verilebilir;



Toplam reaksiyon;



Anottaki tepkime hidrojenin yükseltgenme tepkimesi, katottaki tepkime ise oksijenin indirgenme tepkimesidir. Anot ve katodu ayıran elektrolit, içerisinde sadece iyonların geçişine izin veren bir yapıdadır. Kullanılan elektrolit tipine bağlı olarak yakıt hücresinin tipi, çalışma sıcaklığı, iletilen iyonun türü ve aktarım yönü değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.1. Yakıt hücresinin şematik resmi

Yakıt hücrelerinin tiplerine göre çalıştırılma koşulları değişmektedir. Bu koşulların değişmesi her bir hücre türüne bazı avantaj ve dezavantajlar sağlamaktadır. Genel olarak, yakıt hücrelerinin diğer enerji üreteçlerine göre avantajları olarak aşağıdakiler sayılabilir;

- Enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüşür. Sadece elektron alışverişi olması sebebiyle yüksek verim elde edilir.
- Enerji dönüşümü sırasında hareket eden parça yoktur. Bu enerji kayıplarının oluşmasını engeller.
- Sessizdir.

- Düşük sıcaklıklarda yüksek kullanılabilirlik sağlar.
- Kolay yerleştirilebilir ve kullanılabilir.
- Yakıt türü değiştirilebilir.
- Düşük sıcaklıkta çalışabilmesi sebebiyle güvenlidir.
- Boyutları değiştirilebilir.
- Hızlı bir şekilde yükleme yapılabilir.
- Çevresel kirlilik oranı çok düşüktür. [Blomen et al 1993, Dicks and Larminie, 2001, Kadirgan ve Fıçıcıoğlu, 1992, Fuel Cell Handbook 2002]

2.1.2. Yakıt Hücrelerinin Termodinamiği

Tersinir elektrokimyasal bir reaksiyon için temel termodinamik eşitlikler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

ve standart şartlarda (25 C, 1 atm)

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (2.5)$$

Eşitlikteki ΔG ; reaksiyonun kullanılabilir serbest enerjisini yani Gibbs serbest enerjisini, ΔH entalpiyi, ΔS entropiyi ve T değeri de sıcaklığı göstermektedir. ΔG , ΔH , ΔS değerleri yalnızca maddenin kendisine ve reaksiyonun başlangıç bitiş durumlarına bağlıdır. ΔG verilen reaksiyondan kullanılabilecek net enerjiyi gösterdiğinden, bir hücredeki kullanılabilir net elektrik enerjisi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta G = - nFE \quad (2.6)$$

ve

$$\Delta G^{\circ} = - nFE^{\circ} \quad (2.7)$$

n ; transfer edilen elektron sayısı, F ; Faraday sabiti ve E hücre voltajıdır. Alışılmış termodinamik hesaplamalarda olduğu gibi sıcaklık ve basınç etkisinde

direk elektrokimyasal reaksiyonlar içinde eklenebilir. Elektrokimyasal reaksiyonlar için Nernst eşitliği:

$$E = E^0 - (RT/nF) \ln Q \quad (2.8)$$

Eşitlikteki Q değeri reaksiyon gazlarının kısmi basıncına dayanmaktadır. Hidrojen yakıt hücresi düşünüldüğünde reaksiyon;



Reaksiyonda iki elektron transfer edilmekte ve eşitlik şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$E = E^0 - (RT/2F) \ln (P_{H_2O} / P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}) \quad (2.10)$$

2.1.3. Yakıt Hücresinin Kullanım Alanları ve Türleri

Yakıt hücrelerinin kullanım alanı oldukça geniştir ve bugün bilinen birçok elektrik üreticinin yerini alabilirler. Yakıt hücrelerinden çok büyük miktarda güç üretebilen üreteçler kurulabilir ve gerek endüstri sahasında gerekse evlerde istenen akım temin edebilir. Hücreler sayesinde bir güç istasyonu için güç sağlanabileceği gibi, bir duman detektörüne de güç sağlanabilmektedir. Ayrıca hava kirliliğini asgariye indirmede büyük yararları vardır. Tek dezavantajları dalgalı akım yerine doğru akım üretmeleridir ve bu durum da doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesini gerektiren dönüştürücülerin kullanılmasını gerektirir. Bu üreteçlerin bu dezavantajına rağmen küçük elektrik istasyonlarının kurulmasına başlanmıştır. Özellikle şehir elektriğinin ulaşamadığı ucra köşelerde bu tür üreteçler rağbettedir.

Yakıt hücrelerinin sessiz ve çevre kirliliğine yol açmadan çalışmaları, enerjiyi daha etkili bir biçimde kullanılmasını sağlamaları sebebiyle, bu teknoloji ile çalışabilecek araçlara olan ilgiyi arttırmaktadır. Son zamanlarda petrolle çalışan arabaların hava kirliliğine olan katkısından dolayı yakıt hücresi ile çalışan araçlar

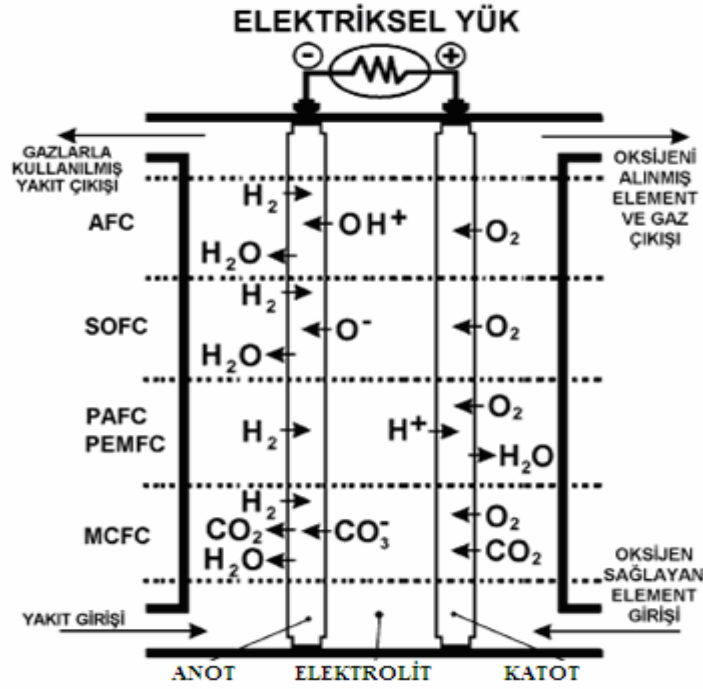
dikkat çekmektedir. Zamanla yakıt hücreli araçlar zamanla dizel veya benzin ile çalışan araçların yerini almaya başlayacaktır. Dünyadaki birçok araba üreticisi yakıt hücresi sistemlerini incelemekte ve prototiplerle çalışmaktadır. Yakıt hücreleri otomobiller ve otobüsler dışında, traktör ve kamyonlar gibi büyük araçlarda da kullanılabilmektedir. Bu sayede hem petrol kökenli yakıtlar konusunda tasarruf sağlanmış olacak, hem de çevre kirliliğine yol açan emisyonlar engellenmiş olacaktır. Uzay araçları için gerekli olan elektrik enerjisi güneş panelleri, aküler ya da RTG (radioisotope thermal generator- radyoizotoplu ısı üreteç) olarak bilinen nükleer bir aygıtla üretilebilir. Ama o dönemde güneş enerjisi sistemleri pahalı ve hacimli, aküler de ağır ve kısa ömürlü olduğundan uzay araştırmaları için uygun bulunmamıştır. Nükleer güç de uzay adamları için riskli olduğundan, uzay araçlarının elektrik gereksinimini karşılamak için yakıt hücreleri yeğlenmiştir.

Uzay uçuşlarında güç kaynağı olarak yakıt hücrelerinin kullanılmasında en büyük etken ağırlığının az olmasıdır. Bu nedenle Gemini ve Apollo uzay mekiklerinin elektrik enerjisi katı polimerli ve alkali yakıt hücreleri ile karşılanmıştır. Halen günümüzde de uzay mekiklerinin enerjisi 12 kW'lık yakıt hücreleri ile karşılanmaktadır. [Sunay 1998]

Yakıt hücreleri seçilen elektrolit türüne göre isimlendirilirler. Kullanılan elektrolit aynı zamanda taşınacak iyonun türünü ve akış yönünü de belirler. Yani iyonun anottan katoda doğru mu, yoksa katottan anoda doğru mu hareket edeceğini belirler. Elektrottaki tepkimeler ve elektrolit tipleri Tablo 2.1'de yakıt hücresi tiplerine göre listelenmiştir. Şekil 2.2'de ise şematik olarak yük cinsleri ve aktarım yönleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Yakıt hücresi türleri ve özellikleri

Yakıt Hücresi Türü	Alkali Yakıt Hücresi (AFC)	Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi (PEMFC)	Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)	Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC)	Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)
Elektrolit	KOH	Katı Polimer (Nafion)	Fosforik Asit	Lityum ve Potasyum Karbonat	Katı Oksit Elektrolit
Yük	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Anot Tepkimesi	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Katot Tepkimesi	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = 2\text{OH}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- = \text{CO}_3^{2-}$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- = \text{O}^{2-}$
Kullanılan Yakıt	Saf H_2	H_2	H_2	$\text{H}_2, \text{CO}, \text{CH}_4$	$\text{H}_2, \text{CO}, \text{CH}_4$
Enerji verimliliği	35- 55 %	35- 45%	40%	> 50%	> 50%
Güç Aralığı	<5 kW	5- 250 kW	200 kW	200 kW-MW	2 kW-MW
Uygulama Sıcaklığı	60- 120	50- 100	~220	~650	~1000
Kullanım Alanı	Uzay araştırmaları, Sabit güç kaynakları	Uzay ve savunma projeleri, Taşıma sistemleri, Bilgisayar, Cep telefonu	Mobil elektrik sistemleri, Taşıma	Sabit güç kaynakları	Otomotiv, Taşınabilir güç kaynakları



Şekil 2.2. Yakıt hücresi türlerine göre yük cinsi ve taşınma yönü

Fosforik asit ve polimer elektrolit membran yakıt hücreleri birbirine yakıt sıcaklık aralıklarından çalışırlar ve elektrolitleri proton geçişine izin veren türdendir. Tepkimeler ise Eşitlik (2.1) ve (2.2)'de gösterildiği şekilde gerçekleşir.

Bir alkali elektrolit kullanıldığında ise; taşınan yük OH⁻ iyonlarıdır. Ters yönde hareket ederler ve su anot tabakasında oluşur. Sağladığı güç sebebiyle uzay araştırmalarında daha önce Apollo ve Shuttle'de olduğu gibi başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Fosforik asit yakıt hücrelerinde eriyik H₃PO₄ elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu yakıt hücreleri daha çok orta ölçekli güç jeneratörleri için geliştirilmiştir.

Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri ismini elektrolit olarak kullanılan özel plastik membrandan almaktadır. Katyon geçişine izin veren membranlar, Du Pont tarafından özel olarak klor alkali endüstrisi için geliştirilmiştir. Bu membranlar yakıt hücresinin tüm anahtar parçalarını yani anot ve katot elektrotları ile elektroliti içeren sıkıştırılmış bir üniteden (MEA) oluşmaktadır. Elektrotlar birkaç yüz mikrondan daha kalın değildir. Polimer elektrolit membran yakıt hücresine yakıt ve

hava yüklendiğinde elde edilen elektrik enerjisi 1 V civarında, güç yoğunluğu ise 1 W/cm² civarındadır. [Fuel Cell Handbook, 2002]

Diğer bir yakıt hücresi türü olan katı oksit yakıt hücrelerinde elektrolit olarak YSZ (yttria stabilized zirconia) çok yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir.

Yüksek sıcaklıkta çalışan diğer yakıt hücresi ise; eriyik karbonat tuzlarını elektrolit olarak kullanan ve karbonat iyonlarının CO₃²⁻ geçişini sağlayan eriyik karbonat yakıt hücresidir. Bu yakıt hücresinde diğerlerinden farklı olarak iyonlar tepkimeye girenlerden değil de, katot gazına eklenen CO₂ den oluşmaktadır. Genellikle anot çıkışından geri döngü yapılar eklenir.

Her iki yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücresi de büyük ölçekli olarak (MW) durağan güç elde etmek için dikkat çekmektedir. Elektrolitleri iyon olmayan malzemelerdendir ve taşınan yükler eriyik karbonat yakıt hücresi için CO₃²⁻, katı oksit yakıt hücresi için ise O²⁻ 'dir. Bu iki yakıt hücresi, elde edilen güç nedeniyle düşük sıcaklıklarda çalışan hücrelerden daha avantajlıdır. Prototiplerinin verimlilikleri 45- 60 % arasında sonuçlanmaktadır. Ancak, yüksek sıcaklıklarda çalışan bu sistemlerin kolayca kapatılamamaları kullanımlarını çoğunlukla durağan sistemler ile sınırlamaktadır.

2.1.4. Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Yakıtlar

Yakıt hücrelerinde çok çeşitli yakıtlar kullanılabilir, ancak yakıtın fiyatı kullanılabilirliği, enerji içeriği, çevresel etkileri, depolama taşıma kullanım kolaylığı göz önüne alınarak seçimin yapılması gerekmektedir. Yakıt hücrelerine yakıt beslemesi doğrudan ve dolaylı olarak gerçekleştirilmektedir. Yakıt olarak, alkoller, doğal gaz, LPG ya da hidrojen kullanılabilir. Hangi yakıt kullanılırsa kullanılsın, yakıtlardan hidrojen içeriği zengin gaz elde etmek esastır. Metanol, etanol, etilen glikol, gliserol ve propanol gibi alkoller, yüksek enerji yoğunlukları, sulu elektrolitlerdeki yüksek çözünürlükleri, emniyetli depolama ve kullanım kolaylığı, yüksek reaksiyon kabiliyeti gibi özellikleri sebebiyle yakıt hücreleri için uygun yakıt kaynakları olarak düşünülmektedirler.

Günümüzde metanol, doğalgaz, kömür veya evsel ve endüstriyel atıklardan biyoteknolojik yöntemlerle üretilmektedir. Yakıt hücrelerinin taşıma araçlarında kullanımı göz önüne alındığında, metanol kullanımının önemli avantajları vardır. Metanol anotta hemen tepkimeye giren, tıpkı benzin gibi oda sıcaklığında sıvı olan bir yakıttır. Benzin istasyonlarında önemli bir değişikliğe gidilmeden kolayca satılabilir. Taşıtlarda metanol için gereken yakıt deposu hidrojeninkinden daha küçük ve hafiftir. Etanol ise içerisinde hidrokarbon bulunduran mısır, buğday, arpa, patates gibi zirai ürünlerden elde edilmektedir. Bu nedenle ekonomisi tarıma dayalı ülkeler için alternatif yakıt olarak kullanılabilir.

Tüm yakıtlara bakıldığında enerji verimi en yüksek olan hidrojendir. Kullanımı ilk sırada yer alan petrol ve doğal gazın sınırlı olmasına karşın, hidrojen su içinde bol bulunan bir maddedir. Hidrojen doğada hazır halde bulunmayıp, su ve fosil kökenli yakıtlardan elde edilebilmesi gerekmektedir [Blomen et al, 1993, Tüsiad 1998]

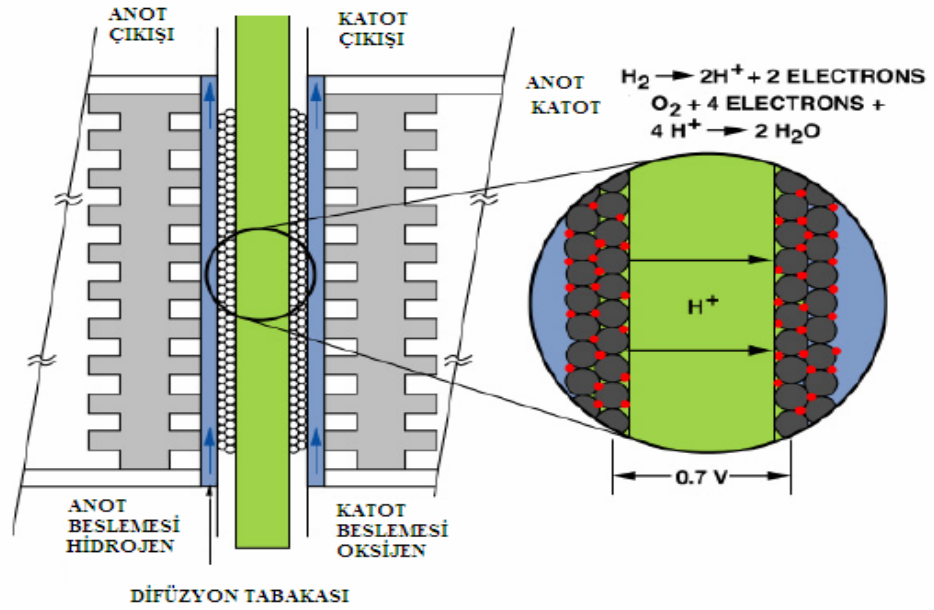
2.2. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFC)

Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri yüksek enerji yoğunluğu ile teknolojik olarak durağan ve hareketli uygulamalar için dikkat çekmektedir. Bu alanlarda kabul görmesindeki başlıca faktörler ağırlığı, hacmi ve maliyetidir. PEM yakıt hücresi, katı haldeki bir polimer elektrot kullanılmasından dolayı diğer türlerden ayrılır. Hücre elektroliti diğer türlere oranla daha az kompleks yapıdadır, korozyona sebep olacak asit ve bazlar bu sistemde elimine edilmiştir. PEM yakıt hücreleri 60- 80 °C gibi düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Kolay çalıştırılabilen yapısı ile daha çok taşınabilir sistemlerde kullanımı amaçlanmıştır.

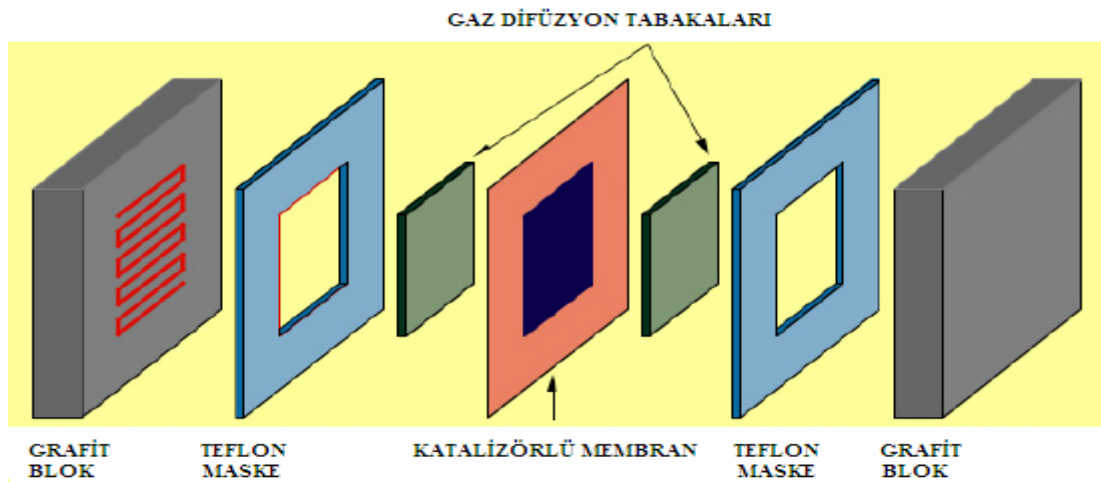
2.2.1.Hücre Bileşenleri

Bir yakıt hücresinin temel bileşenleri; elektrotlar, elektrolit, yakıt ve oksidant olarak sıralanabilir. Bu elemanlar, kullanılacağı alana göre seçilen yakıt hücresi türüne göre belirlenir. Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri, basit yapıları ve yüksek enerji yoğunluklar sebebiyle oldukça ilgi çekicidir. Tipik bir PEM yakıt hücresi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de de gösterildiği üzere şu parçalardan oluşmaktadır:

1. İyon geçişine izin veren membran
2. Elektrik iletkenliği olan gözenekli destek tabakası
3. Gözenekli destek tabakası ile membran arasına konulmuş bir katalizör tabakası
4. Her iki tarafta da yakıt ve oksidantın reaksiyona gireceği bölüme ulaşmasını sağlayan akış kanallarını içeren bipolar tabakalar



Şekil 2.3. PEM Yakıt Hücresinin Şematik Gösterimi



Şekil 2.4. PEM Yakıt Hücresinin Yapısı

2.2.1.1.Elektrolit

PEM yakıt hücrelerinde elektrolit olarak bir plastik membran kullanılmaktadır. Yakıt hücrelerinde kullanılan organik yapıdaki pozitif yüklü iyon (katyon) geçişine izin veren membranlar 1959 yılında William T Grubbs tarafından tasarlanmıştır. Bu ilk uygulamadan sonra geliştirilerek perflorosülfonik asit polimeri günümüzde kullanılmaya başlanmıştır. İyon geçiren membranlar reaktanları birbirinden ayırırken aynı zamanda iletken bir yol da sağlamaktadır. Malzeme elektriksel olarak yalıtkandır. Bunun sonucu olarak iyon iletimi polimer yapısındaki iyonik gruplar yolu ile gerçekleşir. İyon transferi bu sitelerdeki bağlara ve serbest suya bağlıdır. Yaygın olarak Nafion adı verilen perflorosülfonik ailesinden özel bir plastik kullanılır. Membrandaki sülfonik asit grupları $-SO_3H$ iyon transferi karakteristiğini oluşturur ve sülfonik asit gruplarının sayısı iyon iletkenliğini belirler. Membranın içerdiği su ise; iletkenlik ve gaz geçirgenliği gibi başlıca özelliklerini kazandırır.

2.2.1.2. Gözenekli Destek Tabakası

Polimer membran; bir gaz difüzörü gibi çalışan, mekanik destek sağlayan ve elektronlar için elektriksel bir yol sağlayan iki adet gözenekli destek tabakası arasına konulmuştur. Bu destek tabakası genellikle karbon yapılıdır ve hidrofobiktir. Sağladığı bu ıslanmaz yüzey sayesinde açığa çıkan su katotta hareket edebilmektedir. Bu tabaların üç önemli işlevi vardır. Birincisi gaz difüzyonu sağlanır. İkinci olarak, polimer membrana mekanik olarak destek sağlar ve son olarak da elektronlar için bir elektriksel rota sağlar. Genellikle karbon yapılıdır ve hidrofobiktir.

2.2.1.3. Elektrot-Katalizör Tabakası

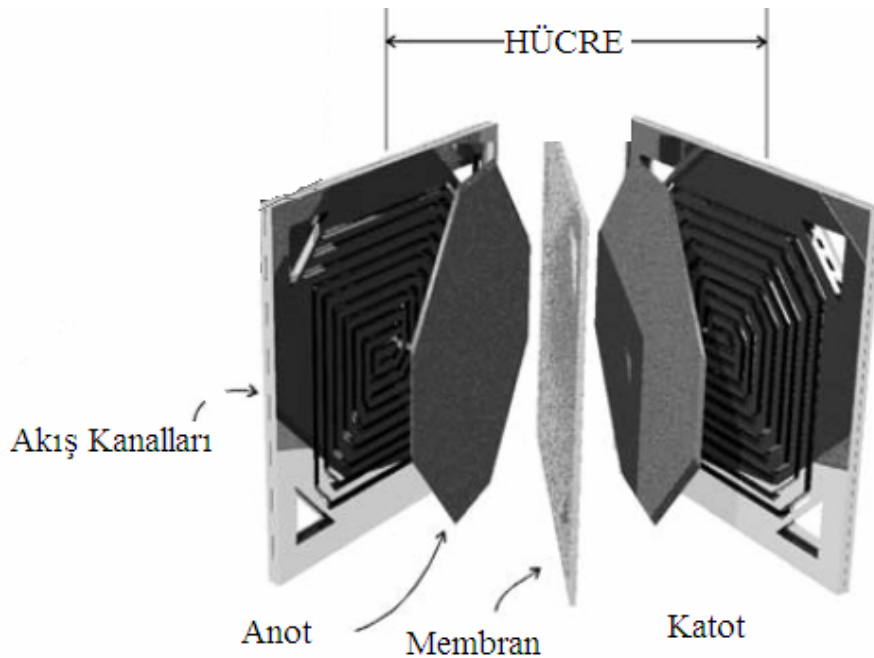
Elektrotlar membran ve difüzyon tabası ile birleşik haldeki bir katalizör tabakasıdır. Bu katalizör yapısı ya membrana ya da difüzyon tabasına eklenir. Günümüzde, katalizör hem anotta hem de katotta platinyum temellidir.

Hidrojen yükseltgenmesi sağlamak için anotta ve oksijen yükseltgenmesini sağlamak için de katotta platinyum metali katalizörü kullanılmaktadır. Anotta

platinyum karbon veya grafitle desteklenmiş şekilde de kullanılabilir. H_2 , CO_2 , CO , N_2 içeren diğer yakıtlarda ise platinyum-rutenyum destekli olarak kullanılmaktadır. Katotta oksijen indirgenmesi sağlamak amacıyla da, platinyum metali veya desteklenmiş katalizör tercih edilir.

Düşük sıcaklıklarda çalışan PEM yakıt hücrelerinin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Çevre koşullarında hızlı bir şekilde kullanılabilmesini sağlayan düşük sıcaklıkta çalışabilmesi bir avantaj sağlamaktadır. Karbonun platinyum katalizör ile etkileşmesi sonucunda açığa çıkan karbon monoksit ise bir dezavantajdır. [Fuel Cell Handbook Sixth Edition]

DuPont yakıt hücresinin elektrot ve elektrolitini içeren sıkıştırılmış parçalar üretmiştir. Yakıt hücresinin kalbini oluşturan, elektrot ve membran birleşimi olan MEA (Membran Elektrot Assembly) adı verilen bu parça çok ince yapıdadır. MEA, anotla katottaki yakıt ve oksidant dağıtımının gerçekleştiği akış kanallarının olduğu iki plaka arasına yerleştirilir. Şekil 2.5 'de yakıt hücresinde yakıt ve havanın geçtiği akış kanalları ve MEA gösterilmektedir.



2.5. Yakıt hücresinin akış kanalları ve MEA

MEA bileşenlerinin her birinin karmaşık işlevleri bulunmaktadır. Bu görevler kısaca Tablo 2.2 'de gösterildiği üzere özetlenebilir.

Tablo 2.2. MEA Bileşenleri ve Görevleri

MEA Bileşenleri	Görevleri
Anot Tabakası	• Yakıt beslemesi ve dağıtılması • Elektron iletimi • Reaksiyon alanından ısıнын uzaklaştırılması • Elektro katalizöre su beslemesi
Anot Katalizör Tabakası	• Anot reaksiyonu için katalizör görevi • Membrana proton iletimi • Elektron geçişi • Su aktarımı • Isı aktarımı
PEM	• Proton iletimi • Suyun taşınması • Elektronik yalıtım
Katod Katalizör Tabakası	• Katod reaksiyonu için katalizör görevi • Reaksiyon alanına oksijen taşınması • Membrandan reaksiyon alanına proton iletimi • Elektron iletimi • Suyun uzaklaştırılması • Isı oluşumu ve uzaklaştırılması
Katod Tabakası	• Oksidant beslemesi ve dağıtılması • Reaksiyon alanına doğru elektron iletimi • Isı uzaklaştırılması • Suyun taşınması

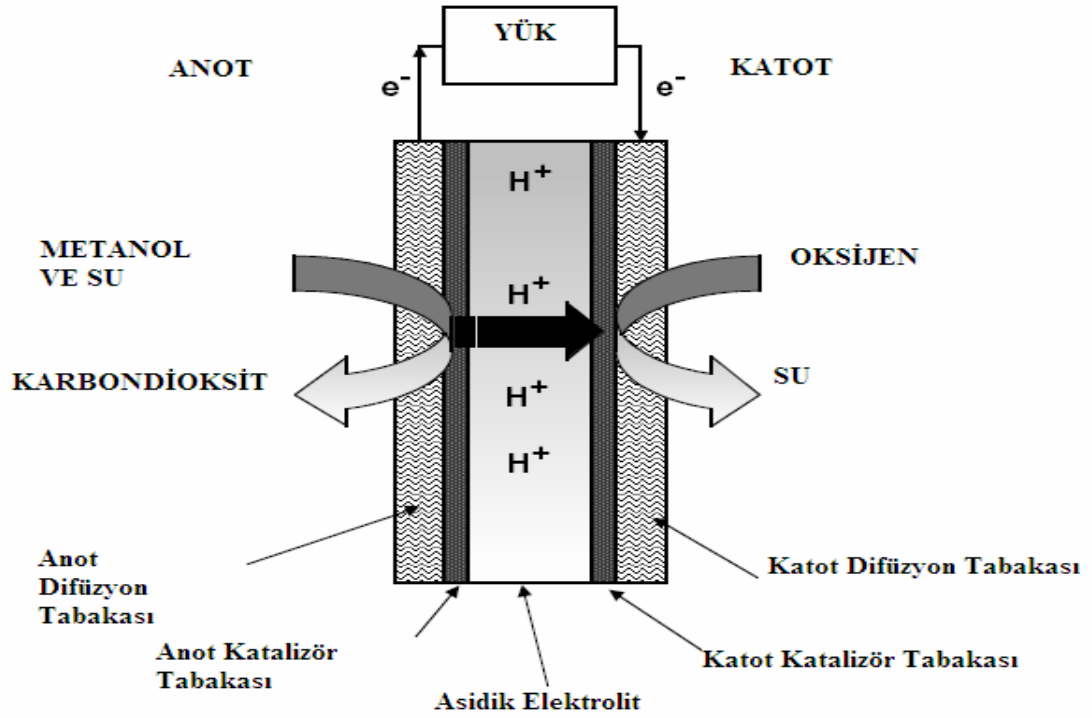
2.3. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri

Doğrudan metanollü yakıt hücreleri (DMFC) 1965'te geliştirilmiştir. Bu yakıt hücrelerinde elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan CO_2 ile reaksiyona girmeyen sulu asit elektrolitler kullanılmıştır. Bu yıllarda, anot tabakasındaki metanol oksidasyonu için, soy metallerin (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) alaşımlarıyla oluşturulan katalizörlerin saf metal katalizörlere oranla daha etkin olduğu gözlemlenmiş ve farklı birleşimlerle hem asit hem de alkali elektrolitlerle çalışmalar yapılmıştır. 1992 yılında, araştırmacılar katı polimer elektroliti geliştirmişler ve bu katı elektroliti doğrudan metanollü yakıt hücrelerinde denemişlerdir. Bu gelişmenin ardından Jet Propulsion Laboratory doğrudan metanollü yakıt hücrelerini Nafion membran ile geliştirmeye başlamıştır.

Doğrudan Metanollü yakıt hücrelerinin sıvı yakıtla çalışması sebebiyle yakıt hücresi çeşitleri arasında kullanım açısından daha ideal olduğu düşünülmektedir. Özellikle de taşınabilir sistemlerde, petrol dağıtım ağı gibi dağıtılabilir olması bir avantaj sağlamaktadır. Yakıt hücresi ile çalışan araçların uygulamalarında doğrudan metanollü yakıt hücreleri geniş bir yer kaplamaktadır. Daha çok ulaşım ve taşınabilir sistemlerde kullanımı amaçlanmaktadır. Ancak metanol dolaşımı ve aşırı gerilim halen yakıt hücresinin performansını engellemektedir. Doğrudan metanollü yakıt hücresi ile ilgili araştırmalar; anot katalizörünün formülünün iyileştirilmesi, membran geliştirilmesi, katot zehirlenmesini engelleyecek katot katalizörü yapımı ve anottan katoda metanol göçü ile oluşan yakıt kayıplarının azaltılması üzerinde odaklanmıştır.

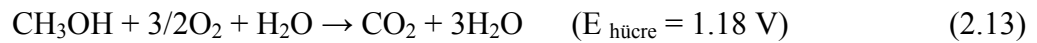
2.3.1. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Uygulama İlkeleri

Doğrudan metanollü yakıt hücresi asidik katı polimer membran eklenmiş hali ile şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. DMFC şematik gösterimi

Metanol ve su anot tabakasında reaksiyona girerek eşitlik (2.11)'de gösterildiği üzere karbondioksit, protonları ve elektronları oluşturur. Anot tabasında ortaya çıkan protonlar polimer elektrolitten katoda doğru göç ederler ve burada oksijen ile reaksiyona girerek eşitlik (2.12)'de gösterildiği gibi su oluştururlar. Anotta ortaya çıkan elektronlar ise serbest enerji taşırlar ve bir dış devre ile taşınarak elektrik enerjisi üretimi için kullanılırlar.



2.3.2. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Yapısı ve Bileşenleri

Doğrudan metanol kullanılan bu yakıt hücrelerinin çalışmalarında en öncelikli sırayı, kullanılan zarın seçiciliği, elektrolit yapısı ve katalizör seçimi almaktadır.

Günümüze kadar yapılan pek çok çalışma sonucunda, doğrudan metanollü yakıt hücrelerinde anotta oksidasyon verimini artırarak yüksek akım yoğunluğu elde edilmesini sağlayan katalizör çeşidinin %50 Platin % 50 Rutenyum karışımı olduğu görülmüştür. [Lamy and Leger, 1999]. Bu etkilerin yanında, katalizörün uzun ömürlü, yüksek verimli ve maliyetin düşürülebilmesi için az miktarda kullanılabilir olması beklenmektedir. Katot yüzeyinde performansı arttıran katalizör çeşidi ise platin katalizörler olmuştur. Bu katalizörler genelde, karbon kömürü ile karıştırıldıktan sonra, elektrot yüzeyine sürülerek, püskürtülerek, preslenerek veya yapıştırılarak uygulanmaktadırlar.

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

Katotta kullanılacak olan katalizörünün yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi, anot katalizörü ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Katot katalizöründen beklenen özellikler; metanol geçişi nedeniyle oluşan oksidasyon ürünlerinin zehirleyici özelliklerine karşı direnç göstermesi, proton oksidasyonunu arttırması, yüksek performansta düşük maliyete sahip olması olarak sıralanmaktadır.

Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'nde kullanılan membranın görevi, hücre içinde iş yapabilecek durumda olan kimyasal potansiyeli oluşturmaktır. Bu potansiyel farkı, iyonların membrandan farklı geçiş hızlarından dolayı meydana gelmektedir. Anotta oluşan protonların membrandan katoda geçişine izin verilirken, metanol moleküllerinin engellenmesi sonucunda hücrede bir termodinamik değişken meydana gelmektedir.

Yakıt hücresinde kullanılan membrandan beklenen özellikler; yüksek sıcaklığa karşı tolerans gösterebilmesi, serbest proton transferine dayanıklı olması, metanol molekülleri gibi diğer kimyasal türlerin geçişine izin vermemesi, fiziksel dayanıklılık

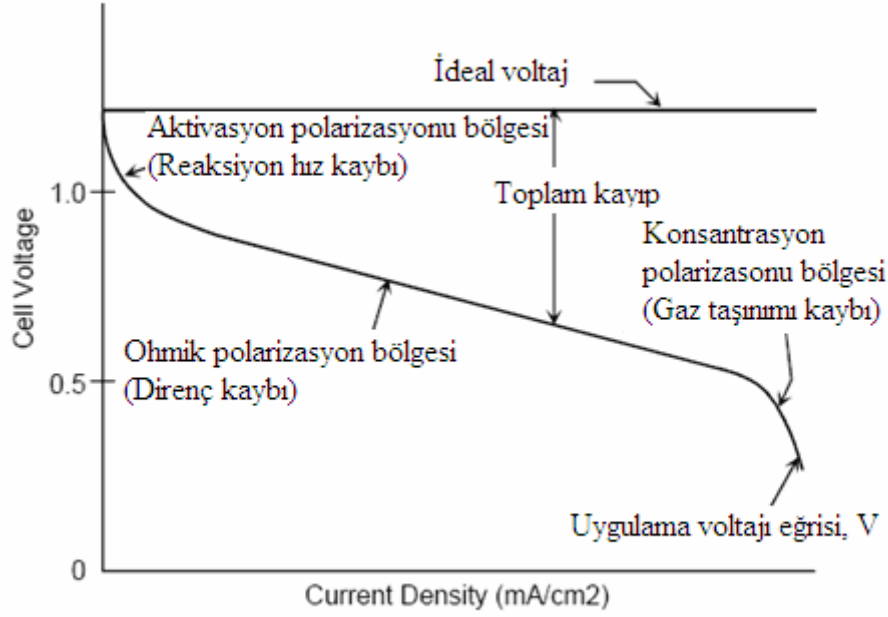
ve ucuzluktur. Günümüzde, membran seçimini ve çalışmalarını zorlaştıran en önemli problem, metanol moleküllerinin membrandan taşınmasıdır. Bu olay doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'nde verimi üç yoldan düşürmektedir. İlk olarak, katot kısmına geçen moleküller işe dönüştürülecek enerjiyi kullanarak okside olarak, enerji kaybına neden olmaktadır. İkinci olarak, protonlarına ve karbon dioksit ayrılacak olan yakıtın azalmasına neden olmaktadır. Son olarak ise, katot tarafındaki karbonların katot katalizörünü zehirlemesi sonucunda katalizörün inaktif hale gelmesine neden olmaktadır.

Polimer elektrolit membran çeşitleri içinden en çok kullanılan ve beklenen tüm özellikleri karşılayan zar çeşidi Nafion'dur [Appleby, 1987]. Her ne kadar kullanımı en yaygın olan malzeme olsa da, metanol geçişine izin vermesi ve maliyetinin yüksek olması önemli dezavantajlarıdır. Bu malzemenin çıkış noktası Teflon olarak bilinen polytetrafloroetilendir. Teflon, hidrofobik bir özelliğe sahiptir. Teflonun sülfolanması sonucunda oluşan Nafion, hidrofilik ve asit özelliğe sahip hale gelmektedir. Oluşan malzeme farklı fazlara sahip olurken, seyreltik asit özelliğine sahip kısımlar kuvvetli hidrofobik özelliğe sahip olmaktadır. Bu özellikler sayesinde H^+ iyonları zar üzerinde hareket edebilmektedirler [Dicks and Larminie, 2000].

2.3.3. Yakıt Hücresi Kinetiği

Termodinamik eşitlikler, reaksiyonları denge olarak tanımlar ve verilen reaksiyon için elde edilebilecek maksimum enerjiyi verir. Dengedeki voltaj yani açık devre voltajı (E_{ocv}) ile kıyaslandığında voltaj, reaksiyonların kinetik sınırlamaları sebebiyle düşer. [Fuel Cell Review 2004]

Eşitlik (2.13)'da gösterildiği üzere yakıt hücresinde %100 voltaj verimi ile 1.18 V gerilim elde edilmektedir. Ancak gerçek hücre potansiyeli Şekil (2.7)'de gösterilen kayıplar neticesinde düşmektedir.



Şekil 2.7. İdeal ve gerçek yakıt hücresi voltajı

Polarizasyon, aşırı potansiyel (overpotential) veya aşırı voltaj (overvoltage) diye de adlandırılan kayıplar (η) başlıca üç kaynaktan meydana gelir: birincisi aktivasyon polarizasyonu (η_{act}), ikincisi ohmik polarizasyon (η_{ohm}), üçüncüsü ise konsantrasyon polarizasyonudur (η_{conc}). Bu kayıplar sonucunda hücre voltajı ideal voltajdan daha az çıkar. Polarizasyon Eşitlik (2.14) ile gösterildiğinde; E_{OCV} açık devre voltajını, E_T ise hücrenin terminal voltajını belirtir.

$$\eta = E_{OCV} - E_T \quad (2.14)$$

Aktivasyon polarizasyonu doğrudan anot ve katodun iç yüzeylerinde, elektrot ve elektrolitteki elektrokimyasal reaksiyonların hızlarına bağlıdır ve düşük akım yoğunluklarında baskındır. Aktivasyon polarizasyonu sonucu voltaj düşüşü Butler-Volmer eşitliği veya Tafel denklemi ile ifade edilebilir. Butler-Volmer eşitliği:

$$i = i_o \exp (\alpha F \eta / RT) - \exp ((1- \alpha) F \eta) / RT \quad (2.15)$$

i_o ; değiş-tokuş akım yoğunluğu, $i_o = k_o Fa$, (k_o reaksiyon hız sabiti, a ; reaktanların üretme aktivitesi), η polarizasyon, α ise transfer katsayısıdır.

Tafel denklemi ise;

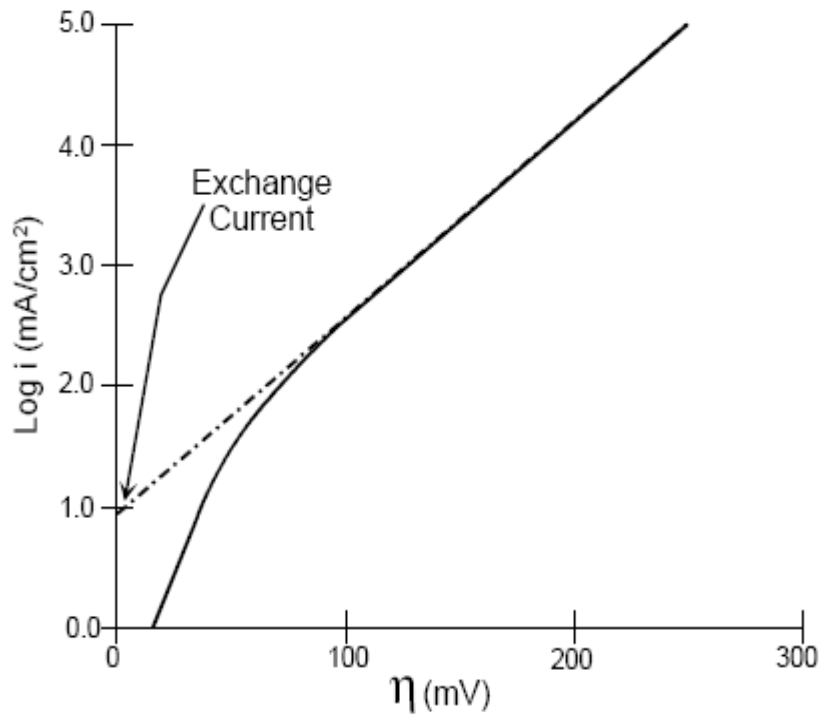
$$\eta_{\text{act}} = (RT/\alpha nF) \ln (i/i_0) \quad (2.16)$$

Şekil (2.8)'de gösterilen Tafel bölgesi aktivasyon polarizasyonunu daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Bunlar, değiş-tokuş akım yoğunluğunu ve transfer katsayısını ölçmede kullanılır.

Tafel eşitliği daha basit şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\eta_{\text{act}} = a + b \ln i \quad (2.17)$$

Burada; $a = (-RT/\alpha nF) \ln i_0$ ve $b = RT/\alpha nF$ Tafel eğimi'dir.



Şekil 2.8. Tafel bölgesine bir örnek

Ohmik kayıplar ise, elektrolitteki iyon akışı direncinden ve elektrot boyunca elektron akışı direncinden dolayı meydana gelir. Elektrolit boyunca baskın ohmik kayıplar elektrot ayırımının düşmesi ve elektrolitin iyonik iletkenliğinin düşmesi ile azalır. Ohmik kayıplar Ohm kanunu ile Eşitlik (2.18)'de olduğu şekilde ifade edilebilir.

$$\eta_{ohm} = iR \quad (2.18)$$

Bu eşitlikte i hücredeki akım, R ise toplam hücre direncidir (elektronik, iyonik ve temas direnci).

Elektrokimyasal reaksiyon ile bir reaktan tüketildiğinde, akışkan kütlesinin başlangıç konsantrasyonundaki yetersizlikten dolayı bir potansiyel kaybı vardır. Konsantrasyon polarizasyonunun oluşmasında, elektrot gözeneklerinde gaz difüzyonunun yavaşlığı ile ürünlerin ve reaktanların elektrolitte difüzyonu sebep olarak sıralanabilir. Konsantrasyon polarizasyonu Eşitlik (2.19)'da gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$\eta_{conc} = (RT/nF) \ln (1 - i/i_L) \quad (2.19)$$

Denklemdaki i_L ifadesi limit akım değerini ifade etmektedir. [Fuel Cell Handbook 2002, Fuel Cell Review 2004]

2.3.4. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Modellenmesi

Kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik ve ısı enerjisine çeviren birçok yakıt hücresi çeşidi arasında PEM yakıt hücreleri son yıllarda araştırmacıların oldukça dikkatini çekmektedir. PEM yakıt hücrelerinin başlıca iki türü olan hidrojen PEM yakıt hücreleri ve Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri (DMFC) yüksek verim elde edilmesini sağlamakla beraber, aynı zamanda geleneksel elektrik jeneratörleri için yer değişim kolaylığı sağlamaktadır. [Shaoduan and Luke, 2005]

Yakıt hücresi sisteminin geliştirilebilmesi için sistem optimizasyon ve analizi oldukça önemlidir. Matematiksel modellere ve simülasyona, yakıt hücresi ve parçalarının optimum tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt hücreleri sistemlerini anlamak ve performansını geliştirmek için, hücre voltajının akım ile değişimini tahmin eden birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Son zamanlara nümerik modeller ve bilgisayar simülasyonları yakıt hücresinin anlaşılmasında iyi performans

göstermektedirler. Nümerik modeller PEM yakıt hücrelerinin iç detaylarını iyi tahmin etse de, çok fazla miktarda hesaplama yapılmasını gerektirmektedir. [Jemei et al, 2003]

Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri (DMFC) teorik olarak Hidrojen yakıt hücrelerine yakın bir performans gösterebilmektedir ama bu teorik performansa ulaşabilmek için metanolün tam yükseltgenmesi ve metanol geçişinin engellenmesi gerekmektedir. Metanolu daha iyi yükseltgeyecek bir katalizör ve daha az metanol geçiren bir membran üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bunların yanında akım yoğunluğuna bağlı olan hücre potansiyelinin karakteristiği, üç ana kaybın sonucudur. Aktivasyon kaybı, ohmik kayıp ve konsantrasyon kaybı. Verilen fiziksel şartlarda, bu üç kayıp operasyon koşullarına, hücre sıcaklığı, reaktan basıncı, nem ve konsantrasyona bağlıdır. [Won-Yong Lee et al, 2004]

Yakıt hücresinin performansı; sıcaklık, anot besleme hızı, metanol derişimi, katot besleme hızı, oksidant bileşimi (hava veya saf oksijen) anot ve katot tarafı basınçlar, anot-katot katalizör türü- niteliksel ve niceliksel bileşimleri, membran türü ve bileşimi, anot-katot difüzör malzeme türü ve bileşimi, hücre yapım malzemesi, hücrenin genel geometrisi yanında özellikle kanal tasarımı gibi bir çok parametreye bağlıdır. Metanol yakıt hücrelerini incelemek için çeşitli test sistemleri tasarlanmaktadır. Bu tasarlanan test sistemlerinde yakıt hücresinden alınacak, güç, akım ve gerilim değerlerinin sisteme girilerek parametrelerle nasıl değiştiğini anlayabilmek için metanol yakıt hücresi test sisteminin matematiksel modeli çıkarmaktadır. [Civaş ve Bayramoğlu,2006]

Matematiksel modeller yakıt hücrelerinin optimizasyonu ve dizaynı için önemli araçlardır. PEM yakıt hücrelerinin tasarım yaklaşımlarına ilaveten, her iki PEM yakıt hücresi türü için de, taşınım ve elektrokimyasal olayları incelemek için birçok fiziksel model geliştirilmiştir. Ancak bu fiziksel modeller sistemi tanımlamada tam olarak yeterli değildir. Üstelik bu fiziksel modellerle yakıt hücrelerinde, girdi-çıkı ilişkisi, Pt beslemesinin etkisi, nem ve diğer tasarım ile uygulama koşullarının performans üzerindeki etkileri tam olarak yansıtılamamıştır. [Shaoduan and Luke, 2005]

Fizikokimyasal olayların bilgilerine dayanarak yapılan karmaşık modeller, uygulama parametrelerini çok iyi bilmeyi gerektirir. Ancak birçok durumda yakıt hücrelerinin parametreleri tanımlamak çok güçtür. Modelleme yaparken tüm yakıt hücresi sistemine yardımcı parametrelerin hesaba katılması gerekmektedir. Bu sebeple gerçek sistemin değerlendirilebilmesi için, çok fazla sayıda parametreye dayalı çok karmaşık seviyedeki modeller oluşturulmalıdır. Ancak bazı parametrelerinin deneysel olarak kolayca ölçülememektedir. Örneğin yakıt hücresini sisteminin davranışları büyük ölçüde gaz akış kanallarının şekline ve ölçülerine bağlıdır. Bu iki parametre gaz difüzyon (O_2 , H_2 ve H_2O) kabiliyetini ve dolayısıyla elde edilebilecek güç seviyesini düşürebilir veya yükseltebilir. Başka bir önemli örnek ise membranın çok ıslak veya kuru olmasıdır. Her iki koşulda da elde edilebilecek elektriksel güç hızla düşmektedir. Analitik modeller düşünülürken, kullanıcılar yakıt hücresi sistem parametrelerini bilmeseler bile hesaba katmak zorundadırlar. [Jemei et al, 2003]

Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri üzerini kinetik çalışma yapılırken, anot ve katot için farklı modeller kullanılmaktadır. Bunun için Tafel modeli, Butler-Volmer modeli veya geliştirilmiş başka ampirik modeller kullanılabilir. Bu modeller arasında sistem varsayımları ile uyuşan ve aşırı potansiyel kayıplarını da göz önüne alacak bir amprik model kullanmak mümkün değilse, Butler-Volmer modeli kullanılabilir. Tafel denklemi diğerlerinin yanında daha basit ve aşırı potansiyelleri ifade etmek için yetersiz kalmaktadır. Bu modeller seçilirken metanol yükseltgenmesi için CO türleri oluşumu kesinlikle göz ardı edilmemelidir. CO türleri oluşumunu göz ardı eden modeller gerçekçilikten oldukça uzaktır.

Modern lineer olmayan metotlar hem sistem hem de bileşenleri için bu zor basamakları aşmada oldukça etkili araçlardır. [Jemei et al, 2003]. Bu sebeple son zamanlarda, Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık metotları PEM Yakıt Hücrelerinin voltajını tahmin uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmüştür. [Ogaji S.T.O. et al, 2005]. Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık metotları, sistemin lineer olmayan parametrelerini içeren ve kullanımı çok basit olan parametrik olmayan tekniklerdir. Her iki teknikte de verilen bilgiler ile sistemi tanımlamada çok kullanışlıdır. Çok fazla miktarda hesaplama yapmayı gerektirmeden sistemin

davranışlarını tahmin etmede birer ampirik model gibi kullanılabilirler. [Won-Yong Lee et al, 2004]

2.3.5. Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Uygulama Alanları

Günümüzde, minyatür ölçekli yakıt pilleri üzerinde hızla gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda, mobil iletişim araçlarında yakıt pillerinin kullanımının artacağı görülmektedir. Yüksek çalışma sıcaklığına dayanıklılık, düşük ağırlık ve şarj kolaylığı minyatür yakıt pillerini geleneksel pillere göre daha avantajlı kılmaktadır.

Diz üstü bilgisayarlar, cep telefonları ve el kameralarının çalışma özellikleri göze alındığında, çalışma sıcaklığı, yakıt imkânı ve hızlı cevap verme özellikleri önemli değişkenler olarak gözlenmektedir. Bu kriterleri karşılayan yakıt hücresi tipi Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'dir.

Doğrudan sıvı metanol kullanımı, geleneksel pillerde elektrikle şarj zorunluluğuna karşı bir avantajdır. Düşük sıcaklıkta, düşük güç yoğunluğu elde etmek için kullanılan platin katalizörün yüksek maliyeti ise Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'nde büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Maliyette oluşan problemler çözüldüğü zaman, gelecekte Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'nin taşınabilir düşük ve orta güç ihtiyacına sahip sistemlerde kullanımının artacağı düşünülmektedir. Günümüzde, cep telefonları üzerinde yapılan çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri'nde sürdürülürken, diz üstü bilgisayar uygulamaları Alman bilim adamları tarafından yürütülmektedir. [Çetinkaya ve Karaosmanoğlu]

Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri teknolojisi oldukça yeni bir yakıt hücresi çeşidi olduğundan dolayı, yüksek güç sistemleri olan taşıt, jeneratör, sabit güç üretim sistemi gibi uygulama alanlarındaki bu yakıt hücresi ile ilgili çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bu uygulama alanlarından biri olan taşıt uygulamalarında Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri kullanımının artacağı düşünülmektedir. Yakıt hücresinin çevre dostu özelliği, metanolün depolanmasının kolaylığı, yüksek sıcaklıklarda yüksek verim elde etmenin kolaylığı, gelecekte Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'nin taşıt uygulamalarında önemli bir yere sahip olmasına neden

olacaktır. Ballard Power Systems, Honda, Nissan, Volkswagen, Yamaha, Ford, Daimler Chrysler, Cinergy firmaları Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri ile çalışan taşıt uygulamaları üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir.[Smith and Angel, 2003]

2.4. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları, insan beyninin en önemli özelliği olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri herhangi bir yardım almadan kendiliğinden gerçekleştirmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Yapay sinir ağlarının çalışma mantığı, insan sinir sistemine benzer şekilde geçmiş verilerden bir bilgi birikimi edinerek benzer durumlar için bir genelleme yapmak ve bu genelleme sayesinde eksik verilerin olduğu daha karmaşık durumlar için sonuç üretmektir.

Yapay sinir ağı, günlük hayatta karşılaştığımız gerçek sistemlerin biyolojik sistemlere benzer şekilde gösterimlerine olanak sağlayan, tabakalar biçiminde düzenlenen basit işlem elemanı gruplarından oluşan bir yapıdır. Her bir tabaka, farklı ağırlık değerlerine sahip olan bağlantılar aracılığıyla iletişimde bulunduğu belli sayıda işlem elemanı içermektedir.

Yapay sinir ağları öğrenerek karar verme prensibi üzerine kurulmuşlardır. Öğrenme zeki sistemlerin bilgi, yetenek ve tecrübelerini arttırma olayı olarak düşünülebilir. Daha genel şekli ile öğrenme, sistemlerin aynı veya benzeri işlemleri yaptıklarında, o işlem veya işlemleri bir önceki yapıldıkları şekilden daha verimli ve etkin olarak gerçekleştirecek değişiklikleri buluşturma süreci olarak tanımlanır. Ortaya atılan öğrenme metot ve tekniklerinin sayısı her geçen gün artmaktadır.

Yapay sinir ağları hakkındaki çalışmalar aslında insan beyninin nasıl çalıştığını ve öğrenme olayını nasıl gerçekleştirdiğini merak etme sonucunda ortaya çıkmıştır. Matematiksel olarak ilk yapay sinir ağları 1943'te McCulloch ve Pitts tarafından açıklanmıştır. İlk uygulama ise Frank Rosenblatt tarafından yapılan Perceptron ağı ve öğrenme kuralıdır. Bu ilk yapılan uygulamalarda öğrenme algoritmaları kompleks ağları eğitmede yeterli olamamıştır. Son yıllarda çok sayıda yapay sinir ağı modeli

geliştirilmiş ve sayısız uygulamalar yapılmıştır. İnsan beyninin nasıl çalıştığı günümüzde de henüz bilinmemektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde bilgisayarların öğrenebildikleri ve başarılı sonuçlar üretebildikleri görülmektedir. Bilhassa çok sayıda bilginin değerlendirilmesini gerektiren olaylarda yapay sinir ağları etkin olarak kullanılmaktadır.

2.4.1. YSA nın Özellikleri

Yapay sinir ağlarını hesaplama ve bilgi işleme gücünü, paralel dağılmış yapısından, öğrenbilme ve genelleme yeteneğinden aldığı söylenebilir. Genelleme, eğitim ya da öğrenme sürecinde karşılaşılmayan girişler için de yapay sinir ağlarının uygun tepkileri üretmesi olarak tanımlanır. Bu üstün özellikleri, yapay sinir ağlarının karmaşık problemleri çözebilme yeteneğini gösterir. Günümüzde birçok bilim alanında yapay sinir ağları, aşağıdaki özellikleri nedeniyle etkin olmuş ve uygulama yeri bulmuştur. Yapay sinir ağlarının genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Doğrusal olmama
- Öğrenme
- Genelleme
- Uyarlanabilirlik
- Hata toleransı

Yapay sinir ağlarının temel işlem elemanı olan düğüm noktaları (hücre) doğrusal olmadığından bu düğüm noktalarının birleşimlerinden oluşan yapay sinir ağı da doğrusal değildir. Bu özellikten dolayı yapay sinir ağlarının kullanımı tercih edilmektedir ve doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde en önemli araç olmuştur.

Yapay sinir ağlarının arzu edilen davranışı gösterebilmesi için amaca uygun olarak ayarlanması gerekir. Bu, hücreler arasında doğru bağlantıların yapılması ve bağlantıların uygun ağırlıklara sahip olması gerektiğini ifade eder. Yapay sinir ağlarının karmaşık yapısı nedeniyle bağlantılar ve ağırlıklar önceden ayarlı olarak verilemez ya da tasarlanamaz. Bu nedenle yapay sinir ağları, istenen davranışı

gösterecek şekilde ilgilendiği problemten aldığı eğitim örneklerini kullanarak problemi öğrenmelidir.

Yapay sinir ağları, ilgilendiği problemi öğrendikten sonra eğitim sırasında karşılaşmadığı test örnekleri için de arzu edilen tepkiyi üretebilir. Örneğin, karakter tanıma amacıyla eğitilmiş bir yapay sinir ağları, bozuk karakter girişlerinde de doğru karakterleri verebilir ya da bir sistemin eğitilmiş modeli, eğitim sürecinde verilmeyen giriş sinyalleri için de sistemle aynı davranışı gösterebilir.

Yapay sinir ağları, ilgilendiği problemdeki değişikliklere göre ağırlıklarını ayarlar. Yani, belirli bir problemi çözmek amacıyla eğitilen yapay sinir ağları, problemdeki değişimlere göre tekrar eğitilebilir, değişimler devamlı ise gerçek zamanda da eğitime devam edilebilir. Bu özelliği ile uyarlamalı örnek tanıma, sinyal işleme, sistem tanılama ve denetim gibi alanlarda etkin olarak kullanılır.

Çok sayıda hücrenin çeşitli şekillerde bağlanmasından oluştuğundan paralel dağılmış bir yapıya sahiptir ve ağına sahip olduğu bilgi, ağıdaki bütün bağlantılar üzerine dağılmış durumdadır. Bu nedenle, eğitilmiş bir yapay sinir ağlarının, bazı bağlantılarının hatta bazı hücrelerinin etkisiz hale gelmesi, ağına doğru bilgi üretmesini önemli ölçüde etkilemez. Bu nedenle, geleneksel yöntemlere göre hatayı tolare etme yetenekleri son derece yüksektir.

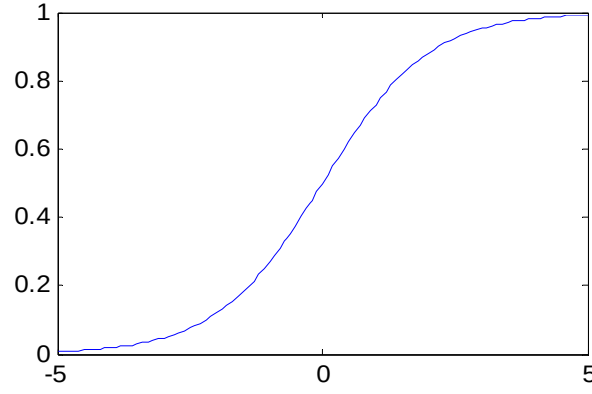
<http://ekitaplar53.googlepages.com/YapaySinirAglari>]

2.4.2. YSA‘nın Yapısı

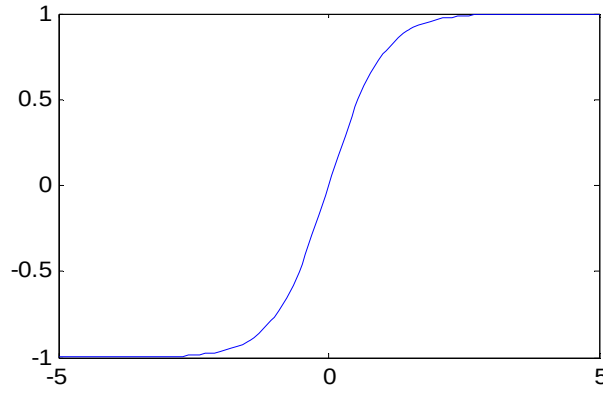
Yapay sinir ağları biyolojik sinir ağları gibi hücrelerden veya proses elemanlarının bir araya gelmesinden oluşur. Yapay sinir ağlarında bilgi, düğüm adı verilen birbirlerine bağlı elemanlar aracılığıyla işlenir. Bu düğümler tabakalaşık yapıdadırlar. Temel bir ağ, bir girdi tabakası, bir veya birden fazla gizli tabaka ve çıktı tabakasından oluşmaktadır. Bilgi bir tabakadan diğerlerine düğümler üzerinden iletilir. Girdi tabakası, verilerin ağa girdiği tabakadır. Gizli tabaka ve çıktı tabakası düğümlerden gelen veriyi belli bir ağırlıkla çarparak toplar. İşlenmiş veri belli bir

transfer fonksiyonu ile çarpılarak bir sonraki tabakaya aktarılır. Transfer fonksiyonu düğümdeki çıkış sinyalini 0 ve 1 veya -1 ve 1 değerleri arasında normalize eder.

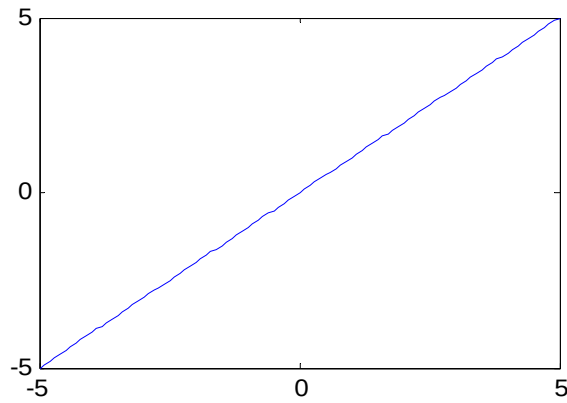
En çok kullanılan transfer fonksiyonları aşağıda verilmiştir:



Şekil 2.9. $\text{Logsig} = 1 / (1 + e^{-x})$ transfer fonksiyonu



Şekil 2.10. $\text{Tansig} = 2/(1+e^{-2x})-1$ transfer fonksiyonu



Şekil 2.11. Purelin transfer fonksiyonu

Çıktı tabakasında bir değer elde edilinceye kadar sinir ağıının eğitimi devam eder. Eğitim boyunca çıkış tabakasındaki değerler olması beklenen değerlerle karşılaştırılır ve hatalar hesaplanır. Kabul edilebilir bir hata seviyesine ulaşabilmek için geri besleme ile ağırlıklar değiştirilerek işlemler tekrarlanır.

Yapay sinir ağıları, hücrelerin birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmalarından oluşur. Hücre çıkışları ağırlıklar üzerinden diğer hücelere ya da kendisine giriş olarak bağlanabilir ve bağlantılarda gecikme birimi de kullanılabilir.

Bir yapay sinir ağıının sahip olduğu bilgi proses elemanları arasındaki bağlantı hatları üzerinde saklanır ve ağırlıklar vasıtasıyla gösterilir. Ağ olaylar hakkında girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi elde bulunan mevcut örneklerden genellemeler yaparak öğrenir ve bu genelleme ile yeni oluşan veya ortaya çıkan daha önce hiç görülmemiş olaylar hakkında karar verir; Ağa bir örnek olay gösterildiğinde girdi tabakalarından alınıp ara tabakalarda işletilerek ağıın o olay hakkında ürettiği sonuç çıktı tabakasından sunulur. Bu bilgi işleme ağıın sahip olduğu tecrübeye göre bilginin ara tabakalarda çağrıştırılması ile gerçekleştirilir. Bu çağrıştırma olayı modelden modele değişmektedir. Mesela ara tabakalardaki proses elemanları sahip oldukları bağlantı ağıları ile kendi kararlarını üretir ve çıktı tabakasındaki proses elemanlarına gönderir. Çıktı tabakasındaki proses elemanları da yine ilgili ağırlıkları kullanarak ağıın en son kararını oluşturur. Bu ağırlıklar tıpkı, ilgili olayın belirli özelliklerini hafızada saklayan elemanlar gibi düşünülebilir. Bilgi işleme ise bir olay gösterildiğinde hafızadan ilgili özellikleri çağırarak ve bunlar ile ilgili bilgileri birlikte analiz ederek karar vermek şeklinde yorumlanabilir.

Ağıın zeki davranış gösterebilmesi için sahip olduğu bütün ağırlıkların ilgili problemde öğrenilmesi istenen özellikleri genelleştirecek şekilde optimum değerler sahip olması gerekir. Bu doğruluk ne kadar artarsa ağıın genelleme kabiliyeti dolayısıyla zeki davranışı da o kadar artar. Optimum ağırlık değerleri bir öğrenme kuralına göre tespit edilir. Çoğunlukla bağlantılara başlangıç değerleri olarak rasgele ağırlıklar atanır. Ve bu ağırlıklar elde örnekler incelendikçe bir kurala göre değiştirilerek optimum ağırlık değerleri bulunmaya çalışılır. Kısaca belirtmek gerekirse öğrenme kuralları bir proses elemanının örnekleri gördükçe kazandığı

tecrübeye göre ilgili bağlantı ağırlıklarının nasıl değiştirileceğini belirleyen algoritmalarıdır. Farklı öğrenme stratejilerinden aşağıda bahsedilmiştir.

Öğretmenli öğrenmede (supervised learning) dışarıdan bir öğretmenin sinir ağının öğrenmesine müdahalesi söz konusudur. Öğretmen sinir ağının, ilgili girdi için üretmesi gereken sonucu sinir ağı sistemine söyler. Yani girdi-çıkı ikilisinden oluşan örnekler sunulur. Bu ikili ağın öğrenmesi gereken özellikleri temsil eder. Ağ girdi kısmını alır ve o anki bağlantı ağırlıklarının temsil ettiği bilgi ile bir çıktı oluşturur. Bu çıktı, olması gereken çıktı ile mukayese edilir ve aradaki hata tekrar ağı aktararak ağırlıklar bu hatayı azaltacak şekilde değiştirilirler.

Takviyeli öğrenmede de yine bir öğretmene ihtiyaç vardır. Öğretmenli öğrenme stratejisinden farkı ise bu durumda öğretmenin ağın üretmesi gereken sonuç yerine onun ürettiği sonucun sadece doğru veya yanlış olduğunu söylemesidir. Bu ise ağı bir takviye sinyalinin gönderilmesi ile gerçekleştirilir. Bu strateji ilgili örnek için beklenen çıktının oluşturulmadığı durumlarda çok faydalıdır.

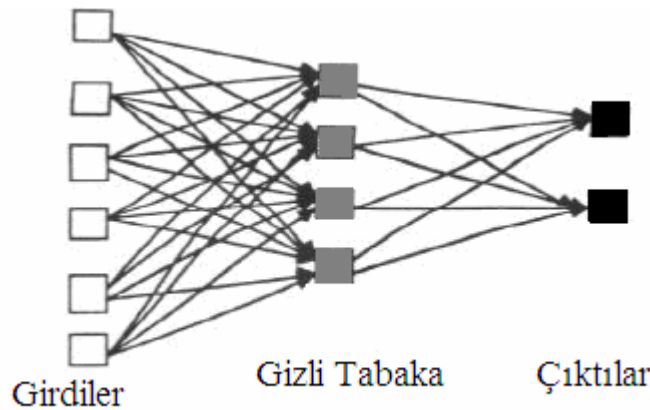
Öğretmensiz öğrenmede (unsupervised learning) ise hiçbir öğretmene ihtiyaç yoktur. Onun için çoğu zaman buna “kendi kendine organize olma” da denilmektedir. Ağ kendisine gönderilen örnekleri alır ve belli bir kritere göre sınıflandırır. Bu kriter önceden bilinmeyebilir. Ağ kendi öğrenme kriterlerini kendisi oluşturmaktadır.

2.4.2.1. Geri Beslemeleri YSA

Geri beslemeli (feedback) yapay sinir ağlarında, en az bir hücrenin çıkışı kendisine ya da diğer hücrelere giriş olarak verilir ve genellikle geri besleme bir geciktirme elemanı üzerinden yapılır. Geri besleme bir katmandaki hücreler arasında olduğu gibi tabakalar arasındaki hücreler arasında da olabilir. Bu yapısı ile geri beslemeli sinir ağı, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterir. Dolayısıyla, geri beslemenin yapıldığı şekline göre farklı yapıda ve davranışta geri beslemeli sinir ağları yapıları elde edilebilir.

2.4.2.2. İleri Beslemeli YSA

İleri beslemeli (feed-forward) yapay sinir ağlarında, hücreler tabakalar şeklinde düzenlenir ve bir tabakadaki hücrelerin çıkışları bir sonraki tabakaya ağırlıklar üzerinden giriş olarak verilir. Giriş tabakası, dış ortamlardan aldığı bilgileri hiçbir değişikliğe uğratmadan orta (gizli) tabakadaki hücrelere iletir. Bilgi, gizli tabaka ve çıktı tabakalarında işlenerek ağ çıkışı belirlenir. Bu yapısı ile ileri beslemeli ağlar doğrusal olmayan statik bir işlevi gerçekleştirir. İleri beslemeli 3 tabakalı yapay sinir ağlarının, gizli tabakada yeterli sayıda hücre olmak kaydıyla, herhangi bir sürekli fonksiyonu istenilen doğrulukta yaklaştırabileceği gösterilmiştir. En çok bilinen geriye yayılım (back propagation) öğrenme algoritması, bu tip yapay sinir ağların eğitiminde etkin olarak kullanılmakta ve bazen bu ağlara geriye yayılım ağları da denmektedir. Şekil 2.10'da gizli ve çıktı tabakaları olmak üzere 2 tabakalı ileri beslemeli yapay sinir ağları yapısı verilmiştir. (girdi tabakasında herhangi bir işlem yapılmadığından genelde hesaba katılmamaktadır).



Şekil 2.12. İleri beslemeli YSA modeli

İleri beslemeli yapay sinir ağları genellikle geri yayımlı bir yapıdadır. Karmaşık verilerin sınıflandırılmasında kullanılan etkin yapay sinir ağı modellerinden birisi Parker, Rumelhart McClelland tarafından geliştirilen geri yayılım ağıdır. İlk uygulamaları yazılı metinden söz sentezi, robot kollarının kontrolüdür. Sınırları ise denetimli eğitim giriş ve çıkış örneklerinin çok sayıda olmasıdır. Geri yayımlı yapay sinir ağları günümüzde en yaygın kullanılan, öğrenimi kolay ve sonuçları etkin bir yapay sinir ağı çeşididir.

Geri yayılım algoritması hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayımlı öğrenme kuralı ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir tabakadaki ağırlıkları yeniden hesaplamak için kullanılmaktadır. Bir geri yayımlı ağ modelinde giriş, gizli ve çıkış olmak üzere 3 tabaka bulunmakla birlikte, problemin özelliklerine göre gizli tabaka sayısını arttırabilmek mümkündür.

2.4.3. YSA Uygulama Alanları

Yapay sinir ağları, ilgilenilen nesne hakkında hemen hemen hiç bilgi olmaması ya da çok az bilgi olması, bu nesnenin parametrelerinin ve durumunun matematiksel olarak ya da kuralla dayalı olarak tanımlanamaması koşullarında ya da alışılmış işlemcilerle çözümlenemeyen problemlerin varlığında tercih edilen bir yöntemdir.

Yapay sinir ağlarının uygulamaları her geçen gün daha geniş bir alana yayılmaktadır. Yapay sinir ağlarını n geleneksel ve klasik hesaplama yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar ürettiğine dair açıklamaların olduğu alanların bazılarını şöyle sıralamak mümkündür:

-Tıp: EEG ve ECG gibi tıbbi sinyallerin analizi, kanserli hücrelerin analizi, protez tasarımı, transplantasyon zamanlarının optimizasyonu ve hastanelerde giderlerin optimizasyonu v.s gibi uygulama yeri bulmuştur.

-Savunma Sanayi: Silahların otomasyonu ve hedef izleme, nesneleri/görüntüleri ayırma ve tanıma, yeni algılayıcı tasarımı ve gürültü önleme v.s gibi alanlara uygulanmıştır.

-Haberleşme: Görüntü ve veri sıkıştırma, otomatik bilgi sunma servisleri, konuşmaların gerçek zamanda çevirisi v.s gibi alanlarda uygulama örnekleri vardır.

-Üretim: Üretim sistemlerinin optimizasyonu, ürün analizi ve tasarımı, ürünlerin (entegre, kağıt, kaynak v.s.) kalite analizi ve kontrolü, planlama ve yönetim analizi v.s. alanlarına uygulanmıştır.

-Otomasyon ve Kontrol: Uçaklarda otomatik pilot sistemi otomasyonu, ulaşım araçlarında otomatik yol bulma/gösterme, robot sistemlerin kontrolü, doğrusal olmayan sistem modelleme ve kontrolü, elektrikli sürücü sistemlerin kontrolü v.s. gibi yaygın bir uygulama yeri bulmuştur.

2.5. Bulanık Mantık

Matematik ve bilimde görülen çeşitli paradigma değişiklikleri arasında belirsizlik kavramı en dikkat çekici olanıdır. Bilimde, belirsizliği istenmeyen bir durum olarak gören ve mümkün olan tüm durumlarda kaçınılması gerektiğinde ısrar eden geleneksel anlayışa karşı olarak, belirsizliği tolere eden ve bilimde bundan kaçınılmasının mümkün olmadığını iddia eden alternatif bir bakış açısı ortaya konmuştur. Araştırmacılar tarafından yapılan incelemeler sonucu belirsizliğin öneminin anlaşılması, geleneksel anlayıştan belirsizliği temel alan modern anlayışa geçişi sağlayan dönüşümü başlatmıştır. 1965'te Lütü Askerzade tarafından yayımlanan makale modern anlamda Bulanık Mantık kavramının değerlendirilmesinde önemli bir nokta olarak kabul edilmiştir. Askerzade, bu makalede kesin olmayan sınırlara sahip nesnelerin oluşturduğu bulanık küme teorisini ortaya koymuştur. [Klir ve Yuan, 1995]. Bulanık küme üzerine yapılan araştırmalar ortaya çıktığı günden bu yana hızla büyümüştür. Oluşturduğu kavramsal çerçeve sonuçları ve sonuçları itibarıyla şu anda geniş bir perspektife sahiptir. Uygulama alanlarının genişliği ve bu alanlarda oluşturduğu sonuçların etkisi bakımından bulanık küme teorisi bugün bilimsel çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. [Şen, 2001]

Bulanık mantık genel olarak insanın düşünüş şeklini örnek almaktadır. Dolayısıyla bu mantığın küme yapısında kullanılan elemanlar insan mantığına çok yakın olan elemanlardır. Bulanık matematiğin en önemli özelliği klasik matematiğin sağladığından daha fazla ifade edilebilir durum yaratması ve doğal dildeki ifadelere daha uygun temsiller sağlamasıdır.

Günümüzde bulanık mantıkla ilgili birçok çalışma yapılmakta ve bu alandaki çalışmaların uygulama alanı bulunmaktadır. Özellikle lineer olmayan ve çok giriş çıkışa sahip karmaşık sistemlerin kontrolünde bulanık mantık büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bulanık mantığın sağladığı en büyük fayda ise insana özgü tecrübe ile öğrenme olayının kolayca modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine olanak tanınmasıdır. [Müezzinoğlu, 1983]

Bulanık mantık ile matematik arasındaki temel fark bilinen anlamda matematiğin sadece aşırı uç değerlerine izin vermesidir. Bu çerçevede, klasik matematiksel yöntemlerle karmaşık sistemleri modellenmesi ve kontrolü zordur. Bulanık mantık kişiyi bu zorunluluktan kurtarır ve daha niteliksel bir tanımlama olanağı sağlar. Mesela, havada "SO₂ konsantrasyonu $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dür" yerine sadece "havada SO₂ konsantrasyonu çok yüksektir" demek bir çok uygulama için yeterli bir veridir. Böylece önemli ölçüde bir bilgi indirgemesi söz konusu olacak ve matematiksel bir tanımlama yerine daha kolay anlaşılabilen niteliksel bir tanımlama yapılabilecektir. [Patyra and Mlynek, 1996].

Bulanık çıkarım (inference) , girdi vektörü x 'teki değerleri yorumlayan ve "IF-THEN" bulanık kurallar yardımıyla çıktı değerlerini atayan bir metottur:

$$\begin{aligned} \text{IF } (x \text{ is } A) \quad \text{THEN} \quad (y \text{ is } B) & \quad (2.20) \\ \text{EĞER } (x \text{ } A \text{ dir) O ZAMAN } (y \text{ } B' \text{ dir.)} \end{aligned}$$

Buradaki A ve B değerleri bulanık kümelerin düşük ve yüksek gibi sınıflandırmalardır. Her bir bulanık küme, her bir elementi 0 ile 1 arasında bir değere eşleştiren uygun bir üyelik fonksiyonu ile belirlenir. Bir kuralın IF ve THEN bölümleri, AND ve OR gibi Boolean operatörleri ile bağlanmış birçok bölüm içerebilir.

Bir bulanık çıkarım sistemi aşağıdaki parçalardan oluşur:

- Bulanık kurallar seti,
- Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarını açıklayan bir veri tabanı
- Çıkarım metodunu uygulayan bir mantık mekanizması.

Değişik Bulanık çıkarım sistemleri mevcuttur. Proses kontrolde yaygın kullanılan bir tipi Mamdani çıkarım sistemidir. Tahmin ve öngörü kullanım amaçlarına yönelik veri tabanlı bulanık modelleme için, Tagaki-Sugeno sistemi daha elverişlidir. İki girdi değişkenli (x_1, x_2) i 'inci kural için 1. mertebe doğrusal Sugeno modeli şöyle örneklendirilebilir;

$$\text{EĞER } (x_1 \text{ } X_{1,i} \text{ dir) VE } (x_2 \text{ } X_{2,i} \text{ dir) OHALDE } y_i = p_{i,0} + p_{i,1}x_1 + p_{i,2}x_2 \quad (2.21)$$

Burada x değerleri girdileri belirtmekte, X değeri her bir sınıflandırmanın benzeri olan bulanık setleri simgelemekte ve p_i değeri de ayarlanabilen parametre setini ifade etmektedir. Çıktının nihai değeri y , her bir kural çıktısının ağırlıklı ortalaması ile verilir:

$$y = \sum W_i y_i \quad (2.22)$$

Eşitlikteki W_i değeri, i 'inci kuralın ağırlığını göstermektedir.

Bulanık metotlarla veri modellemesi iki faz içermektedir: [Kaya D. et al,2002 and Yılmaz Y. et al, 2005]

1. *Yapının belirlenmesi* dört basamaktan oluşur:

- Uygun girdi değişkenlerin seçilmesi
- Bulanık çıkarım sisteminin seçilmesi
- Bulanık kurallarının yapısının ve sayısının belirlenmesi
- Üyelik fonksiyonlarının sayısının ve tipinin belirlenmesi.

2. *Parametrelerin belirlenmesi* sistem parametrelerinin optimum değerlerinin ayarlanması ile ilgilidir.

2.5.1. Niçin Bulanık Mantık?

Bulanık mantığın çok değişik alanlarda ve bu kadar çok kullanılmasının sebeplerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Bulanık mantığı anlamak kolaydır.
- Bulanık mantık esnektir.
- Bulanık mantık açık olmayan data bulunması durumunda tolerans gösterir.
- Bulanık mantıkla karmaşık lineer olmayan fonksiyonlar modellenenir.
- Bulanık mantık geleneksel kontrol teknikleri ile birlikte kullanılabilir.
- Bulanık mantığın ana fikri konuşma dilidir.

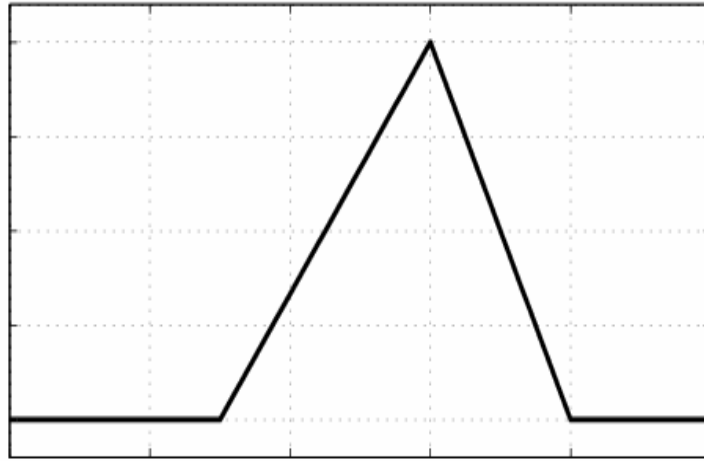
2.5.2. Bulanık Kümeler

Bulanık mantık, küme teorisine dayanır. Bu teori aslında genel bir matematiksel model yaklaşımıdır. Klasik mantık yaklaşımından farkı, çok daha fazla kümenin olmasıdır, ayrıca bir elemanın birden fazla kümenin elemanı olabilmesidir. Bu yaklaşımla çözülmesi çok güç olan problemler basitleştirilerek genel bir yapıya kavuşturulur ve bu sayede daha kolay bir sonuca gidilir.

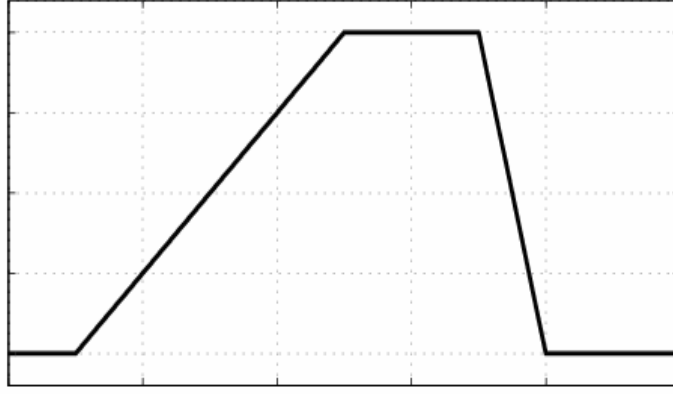
Bulanık mantıkta, klasik mantıkta olduğu gibi çeşitli girişler insan tarafından tanımlanan fonksiyonlara etki ettirilerek çıkış ya da çıkışlar elde edilir. Aralarındaki fark ise, bir bulanık girdisinin üyesinin olduğu kümeye 0 ile 1 arasında değişen bir üyelik derecesinin bulunmasıdır. Bu üyelik derecesi, üyelik fonksiyonu ile kullanıcı tarafından belirlenir. Bulanık küme teorisindeki bulanıklık ile elemanlarının üyelik derecelerini veren üyelik fonksiyonları geliştirilerek kesin sınırlar ortadan kaldırılmıştır. Böylece üyeler ve üye olmayanlar arasında yumuşak bir geçiş sağlanmıştır.

2.5.3. Üyelik Fonksiyonları

Bulanık kümeler üyelik fonksiyonu ile ifade edilmektedirler. Bu üyelik fonksiyonları her nesnenin bir kümedeki ağırlık derecesini vermektedir. Bu ağırlık derecesi 0 ile 1 arasında değişmektedir. [Bandemar and Gottwold, 1996] Literatürde kullanılan üyelik fonksiyonları farklı şekildedirler. Özel bir şeklin uygun olup olmayacağının tespiti, çalışılan uygulama alanından elde edilen verilerle belirlenir. Hesaplama açısından getirdiği kolaylıklar göz önüne alınarak istenilen şekilde üyelik fonksiyonunun seçilmesi, bulanık küme teorisinin esnekliğini yansıtmada öne çıkan bir durumdur. Çoğu durumda, üçgen (trimf) ve yamuk (trapmf) üyelik fonksiyonları işimizi görecektir. Aşağıdaki şekillerde bazı üyelik fonksiyonlarının şekilleri görülmektedir.

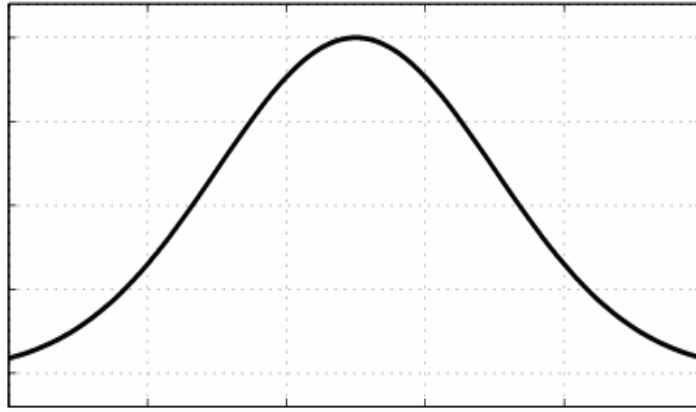


Şekil 2.13. Triangular üyelik fonksiyonu (Trimf)



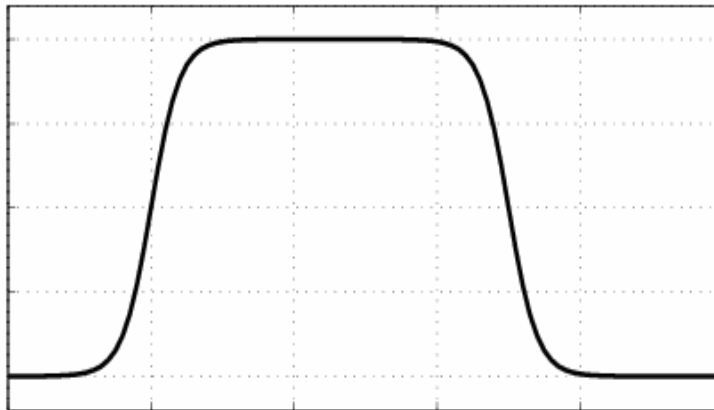
trapmf

Şekil 2.14. Trapezoidal üyelik fonksiyonu (Trapmf)



gaussmf

Şekil 2.15. Gaussian üyelik fonksiyonu (Gaussmf)



dsigmf

Şekil 2.16. Disjunctive üyelik fonksiyonu (Dsigmf)

Tablo 2.3.'de ise çalışmada kullanılan üyelik fonksiyonları ve denklemleri görülmektedir.

Tablo 2.3. Üyelik fonksiyonları ve denklemleri

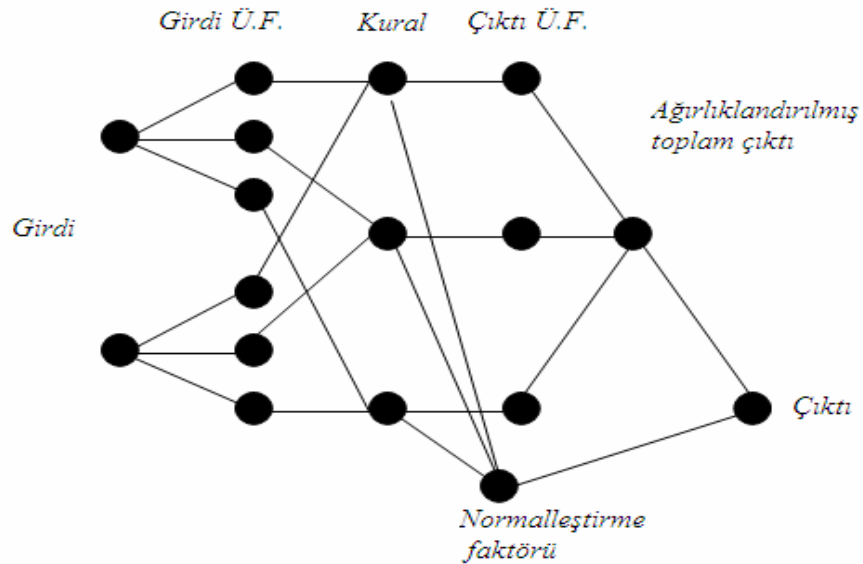
Üyelik Fonksiyonu Tipi	Denklem	Param Sayısı
Triangular (Trimf)	$f(x,a,b,c) = \max(\min((x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b), 0))$	3
Trapezoidal (Trapmf)	$f(x,a,b,c) = \max(\min((x-a)/(b-a), 1, (c-x)/(c-b), 0))$	4
Gaussian (Gaussmf)	$f(x, \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}}$	2
Disigmoidal (Dsigmf)	$f(x,a1,c1,a2,c2,)=f1(x; a1, c1)-f2(x; a2, c2)$ Burada sigmoidal fonksiyon aşağıdaki ifade ile verilir. $f1(x, a1, c1) = \frac{1}{1 + e^{-a1(x - c1)}}$	4

2.5.4. Uyarlamalı Neuro-Fuzzy Çıkarım Sistemi: ANFIS

ANFIS, Sugeno tipi çıkarım sistemine dayanan ve özel bir yapıya sahip adaptif bulanık mantık çıkarım sistemidir. Model parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesinde yapay sinir ağı kullanılmaktadır. Burada, veri seti kullanılarak yapay sinir ağların eğitilmesi bulanık modele uyarlamalı (adaptif) bir özellik kazandırmaktadır. Yapay sinir ağının eğitiminde, ANFIS in özel yapısına uygun olarak, klasik geri yayılım ve en küçük kareler yöntemini içeren bir hibrid öğrenme kuralı geliştirilmiştir. Bu hibrid kural klasik geri yayılılı metodundan daha hızlıdır.

Şekil 2.14'te gösterilen ANFIS'in 5 tabakalı ileri beslemeli ağ yapısı şu şekilde özetlenebilir:

- Birinci tabakadaki düğümler uyarlanabilir. Girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonları düğüm fonksiyonu olarak kullanılır ve bu tabakadaki parametreler “öncül katsayılar” olarak adlandırılır.
- İkinci tabakadaki düğümler Eşitlik 2.21’de verilen kurallar kullanılarak tanımlanan çıktı değerleriyle tanımlanır.
- Üçüncü tabakadaki düğümler Eşitlik 2.22’de gösterildiği şekilde normalize edilerek tanımlanan çıktı değerleriyle tanımlanır.
- Dördüncü tabakada; düğümler birbirini izleyen “artçıl” (consequent) katsayılar Eşitlik 2.20’de verilen düğüm fonksiyonu ile uyarlanabilir.
- Beşinci tabakada; çıktı düğümüne ait çıktı değeri tüm kuralların çıktı değerlerinin ağırlıklı toplamı ile (eşitlik 2.22) hesaplanır.



Şekil2.17. İki girdili üç kurallı ANFIS modeli

2.5.5. Bulanık Mantığın Kullanıldığı Bazı Uygulamalar

Bulanık mantığın kullanıldığı çok değişik mühendislik uygulamaları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Hidroelektrik güç üniteleri için kullanılan baraj kapılarının otomatik kontrolü (Tokio Electric Power)
- Stok kontrol değerlendirmesi için uzman sistem (Yamaichi, Hitachi)
- Klima sistemlerinde istenmeyen ısı iniş çıkışlarının önlenmesi
- Araba motorlarının etkili ve kararlı kontrolü (Nissan)
- Otomobiller için “Cruise-control” (Nissan, Subaru)
- Dokümanların arşivleme sistemleri (Mitsubishi Elec.)
- Depremlerin önceden bilinmesi için tahmin sistemi İlaç teknolojileri:

Kanser teşhisi

- Cep bilgisayarlarında el yazısı algılama teknolojisi
- Video kameralarda hareketin algılanması
- Helikopterler için uçuş desteği
- Çelik sanayinde makine hızı ve ısının kontrolü

3. MATERİYAL-METOT

3.1. Deney Düzenegi

Yakıt hücresinde aşağıdaki özelliklere sahip Fuel Cell Store'dan satın alınmış ticari bir MEA kullanılmıştır:

Membran tipi: Nafion 117

Anot katalizörü: 4 mg/ cm² katalizör yüklemesinde 1:1 Pt-Ru katalizörü

Katot Katalizörü: 2 mg/ cm² katalizör yüklemesinde Pt black

Gaz difüzyon tabakaları: Karbon kumaş

Yakıt hücresi, bilgisayar kontrollü olarak çalışmaktadır ve deney düzenegi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Deney düzenegi

Yakıt hücresi ile ilgili bilgiler ise şu şekildedir:

Akış kanalları üçlü serpantin (serpentine) şeklindedir ve Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Kanalların uzunluğu 38 cm, genişliği 1.5 mm ve derinliği 1 mm’dir. Hücrenin aktif alanı 64 cm^2 , membran alanı 25 cm^2 ($5*5 \text{ cm}$) dir.



Şekil 3.2. Yakıt hücresinin akış kanalları

3.2. Deney Planlaması

Denemelerde; yakıt hücresi sıcaklığı, sıvı ve gaz akış debileri, metanol çözeltisinin konsantrasyonu olmak üzere 4 değişken göz önüne alınmıştır. Değişkenler ve inceleme aralıkları Tablo 3.1 de verilmiştir.

Deney planlamasında Design-Expert 7.0 programı kullanılmıştır. 2. mertebe Merkez bileşkeli tasarım (Central Composite Design) çerçevesinde, döndürülebilir (rotatable) ve dikey (orthogonal) modellerin uygun bir karması (hybrid) deney planı olarak hazırlanmış olup, $16 (2^4)$ faktöriyel blok deneyleri, 3 adet merkez tekrarı deneyleri, 8 adeti döndürülebilir ve 8 adeti ortogonal (toplam 16 adet) 2.mertebe blok deneyleri olmak üzere toplam 35 adet denemeden oluşmaktadır. Deney planı Tablo 3.2 de verilmiştir. Döndürülebilir ve dikey bloklar için kullanılan değişken

aralıkları ise sıra ile Tablo 3.3 ve 3.4 de gösterilmiştir. Her bir deneyde, hücre değişkenleri Tablo 3.2 deki değerlerde olmak üzere, en az 10 veri noktası elde edilecek şekilde akım yoğunluğu eşit aralıklarda artırılarak polarizasyon eğrileri elde edilmiştir.

Tablo 3.1. Hücre değişkenlerinin değişim aralığı

Hücre Değişkenleri	Değişim Aralığı
Metanol Konsantrasyonu (C)	0.25- 3.25 M
Sıvı Akış Debisi (q)	2- 14 ml/dak
Gaz Akış Debisi (Q)	450- 1200 ml/dak
Sıcaklık (T)	25- 65 °C

Tablo 3.2. Döndürülebilir blok için değişken aralıkları

	- α	-1	0	1	+ α
C	0.25	1	1.75	2.5	3.25
T	25	35	45	55	65
q	2	5	8	11	14
Q	200	450	700	950	1200

Tablo 3.3. Dikey blok için değişken aralıkları

	- α	-1	0	1	+ α
C	0.59	1	1.75	2.5	2.91
T	30	35	45	55	60
q	3	5	8	11	13
Q	313	450	700	950	1087

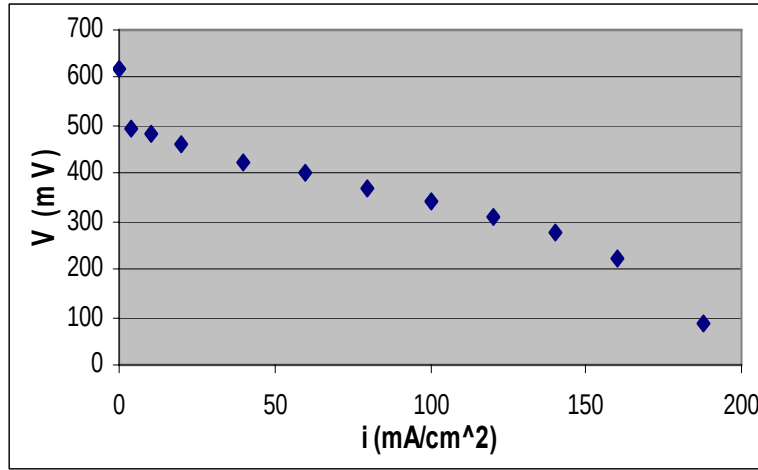
Tablo 3.4. Deney Planı

Deney no	q (ml/dak)	Q(ml/dak)	C (M)	T (°C)	
1	5	450	1	35	FAKTORİYEL
2	5	450	1	55	
3	5	450	2.5	35	
4	5	450	2.5	55	
5	11	450	1	35	
6	11	450	1	55	
7	11	450	2.5	35	
8	11	450	2.5	55	
9	5	950	1	35	
10	5	950	1	55	
11	5	950	2.5	35	
12	5	950	2.5	55	
13	11	950	1	35	
14	11	950	1	55	
15	11	950	2.5	35	
16	11	950	2.5	55	
17	8	700	1.75	25	ROTATABLE
18	8	700	1.75	65	
19	8	700	0.25	45	
20	8	700	3.25	45	
21	2	700	1.75	45	
22	14	700	1.75	45	
23	8	200	1.75	45	
24	8	1200	1.75	45	
25	8	700	1.75	45	TEKRAR
26	8	700	1.75	45	
27	8	700	1.75	45	
28	8	700	1.75	30	ORTOGONAL
29	8	700	1.75	60	
30	8	700	0.59	45	
31	8	700	2.91	45	
32	3	700	1.75	45	
33	13	700	1.75	45	
34	8	313	1.75	45	
35	8	1087	1.75	45	

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler sonucunda gözlemlenen hücre voltajı değerlerinden yararlanılarak hücreye ait güç ve güç yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen toplam 459 adet deney verisinin 275'i (%60) eğitime, 92'si (%20) kontrol ve 92'si (%20) de test amaçlı kullanılmıştır. Bu veriler Matlab yapay sinir ağları ve bulanık mantık iş kutuları kullanılarak modellenmiştir.

Deneylere ait polarizasyon eğrileri Ek-I'de verilmiştir. Örnek olarak, Şekil 4.1'de birinci deneyin polarizasyon grafiği gösterilmiştir



Şekil 4.1. 1. deneyin polarizasyon eğrisi

4.1. YSA ile Modelleme

Yapay Sinir Ağları modellemede iki tabakalı (gizli ve çıktı tabaka) ileri beslemeli (feedforward) ağ yapısı kullanılmıştır. Model ile deney arasında uyumun en iyi olmasını hedefleyen, diğer deyişle ağ parametre değerlerinin optimum değerlerinin saptayan “ağ eğitimi”, “doğrusal olmayan regresyon” da başarılı bir şekilde kullanılan Levenberg-Marquardt metodu ile gerçekleştirilmiştir. Gizli ve çıktı tabakalarında nöronlar “tansig” transfer fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Eğitim ile optimum değerlerinin tespit edilmesi gereken, yapay sinir ağının toplam parametre sayısı, N_{tp} , (düğüm bağlantılarına ait ağırlıklar ve “bias” lar)

$$N_{tp} = N_n (N_{in} + 2) + 1 \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. N_{in} girdi değişken sayısı, N_n ise gizli tabakadaki nöron sayısıdır.

Girdi tabakasına verilen girdiler; T; sıcaklık, C; metanol konsantrasyonu, q; sıvı debisi, Q; gaz debisi, I: akım yoğunluğu olmak üzere 5 adettir. Gerilim ve güç yoğunluğu hücrenin 2 önemli yanıtı olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Modellemede girdi değişkenlerinin sayısı ve gizli tabakadaki nöron sayısı değiştirilerek hem hücre voltajı hem de güç yoğunluğu tahmini için modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modellemede başarı ölçüsü olarak çoklu korelasyon katsayısı, R, alınmıştır.

$$R = \sqrt{1 - SSE / SST} \quad (4.3)$$

burada SSE hataların kareler toplamı olup;

$$SSE = \sum (Y_{exp} - Y_{model})^2 \quad (4.4)$$

ve SST ortalama düzeltilmiş kareler toplamı olup;

$$SST = \sum (Y_{exp} - Y_{ort})^2 \quad (4.5)$$

$$Y_{ort} = \sum Y_{exp} / N \quad (4.6)$$

eşitlikleri ile verilir.

Bir modelin başarılı olması için özellikle eğitme, kontrol ve test işlemlerine ait R değerlerinin mümkün mertebe yüksek ve birbirine yakın çıkması istenen bir durumdur. Bununla birlikte esas başarı ölçüsü test işlemine ait R değeridir. Takip eden bölümlerdeki tablolarda eğitme, kontrol ve test R değerleri mukayeseli olarak verilmiştir.

4.1.1. Gerilim Modellemesi

Bu bölümde yakıt hücresi geriliminin yapay sinir ağları metodu ile modelleme sonuçları yer almaktadır. Girdi değişkenleri, değişken sayısı ve gizli tabaka nöron sayıları değiştirilerek gerilim değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4.1 de gizli tabakadaki nöron sayısının 14 olarak sabit tutulduğu değişik sayı ve türde girdi değişkenli modelleme çalışmalarının R değerleri verilmiştir. Sisteme girdi değişkeni olarak sadece akım değerleri girildiğinde tahmin oranının yüksek olduğu görülmektedir. Doğal olarak, gerilim (ve güç) öncelikli olarak akım tarafından belirlenmektedir. I ile V arasındaki ilişki oldukça nonlineer olup yapay sinir ağları ile başarılı olarak modellenenmiştir. I' ın girdi olarak kullanılmadığı, fakat T ve C 'nin girdi olduğu modelde çok düşük R değerleri bu durumu açıkça göstermektedir. I 'dan sonra ikinci önemli değişkenin T olduğu (I, T) değişkenli model sonuçlarından anlaşılmaktadır. 4 girdi değişkeni (I, T, C, q) ve 5 girdi değişkeninin (I, T, C, q, Q) kullanıldığı denemelerin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Bu iki modeli daha iyi karşılaştırmak üzere, gizli tabakadaki nöron sayısının değişken olarak alındığı modelleme çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.2 ve Tablo 4.3 de verilmiştir. (I, T, C, q) değişkenli model için 8 nöron ile test R değeri 0.9946 'dır. (I, T, C, q, Q) değişkenli model durumunda ise uygun nöron sayısı 10 olup test R değeri 0.9969 'dır.

Tablo 4.1. Farklı girdiler ile gerilim tahmini R değerleri (gizli tabaka nöron sayısı=14)

Girdi Değişkenleri	Eğitme R	Kontrol R	Test R
I	0.9716	0.9648	0.9654
T, C	0.2149	0.2385	0.2385
I, T	0.9880	0.9631	0.9845
I, C	0.9718	0.9636	0.9783
I, T, C	0.9660	0.9777	0.9707
I, T, C, q	0.9964	0.9900	0.9893
I, T, C, q, Q	0.9985	0.9968	0.9966

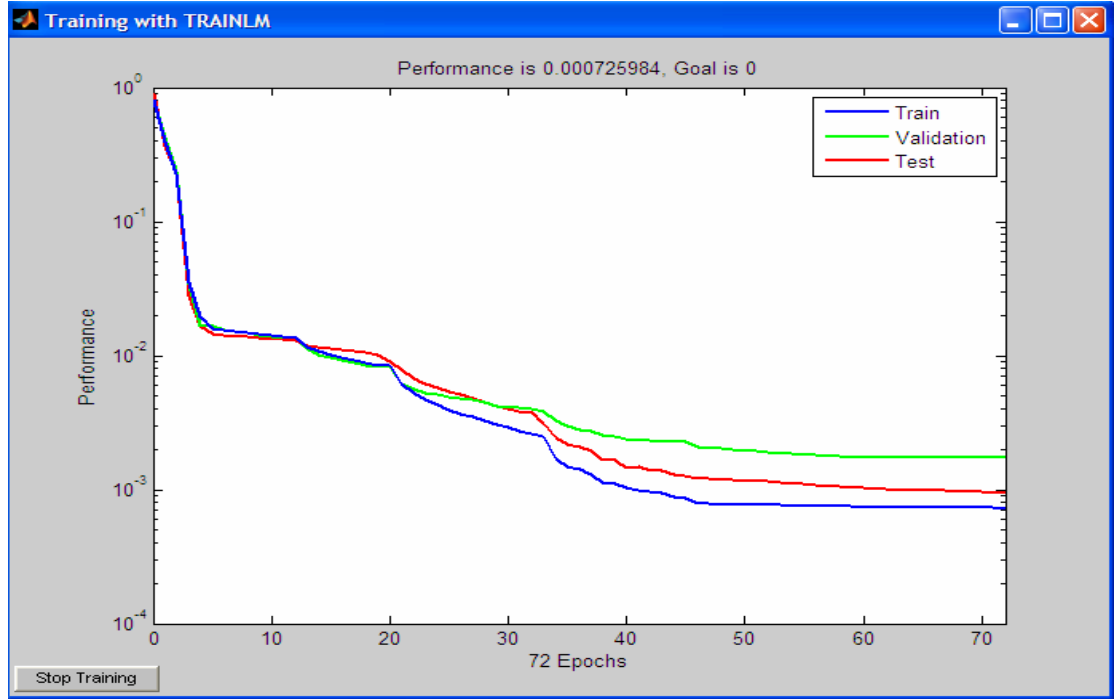
Tablo 4.2. Girdiler I, T, C, q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri

Nöron sayısı	Eğitme R	Kontrol R	Test R	MSSE
4	0.9900	0.9868	0.9855	
6	0.9952	0.9950	0.9943	
8	0.9963	0.9926	0.9946	32.8
10	0.9967	0.9934	0.9925	
12	0.9970	0.9942	0.9931	
14	0.9940	0.9937	0.9895	
16	0.9956	0.9938	0.9910	

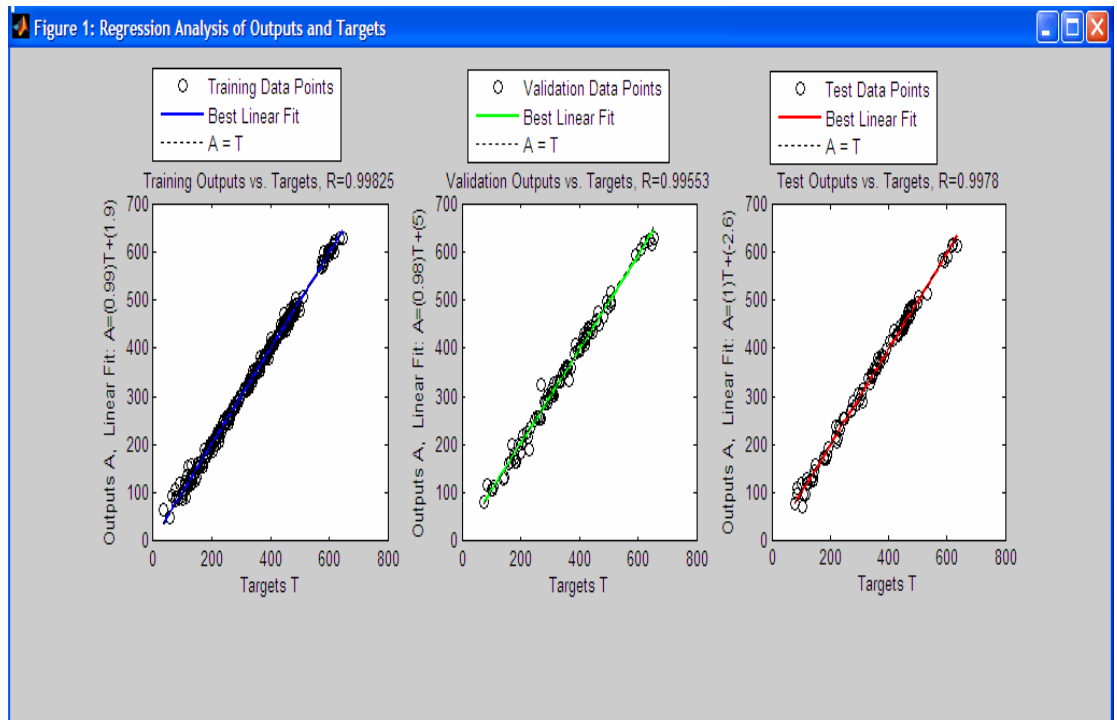
Tablo 4.3. Girdiler I, T, C, q, Q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri

Nöron sayısı	Eğitme R	Kontrol R	Test R	MSSE
4	0.9514	0.9482	0.9533	
6	0.9948	0.9839	0.9833	
8	0.9617	0.9501	0.9533	
10	0.9983	0.9955	0.9978	26.0
12	0.9886	0.9839	0.9798	
14	0.9985	0.9968	0.9966	26.1
16	0.9987	0.9949	0.9919	

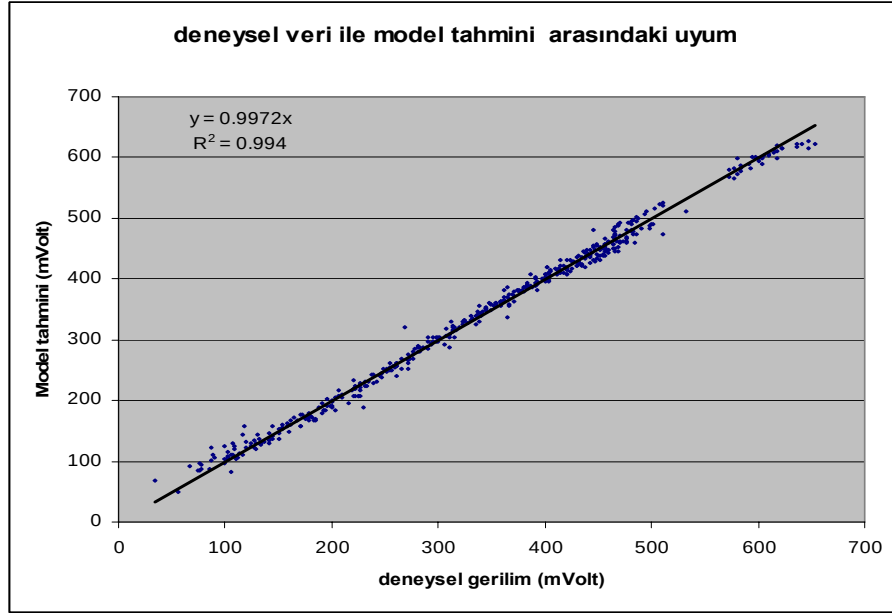
Şekil 4.4 ‘de yapay sinir ağının eğitimi sırasında, eğitme devrine (epoch) bağlı olarak, eğitme performansında gelişme görülmektedir. 60 eğitme devri sonunda, her 3 performans birbirlerine yakın bir konumda sabitleşmektedir. Böylece, yapay sinir ağının başarılı bir şekilde eğitildiği söylenebilir. Eğitme sonunda elde edilen regresyon eğrileri (Şekiller 4.3a ve 4.3b) deneysel veri ile model tahminleri arasındaki uyumu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.2. Girdi değişkenleri T, C, I, q, Q ile eğitim boyunca performans ilerlemesi (gizli tabaka nöron sayısı= 10)



Şekil 4.3a. Girdi değişkenleri T, C, I, q, Q ile son regresyon grafikleri (gizli tabaka nöron sayısı= 10)



Şekil 4.3b. Girdi değişkenleri T, C, I, q, Q : toplam deneysel data ile model tahminleri arasındaki uyum

4.1.2. Güç Modellemesi

Bir önceki bölümde bahsedilen hücre gerilimi için yapılan tüm denemeler aynı şekilde güç için de yapılmıştır. Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 incelendiğinde, gerilim tahmininde gözlemlenen durumların güç için de geçerli olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. Farklı girdiler ile güç tahmini R değerleri (gizli tabaka nöron sayısı=14)

Girdiler	Eğitme	Kontrol	Test
I	0.9411	0.9129	0.9030
T,C	0.3348	0.1132	0.2158
I,T	0.9673	0.9625	0.9728
I,C	0.9429	0.9181	0.9529
I,T,C	0.9842	0.9801	0.9800
I,T,C,q	0.9913	0.9853	0.9765
I,T,C,q,Q	0.9975	0.9928	0.9883

Tablo 4.5. Girdiler I, T, C, q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri

Nöron sayısı	Eğitme	Kontrol	Test
4	0.9856	0.9728	0.9624
6	0.9910	0.9778	0.9611
8	0.9727	0.9773	0.9771
10	0.9925	0.9759	0.9812
12	0.9841	0.9804	0.9830
14	0.9922	0.9852	0.9800
16	0.9897	0.9691	0.9814

Tablo 4.6. Girdiler I, T, C, q, Q ile gizli tabakada nöron sayısına bağlı olarak gerilim tahmini R değerleri

Nöron sayısı	Eğitme	Kontrol	Test
4	0.9707	0.9658	0.9718
6	0.9799	0.9889	0.9816
8	0.9910	0.9889	0.9834
10	0.9910	0.9852	0.9872
12	0.9971	0.9720	0.9870
14	0.9962	0.9811	0.9837
16	0.9925	0.9805	0.9854

4.2. ANFIS ile Modelleme

ANFIS ile modellemede de, deney verilerinin %60'ı eğitime, %20'si kontrol ve %20'si test amaçlı kullanılmıştır. Eğitime işleminde ve performans değerlendirilmesinde “ hata kareler toplamı ortalamasının karekökü (MSSE) ” performans kriteri olarak kullanılmıştır:

$$MSSE = \sqrt{(SSE / N)} \quad (4.7)$$

Bulanık kural oluşturma metodu olarak , diğer metotlar arasından basit olması nedeniyle ”grid partition” (ızgara dağıtma) seçilmiştir. Bu metoda kurallar, girdilerin üyelik fonksiyon sayılarına bağlı olarak aralarında bütün kombinasyonları dikkate alarak

$$\begin{aligned} \text{ŞAYET (girdi}_1 \text{ g1mf1 ye aittir) VE.....(girdi}_{N_{in}} \text{ gNmfl ye aittir).. OHALDE...} \\ \text{(çıktı Cmfl ye aittir)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

(4.8) ifadesine benzer şekilde oluşturulur (ayrıca şekil. 4.5' a bakınız). Girdilerin üyelik fonksiyon sayıları eşit veya farklı olabilir. Burada, her bir girdi için üyelik fonksiyonu sayısı eşit ve 2 olarak sabit ($N_{mf} = 2$) alınmıştır. Bu durumda bulanık kural sayısı

$$\text{Bulanık kural adeti} = 2^{N_{in}} \quad (4.9)$$

Eşitliği ile verilir. Bu sayı aynı zamanda çıktının üyelik fonksiyon sayısına da eşittir.

Yapılan ön çalışmalarda, eğitimde 300 devir (epoch) sayısının MSSE nin kararlı bir değere kadar düşmesi için fazlası ile yeterli olduğu görülerek, bütün eğitimlerde 300 olarak sabit tutulmuştur. Üyelik fonksiyonu tipi olarak; triangular (trimf), trapezoidal (trapmf), gaussian (gaussmf) ve disigmoidal (dsigmf) üyelik

fonksiyonları incelenmiştir. (Bu fonksiyonlara ait bilgiler şekil 2.13- 2.16, ve Tablo 2.3 de verilmiştir)

ANFIS yapısındaki doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam parametre sayısının hesaplanması için Tablo 4.7 ve 4.8 de verilen bağıntılardan faydalanılabilir:

Tablo 4.7. Üyelik fonksiyonlarının doğrusal olmayan katsayı adetini veren denklemler

Üyelik Fonksiyonu Tipi	N_{nlp}
Triangular (Trimf)	$3 * N_{mf} * N_{in}$
Trapezoidal (Trapmf)	$4 * N_{mf} * N_{in}$
Gaussian (Gaussmf)	$2 * N_{mf} * N_{in}$
Disigmoidal (Dsigmf)	$4 * N_{mf} * N_{in}$

Tablo 4.8. Çıktı üyelik fonksiyonunun doğrusal katsayı adetini veren denklemler

Çıktı Üyelik Fonksiyonu Tipi	Sabit	Lineer
N_{lp} Doğrusal katsayı adeti	$N_{mf}^{N_{in}}$	$(N_{in} + 1) * N_{mf}^{N_{in}}$

Değişken sayısına ve üyelik fonksiyonunun tipine bağlı olarak parametre sayıları Tablo 4.9 de özetlenmiştir. Toplam parametre sayısının hesaplanması şu açıdan önemlidir: gerek yapay sinir ağları gerekse ANFIS ile modellemede parametre değerleri başlangıçta bilinmemektedir, başlangıç tahmin değerleri ile hesaplamaya başlanır. Regresyonda olduğu gibi, bilinmeyen sayısı, (toplam parametre sayısı), data sayısından küçük olmalıdır;

$$N_{tp} = N_{nlp} + N_{lp} < N_{eğitme} \quad (4.9)$$

Tablo 4.9’da değişken sayısının ve üyelik fonksiyonu doğrusal (L) veya sabit (S) oluşuna göre; doğrusal (L), doğrusal olmayan (N) ve toplam (T) parametre sayıları belirtilmiştir.

Tablo 4.9. Üyelik fonksiyonlarının değişken sayısına göre katsayı adeti

	Üyelik Fonksiyonları								
Değişken Sayısı	Trimf		Trapmf		Gaussmf		Dsigmf		Parametreler
	S	L	S	L	S	L	S	L	
1	2	4	2	4	2	4	2	4	L
	6	6	8	8	4	4	8	8	N
	8	10	10	12	6	8	10	12	T
2	4	12	4	12	4	12	4	12	L
	12	12	16	16	16	8	8	16	N
	12	24	20	28	20	20	12	28	T
3	8	32	8	32	8	32	8	32	L
	18	18	24	24	12	12	24	24	N
	26	50	32	56	20	44	32	56	T
4	16	80	16	80	16	80	16	80	L
	24	24	32	32	16	16	32	32	N
	40	104	48	112	32	96	48	112	T
5	32	192	32	192	32	192	32	192	L
	30	30	40	40	20	20	40	40	N
	62	212	72	232	52	212	72	232	T

4.2.1. Gerilim Modellemesi

Girdi değişken I (akım yoğunluğu) alınarak gerilim tahminleri yapılmıştır. Denemeler dört farklı üyelik fonksiyonu için, çıktı üyelik fonksiyonunun sabit ve doğrusal olması durumunda Tablo 4.10 ve 4.11 ‘deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.10. Girdi: (I) , çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	52.5	59.7	65.2
Trapmf	75.6	90.1	93.6
Gaussmf	59.8	70.9	75.7
Dsigmf	72.2	85.6	91.1

Tablo 4.11. Girdi: (I) , çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	39.2	28.1	41.6
Trapmf	47.4	50.7	55.1
Gaussmf	46.4	48.9	53.1
Dsigmf	45.6	47.4	52.0

Girdi değişkenleri olarak sıcaklık, konsantrasyon ve akım yoğunluğu alınması durumunda, Tablo 4.12 ve Tablo 4.13 ‘deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.12. Girdiler: (T, C) , çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	131.2	144.8	161.0
Trapmf	131.3	144.7	161.0
Gaussmf	131.1	144.3	161.4
Dsigmf	130.9	145.3	161.8

Tablo 4.13. Girdiler: (T, C) , çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	130.4	145.7	162.7
Trapmf	130.2	146.0	162.5
Gaussmf	130.1	146.1	162.5
Dsigmf	130.1	146.1	162.5

Girdi değişkenleri olarak akım yoğunluğunun ve sıcaklığın alınması durumunda;

Tablo 4.14. Girdiler : (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	42.5	51.9	57.2
Trapmf	70.8	84.1	89.4
Gaussmf	51.0	62.8	68.3
Dsigmf	44.2	53.1	56.6

Tablo 4.15. Girdiler: (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	28.9	20.8	33.9
Trapmf	38.3	46.5	50.6
Gaussmf	37.3	44.4	48.8
Dsigmf	36.5	42.4	47.6

Girdi değişkenleri olarak akım yoğunluğunun ve konsantrasyonun alınması durumunda;

Tablo 4.16. Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	50.1	59.0	64.2
Trapmf	75.8	91.0	94.8
Gaussmf	58.7	69.7	58.7
Dsigmf	71.7	85.3	91.1

Tablo 4.17. Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

MF tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	34.3	33.3	41.4
Trapmf	44.0	50.0	55.4
Gaussmf	40.3	48.6	49.9
Dsigmf	44.1	46.2	50.2

Girdi değişkenleri olarak sıcaklık (T), konsantrasyon (C) ve akım yoğunluğu (I) alındığı durumda sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.18. Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	40.9	50.7	40.9
Trapmf	68.7	83.3	87.0
Gaussmf	47.9	63.4	63.3
Dsigmf	64.4	77.1	81.5

Tablo 4.19. Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	16.7	21.8	25.2
Trapmf	34.9	47.8	81.9
Gaussmf	28.9	44.1	65.5
Dsigmf	33.6	43.0	44.2

Girdi değişkenleri olarak sıcaklık, konsantrasyon, akım yoğunluğu ve sıvı akış debisi alınarak elde edilen sonuçlar aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 4.20. Girdiler: (I, T, C, q), çıktının üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	40.3	51.7	57.4
Trapmf	69.0	85.5	88.8
Gaussmf	47.5	65.3	65.3
Dsigmf	64.0	78.2	82.1

Tablo 4.21. Girdiler: (I, T, C, q), çıktının üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	14.7	22.9	15.5
Trapmf	30.8	50.3	92.4
Gaussmf	26.5	48.0	112.8
Dsigmf	31.1	47.0	43.8

Bu bölümde ise; son olarak sisteme tüm girdilerin verilmesi durumundaki hücrenin gerilimi için R değerleri verilmektedir.

Tablo 4.22. Girdiler: (I, T, C, q, Q), çıktının üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	39.1	53.0	58.9
Trapmf	65.4	85.9	88.4
Gaussmf	46.5	66.4	68.5
Dsigmf	63.1	79.4	84.4

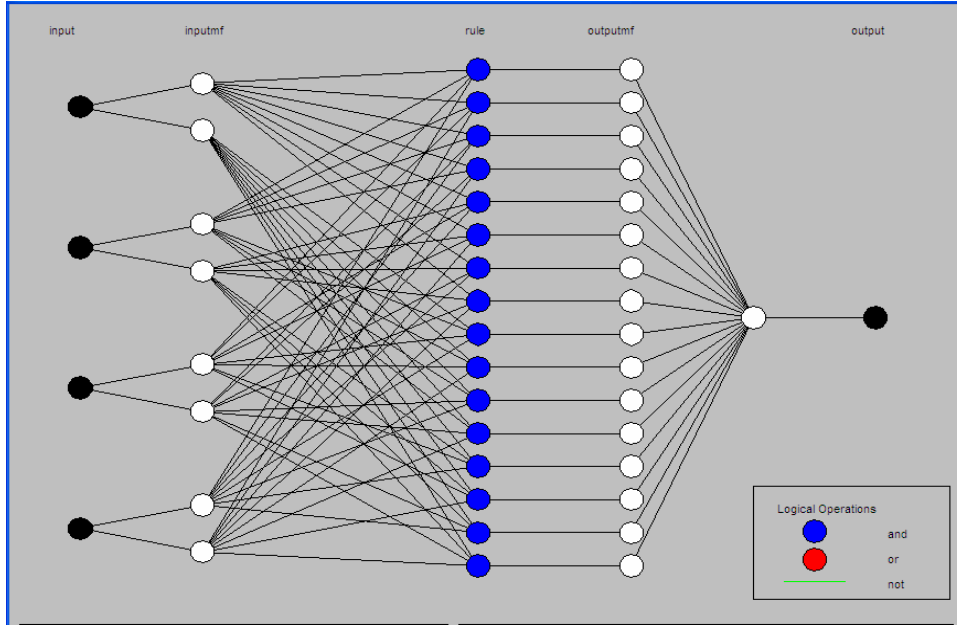
Tablo 4.23. Girdiler (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	10.4	24.3	21.2
Trapmf	28.2	263.4	183.0
Gaussmf	23.8	48.7	92.4
Dsigmf	28.2	49.3	49.6

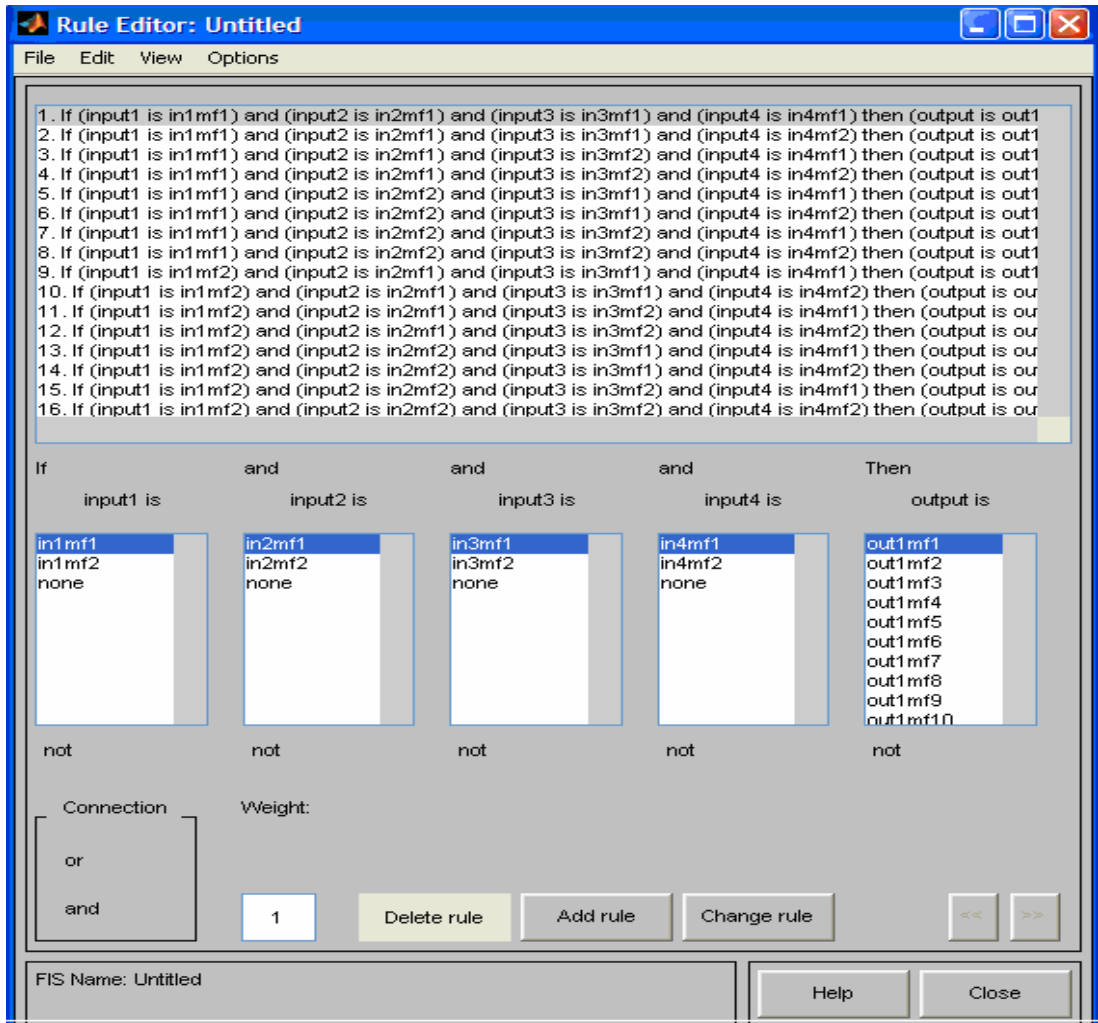
En uygun değişken setini ve üyelik fonksiyonunu seçebilmek üzere, test MSSE değerinin performans kriteri olarak alınarak Tablo 4.24 oluşturulmuştur. Bu tabloya göre; en uygun girdi seti (I, T, C, q) ve en uygun üyelik fonksiyonu Trimf olup test MSSE değeri 15.5 ‘dir. Bu sonuçları sağlayan ANFIS yapısı şekil 4.4 de, kural seti (tabanı) Şekil 4.5 de verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile model tahminleri arasındaki uyumlar ise, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 de gösterilmiştir.

Tablo 4.24. Hedef (çıktı) değişken olarak hücre gerilimi durumunda farklı üyelik fonksiyonu tipleri için test MSSE değerleri

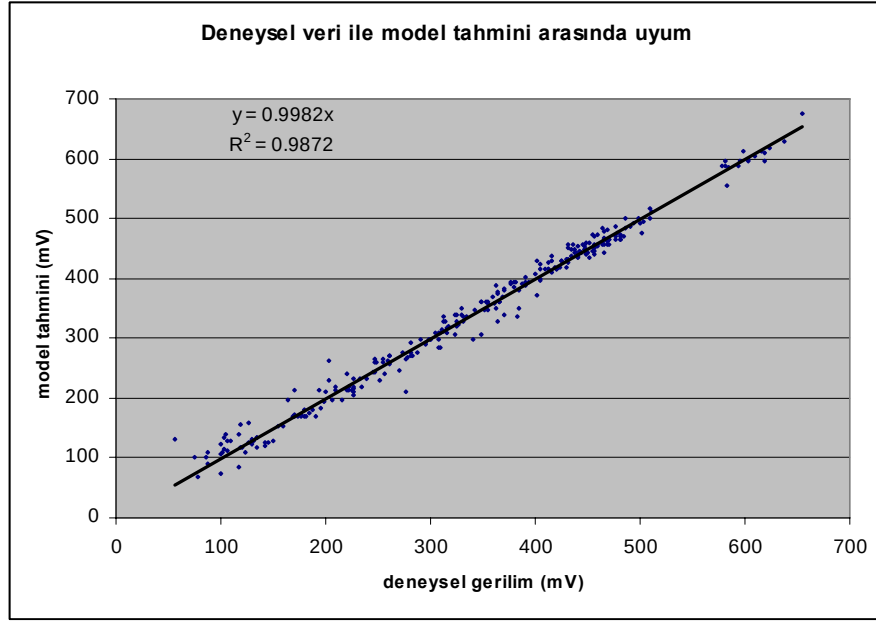
		Test MSSE				
		Üyelik Fonksiyonları				
Değişken Sayısı	Değişkenler	Trimf	Trapmf	Gaussmf	Dsigmf	Çıktı Ü.F.
1	I	65.2	93.6	75.7	91.1	Sabit
		41.6	55.1	53.1	52.0	Doğrusal
2	T, C	161.0	161.0	161.4	161.8	Sabit
		162.7	162.5	162.5	162.5	Doğrusal
2	I, T	57.2	89.4	68.3	56.6	Sabit
		33.9	50.6	48.8	47.6	Doğrusal
2	I, C	64.2	94.8	58.7	91.1	Sabit
		41.4	55.4	49.9	50.2	Doğrusal
3	I, T, C	40.9	87.0	63.3	81.5	Sabit
		25.2	81.9	65.5	44.2	Doğrusal
4	I, T, C, q	57.4	88.8	65.3	82.1	Sabit
		15.5	92.4	112.8	43.8	Doğrusal
5	I, T, C, q, Q	58.9	88.4	68.5	84.4	Sabit
		21.2	183.	92.4	49.6	Doğrusal



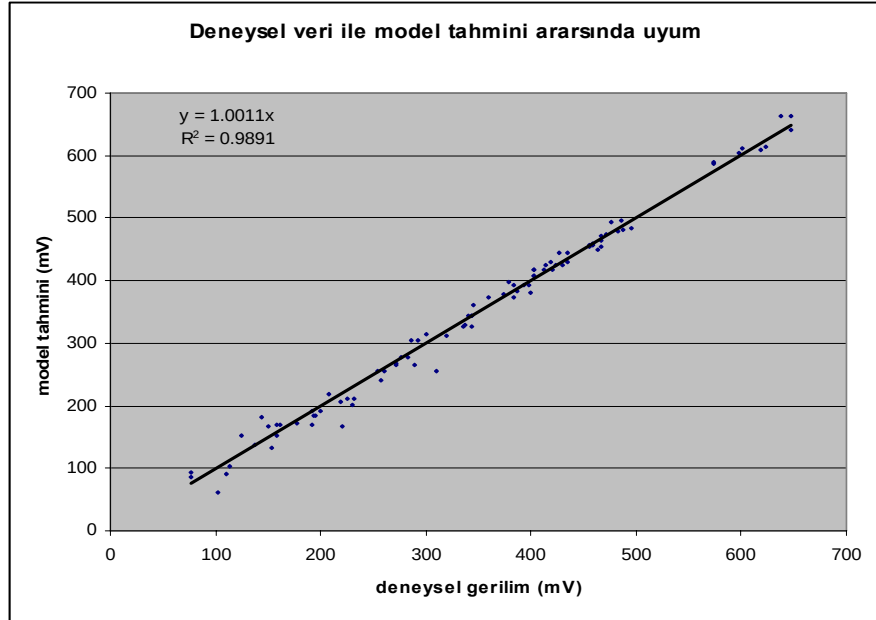
Şekil 4.4. Dört girdili iki üye fonksiyonlu 16 kurallı ANFIS yapısı



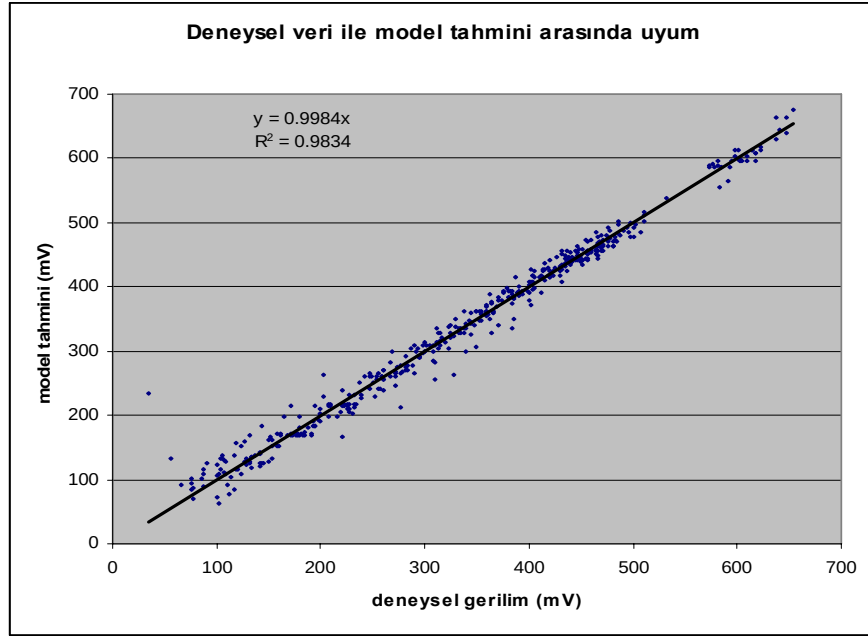
Şekil 4.5. Dört girdili ANFİS modelinde 16 adet kural seti



Şekil 4.6. Dört girdili doğrusal triangular üyelik fonksiyonu ile elde edilen eğitim sonuçlarının model ile uyum grafiği



Şekil 4.7. Dört girdili doğrusal triangular üyelik fonksiyonu ile elde edilen test sonuçlarının model ile uyum grafiği



Şekil 4.8. Dört girdili doğrusal triangular üyelik fonksiyonu elde edilen toplu sonuçlar ile model uyumu grafiği

4.2.2. Güç Modellemesi

ANFİS ile güç modellemesi yapılırken öncelikle girdi değişkeni olarak sadece akım yoğunluğu alınmıştır. Denemeler dört farklı üyelik fonksiyonu için, çıktı üyelik fonksiyonu sabit ve doğrusal alınması durumunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.25. Girdi: (I) , çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	9.8	8.6	10.9
Trapmf	12.9	12.7	13.8
Gaussmf	11.0	10.3	12.2
Dsigmf	12.5	11.8	13.2

Tablo 4.26. Girdi (I) , çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	6.6	5.0	7.7
Trapmf	6.7	5.8	7.9
Gaussmf	6.4	5.1	7.7
Dsigmf	6.4	5.0	7.6

İkinci basamakta ise girdi değişken sayısı 2 alınarak farklı değişkenlerle yapılan deneme sonuçları tablolar halinde verilmiştir. Girdi değişkenleri olarak sıcaklık, konsantrasyon ve akım yoğunluğu değerleri alınmıştır. Öncelikle girdi değişkenleri olarak sıcaklık ve konsantrasyon alınması durumunda güç yoğunluğu için R değerleri aşağıda tablo halinde verilmektedir.

Tablo 4.27. Girdiler : (T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	16.0	17.2	16.6
Trapmf	15.9	17.2	16.6
Gaussmf	15.9	17.2	16.6
Dsigmf	15.9	17.2	16.6

Tablo 4.28. Girdiler: (T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	15.7	17.2	16.4
Trapmf	15.7	17.2	16.4
Gaussmf	15.7	17.2	16.4
Dsigmf	15.7	17.2	16.4

Girdi olarak akım yoğunluğunun ve sıcaklığın alınması durumunda;

Tablo 4.29. Girdiler (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	9.4	8.6	10.6
Trapmf	12.4	12.6	13.2
Gaussmf	10.6	10.3	11.8
Dsigmf	6.9	6.0	8.1

Tablo 4.30. Girdiler: (I, T), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	4.1	3.3	5.9
Trapmf	4.3	4.0	6.3
Gaussmf	3.9	3.1	5.5
Dsigmf	4.0	3.0	5.5

Girdi olarak akım yoğunluğunun ve konsantrasyonun alınması durumunda;

Tablo 4.31. Girdiler: (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	9.5	8.5	10.4
Trapmf	12.6	12.5	13.4
Gaussmf	10.6	10.1	11.6
Dsigmf	12.3	11.6	12.6

Tablo 4.32. Girdiler (I, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	6.0	4.7	7.8
Trapmf	6.1	5.9	15.0
Gaussmf	5.6	5.0	7.3
Dsigmf	5.8	4.9	7.4

Girdi olarak sıcaklık (T), konsantrasyon (C) ve akım yoğunluğu (I) alındığı durumda sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.33. Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	9.2	8.5	10.2
Trapmf	12.2	12.7	13.1
Gaussmf	10.4	10.2	11.4
Dsigmf	6.6	6.1	8.0

Tablo 4.34. Girdiler: (I, T, C), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	2.8	3.2	5.2
Trapmf	3.4	4.1	6.1
Gaussmf	2.6	3.0	5.3
Dsigmf	3.0	3.0	5.0

Girdi olarak sıcaklık, konsantrasyon, akım yoğunluğu ve sıvı akış debisi alınarak elde edilen sonuçlar aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 4.35. Girdiler: (I, T, C, q), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	9.1	8.9	10.4
Trapmf	12.2	13.2	13.4
Gaussmf	10.2	10.4	11.8
Dsigmf	11.9	11.9	12.5

Tablo 4.36. Girdiler : (I, T, C, q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	2.4	2.9	4.6
Trapmf	2.9	5.0	5.1
Gaussmf	1.9	3.7	8.4
Dsigmf	2.3	4.7	4.1

Son olarak, aşağıda sisteme tüm girdilerin kullanıldığı durumda hücrenin güç yoğunluğu tahminindeki sonuçları verilmektedir.

Tablo 4.37. Girdiler : (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: sabit

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	8.8	9.5	11.2
Trapmf	12.0	13.6	13.8
Gaussmf	10.0	11.0	13.0
Dsigmf	11.8	12.2	13.2

Tablo 4.38. Girdiler: (I, T, C, q, Q), çıktı üyelik fonksiyonu: doğrusal

Ü.F. Tipi	Eğitme	Kontrol	Test
Trimf	1.8	2.5	5.1
Trapmf	2.5	5.9	8.5
Gaussmf	1.3	3.7	3.0
Dsigmf	1.8	4.0	5.1

Aynı gerilim modellemesinde olduğu gibi bu bölümde de; en uygun değişken setini ve üyelik fonksiyonunu seçebilmek üzere, test MSSE değerinin performans kriteri olarak alınarak Tablo 4.39 oluşturulmuştur. Bu tabloya göre de; en uygun girdi seti (I, T, C, q,Q) ve en uygun üyelik fonksiyonu Gaussmf olup test MSSE değeri 3.0 ‘dir.

Tablo 4.39. Çıktı olarak yakıt hücresi gücü alınması durumunda farklı üyelik fonksiyonu tipleri için test MSSE sonuçları

Değişken Sayısı	Değişkenler	Üyelik Fonksiyonları				Çıktı Ü.F.
		Trimf	Trapmf	Gaussmf	Dsigmf	
1	I	10.9	13.8	12.2	13.2	Sabit
		7.7	7.9	7.7	7.6	Doğrusal
2	T, C	10.6	13.2	11.8	8.1	Sabit
		5.9	6.3	5.5	5.5	Doğrusal
2	I, T	10.6	13.2	11.8	8.1	Sabit
		5.9	6.3	5.5	5.5	Doğrusal
2	I, C	10.4	13.4	11.6	12.6	Sabit
		7.8	15.0	7.3	7.4	Doğrusal
3	I, T, C	10.2	13.1	11.4	8.0	Sabit
		5.2	6.1	5.3	5.0	Doğrusal
4	I, T, C, q	10.4	13.4	11.8	12.5	Sabit
		4.6	5.1	8.4	4.1	Doğrusal
5	I, T, C, q, Q	11.2	13.8	13.0	13.2	Sabit
		5.1	8.5	3.0	5.1	Doğrusal

4.3. Modellerin tahmin performanslarının karşılaştırılması

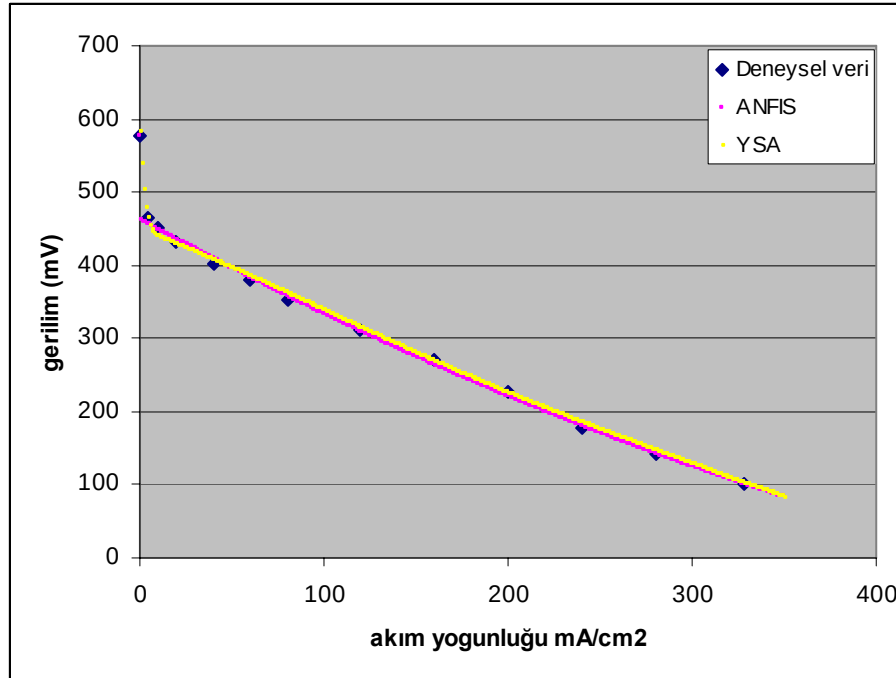
Elde edilen modellerin tahmin performanslarının en açık sınanacağı yer polarizasyon eğrisidir. Bu amaçla, örnek olarak 16 nolu deney şartlarında YSA ve ANFIS modelleriyle polarizasyon eğrisi çizilmiştir. Deneysel veri ile karşılaştırmalı olarak , sonuçlar Şekil 4.9 da gösterilmiştir. Her iki modelin de deneysel polarizasyon verilerine iyi bir uyum sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte, polarizasyon eğrisinin açık devre voltajına yakın noktalarında, YSA 'nın daha iyi tahminlerde bulunduğu görülmektedir. Aynı durumun güç grafiğinde de geçerli olduğu Şekil 4.10 de görülmektedir.

Diğer taraftan modeller, katsayı adeti açısından ele alınırsa;

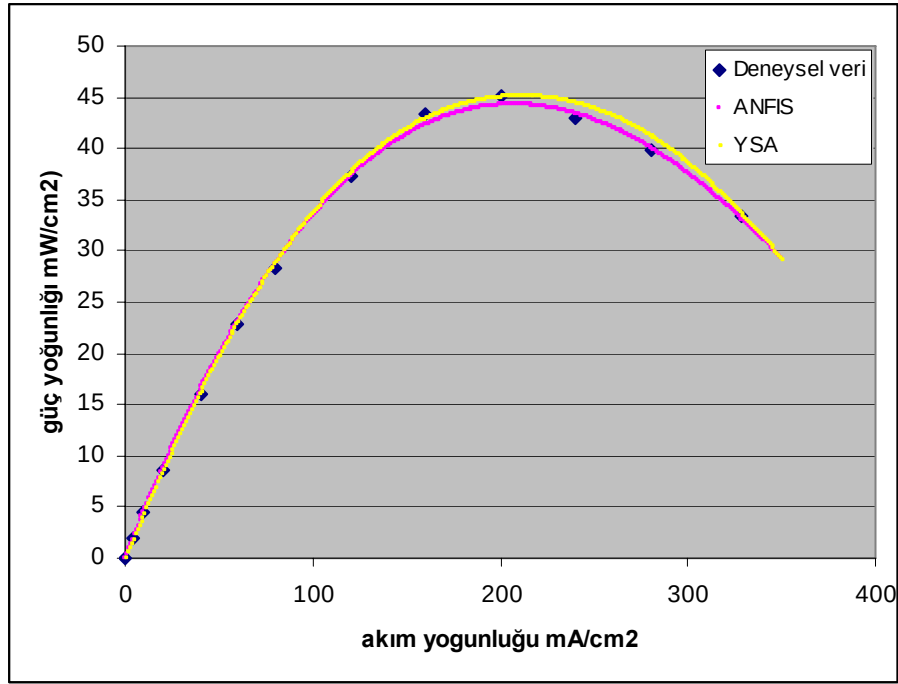
YSA: 5 girdi, 10 nöronlu 1 gizli tabaka: ağırlık 60 adet, bias 11 adet, **toplam 71 adet**

ANFIS :4 girdi 16 kural, Triangular üyelik fonksiyonu , **toplam 104 adet**

Buna göre, YSA 'nın katsayı adeti daha azdır. Başka bir deyişle, YSA tahmin için daha az katsayıya ihtiyacı vardır.



Şekil 4.9. Polarizasyon eğrisi simulasyon grafiği (16. deney, deney şartları: T =55 °C, C=2.5 M, q= 11 cc/ dak, Q= 950 cc/dak)



Şekil 4.10. Güç simülasyon grafiği (16.deney , deney şartları: $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C=2.5\text{ M}$, $q= 11\text{ cc/dak}$, $Q= 950\text{ cc/dak}$)

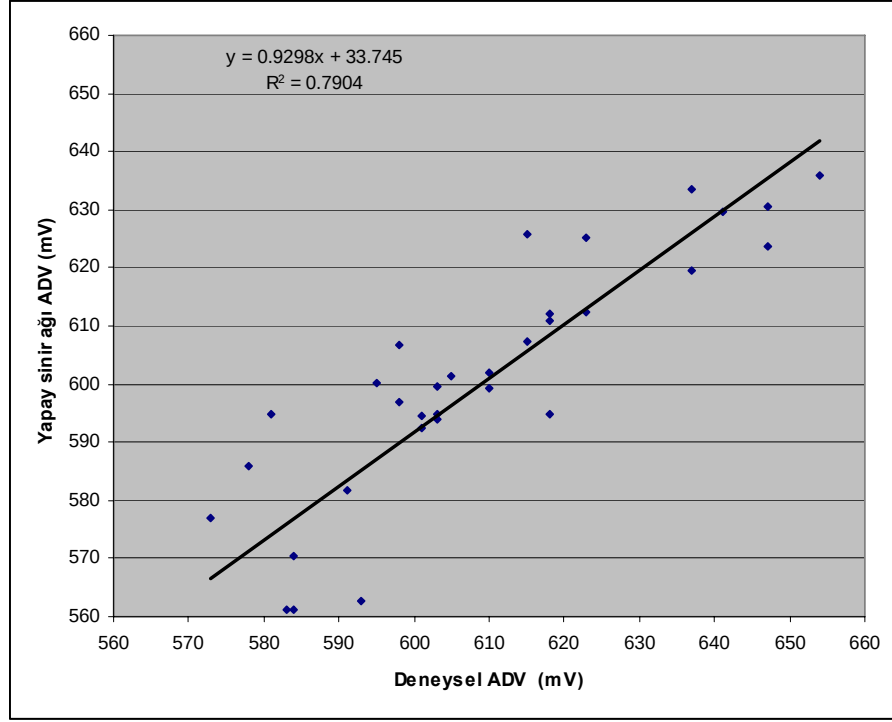
Bu kısımda son olarak, açık devre voltajı (ADV) değerlerinin yapay sinir ağları ve ANFİS metotları ile tahmini üzerinde durulacaktır. ADV, yakıt hücrelerinin enerji verimliliklerinin önemli bir ölçütüdür. Tersinir EMF (pilin elektromotor kuvveti) değeri ADV için teorik üst sınır olup, özellikle aktivasyon polarizasyonu nedeniyle, EMF değerinde oldukça önemli bir kayıp gözlenir. ADV değeri, anot-katot katalizör birleşimine olduğu kadar diğer MEA bileşkenlerine ve yakıt hücresi tasarımına da bağlıdır. İşletme halinde ise, özellikle Sıcaklık, Metanol konsantrasyonu öncelikli olmak üzere işletim değişkenlerinin fonksiyonudur. ADV değerinin tahmini gelişmiş modellerle bile önemli bir problem olup, bu amaçla yarı ampirik modeller teklif edilmiştir. Tablo 4.40'de değişik şartlarda deneysel ADV değerleri ile YSA ve ANFİS model tahminleri verilmiş ve bu değerler kullanılarak Şekil 4.11 ve 4.12'daki grafikler oluşturulmuştur. YSA modelinin tahmin değerleri için $R= 0.7904$, ANFİS tahmin değerleri için $R= 0.7548$ 'dir. YSA 'nın ADV değerlerinin daha iyi tahmin ettiği, bununla birlikte, farkın az olduğu ve deneysel ölçüm hatası içinde bu tezde belirlenen çalışma planı çerçevesinde her iki modelin de eşit performans gösterdiği kabul edilebilir. Ancak, % 0.8 civarında R değeri, tahmin

performansının her iki model için de vasat olduğu göstermektedir. Daha yakın ADV tahminleri için, daha kapsamlı modelleme çalışmalarına ihtiyaç vardır.

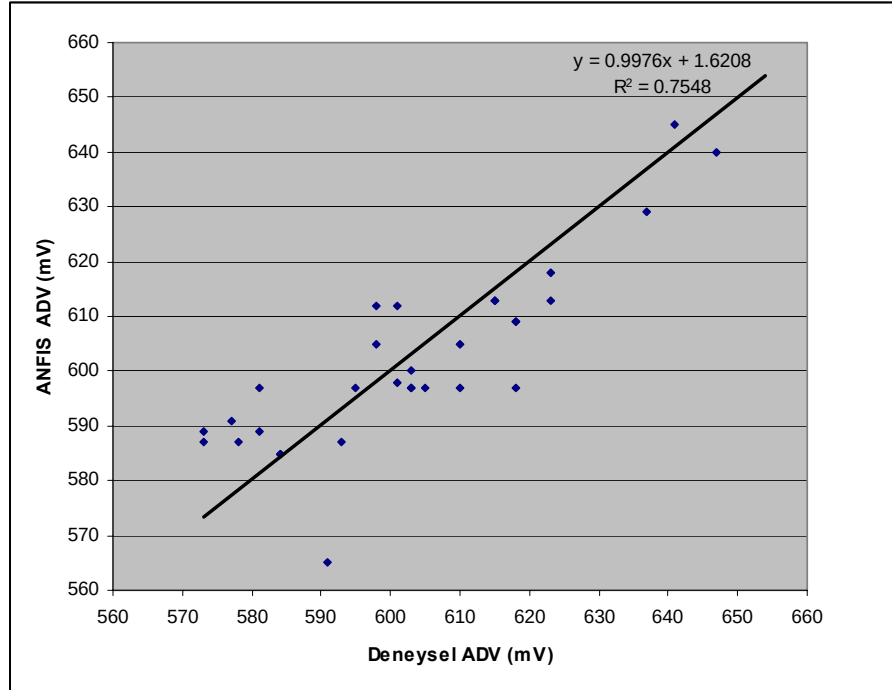
Günümüzde yakıt hücrelerinin yaygın olarak kullanılma aşamasına henüz gelinememiştir. Bu durumun önündeki önemli engeller, hücrenin ana komponentleri ile ilgili beklentilerin tam gerçekleşmemiş olmasıdır. Yakıt hücrelerinin mobil veya sabit uygulamaları gündeme geldiğinde, en yüksek performans ile çalışmasını sağlayacak süreç denetimi önem kazanacaktır. YSA ve Bulanık mantık tekniklerine dayanan süreç denetimi, son yıllarda başarılı olarak kullanılmaktadır. Böylece, bu tür modellerin yakıt hücrelerinin optimum şartlarda çalışması amacıyla kullanılması mümkün olacaktır.

Tablo 4.40. Hücre değişkenlerine karşılık ölçülen deneysel gerilim değerleri ve model tahmini değerleri

Q	Q	C	T	Deneysel ADV (mV)	YSA ADV (mV)	ANFIS ADV (mV)
200	8	1.75	45	610	599	597
313	8	1.75	45	595	600	597
450	5	1	35	618	612	609
450	5	1	55	647	631	664
450	5	2.5	35	584	561	585
450	5	2.5	55	601	595	612
450	11	1	35	610	602	605
450	11	1	55	623	625	613
450	11	2.5	35	581	558	589
450	11	2.5	55	573	577	587
700	2	1.75	45	623	612	618
700	3	1.75	45	615	607	613
700	8	0.25	45	654	636	675
700	8	0.59	45	641	630	645
700	8	1.75	25	583	561	555
700	8	1.75	65	647	624	640
700	8	1.75	45	581	595	597
700	8	1.75	45	603	595	597
700	8	1.75	45	618	595	597
700	8	1.75	30	591	582	565
700	8	1.75	60	637	620	629
700	8	2.91	45	593	563	587
700	8	3.25	45	577	554	591
700	13	1.75	45	601	593	598
700	14	1.75	45	603	594	600
950	5	1	35	618	611	609
950	5	1	55	637	634	664
950	5	2.5	35	584	570	585
950	5	2.5	55	598	597	612
950	11	1	35	598	607	605
950	11	1	55	615	626	613
950	11	2.5	35	573	559	589
950	11	2.5	55	578	586	587
1087	8	1.75	45	603	600	597
1200	8	1.75	45	605	601	597



Şekil 4.11. Deneysel açık devre voltajı sonuçları ile yapay sinir ağı modeli ile elde edilen sonuçların grafiği



Şekil 4.12. Deneysel açık devre voltajı sonuçları ile ANFIS modeli ile elde edilen sonuçların grafiği

5. SONUÇ

Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık metotları, Doğrudan Metanollü Yakıt Hücreleri'nin modellenmesinde kullanılmış ve hücre voltajı ile güç yoğunluğu tahminlerinde iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Yakıt hücrelerinin performansının çok sayıda parametreye doğrusal olmayan bir şekilde bağlı olması sebebiyle matematiksel modellerin çözümü oldukça zorlaşırken, uygulanan bu iki metodun hem kullanımın çok kolay olduğu, hem de çok hızlı bir şekilde sonuç elde edildiği görülmüştür.

Yakıt hücresinin performans tahmininde; akım yoğunluğu (I), sıvı (q) ve gaz akış debisi (Q), hücre sıcaklığı (T) ve metanol konsantrasyonu (C) girdi değişkenleri olarak, hücre gerilimi ile gücü de çıktı değişkenleri olarak alınmıştır. Her iki yöntemde de tek girdili, iki, üç, dört ve beş girdili denemeler yapılmıştır. Yapılan denemelerin sonucunda, sadece akım yoğunluğunun girdi olarak alındığı durumlarda başarılı sonuçların alındığı ve gaz akış debisinin çok fazla etkisinin olmadığı görülmüştür.

YSA ile modellemede, 5 girdili ve gizli tabaka nöron sayısının 10 olduğu durumda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. ANFİS ile modellemedeki en iyi sonuçlar ise; 4 girdili (I, T, C, q), 16 kurallı, girdi üyelik fonksiyonu olarak trimf, çıktı üyelik fonksiyonunun doğrusal alındığı denemelerde görülmüştür.

YSA ve ANFİS modellemeleri ile elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile karşılaştırmasının yapılması amacı ile polarizasyon eğrisi ve güç grafiği çizilmiş, sonuçların iyi uyum sağladıkları görülmüştür. Ayrıca sistemin ADV değerleri tahmininde ise YSA daha iyi tahmin sonuçları vermiştir. Ancak her iki yöntemin tahminlerinde de % 0.8 R civarı değeri elde edildiği düşünüldüğünde sonucun vasat olduğu söylenebilir. Bu kapsamda daha ayrıntılı modelleme çalışmaları yapılmalıdır.

Son olarak, YSA ve bulanık mantık tekniklerinin “tahmin etme” dışında önemli başka bir kullanım alanı “süreç denetimi”dir. Son yıllarda bu tekniklere

dayanan süreç denetimi, endüstride ve günlük hayatta başarılı olarak kullanılmaktadır. Gelecekte, bu tür modellerin yakıt hücrelerinin optimum şartlarda çalışması amacıyla kullanılması mümkündür.

KAYNAKLAR

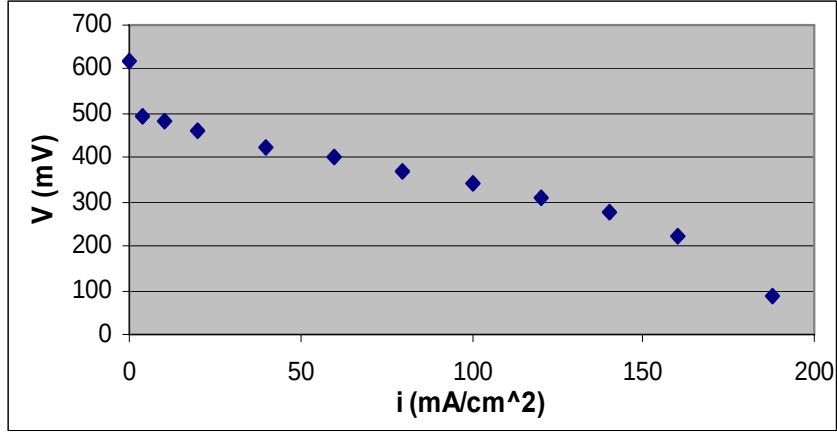
1. Shaoduan Ou, Luke E.K. Achenie, 2005, A Hybrid Neural Network Model For PEM Fuel Cells, Journal of Power Sources 140 (2005) 319–330
2. Won-Yong Lee, Gu-Gon Park, Tae-Hyun Yang, Young-Gi Yoon, Chang-Soo Kim, 2004, Empirical Modeling Of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance Using Artificial Neural Networks, International Journal of Hydrogen Energy 29 (2004) 961 – 966
3. Blomen L.J.M.J, M.N. Mugerva, 1993, Fuel Systems, Plenum Pres, New York
4. Özdemir E., İ Kılıçaslan, 1995, “Yakıt Hücreli Güç Sistemlerinin Bugünkü Durumu ve Geleceğine İlişkin Beklentiler” , Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi Oturum Tebliğleri, S.190- 197, 11- 17 Eylül, Bursa
5. Tüsiad , 1998, “21. Yüzyıla Girerken Türkiye’nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi”, TY/172/1998
6. Oral E., V. Çelik, “Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi”, Mühendis ve Makine, Cilt 46, Sayı 540 Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
7. Dicks A., Larminie J., 2000, “ Fuel ell Systems Explained”, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, İngiltere
8. Kadirgan F., N.D. Fıçıoğlu, 1992, “Yakıt Pilleri ve Uygulamaları, Etilen Glikol Hava Yakıt Pilini Geliştirme Çabaları”, Türkiye 6. Enerji Kongresi Teknik Oturum Tebliğleri, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 22-26 Ekim, Ankara

9. Fuel Cell Handbook Sixth Edition, 2002, EG&G Technical Services, Inc.Science Applications International Corporation, S.56-97
10. Winter M., Brood R. J., 2004, What Are Batteries,Fuel Cells And Supercapacitors?, Chemical Reviews, Vol.104, 4245-4266
11. Hoogers G., Chen E., Thompsett D., Hinsberger M., 2003, Fuel Cell Technology Handbook, CRC Pres LLC, S. 18-171
12. Sunay Ç. , 1998, Geleceğin Temiz Enerji Kaynağı, Yakıt Pilleri, Bilim ve Teknik Dergisi, S. 34- 41, Ekim, Tübitak
13. Lamy C., Leger L.G., 1999, Interfacial Electrochemistry, Marcel Dekker, S.48, New York
14. Appleby A. J., 1987, Fuel Cells: Trends In Research And Applications, Hemisphere Publishing Corporation
15. S. Jemei, D. Hissel, M.C. Pera, J.M. Kauffmann, 2003, On-board Fuel Cell Supply Modeling On The Basis Of Neural Network Methodology, Journal of Power Sources 124 (2003) 479–486 S.O.T.
16. Civaş A., Bayramoğlu M., 2006, Doğrudan Metanollü Yakıt Hücrelerinin Performansının Deneysel Testi ve Yarı Ampirik-Analitik Matematiksel Model ile Öngörülmesi, Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Eskişehir, Eylül
17. Ogaji, R. Singh, P. Pilidis, M. Diacakis, 2006, Modelling Fuel Cell Performance Using Artificial Intelligence, Journal of Power Sources 154 (2006) 192–197
18. Çetinkaya M., Karaosmanoğlu F.,Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pilleri, İTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü

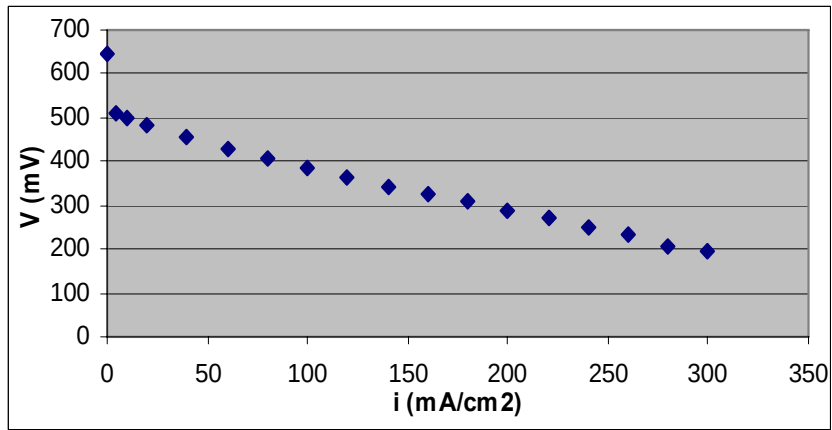
19. Smith, J., Angel, B., 2003, New Application for DMFC, Journal of the Fuel Cell, 44:1, S.22-29
20. <http://ekitaplar53.googlepages.com/YapaySinirAglari>
21. Klir G.J., Yuan B., 1995, Fuzzy Theory And Applications, Prentice Hall PTR, New Jersey, S.5-30
22. Şen Z., 2001, Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Kültür Sanat Yayıncılık, İstanbul
23. Müezzinoğlu A., 1983, İzmir’de Hava Kirlenmesinin Ölçme ve Matematik Model Yardımı ile Belirlenmesi, Çevre’83 II. Ulusal Çevre Sorunları Sempozyumu
24. MATLAB 7.3 R2006b
25. Kaya D., Hasiloglu S., Bayramoglu M., Yesilyurt H., Ozok F., 2003, A New Approach To Estimate Anthoropometric Measuremets By Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, International Journal of Industrial Ergonomics 32 (2003) 105-114
26. Yildirim Y., Bayramoglu M., 2006, Adaptive Nuero-Fuzzy Based Modelling For Prediction Of Air Pollution Dailly Levels In City Of Zonguldak, Chemosphere 63 (2006) 1575-1582

EK-I

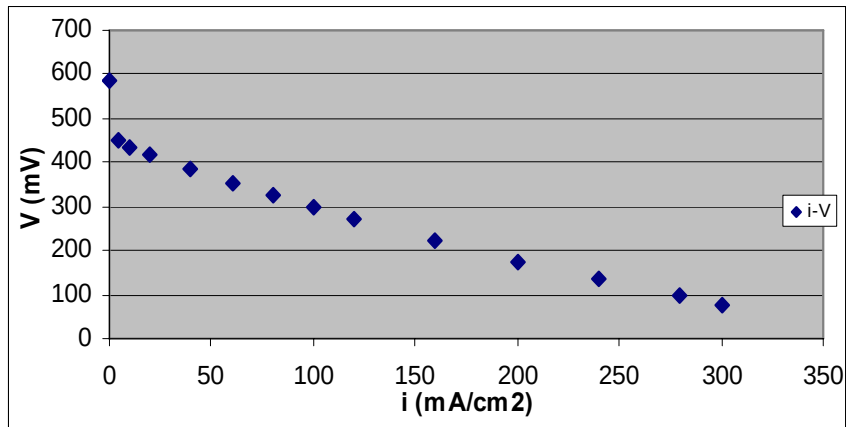
Tablo 3.2 de verilen deneylerin polarizasyon eğrileri



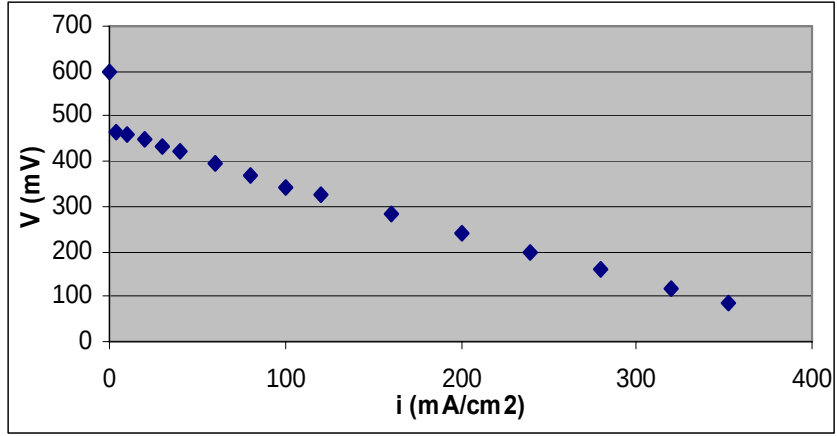
Şekil 1. Deney 1'e ait polarizasyon eğrisi



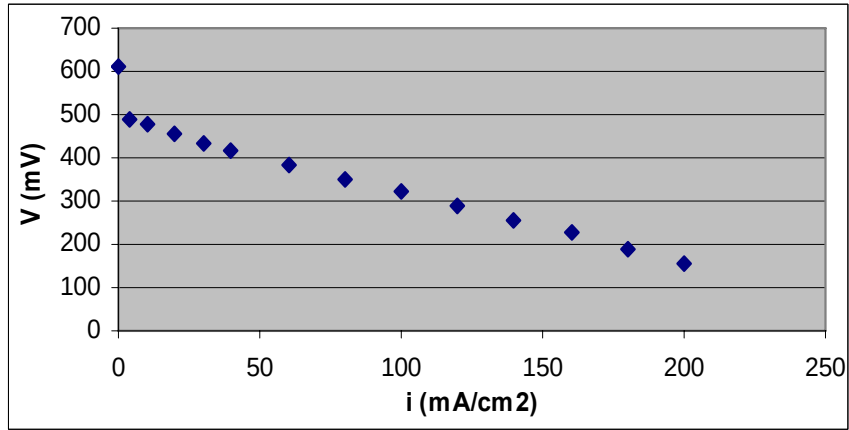
Şekil 2. Deney 2'ye ait polarizasyon eğrisi



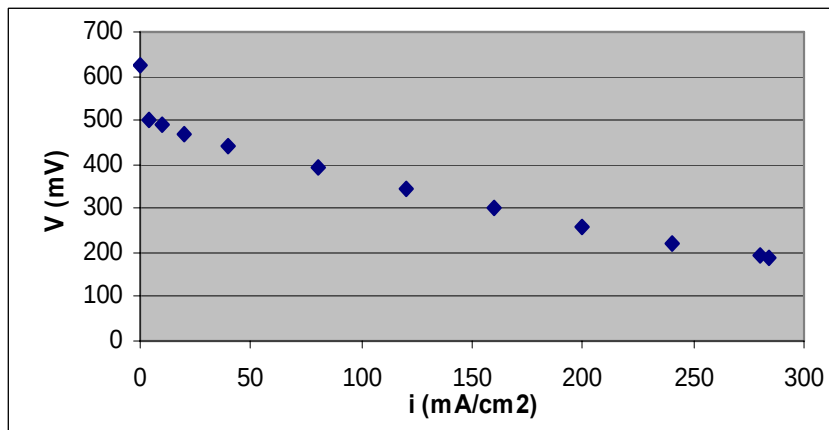
Şekil 3. Deney 3'e ait polarizasyon eğrisi



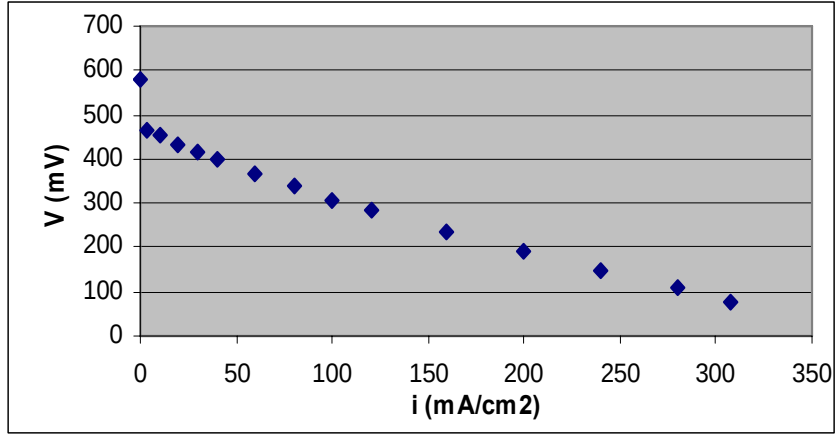
Şekil 4. Deney 4'e ait polarizasyon eğrisi



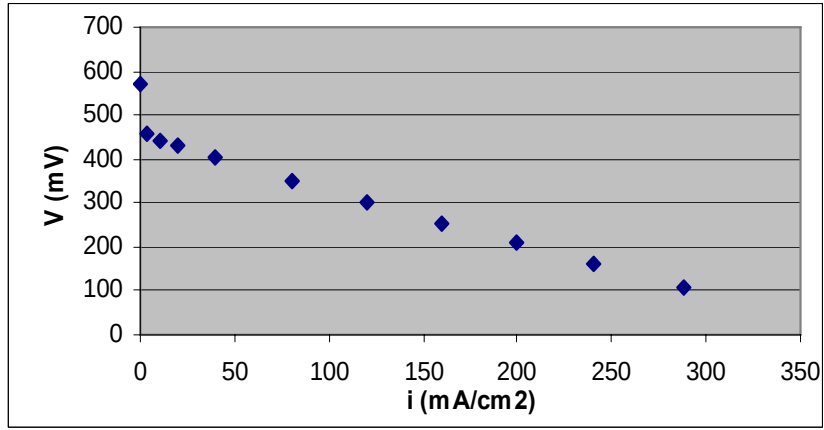
Şekil 5. Deney 5'e ait polarizasyon eğrisi



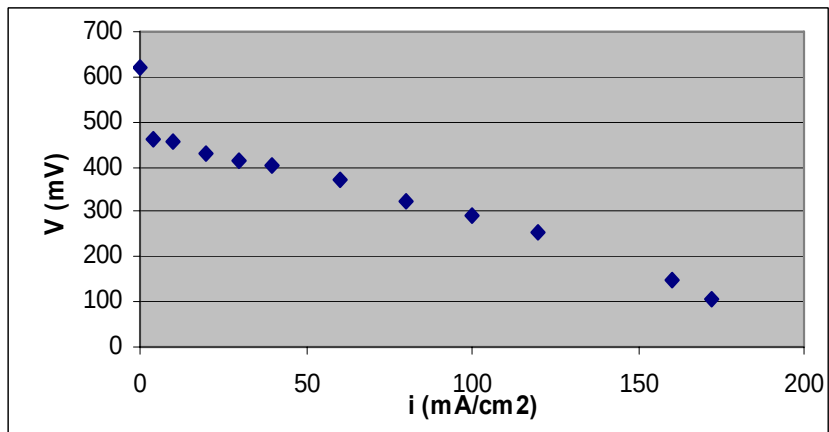
Şekil 6. Deney 6'ya ait polarizasyon eğrisi



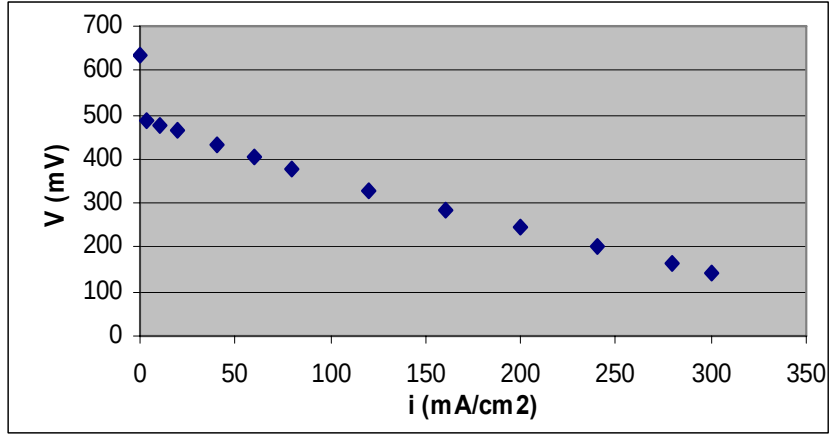
Şekil 7. Deney 7'ye ait polarizasyon eğrisi



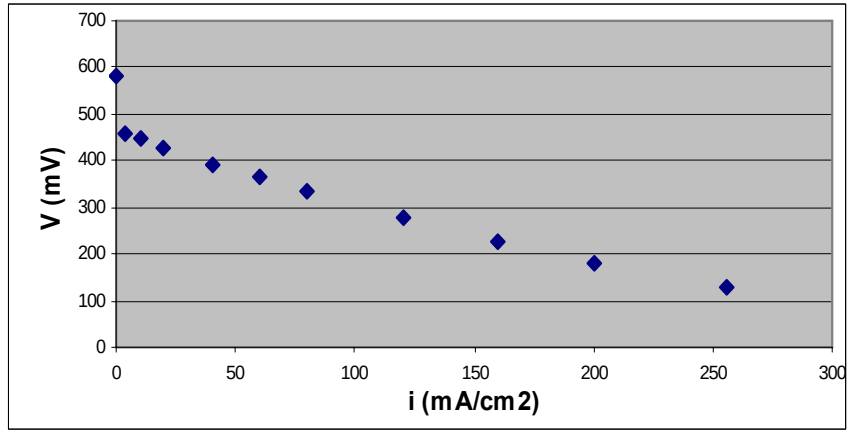
Şekil 8. Deney 8'e ait polarizasyon eğrisi



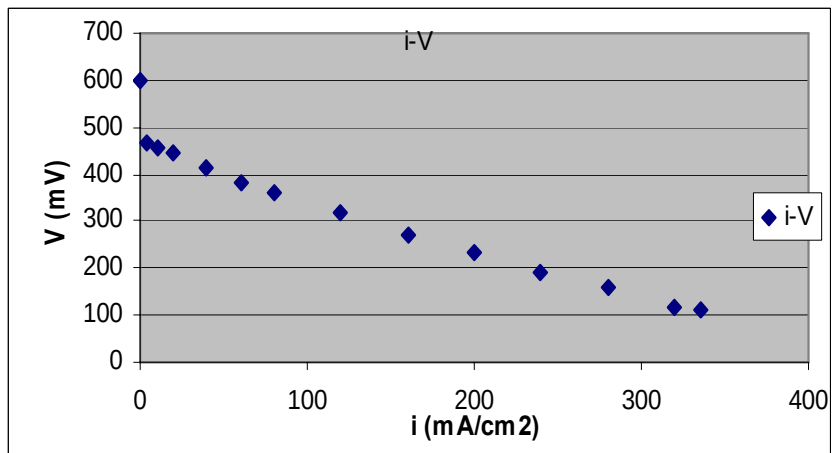
Şekil 9. Deney 9'a ait polarizasyon eğrisi



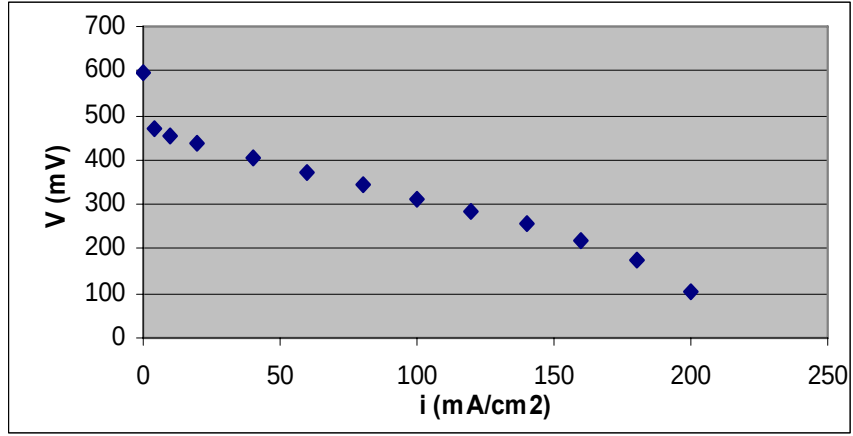
Şekil 10. Deney 10'a ait polarizasyon eğrisi



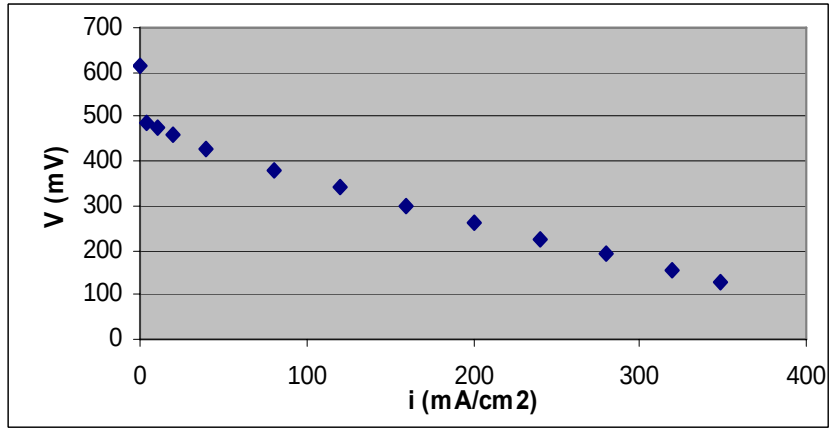
Şekil 11. Deney 11'e ait polarizasyon eğrisi



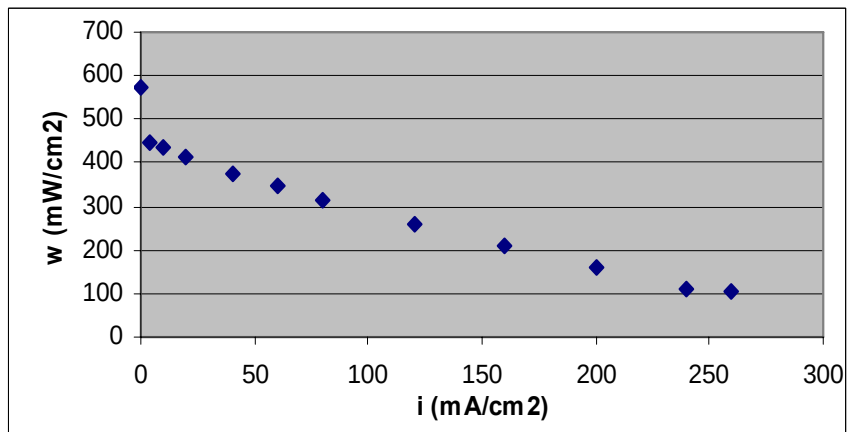
Şekil 12. Deney 12'ye ait polarizasyon eğrisi



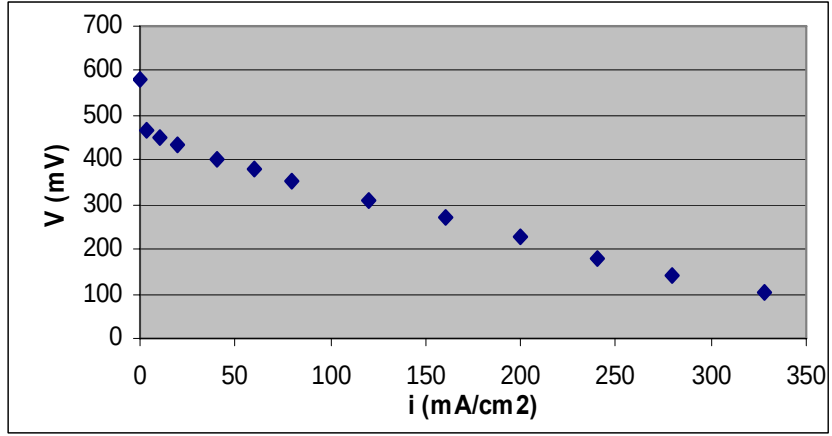
Şekil 13. Deney 13'e ait polarizasyon eğrisi



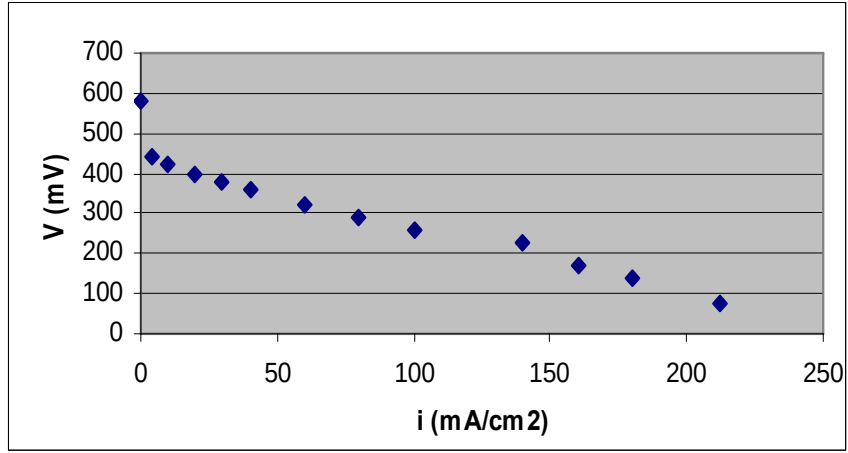
Şekil 14. Deney 14'e ait polarizasyon eğrisi



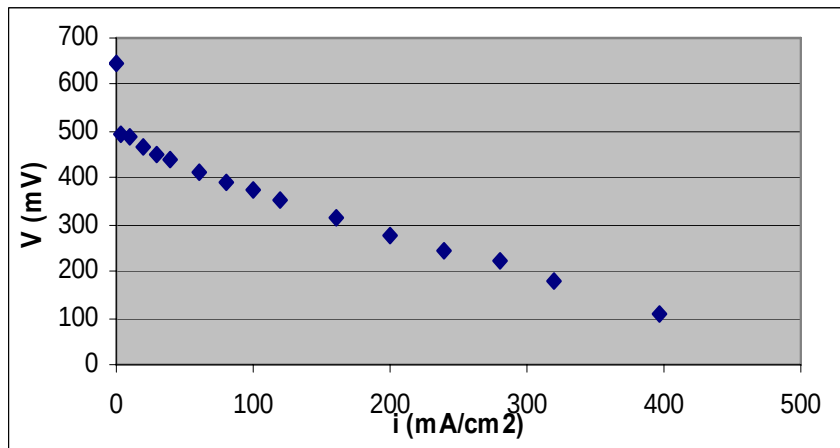
Şekil 15. Deney 15'e ait polarizasyon eğrisi



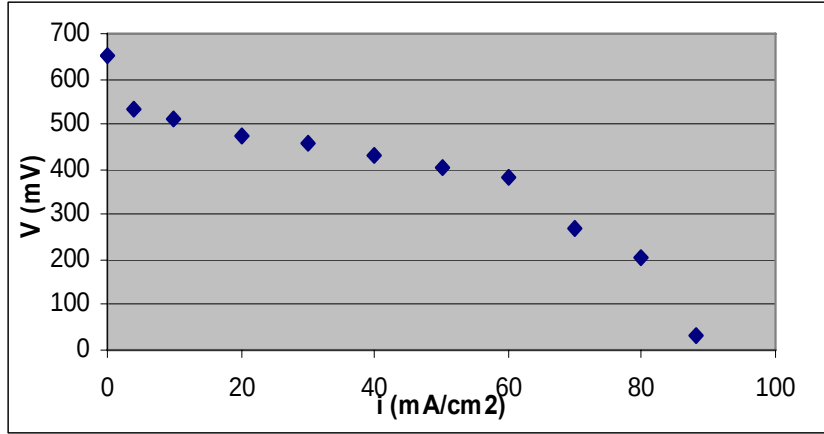
Şekil 16. Deney 16'ya ait polarizasyon eğrisi



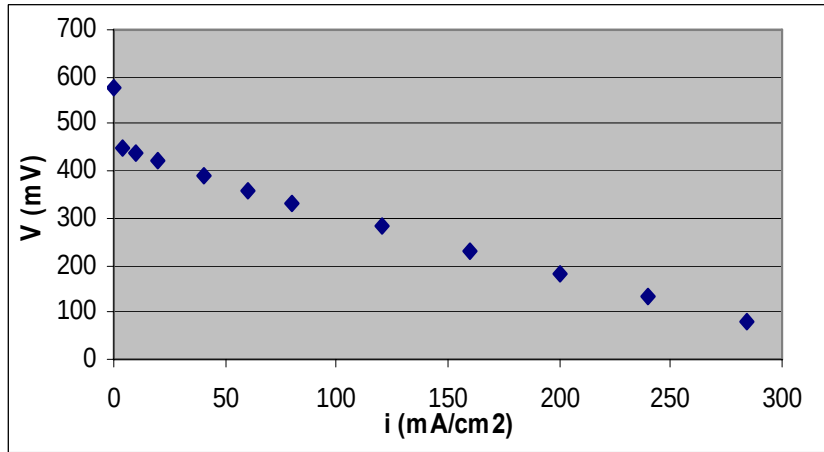
Şekil 17. Deney 17'ye ait polarizasyon eğrisi



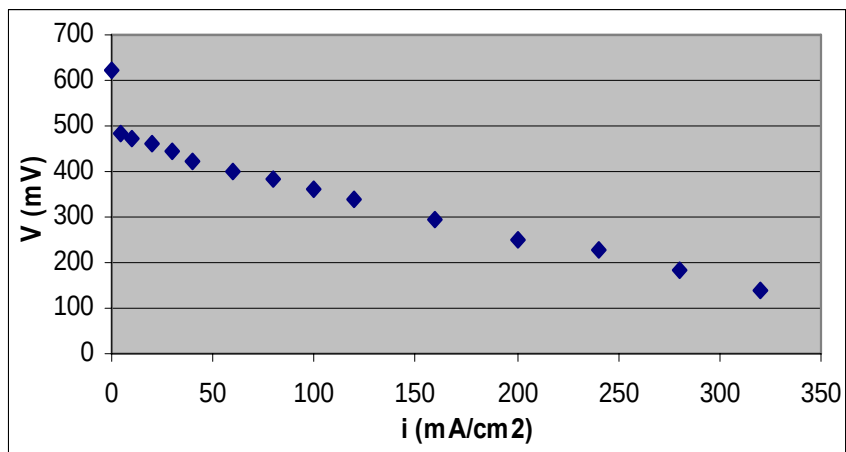
Şekil 18. Deney 18'e ait polarizasyon eğrisi



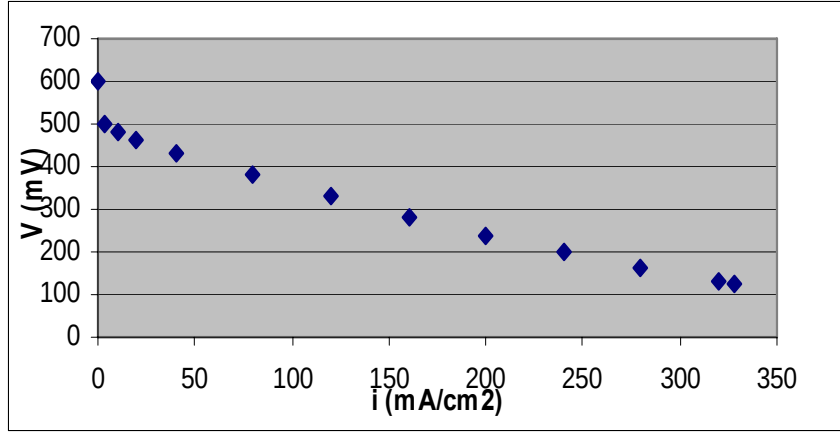
Şekil 19. Deney 19'a ait polarizasyon eğrisi



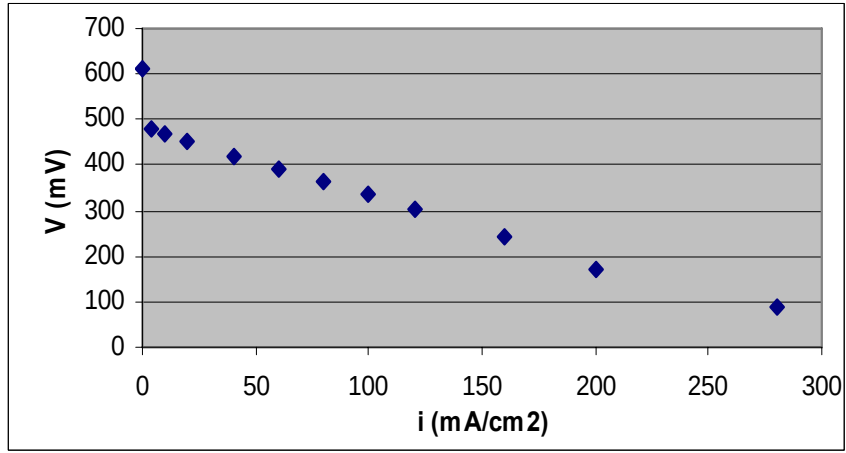
Şekil 20. Deney 20'ye ait polarizasyon eğrisi



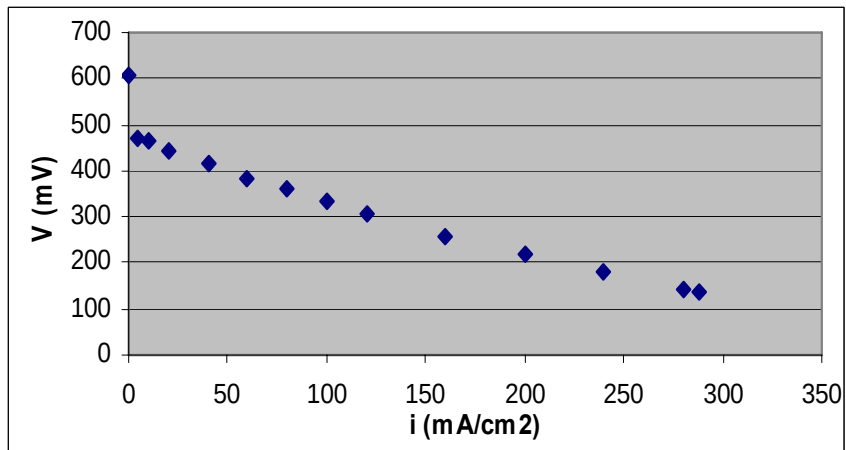
Şekil 21. Deney 21'e ait polarizasyon eğrisi



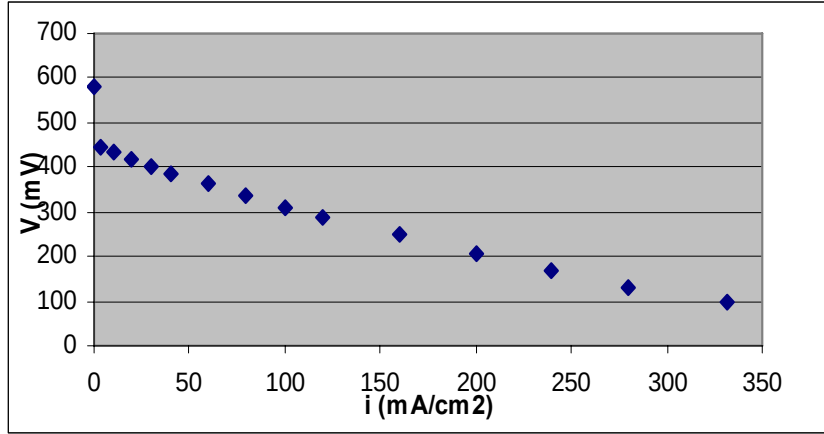
Şekil 22. Deney 22'ye ait polarizasyon eğrisi



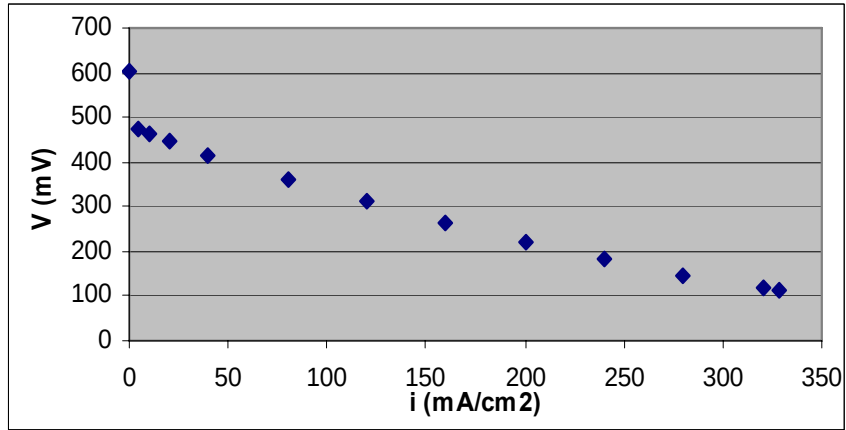
Şekil 23. Deney 23'e ait polarizasyon eğrisi



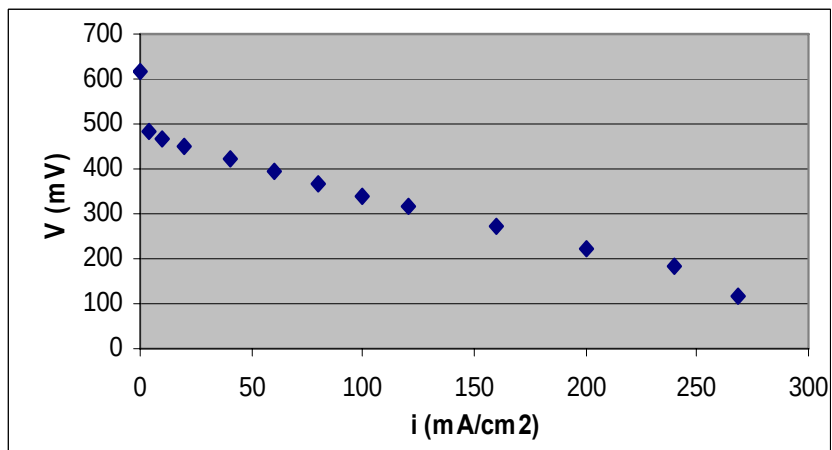
Şekil 24. Deney 24'e ait polarizasyon eğrisi



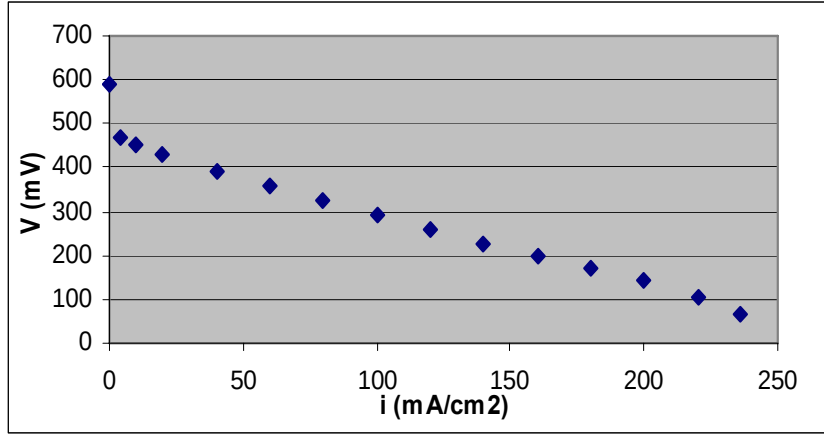
Şekil 25. Deney 25'e ait polarizasyon eğrisi



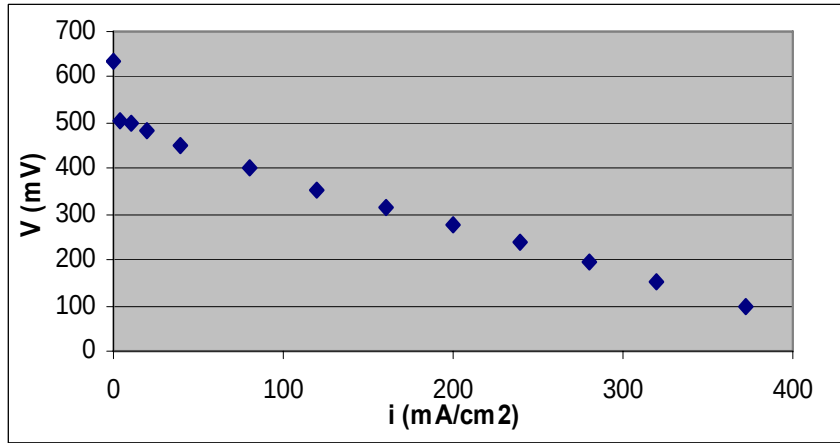
Şekil 26. Deney 26'ya ait polarizasyon eğrisi



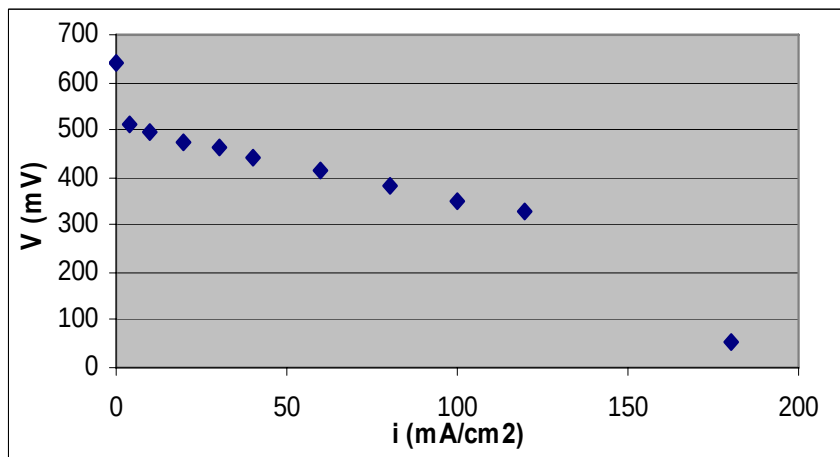
Şekil 27. Deney 27'ye ait polarizasyon eğrisi



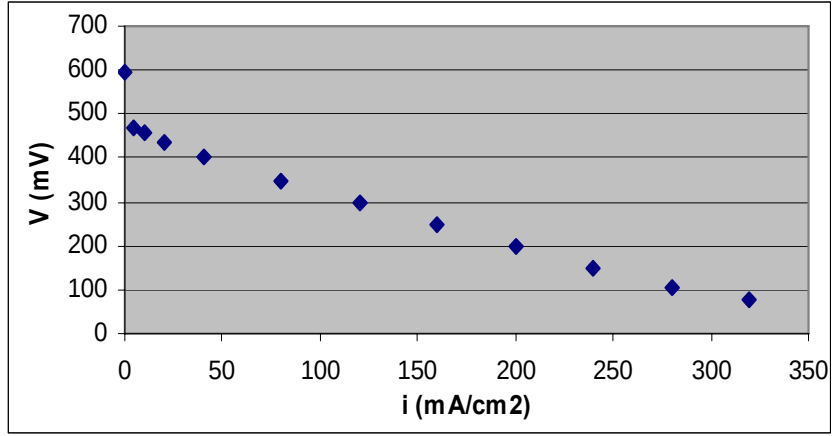
Şekil 28. Deney 28'e ait polarizasyon eğrisi



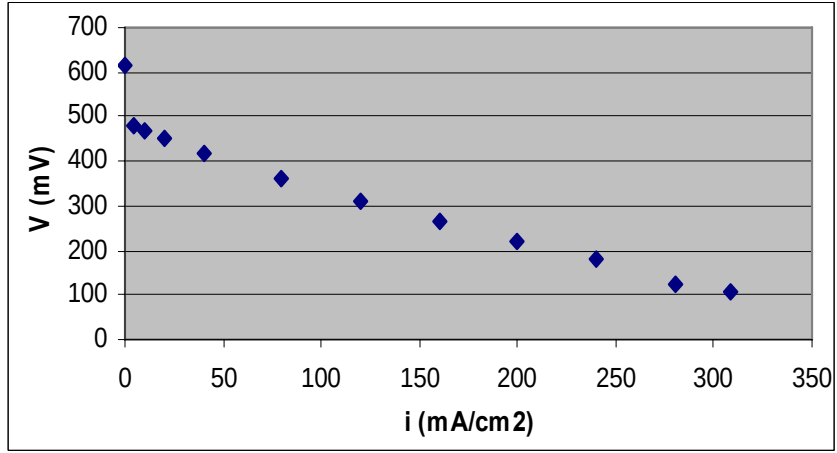
Şekil 29. Deney 29'a ait polarizasyon eğrisi



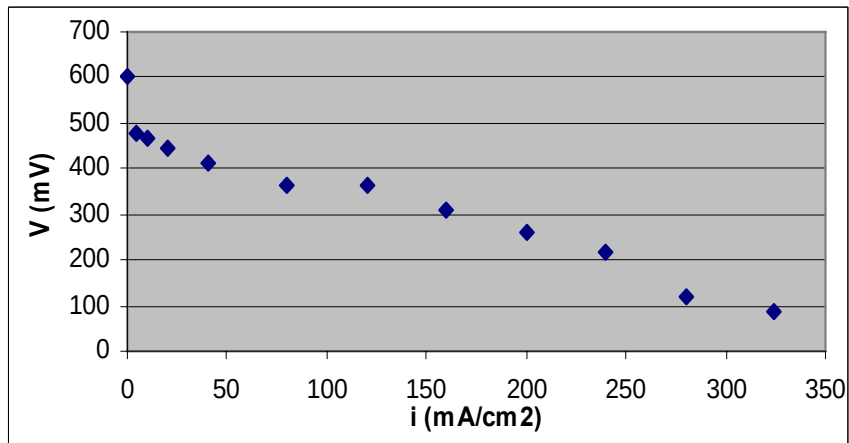
Şekil 30. Deney 30'a ait polarizasyon eğrisi



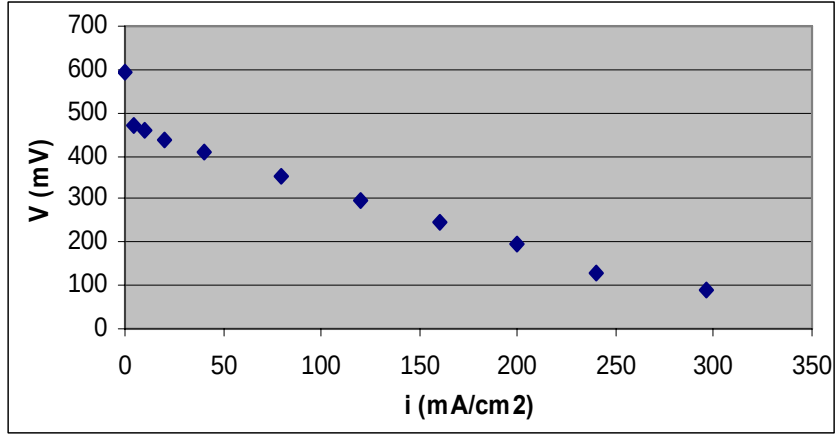
Şekil 31. Deney 31'e ait polarizasyon eğrisi



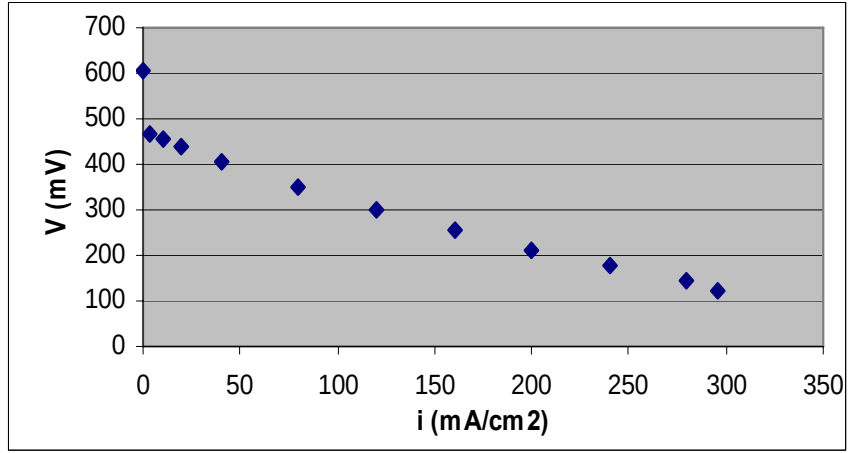
Şekil 32. Deney 32'ye ait polarizasyon eğrisi



Şekil 33. Deney 33'e ait polarizasyon eğrisi



Şekil 34. Deney 34'e ait polarizasyon eğrisi



Şekil 35. Deney 35'e ait polarizasyon eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İskenderun’da doğan Derya TARCAN, ilköğrenimini Kayseri Yahyagazi İlkokulu’nda, ortaöğrenimini Gebze Sarkuysan Lisesi’nde ve lise öğrenimini Gebze Neşet Yalçın Süper Lisesi’nde tamamladı. 1999 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü’nde üniversite öğrenimine başladı. 2004 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra, 2005 yılında Gebze İleri teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitim almaya başladı.