



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEM YAKIT HÜCRESİNİN MEMBRAN PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE ENERJİ AYRIŞIMI OLAYININ BULANIK MANTIK YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Sadık ATA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Sadık ATA

Tarih: 18.12.2015

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PEM YAKIT HÜCRESİNİN MEMBRAN PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE ENERJİ AYRIŞIMI OLAYININ BULANIK MANTIK YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Sadık ATA

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kevser DİNCER

2015, 122 Sayfa

Jüri
Yrd. Doç. Dr. Kevser DİNCER
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Yrd. Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

Bu tez çalışmasında, enerji ihtiyacını karşılamada kullanılan fosil yakıtların neden olduğu sorunlara çözüm olarak yenilenebilir enerji türlerinden hidrojen enerjisiyle ilgili bilgi verilmiştir. Hidrojenin yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak su üretilmesi kapsamında yakıt hücrelerinin genel özellikleri, çalışma prensibi, avantajları, çeşitleri hakkında bilgiler açıklanmıştır. Bu çalışmada yakıt hücresi çeşitlerinden polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresinin bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir.

PEM yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde önemli bir yere sahip olan membranın karbon nanotüp ile kaplanmasına yönelik deneysel çalışma yapılmıştır. Karbon nanotüp, teknik özellikler bakımından çok iyi mekanik dayanım, rijitlik, elektriksel ve ısıl özellikler sergilediği için, kaplama sonrası PEM yakıt hücresinin kaplama öncesine göre performansın arttığı görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca deneysel çalışmalarda önemli bir yere sahip olan bulanık mantık yöntemi ile modelleme çalışması yapılmıştır. Enerji ayrışımı olayının incelenmesi bakımından hidroksi (HHO) hücresinin performansının bulanık mantık yöntemi ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PEM yakıt hücresinin şarj ve deşarj sırasında karbon nanotüp ile kaplanması ve yitriya stabilize zirkonyum ile kaplanmasına yönelik yapılan deneysel çalışmaların bulanık mantık yöntemi ile modelleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar, HHO hücresinin ve PEM yakıt hücresinin membran performansının belirlenmesinde, bulanık mantık yönteminin başarıyla uygulanabildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Mantık, Karbon Nanotüp, Polimer Elektrolit Membran, Yakıt Hücresi

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MEMBRANE PERFORMANCE OF PEM FUEL CELL AND FUZZY LOGIC MODELLING OF ENERGY DECOMPOSITION EVENT

Sadık ATA

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Kevser DİNCER

2015, 122 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. Kevser DİNCER
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Asst. Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

In this thesis, information about the hydrogen energy from renewable energy sources, as a solution to the problems caused by fossil fuels used to meet the energy needs, is given. In the content of hydrogen consumption in fuel cells and production of water as an afterproduct, all the information about the general properties of fuel cells, working principle and their variations were explained. In this study, of all fuel cells variations, Polimer Electrolyte Membrane (PEM) and it's components were introduced.

The experimental study about carbon nanotube coating the membrane which has an important role in determining the performance of PEM fuel cell. The carbon nanotube has mechanical strength, stiffness, electrical and thermal properties in terms of technical features and therefore it is seen that the PEM fuel cell performance has been increased after the coating. This study also contains a model with fuzzy logic method that has an important place in experimental studies. The modelling of hydroxy cell's performance with fuzzy logic was performed in the way of examining the energy dissociation event. In addition, the fuzzy logic modellings of PEM fuel cell with carbon nanotube coating and yttria-stabilized zirconium coating during charge and discharge have been performed. These studies showed that fuzzy logic method can be applied succesfully in determining the performance of HHO cell and PEM fuel cell.

Keywords: Carbon Nanotube, Fuel Cells, Fuzzy Logic, Polimer Electrolyte Membrane

ÖNSÖZ

Tez çalışmasında, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli fikir ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Kevser Dincer'e anlayışından ve her konuda gösterdiği desteğinden dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen Yavuz Türkel'e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük katkı ve emeğe sahip olan çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sadık ATA
KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1.GİRİŞ **1**

2.HİDROJEN ENERJİSİ **4**

2.1. Hidroksi Hücresi (HHO) 5

3. YAKIT HÜCRELERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ **7**

3.1. Yakıt Hücreleri Tarihçesi 8
3.2. Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları 9
3.3. Yakıt Hücresi Genel Çalışma Prensibi 9
3.4. Yakıt Hücresi Çeşitleri 10
3.4.1. Alkali yakıt hücreleri 11
3.4.2. Fosforik asit yakıt hücreleri 12
3.4.3. Erimiş karbonat yakıt hücreleri 13
3.4.4. Katı oksit yakıt hücresi 14
3.4.5. Doğrudan metanol yakıt hücreleri 15
3.4.6. Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri 16

4.POLİMER ELEKTROLİT MEMBRANLI YAKIT HÜCRELERİ **17**

4.1. Genel Özellikler 17
4.2. Avantaj ve Dezavantajları 18
4.3. Çalışma Prensibi 18
4.4. PEM Yakıt Hücresinin Bileşenleri 19
4.4.1. Elektrotlar ve platinyum katalizör 20
4.4.2. Membran 21
4.4.3. Gaz difüzyon tabakası 22
4.4.4. Bipolar plaka 23

5. BULANIK MANTIK **25**

5.1. Yapay Zeka Kavramı 25
5.2. Bulanık Mantık Genel Özellikleri 26
5.3. Bulanıklık-Olasılık ve Random Sistem Kavramları 27
5.4. Bulanık Mantık Tarihçesi 27
5.5. Bulanık Mantık Avantaj ve Dezavantajları 28
5.6. Bulanık Kümeler 29

5.7. Üyelik Fonksiyonları 30
5.7.1. Üçgen üyelik fonksiyonu.....32
5.7.2. Yamuk üyelik fonksiyonu 33

6. KAYNAK ARAŞTIRMASI 34

6.1. Yakıt Hücresi İle İlgili Yapılan Çalışmalar 34
6.2. Bulanık Mantık Modeli İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....37

7. MATERYAL VE YÖNTEM.....41

7.1. Karbon Nanotüp Teknolojisi.....41
7.2. Spin Yöntemi İle Kaplama Tekniği.....42
7.3. Elektrospin Yöntemi ile Kaplama Tekniği 43
7.4. Deneysel Çalışma 44
7.4.1. Deneysel Sistem.....44
7.4.2. PEM yakıt hücresinin spin yöntemiyle KNT ile kaplanma aşamaları.....45
7.5. Bulanık Mantık Modeli Çalışma Prensibi.....51
7.5.1. Bulanıklaştırma.....51
7.5.2. Karar Verme Birimi 52
7.5.3. Bulanık Çıkarım Mekanizması.....52
7.5.4. Durulama Birimi.....54
7.6. HHO Hücre Performansının BM Yöntemi İle Modellenmesi 55
7.6.1. BM modelinin oluşturulması.....55
7.6.2. Dilsel değişkenler ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi 57
7.6.3. Kural tabanı oluşturulması 61
7.7. PEM Yakıt Hücresi Performansının BM Yöntemi İle Belirlenmesi 66

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 68

8.1. Yakıt Hücresinin Kaplama Sonrası Analiz Sonuçları 68
8.2. Bulanık Mantık Modeli Analiz Sonuçları.....75
8.2.1. HHO hücre performansının BM modeli analiz sonuçları 75
8.2.2. PEM yakıt hücresi performansının BM modeli analiz sonuçları 84

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 103

9.1. Sonuçlar 103
9.2. Öneriler 104

KAYNAKLAR 106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Amper/cm^2	:	Akım yoğunluğu
^oC	:	Sıcaklık
Cr	:	Krom
CO	:	Karbon monoksit
CO_2	:	Karbondioksit
CO_3^{-2}	:	Karbonat
GPa	:	GigaPaskal
H_2	:	Hidrojen
KOH	:	Potasyum hidroksit
K_2CO_3	:	Potasyum karbonat
Li	:	Lityum
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
Ni	:	Nikel
Volt/cm^2	:	Gerilim yoğunluğu
Watt/cm^2	:	Güç yoğunluğu

Kısaltmalar

AYH	:	Alkali yakıt hücresi
BM	:	Bulanık mantık
DMYH	:	Direkt metanol yakıt hücresi
EKYH	:	Erimiş karbonat yakıt hücresi
FAYH	:	Fosforik asit yakıt hücresi
HHO	:	Hidroksi hücresi
KNT	:	Karbon Nanotüp
KOYH	:	Katı oksit yakıt hücresi
MEB	:	Membran elektrot birimi
PEMYH	:	Polimer elektrolit membran yakıt hücresi
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
YSZ	:	Yitriya stabilize edilmiş zirkonyum

1.GİRİŞ

Bir ülkenin ekonomik kalkınmasının yanında sosyal kalkınmasının da iyileşmesi enerji tüketimindeki artış ile görülmektedir. Küresel istikrar için hem maliyeti az hem de çevreyi kirletmeyen yakıtların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı sanayi ve teknolojik gelişmede enerjinin büyük bir öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Fakat enerjinin kullanımı ile ilgili çok fazla olumsuz koşulla karşı karşıya kalınmaktadır. Olumsuz koşulların başında, sera etkisi nedeniyle küresel iklim değişikliği ve asit yağmurları gelmektedir. Fosil yakıtlı kaynakların kullanılmasıyla birlikte bu sorunların artacağı ve ayrıca bu yakıtların giderek azalması temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmenin ihtiyaçtan daha çok zorunluluk haline geldiğini göstermektedir (Dinçer ve Aslan, 2008).

Yakın gelecekte fosil yakıtlı kaynakların tamamen tükeneceği, gerek yakıt rezervleri gerek de mevcut kullanım hızları düşünüldüğünde anlaşılmaktadır. Dünyadaki petrol rezervlerinin 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 67 yıl ve kömür rezervlerinin 227 yıl sonra tükeneceği tahmin edilmektedir. Dünya elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %38.7 kömür, %18.3 doğalgaz, %7.5 petrol olmak üzere toplam %64.5 gibi bir oranda fosil yakıtlarından gerçekleşmektedir. Bundan dolayı yenilebilir enerji kaynaklarına yönelimin ilerleyen yıllarda hızla artacağı ve bu alana önemli miktarlarda yatırımların yapılacağı beklenmektedir (Altaş ve Mengi, 2008).

Yenilenebilir enerji çeşitlerinden olan hidrojen enerjisini kullanan yakıt hücresi, yakıt ve oksitleyici arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi elde edilen ve bunun sonucunda çevreye zararlı hiçbir emisyon etkisi olmayan, ayrıca yüksek verime sahip bir teknolojidir. Yakıt hücresi çeşitlerinden polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresi, düşük çalışma sıcaklığında yüksek verim elde edilmesi, sessiz çalışması ve saf suyun dışında herhangi bir atık ortaya çıkarmamasından dolayı önemli bir yere sahiptir. Çalışma prensibi, yakıt olarak kullanılan hidrojenin yakıt hücresinin anot tarafından beslenmesi, anotta platin katalizör varlığında hidrojenin elektron ve protonlarına ayrışması, protonların polimer membrandan geçerek katoda doğru hareket etmesi şeklindedir. Bu sırada elektronlar dış çevrimde elektrik akımını oluşturur, bunların sonucunda katotta havadan gelen oksijen, dış çevrimden gelen elektronlar ve protonlar birleşerek su ve ısı oluşur. Yapısındaki en önemli bileşen, anot ve katot taraflarındaki reaksiyonların oluşumunu sağlayan membrandır. Protonlarına ayrılan hidrojenin katot tarafına geçmesini sağladığı için membranın performansı, sistemin tüm

verimini etkileyen bir parametredir. Bu kapsamda, tez çalışmasında membran performansının geliştirilmesi için yakıt hücresinin anot tarfının karbon nanotüp ile kaplanması üzerine deneysel çalışma yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda sonuçların elde edilmesinde zaman ve maliyet unsuru, daha önce yapılmış deneylerden elde edilen verilerle genellemeler yaparak, bu genelleme ile daha önce gerçekleştirilmemiş deneylere ilişkin çözümler üretilmesini gerektirmiştir (Hasgül, 2005). Bu kapsamda yapay zeka tekniklerinden bulanık mantık (BM) modeli kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda oluşturulan sistemlerin BM modeli ortaya çıkarılmış, deneysel çalışmada tespit edilen her değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. İki yöntem ile ulaşılan sonuçlar, istatistiksel metotlar kullanılarak mukayese edilmiş, daha sonra deneysel çalışmada gerçekleştirilmemiş ara değerleri öğrenmek için BM modeli kullanılmıştır.

Tezin genel yapısı incelendiğinde, ikinci bölümde PEM yakıt hücresinde kullanılan hidrojen enerjisi ve hidroksi hücresi (HHO) teknolojisi hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde yakıt hücresi genel özellikleri ve yakıt hücresi çeşitleri hakkında genel açıklamalar yapılmıştır. Dördüncü bölümde PEM yakıt hücresi çalışma prensibi ve sistemin tüm bileşenleri açıklanmıştır. Beşinci bölümde, modelleme için kullanılacak olan bulanık mantık yöntemi, genel özellikleri ve klasik mantık ile olan farkı ortaya konularak anlatılmıştır.

Altıncı bölüm olan kaynak araştırması bölümünde, yakıt hücresi membran performansının iyileştirilmesinde yapılmış çalışmalara ve bulanık mantık modelinin uygulandığı çalışmalara yer verilmiştir.

Yedinci bölüm olan Materyal ve Metot bölümünün ilk kısmında, membran performansının belirlenmesi için yapılan birçok çalışmadan farklı olarak, yeni bir teknoloji olan karbon nanotüp (KNT) teknolojisi açıklanmıştır. Sıra dışı elektriksel ve mekanik özellikler gösteren karbon nanotüpün, yakıt hücresinin anot tarafına kaplama aşamaları anlatılmıştır. İkinci kısımda ise, BM modelinin çalışma prensibi açıklanmış, HHO hücresinin performansının belirlenmesi için oluşturulan BM modeli, anlatılan çalışma prensibi doğrultusunda anlatılmıştır.

Sekizinci bölüm olan Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümü, kendi içinde 5 farklı kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda, deneysel çalışmada anot tarafı spin yöntemiyle KNT ile kaplanan yakıt hücresinin performans sonuçları kaplama öncesi ve sonrası durumları için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Daha sonraki kısımlar oluşturulan BM modellerini anlatmaktadır. İkinci kısımda HHO hücresinin performansının belirlenmesi,

üçüncü kısımda KNT ile kaplanan yakıt hücresinin şarj sırasındaki membran performansının belirlenmesi, dördüncü kısımda KNT ile kaplanan yakıt hücresinin deşarj sırasındaki membran performansının belirlenmesi, beşinci kısımda yitriya stabilize edilmiş zirkonyum (YSZ) ile kaplanan yakıt hücresinin şarj sırasındaki membran performansının belirlenmesi için oluşturulan BM modelleri anlatılmıştır. Tüm yapılan model çalışmalarında deneysel çalışmalarda tespit edilen veriler ile BM modelinden elde edilen verilerin karşılaştırması istatistiksel yöntem kullanılarak yapılmış, deneylerde tespit edilmeyen ara değerlere ilişkin sonuçları görebileceğimiz grafiklere yer verilmiştir.

Tezin son bölümü olan sonuçlar ve öneri bölümünde, tespit edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiş, yapılan deneysel çalışma ve modelleme çalışmasıyla ilgili öneriler aktarılmıştır.

2.HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen, 1500'lü yıllarda keşfedilmiş ve 1700'lü yıllarda da yanabilirliğinin farkına varılmış olup Yunanca'da su oluşturan anlamına gelmektedir. 1776'da Cavendish tarafından izole edilmiş, 1784'de ise su buharını kızdırılmış metal veya kömür üzerinden geçirerek hidrojen ve oksijene ayıran Lavoisier tarafından da isimlendirilmiştir. Karbondioksit üretmediği için sera etkisine yol açmaması, böylece çevre kirliliğine en ufak bir katkısının olmaması hidrojenin geleceğin enerji kaynağı olarak görülmesini sağlamaktadır (Bayrak, 2011).

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olması, başka bir deyişle üretilmiş enerjiyi bir yerden başka bir yere taşıması diğer alternatif yakıtlardan farkını ortaya koymaktadır. Hidrojen hem yenilenebilir enerji kaynaklarından hem de fosil kaynaklardan elde edilmektedir. Hidrojenin değişik enerji formlarına, diğer yakıtlara oranla daha yüksek verimle çevrilmesi, tankerler ile uzak mesafalere taşınabilmesi, doğada en çok bulunan suyun hammaddesi olması hidrojenin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca hidrojenin büyük ölçekli sistemler için gaz halinde, uzay teknolojisindeki çalışmalar için sıvı halde, küçük ölçekli sistemler için ise metal hidridler şeklinde depolanabilme imkanları vardır (Sherif ve ark., 2005).

Hidrojen, havadan 14,4 kez daha hafif, evrende en çok bulunan elementtir. Renksiz, kokusuz ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip, aynı zamanda da en hafif kimyasal elementtir. 1 kg hidrojen, 2.8 kg doğal gaz veya 3.2 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Yoğunluğu çok düşük olup, 0.0899 gram/litre'dir (Yıldızbilir, 2006).

Hidrojen, gaz veya sıvı hallerde depolanabilme özelliğine sahip olup iki durumunda kendine özgü dezavantajları vardır. Sıkıştırılmış gaz olarak depolanmasında, basınca dayanıklı tank gerekmekte olup, araç içinde düşünüldüğünde tank ağırlıkları problem oluşturmaktadır. Sıvı olarak depolanmasında ise gaz halde depolanmasına göre daha fazla enerji gerekir. Çünkü sıvılaştırma işlemi için -253 ^{o}C değerine kadar soğutulması gerekir bu da depoladığı enerjinin %25-30'una tekabül etmektedir (Kellegöz, 2005).

Metal hidrür yöntemiyle hidrojen depolanmasında ise, bazı metaller ve alaşımlar, normal basınç ve sıcaklıkta hidrojen absorblayarak hidrür bileşiklerini meydana getirirler. Hidrürler, hidrojen ile bir veya daha fazla başka element içeren kimyasal maddelerdir. Bu sistemde, ısı alışveriş sistemi ile çalışan metal granüller

bulunur. Çalışma prensibi, tanka hidrojen doldurulurken ısı çekilmesi, tank boşaltılırken de ısı verilmesi şeklindedir. Metal hidrür ısıtılması durumunda absorbladığı hidrojeni serbest bırakması üzerine kurulu bir mekanizması vardır. Hidrojenin sıvı halde depolanmasına göre daha etkili olup güvenli bir yöntemdir. Olumsuz bir durum yaşanması durumunda, örneğin tankın delinmesi halinde ısı sistemi hemen soğutmaya geçip hidrojen kaçağını engelleyerek, hidrojen metal yapının içerisinde kalır (Beşergil, 2009).

Hidrojen depolanmasında avantajlı bir teknoloji olan sodyum bor hidrür, katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen taşımaktadır. Saf sodyum bor hidrür yerine pratikte %30-%40 sulu çözeltisi kullanılmakta olup, katalizör yardımıyla hidrojene ayrılmaktadır. Dezavantajı, hidrojenin elde edildikten sonra tekrar temizlenmesinin gerekmesidir (İbrahimoğlu, 2008).

2.1. Hidroksi Hücresi (HHO)

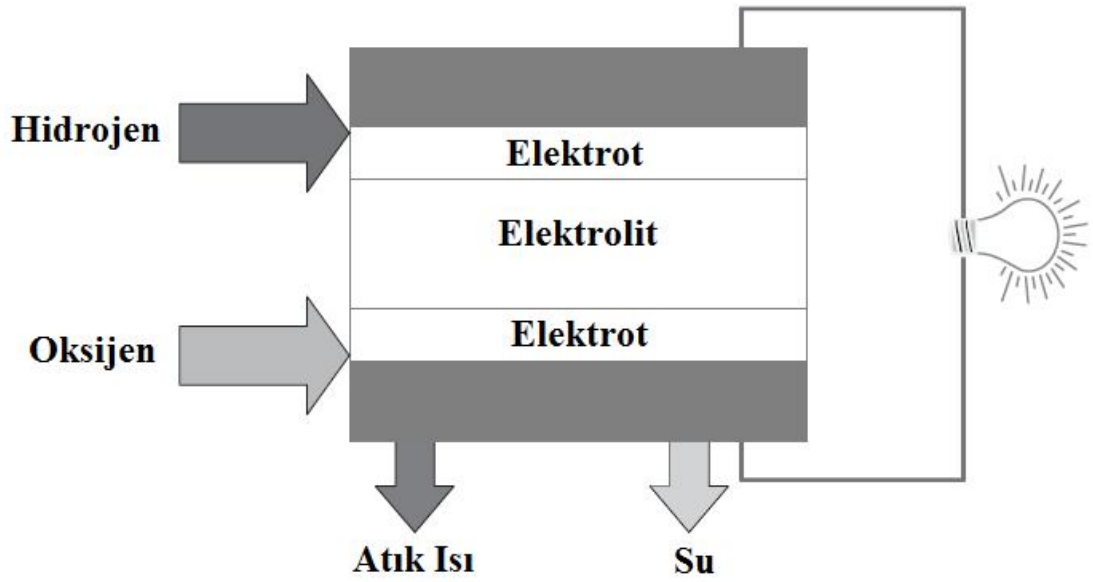
Hidrokarbon yakıtlar dünyada kullanılan enerjinin birincil kaynağını oluşturmaktadır. Hidrokarbon yakıt kullanımının başlıca olumsuz yan etkileri arasında zararlı kirletici emisyonları, artan sera gazı düzeyleri, yüksek maliyetler ve politik istikrarsızlık gelmektedir. Bu yakıtın tüketimini ve ortaya çıkan emisyonunu azaltmanın bir yolu, bir yakıt takviyesi olarak hidrojen kullanmaktır (Bhardwaj, 2014). Yanma sürecindeki hava girişinde hidrojen gazı ilavesi alev hızını, yalın yanma yeteneğini ve alev söndürme mesafesini arttırmaktadır. Fakat ulaşım kıtlığı ve üretim maliyeti bu tür uygulama yapmayı zorlaştırmaktadır. Brown Gaz veya hidroksi hücresi (HHO) olarak adlandırılan; suyun elektrolizi ile üretilen hidrojence zengin bir gaz, bu zorlukları çözmek için bir alternatif olabilir (Leelakrishnan vd., 2013). 1918 yılında Charles Frazer, Kuzey Amerikalı mucit, içten yanmalı motorlar için hidrojen güçlendirici olarak kullanılan ilk su elektroliz makinesinin patentini aldı. 1970 ve 80'li yıllarda, Yull Brown, bir Bulgaristan doğumlu Avustralyalı mucit, Brown Gazının patentini alarak bir kesme gazı ve yakıt katkı maddesi olarak sevdirmeye ve popüler hale getirmeye çalıştı (Cameron, 2012). HHO hidrojen ve oksijenin moleküler ve manyetik olarak birbirine bağlanmasıyla oluşan zenginleştirilmiş bir karışımdır. HHO gazı ortak-kanallı elektrolizerde üretilmekte ve motorun yanma odası içine emme manifoldundan gönderilmektedir (Yadav ve Sawant, 2011).

Otomotiv uygulamalarında hidrojen gazı kullanmanın zorluklarından biri depolamadır. HHO araç üzerinde oluşturulmuyor olsaydı eğer büyük tanklar gerekli olacaktı. Bu nedenle, araç üzerinde hidrojen gazı üretimi ile bu son derece patlayıcı gazı depolamak zorunda kalınmayacaktır. Ancak, hidrojen üretimi de ekstra bir maliyetle gelmektedir. Aracın aküsü ve alternatörü üzerinde bir yük oluşturacak ve bu da motor gücünü etkileyecektir. HHO gazının yanma sürecine katılımıyla daha iyi yanma, artan motor gücü ve düşük emisyonları sağlayacağı tahmin edilmektedir (Madriya ve Harding, 2014). HHO jeneratör tasarımlarında dikkat edilmesi gereken noktalar; elektrotların seçimi, iki elektrot arasındaki mesafe, elektrotlar arasındaki bağlantı, katalizörün seçimi, seviyesi, hazne seçimi, elektriksel bağlantı ve yangın koruması olarak sıralanabilir (Chakrapani ve Neelamegam, 2011).

HHO gazının tutuşma sıcaklığı yaklaşık 570°C'dir ve normal atmosfer basıncında stokiyometrik karışım için 241,8 kJ ısıtma değeri meydana gelir. Normal şartlar altında, HHO gazı hacimsel olarak yaklaşık %4 ile %94 hidrojen arasında olduğunda yanabilir. Ateşlendiğinde, gaz karışımı, su buharı ve enerji açığa çıkarır. Açığa çıkan ısı miktarı, yanma tarzından bağımsızdır, ama alev sıcaklığı değişir. 2800°C'lik yüksek sıcaklıkta saf stokiyometrik karışımı ile elde edilir ve havada yanmakta olan bir hidrojen alevinden yaklaşık 700°C daha sıcaktır (Sakthıvel 2014, Dincer ve ark.,2013). HHO gazı çok yüksek yayılmaya sahiptir. Havada dağılma özelliği benzinden çok daha fazladır ve iki nedenden dolayı avantajlıdır. İlk olarak, homojen hava yakıt karışımı ve oluşumunu kolaylaştırır ve ikinci olarak herhangi bir sızıntı olursa hızla dağılabilir. HHO gaz yoğunluğu çok düşüktür. İçten yanmalı bir motorda kullanıldığında bu depolama sorununa yol açar. Birkaç araştırma ile suyun bir litresi ile yaklaşık 1866 litre HHO gazı üretildiği tespit edilmiştir. Bu gaz ateşlendiğinde, hacim orijinal hali olan bir litre su hacmine düşmektedir (Sakthıvel 2014).

3. YAKIT HÜCRELERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Yakıt hücreleri, yakıt ve oksitleyici arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi elde edilen temiz, çevreye herhangi bir olumsuz etkisi olmayan bunun yanında yüksek verime sahip yeni bir teknolojidir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi yakıt hücreleri, yakıtın kimyasal enerjisini herhangi bir aşamaya gerek olmadan elektrik enerjisine çevirirler. Başlıca avantajı, sıfır emisyon özelliğiyle atık olarak sadece su ve ısı elde edilmesidir.

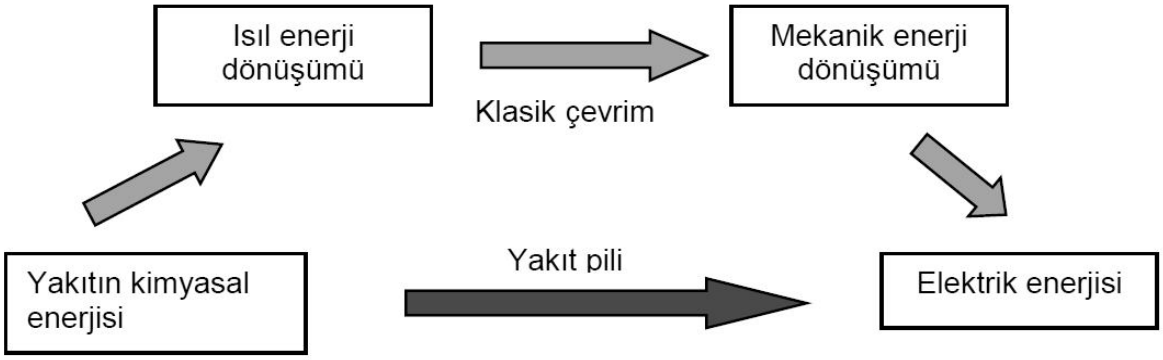


Şekil 3.1. Yakıt hücresi teknolojisi (Barbir, 2013).

Yakıt hücresi ile piller arasındaki fark, pillerin sadece enerji depolama aleti olmasıdır. Pilin maksimum enerjisi hücrenin içine depolanmış kimyasal maddenin miktarı ile belirlenmektedir. Bu kimyasal maddenin dönüşümü bittiğinde pilin ömrü bitmekte yani atılmaktadır. İkincil pillerde ise bu işlem sonunda reaksiyon geri çevrilmekte yani kimyasallar tekrar yükleme yapılmak suretiyle rejenere edilmektedir. Yani hücrenin içine dış bir kaynaktan enerji yüklenmesi olmaktadır. Yakıt hücresinin pillerden farkı da bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bir yakıt hücresi teorik olarak elektrotlara yakıt ve oksitleyici beslendiği sürece elektrik üretme kapasitesine sahip enerji dönüşüm aletidir (San ve ark., 2001).

Yakıt hücrelerinde yakıtın kimyasal enerjisi direk olarak elektrik enerjisine çevrilirken, klasik çevrim teknolojisinde tamamen farklıdır. Bu farklılık, Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Fosil yakıtlar, geleneksel yöntemler kullanılarak elektriğe dönüştürülürken sırasıyla şu adımlar izlenir. İlk olarak yakıtın yanmaya uygun hale

getirilmesi sağlanır, yani kömür, petrol gibi fosil yakıtlar gazlaştırma veya ayrıştırma olarak adlandırılan işlemlerden geçirilir. Bu olay, otomobillerde kullandığımız benzinin rafinerilerde petrolden üretilmesine benzer. Bu işlemden sonra elde edilen yakıtın uygun bir reaktörde yakılarak kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi sağlanır. Daha sonra bu ısı enerjisi, pistonlu makinelerde hareket enerjisine çevrilmekte daha sonra jeneratörle elektrik enerjisine dönüşmektedir (Erdener ve ark., 2013). Her bir aşamada verim düşmekte ve çevre kirletilmektedir. Yakıt hücrelerinde ise kimyasal enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu aşamalarda gerçekleşen verim kayıplarından etkilenmez.



Şekil 3.2. Geleneksel teknoloji ve yakıt hücresinde enerji dönüşümü (San ve ark.,, 2001).

3.1. Yakıt Hücreleri Tarihçesi

İlk olarak, 1839 yılında Sir William Grove, seyreltik sülfirik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşmuş bir sistemde, hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır. Yakıt hücresi terimi ise, 1889'da Ludwing Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak ortaya konmuştur. Daha sonra 1.5 watt güç üreten ve %50 çalışma verimine sahip bir yakıt hücresi Mond ve Longer tarafından geliştirildi. Oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanmışlardır. 1932'de Francis T. Bacon, ilk başarılı yakıt hücresini geliştirmiştir. Ardından, 1952'de Bacon ve arkadaşları 5 kW'lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. 1960'lı yıllarda NASA, yakıt hücresi teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmıştır. Yakıt hücreleri hafif olması ve atık olarak su ve ısı oluşturması, yüksek verime, düşük gürültüye sahip olmasından dolayı uzay uygulamaları için düşünülmeye başlanmıştır. İlk olarak Gemini uzay aracında, General Elektrik tarafından üretilen proton değişim membranlı yakıt hücresi kullanılmıştır. 1970'li yıllarda General

Motor, “Elektrovan” adlı yakıt hücresiyle çalışan bir araç geliştirmiştir. Bundan sonra aynı yıllarda devlet destekli yakıt hücresi araştırmaları başlamış ve bu amaçla Los Alamos Ulusal Laboratuarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuarları kurulmuştur (Şahin, 2014).

3.2. Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları

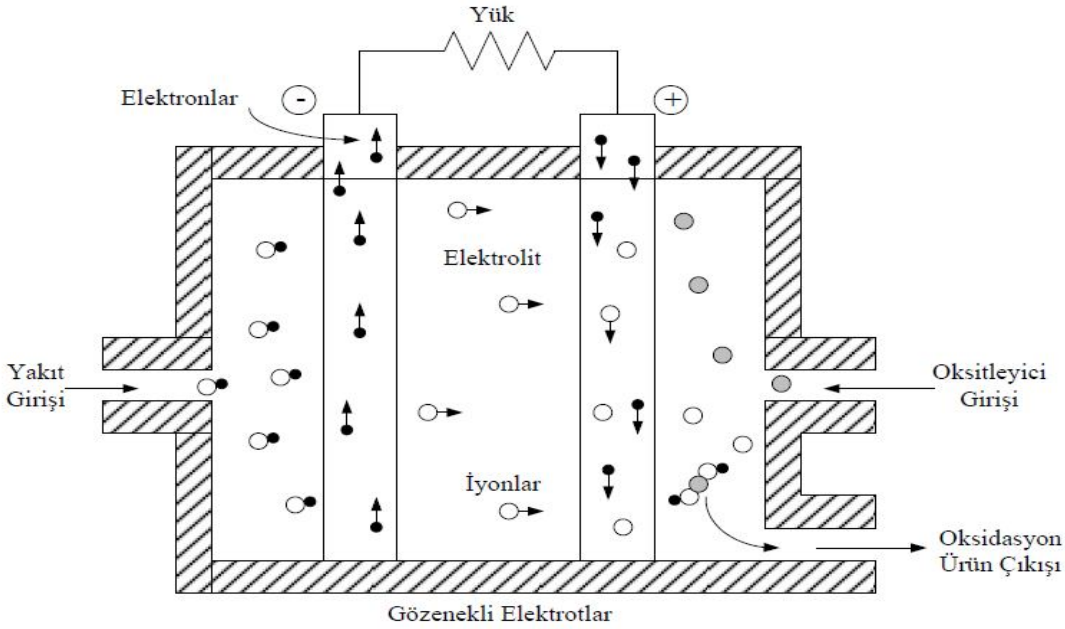
Yakıt hücreleri kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüşmesinden dolayı, klasik çevrimde gerçekleşen kayıplardan etkilenmediği için verimleri yüksektir. Ayrıca, yakıt hücresi, termal enerji sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışır. Termal sistemlerde elektrik üretimindeki verim %35-40’ı geçemezken, yakıt hücresi sistemlerinde %70 ‘e yakın verimle çalışılmaktadır. Çünkü yakıt hücresi sistemleri, Carnot çevrimi kriterlerinden etkilenmez. Hareketli parçaya sahip olmamasından dolayı yapıları çok basit olup gürültü kirliliğine neden olmamaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda açığa çıkan sadece su ve ısı olduğundan sıfır emisyon sağlar (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Yakıt hücresinin dezavantajları arasında maliyetinin yüksek olması, hidrojenin elde edilmesi ve depolanmasına ilişkin sorunlar gelmektedir. Bu sorunların giderilmesiyle birlikte, yakıt hücresi teknolojisi gelecekte çok daha büyük bir öneme sahip olması beklenmektedir.

3.3. Yakıt Hücresi Genel Çalışma Prensibi

Bir yakıt hücresi temel olarak anot, katot ve bunlarla temas halinde olan elektrolitten oluşur. Tipik bir yakıt hücresinin çalışma prensibi Şekil 3.3’de görülmektedir. Anot tarafı negatif elektrot, katot tarafı pozitif elektrottur. Bu hücrede yakıt anoda, oksitleyici ise katoda sürekli olarak beslenmektedir. Yakıt ile oksijen arasında indirgenme/yükseltgenme reaksiyonu olurken elektrik akımı ve ısı oluşmaktadır. Katot tarafından hava geçerken, anot tarafından da yakıt hücresi çeşidine göre belirlenen gaz geçer. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda, anot tarafındaki gaz kanallarından geçerken proton ve elektronlarına ayrılan hidrojen iyonları elektrolitin içinden geçerek karşı tarafa geçer. Elektrolit, sadece protonların geçişine izin verir. Elektronlar ise katoda bir dış devre yoluyla taşınır, bu esnada elektrik üretir.

Bu işlemler sonucunda, katotta oksijen, hidrojen iyonları ve elektronların reaksiyona girmesiyle su ve ısı elde edilir (Taner ve Eroğlu, 2008).



Şekil 3.3. Tipik bir yakıt hücresinin çalışma prensibi (Gelen, 2012).

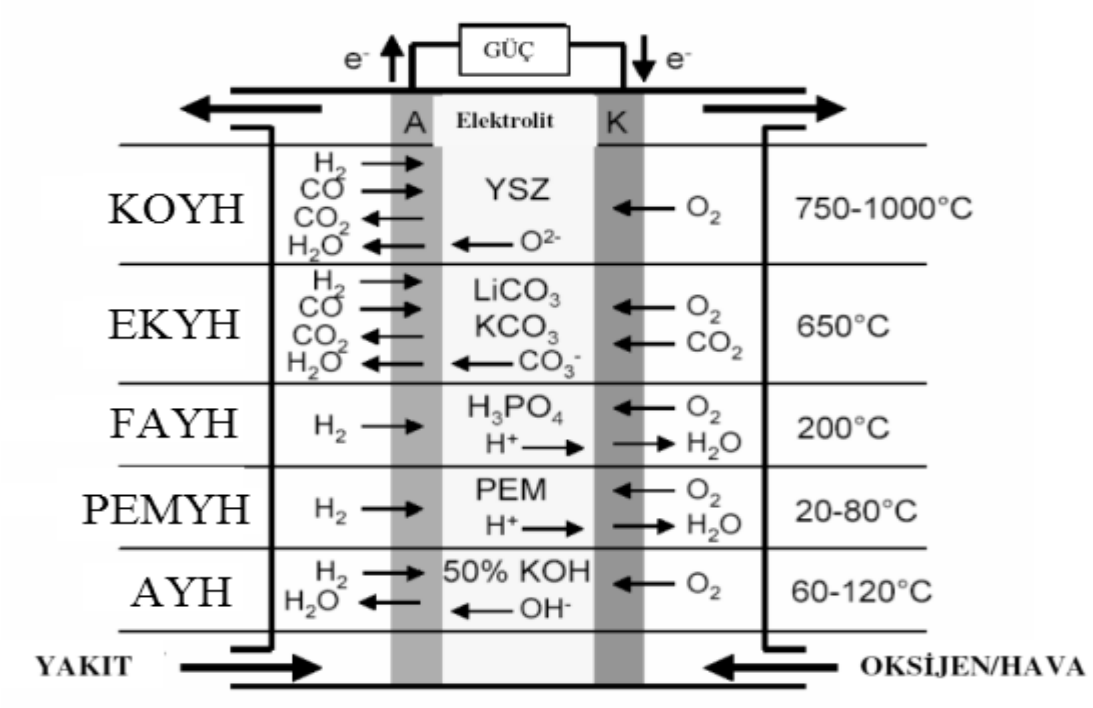
3.4. Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücrelerinin, içerdikleri elektrolit tipine göre 6 farklı çeşidi bulunmaktadır. Bunlar;

i. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMYH)
ii. Alkali yakıt hücresi (AYH)
iii. Fosforik asit yakıt hücresi (FAYH)
iv. Erimiş karbonat yakıt hücresi (EKYH)
v. Katı oksit yakıt hücresi (KOYH)
vi. Doğrudan metanol kullanan yakıt hücresi (DMYH)

Çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırma yaptığımızda, düşük sıcaklık-orta sıcaklık-yüksek sıcaklık yakıt hücreleri olarak 3 farklı sınıflandırma yapılabilir. Düşük sıcaklık yakıt hücreleri, PEMYH ve DMYH; orta sıcaklık yakıt hücreleri FAYH; yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri ise EKYH ve KOYH'lerdir.

Yakıt hücresi çeşitlerinin her birisinin sahip olduğu elektrolit, anot ve katot gazları ve çalışma sıcaklıkları Şekil 3.4'de verilmiştir.

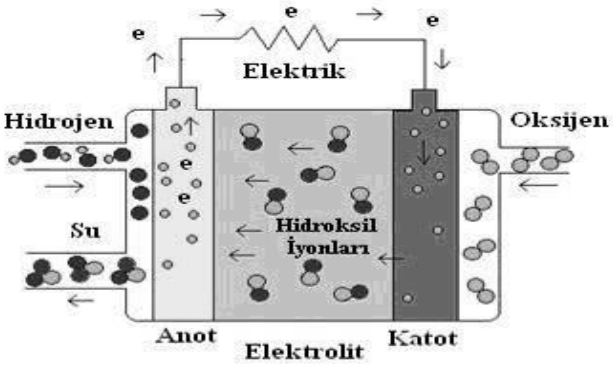


Şekil 3.4. Yakıt hücresi çeşitleri çalışma sıcaklıkları ve kullandıkları yakıt (Yılmaz, 2006).

3.4.1. Alkali yakıt hücreleri

Alkali yakıt hücrelerinde elektrolit olarak suda çözünmüş potasyum hidroksit kullanılır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık olarak 80 ^{o}C'dir.

Çalışma prensibi, hidroksil iyonlarının katottan anoda doğru ilerlemesi, anotta hidrojen gazının OH- iyonlarıyla reaksiyona girmesi, bunun sonucunda su oluşurken elektronların açığa çıkması şeklindedir. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi bu elektronlar, harici bir devreye elektrik enerjisi sağladıktan sonra katoda dönerler, daha sonra oksijen ve suyla reaksiyona girerek sistemde hidroksil iyonu üretilir.



Şekil 3.5. Alkali yakıt hücresi çalışma prensibi (Yıldızbilir, 2006).

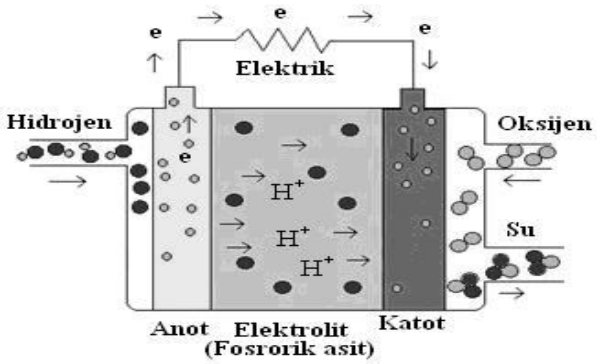
Avantajları, diğer tüm yakıt sistemleri arasında en yüksek voltaj verimine sahip olması ve soy metal olmayan katalizörlerin kullanılabilmesidir. Elektriğin yanı sıra içilebilir nitelikte su ürettikleri için uzay araçlarında kullanılmaktadır.

Dezavantajları, karbondioksite çok hassas olması, saf halde hidrojene ihtiyaç duyması, ortamda bulunabilecek çok az miktarda karbondioksitin bile potasyum hidroksit ile reaksiyona girerek potasyum karbonat oluşumuna sebep olması, bunun sonucunda elektrolitin yapısı değişerek hücrenin çalışamaz hale gelmesi olarak belirtilebilir (Bıyıkoğlu, 2003).

3.4.2. Fosforik asit yakıt hücreleri

Fosforik asit yakıt hücrelerinde elektrolit olarak fosforik asit kullanılır. Çalışma sıcaklıkları 150-200 ^{o}C arasındadır.

Çalışma prensibi, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi pozitif yüklü hidrojen iyonlarının elektrolitten geçerek anottan katoda ilerlemesi, anotta üretilen elektronların ise harici bir yoldan devrelerini tamamlayarak elektrik enerjisi üreterek katoda dönmesi, son olarak da elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijenin reaksiyona girerek su meydana gelmesi şeklindedir.



Şekil 3.6. Fosforik asit yakıt hücresi çalışma prensibi (Yıldızbilir, 2006).

Avantajları, fosforik asitin bir elektrolit olarak mükemmel ısıl, kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık göstermesi ve bu elektrolitin suyun kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda da görevini yapabilmesi olarak belirtilebilir. Diğer asit elektrolitlerinde iletkenlik için su gerekmektedir.

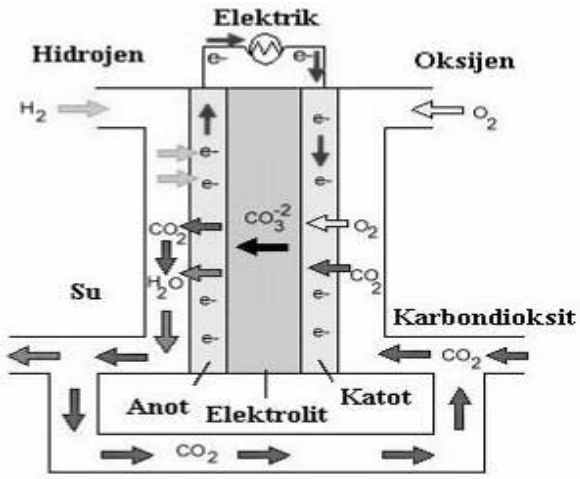
Dezavantajları, elektrolit olarak kullanılan fosforik asitin kararlı bir asit olmasından dolayı temel metallerle çok çabuk reaksiyona girmesi, bunun sonucu olarak,

sadece platin ve platin alaşımları olan pahalı katalizörlerin kullanılması olarak belirtilebilir. Yakıt hücresinde kullanılacak hidrojen, bir dış dönüştürücüde hidrokarbon yakıttan elde edilir (Bıyıkoğlu, 2003).

3.4.3. Erimiş karbonat yakıt hücreleri

Erimiş karbonatlı yakıt hücrelerinde elektrolit olarak alkali potasyum lityum karbonat kullanılır. Çalışma sıcaklıkları 600-700 ^{o}C arasındadır.

Çalışma prensibi diğer yakıt hücrelerinden çok farklıdır. EKYH, katot tarafından oksijen ve karbondioksit gazı ile beslenir, bu şekilde iyonların iletilmesini sağlayan karbonat oluşumu sağlanır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi bu karbonat iyonları, elektrolit içinden anoda geçer, burada hidrojenle reaksiyona girerek su, karbondioksit ve elektronları açığa çıkarır. Elektronlar, diğer yakıt hücrelerinde olduğu gibi harici bir devreyi izleyerek elektrik enerjisini meydana getirerek katoda döner. Anotta açığa çıkan karbondioksit ve oksijen elektronlarla reaksiyona girerek karbonat iyonları meydana gelir, daha önce boşalan elektrolit tekrar doldurulmuş olur.



Şekil 3.7. Erimiş karbonat yakıt hücresi çalışma prensibi (Yıldızbilir, 2006).

Avantajları, yüksek çalışma sıcaklığına sahip olmalarından dolayı katalizör olarak değerli metal kullanımına ihtiyaç duymamaları, karbonmonoksit zehirlenmesine karşı dayanıklı olması belirtilebilir. Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısının kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır.

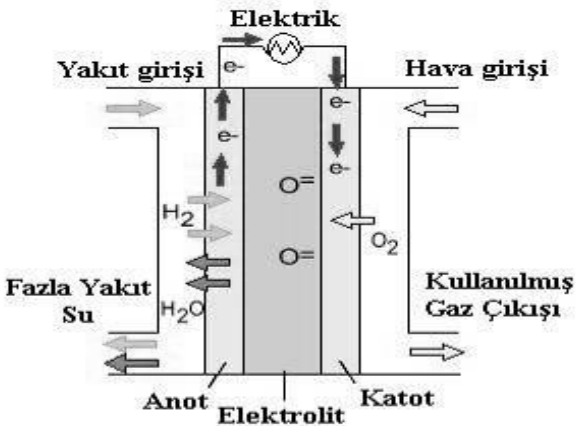
Dezavantajları, karbonat iyonlarının anot reaksiyonunda harcanması nedeniyle sürekli katoda karbondioksit enjeksiyonu gerektirmesi, yüksek çalışma sıcaklığı ve

korozif elektrolit kullanımı sonucu parçaların ömrünün kısa olması olarak belirtilebilir (Yıldızbilir, 2006).

3.4.4. Katı oksit yakıt hücresi

Katı oksit yakıt hücresi elektrolit olarak sert ve seramik bir elektrolit kullanır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık olarak 1000 ^{o}C'dir.

Çalışma prensibi, Şekil 3.8'de görüldüğü gibi negatif yüklü oksijen iyonlarının seramik elektrolit içerisinde hareket etmesi, hidrojen içeren bir yakıt gazının anottan geçirildiğinde negatif yüklü oksijen iyonlarının yakıtı oksidize etmesi ve oluşan elektronların harici bir yol katederek elektrik devresini tamamlayarak elektrik enerjisini üretmesi şeklindedir. Oksijen genellikle katot tarafında havadan elde edilir.



Şekil 3.8. Katı oksit yakıt hücresi çalışma prensibi (Yıldızbilir, 2006).

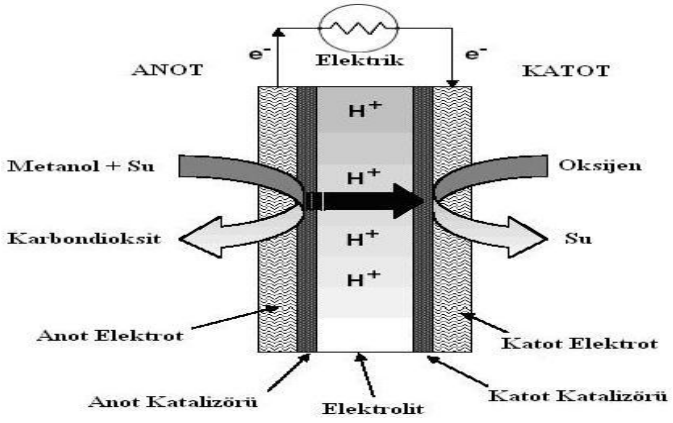
Avantajları, yüksek çalışma sıcaklığına sahip olmalarından dolayı katalizör olarak değerli metal kullanımına ihtiyaç duymamaları başta doğal gaz olmak üzere tüm hidrokarbon içeren yakıtları kullanabilmesi, yüksek elektrik üretim verimi, egzoz ısısının bir ısı kaynağı olarak çeşitli proseslerde kullanılabilmesi olarak belirtilebilir.

Dezavantajları, uzun çalışmaya başlama zamanı gerektirmeleri, yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle ve yüksek sıcaklıklara dayanan malzemelerin geliştirilmesinin gerekliliği, yüksek maliyetli olmaları belirtilebilir (Mat, 2011; Fettah, 2010).

3.4.5. Doğrudan metanol yakıt hücreleri

Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde elektrolit olarak polimer zar kullanılır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık olarak 50-100 ^{o}C aralığındadır.

Çalışma prensibi, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi katot üzerinde oluşan su ile metanolün anotta elektrokimyasal reaksiyonu sonucu metanolün parçalanması, bunun sonucunda protonlar, elektronlar ve karbondioksit meydana gelmesi, oluşan protonların polimer elektrolit zardan geçerek katoda hareket etmesi ve burada oksijen ile reaksiyon girerek suyun oluşumu şeklindedir. Bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen termodinamik potansiyeller, iletken tel ile oluşturulan dış devrede gerilimin oluşmasına ve elektrik üretilmesine neden olmaktadır.



Şekil 3.9. Doğrudan metanol yakıt hücresi çalışma prensibi (Yıldızbilir, 2006).

Avantajları, sıvı metanolün kullanılmasıyla, saf hidrojenin depolama güçlüğünden doğan problemleri ortadan kaldırması, sisteme metanolun sulu çözelti halinde verilmesi PEM yakıt hücrelerinde problem olan membranın nemlendirilme gereksinimini ortadan kaldırması olarak belirtilebilir. DMYH, atmosferik koşullarda sıvı halde bulunan metanol kullanması ve metanolun yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle özellikle taşınabilir elektronik cihazlar için dikkat çekmektedir (Çelik, 2009).

Dezavantajları, düşük sıcaklıkta metanolün karbondioksite ve hidrojene dönüşmesi sebebiyle yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulması, bunun sonucunda maliyetin artması olarak belirtilebilir (Yıldızbilir, 2006).

3.4.6. Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri

Polimer elektrolit membran yakıt hücrelerinde elektrolit olarak ince, geçirgen katı bir polimer kullanılır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık olarak 80 ^{o}C'dir.

Çalışma prensibi, yakıt olarak kullanılan hidrojenin yakıt hücresinin anot kenarından beslenmesi, anotta platin katalizör varlığında hidrojenin elektron ve protonlarına ayrışması, protonların polimer membrandan geçerek katoda doğru hareket etmesi şeklindedir. Bu sırada elektronlar dış çevrimde elektrik akımını oluşturur, bunların sonucunda katotta havadan gelen oksijen, dış çevrimden gelen elektronlar ve protonlar birleşerek su ve ısı oluşur.

Avantajları, düşük çalışma sıcaklığında yüksek verim elde edilmesi, sessiz çalışması ve saf suyun dışında herhangi bir atık ortaya çıkarmaması olarak belirtilebilir. Dezavantajları, pahalı platin katalizör kullanılması, yüksek çalışma sıcaklıklarında ve düşük nem oranlarında membran performansının düşmesi olarak belirtilebilir.

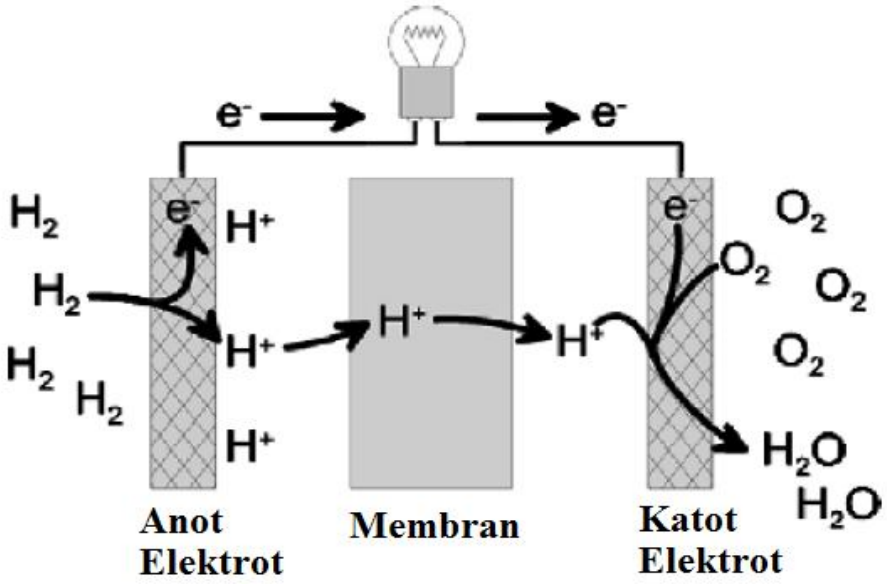
Bu tez çalışmasında, polimer elektrolit membran yakıt hücresinin performansının arttırılmasına yönelik deneysel ve modelleme çalışma yapılmıştır. 4.bölümde, bu yakıt hücresi detaylı olarak ele alınmış olup, yapısını oluşturan bileşenlerin özellikleri verilmiştir.

4.POLİMER ELEKTROLİT MEMBRANLI YAKIT HÜCRELERİ

4.1. Genel Özellikler

Yüksek performanslı polimerlerin keşfiyle birlikte özellikle uzay çalışmaları ve özel askeri projelerde kullanılmak üzere polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücreleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu yakıt hücreleri, düşük çalışma sıcaklığında yüksek verimle çalışması, hareketli parça içermemesi sebebiyle sessiz olması, düşük güç seviyelerinde maksimum verimliliğe ulaşması ve atık olarak sadece su ortaya çıkarmasından dolayı diğer yakıt hücrelerine göre daha fazla ilgi odağı olmuştur (Dincer ve ark., 2014).

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, polimer elektrolit membranın iki tarafında, sisteme beslenen gazların membran-elektrot ara birimine ulaşmasını sağlayan gözenekli elektrotlar bulunur. Bu üçlü sistemin oluşturduğu yapı membran-elektrot birimi (MEB) olarak adlandırılır. Elektrokimyasal reaksiyonlar bu elektrot ara yüzeydeki katalizör tabakasında gerçekleşmektedir. MEB, iki bipolar plaka arasında bulunmakta olup, bu plakaların girdi gazlarını elektroda dağıtacak bir yapıya sahip olması ve üretilen akımı bitişik hücreye geçirmeye yetecek elektrik iletkenliğine sahip olması gerekir (Yılmaz, 2006).



Şekil 4.1. PEM yakıt hücresinin çalışma prensibi ve temel bileşenleri (Kalender, 2011).

4.2. Avantaj ve Dezavantajları

PEM yakıt hücresinin avantajları şöyle özetlenebilir;

i. Katı ve korozif özellikte olmayan elektrolit kullanması sonucu sıvı kullanma ve yenilenme sorunları ile karşılaşmaz.
ii. Tasarım ve kullanımı, diğer yakıt hücrelerin birçoğundan daha az karmaşıktır.
iii. Gerilim, akım ve güçleri yüksektir. Düşük sıcaklıkta diğer yakıt hücrelerinden yüksek güç yoğunluğuna sahiptir.
iv. Düşük basınçlarda çalışabildiklerinden güvenlidirler.
v. Çabuk çalışmaya başlarlar.

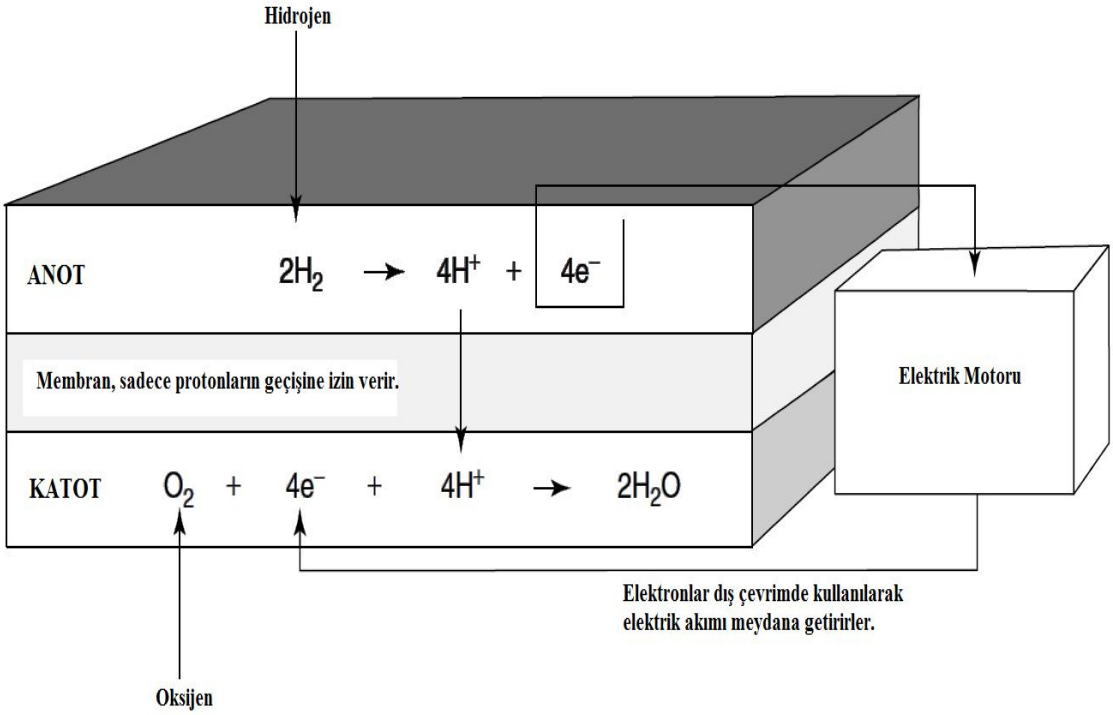
PEM yakıt hücresinin başlıca dezavantajları;

i. Platin katalizörün pahalı olmasından dolayı hücrenin maliyeti yüksektir.
ii. Membrandaki su dengesi önemlidir, suyun az olması veya fazla olması istenmeyen bir durumdur, bundan dolayı reaktif gaz ünitelerinin nemlendirilmesi gerekir.
iii. Gazların nemlendirilmesi için su kullanılması durumunda, yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı, suyun kaynama noktası sıcaklığından daha düşük olması durumundadır. Bu durum, kojenerasyon için kullanılma potansiyelini sınırlandırır.
iv. Hidrojen kirliliğine karşı çok duyarlıdırlar (Kaya ve Öztürk, 2012).

4.3. Çalışma Prensibi

Yakıt hücresinin temel yapısında; orta kısımda polimer membran elektrolit bulunmaktadır. Bu membranın bir tarafında anot elektrot, bir tarafında katot elektrotlar bulunmaktadır ve her iki elektrot bir kenarlarından platin katalizör tabaka ile kaplanmıştır. Kullanılan elektrolit ise ince bir polimer membrandır. Bu ince polimer tabaka protonların kolayca diğer tarafa geçişine izin verirken, elektronların geçişi mümkün olmaz. Elektrolit, elektronlar için yalıtkan, protonlar için ise iletkendir. Yakıt olarak kullanılan hidrojen, hücreye anot tarafından beslenir ve buradaki platin katalizörde elektron ve protonlarına ayrışır. Serbest elektronlar dış çevrimde kullanılarak elektrik akımını meydana getirirler. Protonlar ise membranı geçerek katota doğru hareket ederler. Katoda gelen protonlar; havadan gelen oksijen ve dış çevrimden gelen elektronlar ile birleşerek saf su ve ısı açığa çıkarırlar (Gözütok, 2007). Şekil 4.2,

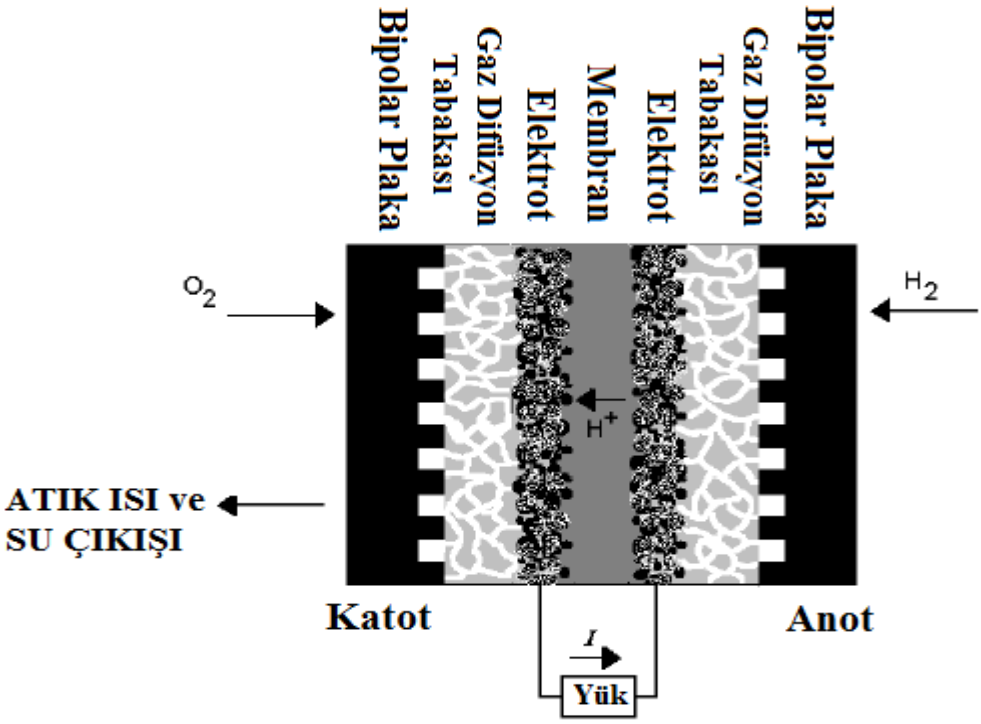
PEM yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonları göstererek çalışma prensibini anlatmaktadır.



Şekil 4.2. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi çalışma prensibi (Larminie ve Dicks, 2003).

4.4. PEM Yakıt Hücresinin Bileşenleri

PEM yakıt hücresi, Şekil 4.3'de görüldüğü gibi polimer elektrolit membran, bu membranın her iki tarafında bulunan anot ve katot elektrodu, reaksiyon gazlarının polimer elektrolite ulaşmasını sağlayan gaz difüzyon kanalı ve bir hücrenin anoduyla ona komşu olan hücrenin katodu arasındaki elektriksel bağı kuran bipolar plakadan oluşur.



Şekil 4.3. PEM yakıt hücresi bileşenleri (Karvonen, 2011).

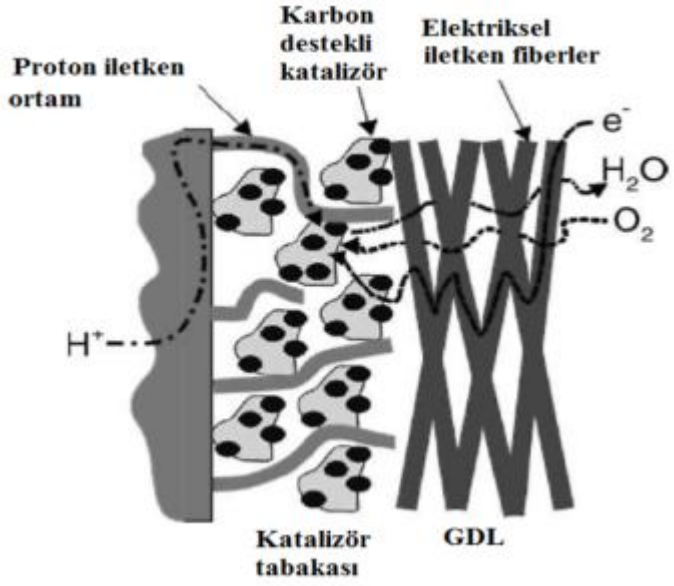
4.4.1. Elektrotlar ve platinyum katalizör

PEM yakıt hücresinin çalışma prensibinde anlatılan kimyasal tepkimelerden yükseltgenme tepkimesi anotta, indirgenme tepkimesi ise katotta gerçekleşir. Yükseltgenme tepkimesinde, gaz halindeki hidrojen, proton ve elektronlarına ayrılır. İndirgeme tepkimesinde, katoda atmosferden sağlanan oksijen, hidrojen iyonları ve elektronlar su formuna dönüşür ve atık ısı açığa çıkar. Bu iki yarım tepkime, düşük çalışma sıcaklığına sahip PEM yakıt hücresinde çok yavaş gerçekleşir. Bundan dolayı, her yarım tepkimenin hızını arttırabilmek için hem anot hem de katotta platinyum katalizör kullanılır. Platin, katalizör olarak her elektrotta etkin bir şekilde çalışabilecek pahalı bir materyaldir. Her elektrotta gerçekleşen tepkimeler, sadece platinyum katalizör yüzeyinde yüksek bir hızda gerçekleşebilmektedir (Şenol ve ark., 2012). Yüksek çalışma sıcaklığına sahip yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı reaksiyonu hızlandırmak için yeterlidir, bu şekilde bir sorunla karşılaşılmaz.

PEM yakıt hücresinde bulunan elektrotlar, ince bir katalizör tabakasıdır. Bu tabaka, 5–50 μm kalınlığında olan ve 2–4 nm çapında platinyum mikrokristaller içermektedir. Reaksiyonu hızlandırmak adına platinyum hem anot hem de katot reaksiyonları için uygun bir katalizördür. Bu katalizör için birincil zehirleyiciler

arasında karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit gelmektedir. En küçük miktardaki CO bile Pt katalizörün yüzeyine tutunmakta ve hidrojenin katalizörle temasını engellemektedir (San ve ark., 2001).

Elektrot, PEM yakıt hücresinde reaksiyon gazlarının difüzyon ile katalizöre ulaşmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı gözenekli yapıda olması gerekir. Şekil 4.4'de elektrotta gerçekleşen gazların, protonların ve elektronların transferi görülmektedir.



Şekil 4.4 Bir PEM yakıt hücresi elektrodunda gazların, protonların ve elektronların transferi (Wee ve Lee, 2006).

4.4.2. Membran

PEM yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolit ince bir polimer membrandır. Kullanılan elektrolit, üretici firmalara bağlı olarak değişebilmekle birlikte, en yaygın olarak kullanılan DuPont tarafından üretilen Nafion'dur. Nafion, gıdaları korumak için kullanılan plastik sargıya benzetilebilir. Polimer elektrolit membranlar, 2 ile 7 adet parşömen kağıdın kalınlığı kadar bir kalınlığa sahiptir (Kaya ve Öztürk, 2012).

Membranın anot ile katot arasında iyonik iletişimin sağlanması ve reaksiyona giren iki gazın birbirinden ayrılması olmak üzere iki temel görevi vardır. Ayrıca kimyasal ve mekanik kararlılığa sahip olmalıdır. Nafion malzemesi yüksek kimyasal ve ısıl kararlılığa sahiptir. Yüksek çalışma sıcaklıkları ve düşük nem oranlarında performansı düşmektedir. Membran, PEM yakıt hücresinin iyi bir performans sergilemesinde çok önemli bir bileşendir. Proton ve su aktarımı bu kısımda gerçekleştiğinden uygun su yönetimi kritik noktadır. Proton iletkenliğinin düşmesi yakıt

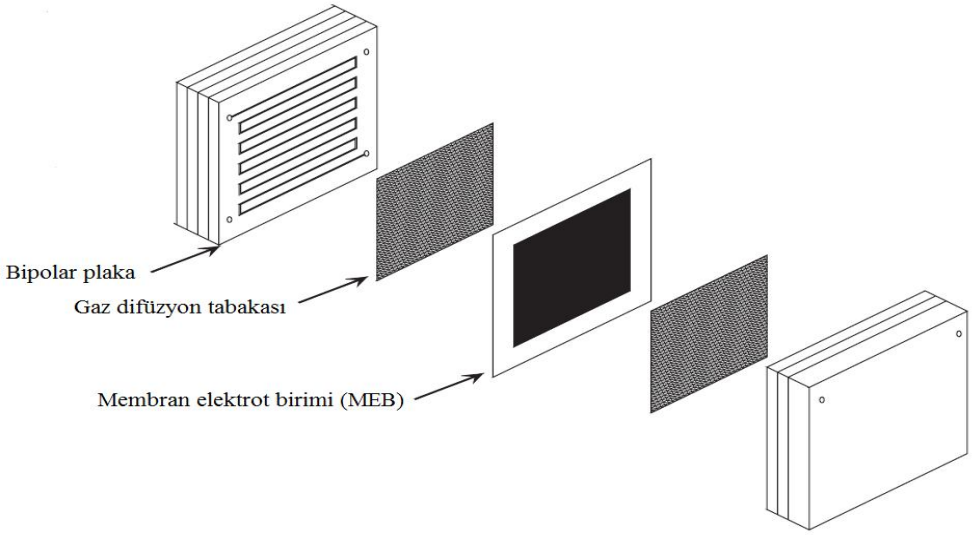
hücresi performansının azalmasına neden olur. Bundan dolayı membran kuruması istenmeyen bir durumdur. Membranın kuruması proton iletkenliğini düşürmektedir. Aynı şekilde suyun fazlası da istenmeyen bir durumdur. Suyun fazlası ise elektrot gözeneklerinde su taşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda gaz difüzyon tabakaları su ile dolarak reaksiyon gazlarının katalizör tabakasına ulaşmasını engellemektedir (Yılmaz, 2006).

PEM yakıt hücrelerinde kullanılan membranların, proton geçirgen özellikte olması, reaksiyon gazlarını geçirmemesi, mekanik dayanımının yüksek olması gerekir. Ayrıca, yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için emniyetli ve ucuz olması gerekmektedir (Dincer, 2014).

PEM yakıt hücresinin düşük çalışma sıcaklığına sahip olması hızlı bir şekilde çalışmaya başlaması açısından avantaj olsa da 150 ^{o}C'den düşük sıcaklıklarda karbonmonoksitin platin üzerini kaplayarak hidrojenin elektro oksidasyonunu engellemektedir (Güder, 2015). Bundan dolayı yeni bir membran geliştirme çalışmalarında, düşük sıcaklıklarda platin üzerinde CO zehirlenmesinin azaltılması, daha yüksek termal ve su yönetiminin gösterilmesi konuları öne çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan membran elde edilmesinde ise proton iletimini membranın nemliliğinden bağımsız olunması çalışmaları yapılmaktadır (Yıldırım, 2011).

4.4.3. Gaz difüzyon tabakası

PEM yakıt hücresinde polimer membran ve katalizör ile bunlarla iki taraftan temas halinde bulunan gözenekli gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ile bipolar plaka arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlar. Şekil 4.5, PEM yakıt hücresindeki gaz difüzyon tabakasının yerini göstermektedir. Bu tabakanın diğer görevleri, reaksiyon gazlarının katalizör tabakasına ulaşmasını sağlamak, reaksiyon sonrası oluşan suyun ve ısının uzaklaştırılmasını sağlamak, elektrotlar ile bipolar plakalar arasındaki elektronik ve ısıl teması sağlamak ve membran-elektrot birimine mekanik destek sağlamak olarak sıralanabilir. Bir gaz difüzyon tabakasından istenilen özellikler ise, yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik, yüksek gözeneklilik, iyi kimyasal, mekanik uyum ve düşük maliyettir. Gaz difüzyon katmanında materyal olarak karbon esaslı kağıtlar, keçeler ve kumaşlar kullanılabilir. Gaz difüzyon tabakasının gözenekleri arasında su birikintilerinin oluşmasını önlemek için, hidrofobik olması gerekir (Ural, 2007).

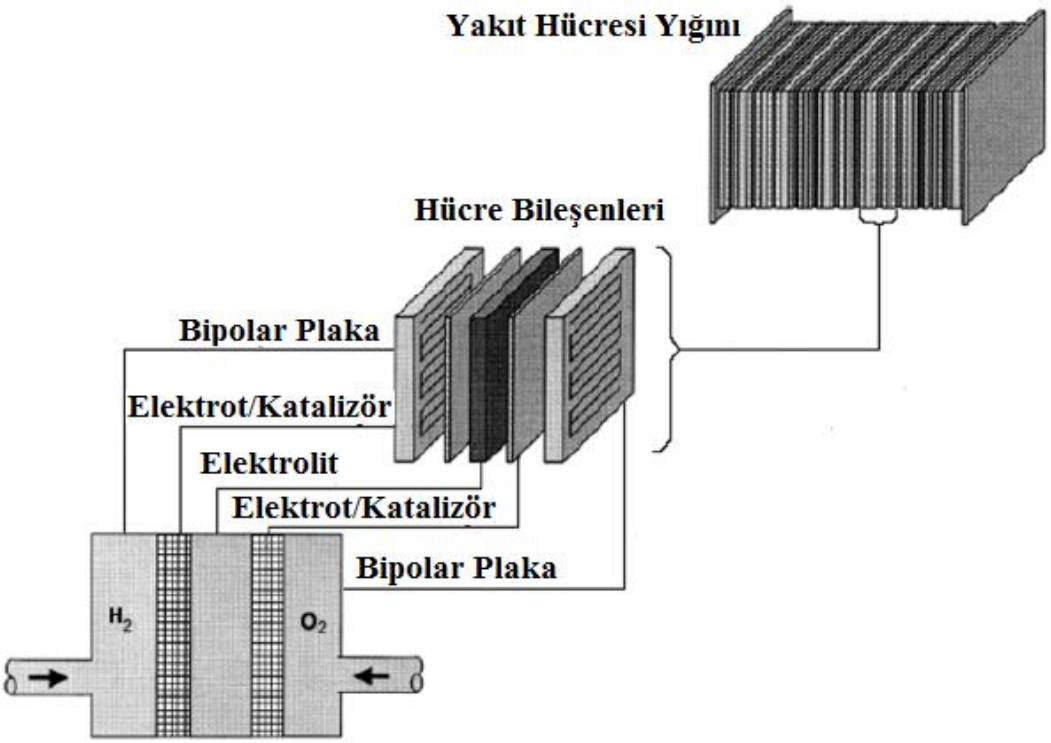


Şekil 4.5. Pem yakıt hücresi yapısında gaz difüzyon tabakasının görünümü (Mennola, 2004).

4.4.4. Bipolar plaka

Bipolar plakalar birden fazla birim hücrenin birleşerek oluşturdukları yakıt hücresi sistemlerinde bulunurlar ve bir hücrenin anoduyla ona komşu olan hücrenin katodu arasındaki elektriksel bağı kurar. Yakıt hücresinin ağırlık olarak %80'ini oluşturan bipolar plakanın gaz akışını sağlama, hücreler arası ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlama, ısıyı sistemden uzaklaştırmasıyla hücrenin soğutulmasına yardım etme, yakıt hücresinin diğer bileşenlerini mekanik olarak destekleme gibi görevleri vardır. Bu görevleri yerine getirebilmesi için, bipolar plakaların yüksek elektriksel ve ısıl iletkenliğe, yeterli mekanik mukavemete, yüksek korozyon direncine sahip olması gerekmektedir. Komşu hücrelerdeki gazların karışmasının engellenmesi için bipolar plakaların gaz geçirgenliklerinin düşük olması gerekmektedir. Sisteme yapısal destek sağladığı için düşük ağırlığa sahip olması, aynı zamanda da maliyetinin düşük, kolay işlenebilir olması gerekmektedir. En çok tercih edilen bipolar plaka malzemesi grafit-polimer kompozitlerdir (Yılmaz, 2006; Ay ve Arslan, 2010).

Yakıt hücresi sistemlerinde elde etmek istediğimiz voltaj değerine ulaşmak için, çok sayıda hücre bir araya getirilerek yakıt hücresi yığını oluşturulur. Yakıt hücresi yığını ve elemanlarının detaylı görünümü Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Bir yakıt hücresi yığını ve elemanlarının detaylı görünümü (Yuan vd., 2010).

5. BULANIK MANTIK

5.1. Yapay Zeka Kavramı

Zeka, insanın düşünme, akıl yürütme, kavrama, öğrenme, olaylardan sonuç çıkarma yeteneklerinin tümüdür. Yapay zeka ise, bir bilgisayarın ya da bilgisayara bağlı bir makinenin insana özgü nitelikler olan yorumlama, geçmiş deneyimlerden yararlanma, genelleme gibi özellikleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Kalaycı, 2006).

Yapay sinir ağları, genetik algoritma ve bulanık mantık gibi yapay zeka yöntemleri özellikle son yıllarda geniş bir araştırma ve uygulama alanı bulmaktadırlar. Yapay sinir ağları, insan beyninin sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Bir anlamda paralel bilgi işleme sistemi olarak düşünülebilir. İlgili olaya ait örnekler üzerinde çalışılarak yapay sinir ağlarına bilgiler verilir. Bu örnekleri kullanarak daha önceden ortaya çıkarılmış özellikler ile genelleştirme yapılarak, daha sonra çalışılacak olaylara çözüm üretmektedir. Ayrıca o zamana kadar hiç rastlanmamış olaylar hakkında da yorum yapmaktadır. Genetik algoritmalar yöntemi, evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasını içermektedir. Darwin'in evrim kuramı olan doğada en iyinin yaşaması kuralından esinlenerek oluşturulmuştur. İlgili çalışma üzerindeki bir veri öbeğinden özel bir veriyi bulmak için kullanılan bir arama yöntemidir. Bulanık mantık ise, bulanık küme teorisine dayanan bir matematiksel disiplindir. Bulanık mantık insan mantığında olduğu gibi, uzun-kısa yerine, uzun-ortadan uzun-orta-ortadan kısa-kısa vb. ara değerlere göre çalışmaktadır (Elmas, 2011).

Bulanık mantık, eldeki verilerin doğru ve yanlış olmasıyla değil hangi oranda doğru veya hangi oranda yanlış olduğuyla ilgilenir. İnsan düşünme ve karar verme mekanizmasına benzer bir çalışma prensibi olduğundan, modelleme yöntemi olarak çok kullanılır. Bu çalışmada, deneysel verilerden yararlanılarak oluşturulan bulanık mantık model çalışmaları anlatılmıştır.

Deneysel çalışmalarda sonuçların elde edilmesinde zaman ve maliyet unsuru, daha önce yapılmış deneylerden elde edilen verilerle genellemeler yaparak, bu genelleme ile daha önce gerçekleştirilmemiş deneylere ilişkin çözümler üretilmesini gerektirmiştir. Bu kapsamda kullanılan bulanık mantık modeli ayrıca deneyler için örnekler alınırken ara değerlerin sonucunun bilinememesi, bağımsız değişkenlerin

sayısının çok fazla olması nedeniyle hesaplamaların zor oluşu gibi olumsuz durumları gidermek için de kullanılır (Hasgül, 2005).

5.2. Bulanık Mantık Genel Özellikleri

İnsanlar, bir konu hakkında karar verirken sistemi tam olarak analiz edebilmek için gerekli tüm değişkenlere sahip olmamalarına rağmen doğru kararlar verebilir. Örneğin, bisiklet ile giderken bir sokağa dönmemiz gerektiğinde, bisikletin hızını, tekerlek sürtünmesini, dönmesi gereken sokağın açı değerini, bisikletin kaç derece eğimle yana yattığını sayısal olarak bilmediğimiz halde, bisikletin üstünde bir şekilde dengede durur ve uygun bir açıyla düşmeden o sokağa döndürebiliriz. Bu karar, hiçbir matematiksel hesaplama yapılmadan doğru bir şekilde verilmesinde, insanların daha önceki deneyimleri ve algıları ile yaklaşık değerlerle karar verebilme yeteneğine sahip olmasıdır (Çınar, 2013). Bulanık mantığın çalışma prensibi de insanın karar verme mekanizmasına benzer. Çalışılacak sistem hakkında önceki yapılmış çalışmaları eksiksiz şekilde öğreterek, oluşturulan bulanık mantık modelinin karar vermesi istenir.

Klasik mantık ilkesinin doğru ve yanlış olarak belirlediği ifadelerin arasına ara değerleri de ekleyerek bu değerleri matematiksel olarak ifade etmeye yönelik bir teori olan bulanık mantık, bir elemanın ilgili kümeye üye olma derecesine göre sonuç veren bir mekanizmadır. Bu üyelik derecesi, uzman kişi tarafından belirlenecek olan üyelik fonksiyonu ile ölçülebilir (Dincer ve ark., 2007).

Klasik mantık ilkesinde yapılan bir iş ya doğrudur ya da yanlıştır. Yapılan işin bir kısmının doğru veya bir kısmının yanlış olma durumu kabul edilmez. Bulanık mantık, bu durumu kabul etmeyen, özellikle modelleme çalışmalarında bireyin daha aktif kullanılmasına izin veren bir metottur (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003).

Bulanık mantık modeli üzerinde çalışan kişinin karar verirken önünde sadece iki seçeneği olmaz, hangi değerin sonuca ne kadarlık bir etkisi olduğuna karar verir. Böylece her parametrenin sistem içinde nasıl bir öneme sahip olduğu anlaşılır. Bulanık mantık ilkesini klasik mantık ilkesinden üstün kılan bu özellik sayesinde, modelleme çalışmasında her ara değerin sistem üzerindeki etkisi belirlenebilir.

5.3. Bulanıklık-Olasılık ve Random Sistem Kavramları

Bu kısımda anlamları çok fazla karıştırılan bulanıklık, olasılık ve random ifadeleri açıklanmıştır. Bulanıklığın tespit edilebilir bir belirsizlik olması olasılık kavramından farkını ortaya koymaktadır. "A elemanı %50 ihtimalle bu kümeye aittir" ifadesi olasılık kavramını açıklar, yani A elemanının bu kümeye ait olmama ihtimali vardır. "A elemanı %50 oranında bu kümeye aittir" ifadesi ise bulanıklığı açıklar. A elemanının bu kümeye hiç ait olmama durumu yoktur.

Random ile bulanıklık arasındaki fark ise sonuç kısmında ortaya çıkmaktadır. Random sistemlerde sonuç tamamen rastgele alınmaktadır, herhangi bir bilgiye veya değişkene ihtiyaç yoktur. Bulanık sistemde ise sonuç en az bir giriş değişkenine ve uzman kişinin sistem hakkında belirlediği kurallar doğrultusunda alınmaktadır (Elmas, 2011).

5.4. Bulanık Mantık Tarihçesi

Azeri kökenli ABD'li bilim adamı Lotfi Ali Asker-Zadeh, ilk kez bulanık küme kavramından 1962'de yayınladığı devre teorisinden sistem teorisine adlı çalışmasında belirtmiştir. Daha sonra bulanık mantık, 1965 yılında L. Asker Zadeh'in California Berkeley Üniversitesinde Information ve Control adlı dergide Bulanık Kümeler isimli makalesini yayınlaması ile başlamıştır. Zadeh, bu makalesinde matematiğin, dil ve insan zekası ile ifade edilebileceğini açıklamış ve bunun için bulanık kümeler teorisini ortaya koymuştur. Zadeh, bulanık mantıkta yer alan sözel ifadeler ile açıklanan kavramların, gerçek hayatın daha iyi modelini oluşturduğunu açıklamıştır (Yıldız ve Kişoğlu, 2011).
Kısaca tarihçesi;

- Bulanık mantık, ilk olarak 1965 yılında Azerbaycan asıllı bilim adamı Lütfü Askerzade (Zadeh) tarafından matematiksel modelleme yaklaşımı olarak geliştirilmiştir.
- 1975 yılında Mamdani ve Assilian, bulanık sistem modeli ile buhar makinesinin kontrolünü oluşturmuşlardır. "Eğer türbin hızı çok hızlı artıyorsa ve basınç da çok düşükse, buhar vanasını biraz aç" türünden kurallardan oluşan bir sistem geliştirmişlerdir.

- 1980 yılında Danimarka'daki bir çimento fabrikasının işletilmesi ve kontrolünde ticari amaçla kullanılmıştır.
- Batı dünyasında önem kazanması, Japonya'da teknolojik ürünlerin geliştirilmesiyle 1985 yılları sonrasında başlamıştır.
- 1987 yılında Hitachi firması tarafından Sendai metrosu bulanık mantık temeliyle gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bulanık mantık modeli ile, trenin istenen konumda durması üç kat daha iyileştirilmiş, kullanılan enerji ise %10 azaltılmıştır.
- Yamaichi Securities'in geliştirdiği Bulanık Mantık temelli uzman sistem, Tokyo Borsası'nda 1988 yılının Ekim ayında kara Pazar adlı krizin sinyallerini on sekiz gün önceden haber vermiştir.
- Yaşanan olumlu gelişmeler üzerine bulanık mantık çalışmalarına ilgi artmış ve 1989 yılında aralarında SGS, Thomson, Omron, Hitachi, NCR, IBM, Toshiba ve Matsuhita gibi dünya devlerininde bulunduğu 51 firma tarafından LIFE (Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering) laboratuvarları kurulmuştur (Ertunç, 2012).

5.5. Bulanık Mantık Avantaj ve Dezavantajları

Bulanık mantık çalışma prensibi insan düşünce sistemi ve karar verme mekanizmasına yakındır, bundan dolayı anlamak kolaydır. Uygulamasında matematiksel modelin gerekliliği yoktur. Matematiksel ifade edilişi çok zor oluşturulan sistemlerin modelinin oluşturulmasında kolaylık sağlar. Doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesine izin verir (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003).

Bu avantajlarının yanında, bulanık mantık uygulamalarında mutlaka kuralların uzman kişilerin deneyimlerine dayanarak tanımlanması zorunluluğu vardır. Üyelik fonksiyonlarının değişkenlerinin belirlenmesinde kesin sonuç veren belirli bir yöntem yoktur. Deneme-yanılma yöntemi kullanılır, bu yöntem de çok uzun zaman alabilir. Çünkü o sistemin nasıl bir üyelik fonksiyonuna sahip olması gerektiğine üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmış testler sonucunda karar verilir (Elmas,2011).

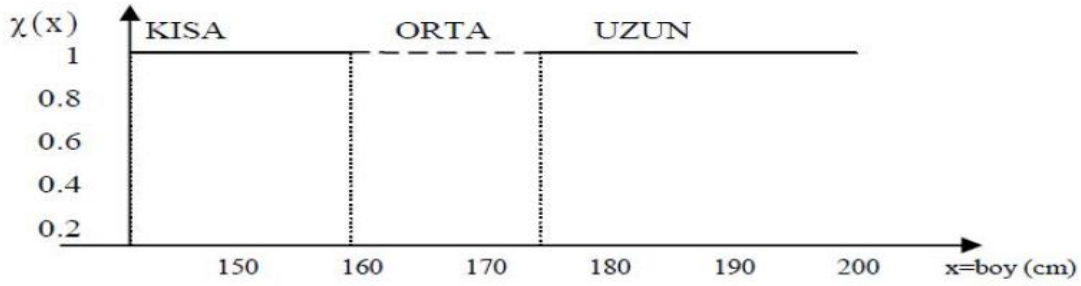
5.6. Bulanık Kümeler

Bulanık mantık yaklaşımı, makinalara insanların deneyimleri ve öngörülerinden faydalanılarak özel verilerin işlenmesi ve çalışma yeteneğini vermektedir. Bu yeteneği geliştirirken, sayısal ifadeler yerine sembolik İfadeler kullanılmaktadır. Makinelere bu sembolik ifadelerin transferi matematiksel bir esasa dayanmaktadır. Bu matematiksel temel; bulanık mantık küme teorisidir ve bulanık mantık bu teoriye dayanmaktadır. Bulanık mantık denetleyicinin temelini bu tür sözlü İfadeler ve onların arasındaki mantıksal ilişkiler oluşturmaktadır (Yılmaz ve Ayan, 2013).

Bulanık küme, klasik küme kavramının genelleştirilmiş halidir. Bir elemanın o kümeye ne kadar ait olduğu üyelik dereceleri ile ifade edilir. Klasik kümede {0,1} ile ifade edilen üyelik dereceleri, bulanık kümede süreklilik arz eden ve [0,1] aralığında üyelik dereceleri alan elemanlardan oluşmaktadır (Gülcan, 2012).

Bulanık mantık, değişkenlerin tek bir kümeye tam üye olarak değil de onun yerine bir dizi evrensel kümeye kısmi olarak üye olduğunu açıklamaktadır. Üyelik derecesi, 0 ve 1 arasında çeşitli değerler alabilir. Bu değerin belirlenmesini sağlayan bulanık üyelik fonksiyonları ise birçok şekle girebilir; özellikle pratik uygulamalarda, basit doğrusal fonksiyonlar, üçgen veya trapez olanlar tercih edilir (Bozokalfa, 2005). Değişken ifade, o kümenin tam olarak elemanı olmaya yakınlık gösteriyorsa üyelik derecesi 1'e yakın, eğer değilse 0'a yakın olur.

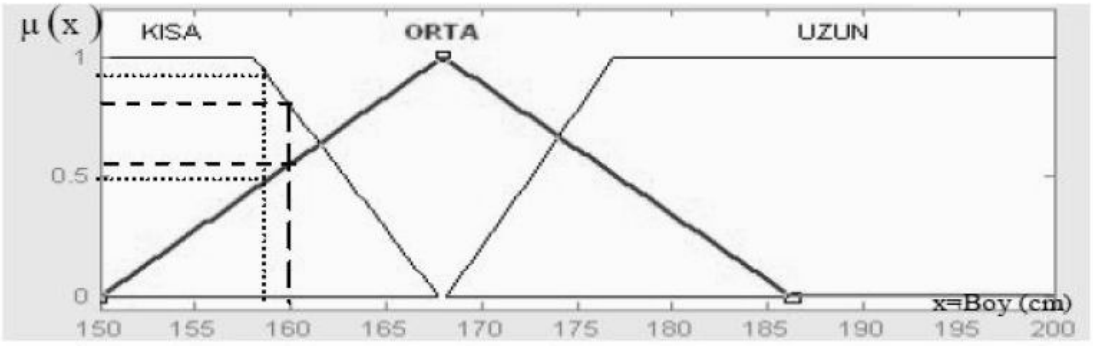
Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki fark, Şekil 5 ve 6'da şematik olarak açıklanmıştır. Şekil 5.1'de klasik kümelerle Boy sınıflaması gösterilmiştir. Bu kümeye göre kısa boy sınırı 159 cm ile son bulmuş, orta boy sınırı 160 cm'den başlamaktadır. Klasik mantık anlayışı, aralarında 1 cm olan iki kişiden 159 cm boyu olan kişiyi kısa grubuna dahil ederken, 160 cm boyundaki kişiyi orta sınıfına dahil etmektedir. Hemen hemen aynı uzunlukta olan iki kişiyi, boy sınıflandırılmasında farklı gruplarda göstermektedir.



Şekil 5.1. Klasik kümelerle boy sınıflandırması (Tektaş, 2014).

Bulanık mantık anlayışı ise, boy sınıflandırılması yapılırken her değerin ilgili grupta bir ağırlığının olacağını açıklamaktadır. Şekil 5.2'de gösterilen bir bulanık kümeyi örnek alırsak, orta boyun 150 cm'den başladığını üyelik derecesinin adım adım artarak 168 cm'de maksimuma ulaştığını ve 168 cm'den 186 cm'e kadar üyelik derecesinin azaldığını göstermektedir. Yani 150 cm ile 186 cm arasındaki kişilerin belli oranlarda orta sınıfına dahil olduğunu açıklar. Klasik mantık ile verilen örneği tekrarlarsak, 159 cm boyundaki kişi aşağıdaki şekle göre kısa kümesine %90 üye iken, orta kümesine %50 üye olacaktır. Aynı şekilde kendisinden sadece 1 cm uzun olan diğer kişi de %85 kısa kümesine üye, % 55'de orta kümesine üyedir.

Klasik mantık anlayışında tamamen farklı sınıflandırmalara dahil olan iki kişi, bulanık mantık açısından değerlendirildiğinde aynı kümelere farklı oranlarda dahil olunduğu görülür.



Şekil 5.2. Bulanık kümelerle boy sınıflandırması (Tektaş, 2014).

Bulanık kümede değişkenlerin bulanıklaştırılması, üyelik fonksiyonları ile karakterize edilmektedir. Bulanık veriler ile işlem yapabilmek için, belirli üyelik fonksiyonları kullanarak gerçek verileri bulanık veriye dönüştürmek gereklidir. Üyelik fonksiyonları oluşturmak için farklı yöntemler mevcuttur. Bulanık mantık yaklaşımında kurallar ve üyelik fonksiyonlarının bilgileri uzmanlardan elde edilmektedir (Bölgen, 2010).

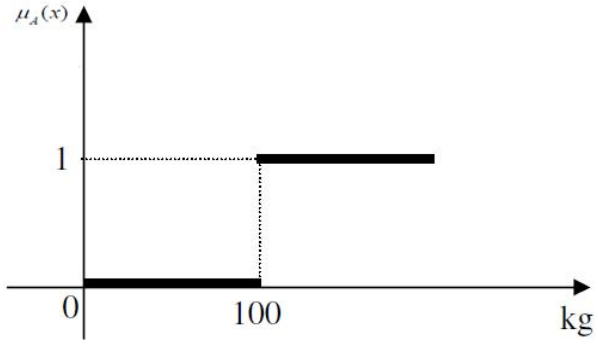
5.7. Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları, değişken parametrelerin oluşturulan bulanık kümeye ait olma derecelerinin değişimini gösteren fonksiyonlardır. Bulanık küme üzerinde çalışılırken, üyelik fonksiyonu çeşidinin belirlenmesi sezgisel veya çıkarım şeklinde olabileceği gibi algoritmik temelli de olabilir. Üyelik fonksiyonunun doğru bir şekilde

analiz edilerek belirlenmesi, ilgili sistemin değişkenleri ile ilgili modelleme çalışmalarında önemli hale gelmektedir (Gülcan, 2012).

Üyelik fonksiyonu kavramı da klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki fark kullanılarak Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen örneklerle açıklanmıştır. İlgili örneğimiz, "Ağır malzemeler kümesi 100 kg'dan daha çok ağırlığa sahip malzemeler olsun" diye belirttiğimizde, klasik mantık kavramına göre ilgili küme, 100 kg'dan az olanlar ve çok olanlar olarak ikiye ayrılır. Az olanların üyelik derecesi 0 olurken, çok olanların üyelik derecesi 1 olur. Yani 99 kg ağırlığında malzeme ağır olarak nitelendirilmez. Bu sisteme ait üyelik fonksiyonu denklem 5.1'de, bu fonksiyona göre oluşturulan grafik de Şekil 5.3'de verilmiştir.

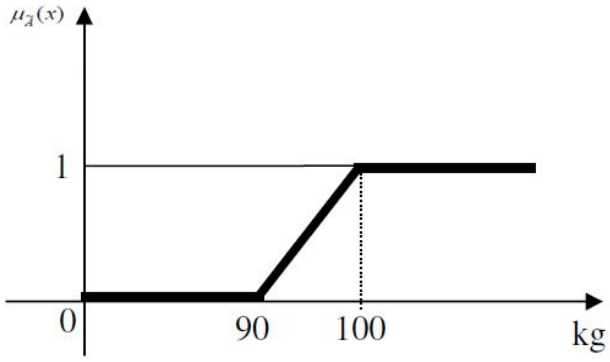
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , x > 100\,kg \\ 0 & , diğer\ durumlarda \end{cases} \tag{5.1}$$



Şekil 5.3. Klasik kümelerde üyelik fonksiyonu grafiği (Göksu, 2008).

Aynı örneği, bulanık mantık ilkesine göre açıklarsak, ağır malzemelerin 100 kg'da başladığı bilgisinin yanı sıra 100 kg'dan daha az ağırlığa sahip olan malzemelerin de belli oranlarda bu kümeye ait olduğu söylenebilir. Şekil 6'da oluşturulan bulanık küme üzerinden açıklanırsa, ağır malzeme sınırının 90 kg'da başladığı, malzemenin 100 kg'a kadar belli oranlarda ağır grubuna dahil olduğunu açıklıyor. Örneğin 95 kg gelen malzeme, klasik mantık bakımından hafif sınıfında bulunmasına rağmen, bulanık yaklaşımda %50 ağır sınıfında olduğu söylenebilir. Bu sisteme ait üyelik fonksiyonu denklem 5.2'de, bu fonksiyona göre oluşturulan grafik de Şekil 5.4'de verilmiştir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1 & , x > 100\,kg \\ \frac{x-90}{10} & , 90 \leq x \leq 100 \\ 0 & , x < 90 \end{cases} \tag{5.2}$$



Şekil 5.4 Bulanık kümelerde iki parametreli üyelik fonksiyonu grafiği ve denklemi (Göksu, 2008).

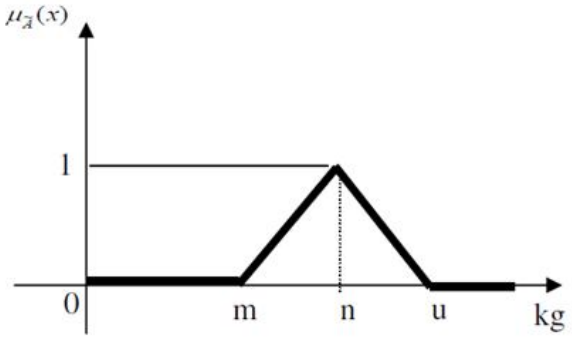
En çok kullanılan üyelik fonksiyonu çeşitleri, üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonu çeşitleridir.

5.7.1. Üçgen üyelik fonksiyonu

Üçgensel üyelik fonksiyonu, elemanları A=(m,n,u) seklinde tanımlanan fonksiyonlardır. Burada, n üyelik derecesinin 1 olduğu değeri, o kümenin tam olarak elemanı olduğunu, m ve u ise alt ve üst sınırı göstermektedir. Üyelik derecesi değerinin m'den itibaren arttığı, aynı şekilde u değerine kadar azaldığı, u değerinden sonra üyelik derecesinin 0 olduğu görülür (Lee vd., 2008).
Bu şekilde tanımlanan üçgensel üyelik fonksiyonu denklem 5.3'de verilmiştir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x < m \\ \frac{x-m}{n-m} & , m \leq x \leq n \\ \frac{u-x}{u-n} & , n \leq x \leq u \\ 0 & , x > u \end{cases} \qquad (5.3)$$

Ayrıca üçgensel üyelik fonksiyonuna ait grafik, Şekil 5.5'te görülmektedir.



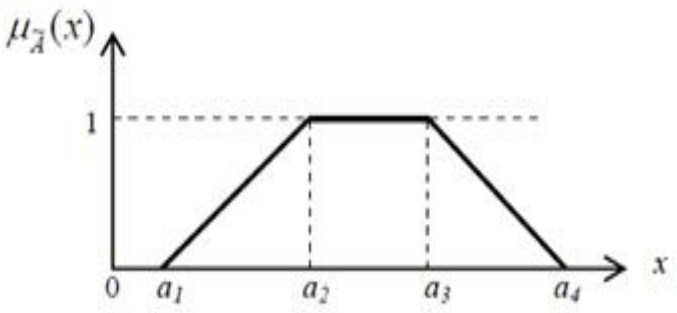
Şekil 5.5 Bulanık kümelerde üçgensel üyelik fonksiyonu grafiği ve denklemi (Göksu, 2008).

5.7.2. Yamuk üyelik fonksiyonu

Yamuk üyelik fonksiyonları a1, a2, a3 ve a4 olmak üzere dört parametre ile tanımlanır. a1, sistemin üyelik derecesinin artmaya başladığı alt sınır, a2 ile a3 arası ilgili elemanın tam olarak o kümeye ait olduğunu gösteren kısım, a4 ise üyelik derecesinin son bulduğu kümenin üst sınırı olarak ifade edilir. Modelleme çalışmalarında, ilgili değişken aralığının bir süre boyunca tamamen o kümeye ait olması istendiğinde yamuk üyelik fonksiyonu kullanılır. Bu istenen değer a2 ile a3 arasında belirtilir. Bu şekilde tanımlanan yamuk üyelik fonksiyonu denklem 5.4'de verilmiştir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x < a_1 \ veya \ \ x > a_4 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & , a_1 \leq x \leq a_1 \\ 1 & , a_1 \leq x \leq a_1 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3} & , a_1 \leq x \leq a_1 \end{cases} \tag{5.4}$$

Ayrıca yamuk üyelik fonksiyonuna ait grafik, Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Bulanık kümelerde yamuk üyelik fonksiyonu grafiği ve denklemi (Gülcan, 2012).

6. KAYNAK ARAŞTIRMASI

6.1. Yakıt Hücresi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Yakıt hücresi performansı ile ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan yakıt hücresi membran performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, yakıt hücresinin diğer bileşenleri ile ilgili de bazı çalışmalar değerlendirilmiştir.

Dincer (2014), PEM yakıt hücresinin katot tarafını spin yöntemi ile YSZ ile kaplayarak kaplama öncesi ve sonrası için elektroliz ve elektrik üretme olmak üzere iki farklı deneysel çalışma yapmıştır. Elektroliz deneylerinde kaplama öncesi ve sonrası akım ve güç yoğunluğu zaman ilerledikçe performans düşerken gerilim yoğunluğu performansı zaman ilerledikçe artmıştır. Kaplama sonrası, elektrik üretim deneylerinde, akım yoğunluğu, gerilim yoğunluğu ve güç yoğunluğunun çalışma sürelerinin kaplama öncesine göre arttığı tespit edilmiştir. Ergun ve ark. (2010), PEM yakıt hücrelerinde yüksek sıcaklığa dayanıklı fosforik asit yüklü polibenzimidazol (PBI) elektrolit membran üzerinde çalışmışlardır. PBI'nın PEM yakıt hücrelerinde elektrolit olarak kullanılmasıyla PEM yakıt hücresi performanslarının $160^{o}C$'ye kadar elde edilebildiği sonucuna varmışlardır. Önal ve ark. (2014), PEM yakıt hücresinin anot tarafını spin yöntemi ile YSZ+SDC ile kaplayarak membran performansını analiz etmişlerdir. Kaplama sonrasında yapılan gerilim, akım ve güç performanslarının kaplama öncesine göre arttığını tespit etmişlerdir. Sarıdemir ve Erşan (2010), yaptıkları çalışmada membran yapımı için geleneksel reçinelere göre daha ucuza temin edilebilen Dowex Marathon C tipi iyon değiştiren reçine kullanmış, iki farklı destek malzemesinin pil voltajına etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta ise, membran yapımında kullanılan reçine tanecik çaplarının homojen olmaması ve birim alana düşen reçine yoğunluğunun az olmasının, pil verimine etki eden diğer bir neden olduğunu görmüşler ve silikon destekli membran-elektrot çifti ile kabul edilebilir düzeyde gerilim değerleri elde etmişlerdir. Ersoyoğlu ve ark. (2014), PEM yakıt hücresinin anot tarafını spin yöntemi ile YSZ ile kaplayarak membran performansını analiz etmişlerdir. Performans parametresi olarak, akım, güç ve direnç kullanmışlar, kaplama sonrası membran performansının kaplama öncesine göre arttığını tespit etmişlerdir. Devrim ve ark. (2009), farklı oranlarda TiO_2 içeren Nafion / TiO_2 kompozit membranlar hazırlamışlar ve kullanılan TiO_2 miktarının PEM yakıt hücresi performansı üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda,

TiO_2 içeren kompozit membranların yakıt hücresi performanslarının Nafiondan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Dincer ve ark. (2014), PEM yakıt hücresinin anot tarafını elektrospin yöntemi ile YSZ+SDC+NaCaNİBO ile kaplayarak kaplama öncesi ve sonrası için elektroliz ve elektrik üretme olmak üzere iki farklı deneysel çalışma yapmışlardır. Elektroliz deneylerinde kaplama öncesi ve sonrası akım yoğunluğu zaman ilerledikçe performans düşerken, gerilim yoğunluğu performansı zaman ilerledikçe artmıştır. Kaplama sonrası, elektrik üretim deneylerinde, akım yoğunluğu, gerilim yoğunluğu ve güç yoğunluğunun çalışma sürelerinin kaplama öncesine göre arttığı tespit edilmiştir. Petrach ve ark. (2007), bipolar plaka tasarımında grafit ve metal plaka kullanılmasının dezavantajlarından dolayı elastomerik malzeme üzerinde çalışma yapmışlardır. Silikon elastomer kullanımında, elektriksel direnç ölçümlerinin ticari olarak kullanılan grafite göre daha düşük elektrik direnci oluşturduğunu sonucuna varmışlardır. Yılmaz ve ark. (2014), PEM yakıt hücresinin katot tarafını sprey yöntemi ile NaCaNİBO ile kaplayarak membran performansını analiz etmişlerdir. Performans parametresi olarak güç/akım kullanmışlar, kaplama sonrasında bu değerin kaplama öncesine göre arttığını tespit etmişlerdir. Mepsted ve Moore (2003), yaptıkları çalışmada bipolar plaka yapımında kullanılan grafit, kompozitler, titanyum ve alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, kompozitlerin metalik malzemelere göre genelde düşük elektriksel özelliklere sahip olduğu ancak, işleme ve malzeme maliyetlerinin düşük olması ve iyi korozyon dayanımından dolayı çok kullanıldığını belirtmişlerdir. Jang ve ark. (2006), yakıt hücresi performansında tepkimeye giren gazların nemlerinin etkileri üzerinde çalışma yapmışlardır. En iyi pil performansının yüksek bir giriş bağıl nemde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Yann ve ark. (2006), yaptıkları deneysel çalışmada katot giriş gazı akış hızı, nemlendirme sıcaklığı ve pil sıcaklığınının yakıt hücresi performansı üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Deney sonucunda, üç değişkenin de artmasıyla yakıt hücresi performansının arttığını belirtmişlerdir. Ay ve Arslan (2010), yaptıkları çalışmada grafit-polimer kompozit bipolar plaka üretiminde sodyum bentonit katkısını araştırmışlardır. Bentonitin yüksek miktarda su tutma kapasitesine sahip olduğunu belirten yazarlar, grafit polimer kompozit plakalara ilave edilmesiyle fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi için kullanılabilecek bir dolgu malzemesi olduğunu belirtmişlerdir. İçingür ve Kireç (2009), alüminyum PEM yakıt hücresi ünitesi tasarlamışlar ve bir prototip oluşturarak hem yapısal ve hem de çalışma koşullarındaki parametrelerin değişimlerinin yakıt hücresi ünitesinin performansına etkilerini

incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sıcaklık, basınç, karışım oranı, nemlendirici gibi parametrelerin PEM yakıt hücresinin çalışma performansını pozitif yönde etkilediğini görmüşlerdir. Optimum bir stokiyometrik oranın da performansı arttıran bir etken olduğu sonucuna varmışlardır. Ar ve ark. (2003), geliştirdikleri bir elektrolit - elektrot çiftini paket haline getirerek, gerekli tasarım ve güç hesabı yaparak içten yanmalı motor ile karşılaştırılmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda gelişmiş bir elektrolit – elektrot çifti ile yakıt hücresi paketleri seri olarak üretildiğinde, karşılaştırılan tüm değişkenlerde belirgin farkla içten yanmalı motorlardan daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Kahraman ve ark. (2014), hücre sıkıştırma basıncının PEM yakıt hücresi performansı üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, 12 Joule sıkıştırma torkuna kadar performansın arttığını, dirençsel kayıp bölgesindeki gerilim artışının kütle transfer kayıp bölgesindeki artışa nazaran daha fazla olduğunu gözlemişlerdir. Kahveci ve Taymaz (2014), yaptıkları deneysel çalışma ile pil sıcaklığının, nemlendirme sıcaklığının, hidrojen debisinin ve oksijen debisinin güç yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Optimum koşulları belirlerken Design-Expert 8.0 programı deneme sürümü altındaki Yanıt Yüzey Yöntemini kullanmışlardır. Deneysel çalışmada, sıcaklığın PEM yakıt hücresinin performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, artan sıcaklıkla birlikte sistemin performansının arttığını, ancak belirli bir sıcaklığın üzerindeki değerde ise performansın düştüğü sonucuna varmışlardır. Devrim ve ark. (2015), düşük bağıl nem koşullarında yığın performansını artırmak için gereken net 100 W güç çıkışı üretimi için hava soğutmalı PEM yakıt hücresi Nafion / Silika nanokompozit membran ile kısa yığını tasarlamış ve imal etmişlerdir. Kompozit zarı, solüsyon döküm yöntemi ile hazırlamış ve gaz difüzyon elektrotu ultrasonik püskürtme kaplama tekniği ile üretmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, zar üzerinde silika giriş yığını çalışma sıcaklığının olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. M. Chandesris ve ark. (2015), membran bozunmasındaki sıcaklık ve akım yoğunluğunun etkisini incelemek için membran kimyasal bozunmasını içeren bir 1 boyutlu polimer elektrolit membran su elektrolizörü modeli geliştirmişler. 1D performans modelinde, anot ve katot katalizör tabakalarının elektrokimyasal davranışları ile birlikte farklı hücre bileşenleri arasındaki elektronik ve iyonik taşımalar dikkate almışlardır. Kimyasal bozulma oranı, anotta ve katotta hücrenin çıkış maddesi olan suyu toplayarak ve bir florit seçici elektrodla fluorür salınımı oranının ölçülmesi ile karakterize edilmiştir. Devrim ve ark. (2015), çalışmalarında, nafion/zeolit kompozit membranlarını farklı zeolit yük değerleriyle hazırlamışlardır. Nafion/zeolit kompozit membranlarını yapısını,

taramalı elektron mikroskobu, x-ışın kırılması ve termogravimetrik analiz ile incelemişlerdir. Nafion/zeolit kompozit membranlar nafion polimer ve zeolit parçacıklar arasındaki etkileşim ve zeolitin su tutma özellikleri nedeniyle artan su alımı ve proton iletkenlik özellikleri göstermektedirler. Düşük nem ve farklı işletim sıcaklıklarında gerçekleştirilen tek hücre PEM yakıt hücresi testlerinde, Nafion / zeolit membran tabanın, Nafion membran tabana göre daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Bu sebeple Nafion / zeolit membranlar PEM yakıt hücresi için alternatif membran kaynağı olarak kullanılabilir bir potansiyeline sahiptirler. Langemann ve ark. (2015), bipolar plakalarda bir koruyucu tabaka olarak kullanmak amacıyla PEM elektrolizörlerinde Au ve Tin gibi farklı kaplamaları test etmişlerdir. PEM elektrolizörlerinde, yüksek potansiyel altında pH değerinin, alt tabaka malzemelerini ve kaplamaların uzun vadeli istikrarını etkileyen önemli bir faktör olduğu sonucuna varmışlardır. PEM elektrolizörlerinde korozyon problemlerinin ana kaynağının PH değeri olduğu ve asidik ortamı meydana getiren mekinizmaları anlayarak daha iyi yaşlandırma testleri geliştirilebileceği ayrıca yeni bir sistem işletim stratejileri geliştirilerek genel korozyon oranlarının azaltılabileceği sonucuna varmışlardır. Ata ve ark. (2015), PEM yakıt hücresi anot tarafının elektrospin yöntemiyle karbon nanotüp ile kaplanması üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda karbon nanotüpün sergilediği üstün özellikler nedeniyle membran performansında artış olduğu, elektrospin yönteminin de bu kaplamada başarıyla kullanıldığı sonucuna varmışlardır.

6.2. Bulanık Mantık Modeli İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Bulanık mantık modeli ile ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan yakıt hücresinin bulanık mantık ile modellenmesi üzerine çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, bulanık mantık modelinin diğer disiplinlerde kullanılmasıyla ilgili de çalışmalar değerlendirilmiştir.

Mammar ve ark. (2009), konut enerji üretimi için yakıt hücresi sisteminin dinamik modelini incelemişlerdir. Aktif güç yük değişim eldesi için hidrojen akışını bulanık mantık denetleyicisi ile kontrol etmenin çok etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Fan ve ark. (2012), proton değişim membranlı yakıt hücresi matematiksel modeli üzerine çalışmışlar ve bulanık mantık denetleyicisi tasarlamışlardır. Yakıt pillerinin sabit güç çıkışları olması garanti edildiğinde uygun bulanık mantık kontrol şemalarının, verilen belirli bir güç değerini izlemede tatmin edici sonuçlar elde

ettiklerini belirtmişlerdir. Gao ve ark. (2008), yakıt hücresi sistemi ile donatılmış bir hibrit otobüsü üzerine çalışmalar yapmış ve bulanık mantığa dayalı bir enerji yönetim stratejisi geliştirmişlerdir. Karmaşık güç sistemlerinde enerji akışını yönetmek için bir bulanık mantık sistemi geliştirmiş ve uygulamışlardır. Kim ve ark. (1999), yakıt hücresi üretim sisteminin bir elektriksel modellemesi üzerine çalışmışlardır. Kontrol edilemeyen büyük aşma ve büyük akım dalgalanması gibi dezavantajların üstesinden gelmek için bulanık mantık denetleyici kullanmışlardır. Bulanık denetleyicinin; yüksek sistem istikrarı ve performansı ortaya koyduğunu aynı zamanda çıktı kontrolü ve istenilen çalışma noktası operasyonlarında çok etkili olduğunu kaydetmişlerdir. Ata ve Dincer (2015), PEM yakıt hücresi ve HHO hücresinin performansının belirlenmesinde bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. PEM yakıt hücresinin şarj ve deşarj sırasında karbon nanotüp ile kaplanması ve yitriya stabilize edilmiş zirkonyum ile kaplanması sırasında tespit edilmiş deneysel verileri, sisteme belli kurallar vasıtasıyla öğreterek üç farklı modelleme çalışması yapmışlardır. Deneysel sonuçlar ile bulanık mantık model sonuçlarını istatistiksel metotlar kullanarak karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, PEM yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde bulanık mantık yönteminin başarıyla uygulanabildiğini göstermişlerdir. Tong ve ark. (2013), yaklaşık 1 kW PEM yakıt hücresi ünitesi üzerine çalışmışlar, yığın gerilimi, katot akımı ve anot akımının modellemesini geliştirmişlerdir. Dış yükün güç talebinin, basitleştirilmiş değişkenli bulanık denetleyicisinin gerçek zamanlı kontrolü altında yakıt hücresi tarafından temin edilebileceğini önermişlerdir. Keshwani ve ark. (2008), cilt geçirgenliğinin kural tabanlı Mamdani tipi bulanık modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Toksisite riskleri, transdermal ilaç sağlanması için aday belirlemek ve tahmin etmek için sunulan modelleri bileşiklerin deri geçirgenliğini hızlı bir şekilde değerlendirmek için kullanmışlardır. Shakhawat ve ark. (2006), üretilen su içinde doğal olarak meydana gelen insan sağlığı için riskli radyoaktif maddelerin bulanık kural tabanlı modellemesi üzerine çalışmışlardır. Üretilen suyun içinde doğal olarak oluşan radyoaktif maddelerin insan sağlığı risk değerlendirmesi için bir çift bariyer yaklaşımı önermişlerdir. Tosun ve ark. (2011), Türkiye'de konutlarda kullanılan çok katmanlı prekast beton panellerin termal performanslarını kural tabanlı Mamdani tipi bulanık modelleme kullanarak incelemişlerdir. BM'nın konut çalışmalarında kullanılan çok tabakalı prefabrik beton panellerin termal performansının değerlendirilmesinde güvenilir bir modelleme yöntemi olarak kullanılabileceğini kaydetmişlerdir. Yıldız ve Kişoğlu (2011), bayan dış giyim alanında faaliyet gösteren hazır giyim işletmelerinden alınan boyut tabloları ve vücut

büyüklüğü numaralarını inceleyerek ortak bir vücut numaralandırma sistemini bulanık mantık sistemi kullanarak modellemişlerdir. Yapılan bu modelleme ile; pazarlama problemlerine olumlu anlamda katkı sağlanacağını ve hazır giyim sektöründe rekabete katkıda bulunarak tüketici ürünleri ile ilgili sorunların azalacağını önermişlerdir. Özek ve Sinecen (2004), bir havalandırma sisteminin modelini bulanık mantık yaklaşımıyla incelemişlerdir; çünkü kontrol sistemlerindeki temel sorunlardan biri kontrol mekanizması ile ilgili matematiksel modeli oluşturmadaki zorluktur. Kontrol sisteminin matematik modeli kullanılmadan yapılan bulanık mantık yönteminin sadece sözel değişkenler yardımıyla kontrol mekanizması gerçekleştirebildiğini göstermişlerdir. Tiryaki ve Kazan (2007), günlük yaşamda sık kullanılan bir bulaşık makinasının simule edilmesi ve bulanık mantık kullanılarak modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Uygun bir donanım desteği ve uygun sensörler kullanıldığında bulanık mantık modelinin amacı ile bulaşık miktarı, türü gibi girdilere göre, insan müdahalesi olmadan yıkama işleminin yapılabileceği sonucuna varmışlardır. Berber ve ark. (2013), karşı-akım Ranque-Hilsch vorteks tüplerinin ısıtma ve soğutma performanslarını deneysel olarak incelemiş ve bir kural tabanlı Mamdani tipi bulanık modelleme tekniği ile modellemişlerdir. BM'nın başarılı bir şekilde farklı geometrik yapılara sahip karşı akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü ısıtma ve soğutma performans analizi için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Kashyap ve Kishor (2012)'un Katı Oksit Yakıt Hücresi ile çalışan güç üretme sistemini matematiksel olarak modelleyen çalışmasında Matlab/Simulink üzerinde çalıştırılan bulanık mantık modeli kontrol mekanizması olarak kullanılmıştır. Katı Oksit Yakıt Hücresi'nin çalışmasının bulanık mantık yardımıyla bir benzetimi yapılarak sistemin aktif güç kontrolü ve voltaj düzenleme yeteneği gibi genel performans verileri değerlendirilmiştir. Mammar ve Chaker (2009), evsel kullanım için PEM yakıt hücresinin dinamik benzetimi ile ilgili bir çalışmada, PEM yakıt hücresinin güç çıktısını bulanık mantık aracılığıyla kontrol eden bir algoritma geliştirmişlerdir. Çalışma içerisinde türetilen benzetime, evsel kullanımda gerekli olan dinamik yakıt hücresi, gaz şartlandırma sistemi, doğru akım-alternatif akım dönüştürücüsü ve bulanık mantık sürücüsü benzetimleri birleştirilerek enerji üretim sisteminin güç talebindeki ani artış karşısındaki cevabını detaylı olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, PEM yakıt hücresinin güç çıktısının belirlenmesinde bulanık mantık yönteminin başarıyla kullanılabildiğini göstermişlerdir. Becker ve Karri (2010), çalışmalarında pahalı ve karmaşık hidrojen ölçüm cihazlarının kullanımı yerine yapay sinir ağlarının kullanımını önermişlerdir. Matematiksel benzetimler ile elde edilen hidrojen seviyeleri ölçüm cihazı

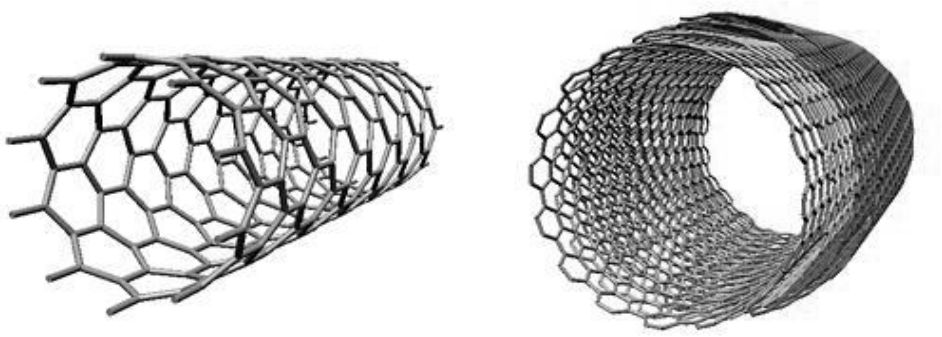
ile elde edilen değerler ile yaklaşık %3'lük bir sapma göstermektedir. Bu durum hidrojen tüketen sistemler için matematiksel modellerin fiziken ölçüm alanında bulunan ölçüm cihazlarının yerini almasının yolunu açmıştır.

7. MATERYAL VE YÖNTEM

7.1. Karbon Nanotüp Teknolojisi

Günümüzde teknoloji, insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak için sürekli gelişmektedir. Bu gelişmelerden biri de boyutların küçültülmesiyle birlikte malzemelerin özelliklerini iyileştirmeye yönelik olan nanoteknolojidir. Atomik ölçekte gerçekleştirilen işleme teknolojisi olan nanoteknoloji, mikro teknolojiden daha küçük teknoloji olarak da adlandırılmaktadır (Küçükyıldırım ve Eker, 2012).

Karbon nanotüp (KNT), grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron civarındadır. KNT'ler Şekil 7.1'de görüldüğü gibi tek katmanlı ve çok katmanlı olarak üretilebilmektedir (Güvendiren, Öztürk, 2003).



Şekil 7.1. Tek Katmanlı ve Çok Katmanlı Nanotüpler (Yetim,2011).

Karbon nanotüp silindir şeklindeki bir karbon allotropudur, sadece karbon atomu içerir. Karbon nanotüpler, kıvrılmış grafin yüzeyi olarak ele alınırsa, beyaz kâğıdın grafin olarak düşünülmesi durumunda, kâğıdın boylamasına kıvrılıp elde edilen silindirin karbon nanotüp olduğu söylenebilir. Karbon nanotüpün çapı, en gelişmiş yarı iletken aletten daha küçüktür. Dolayısıyla karbon nanotüplerin bu elverişli yapısı çok küçük boyutu ve karbon atomunun eşsiz elektronik özelliklerinden dolayı yarı iletken fiziği üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir (Yetim, 2011).

KNT'ler teknik özellikler bakımından çok iyi mekanik dayanım, rijitlik, elektriksel ve ısıl özellikler sergilemektedir. KNT'lerin silindirik yapıları sayesinde, boyları doğrultusunda 63 GPa gibi çekme dayanımı değerlerine sahip olmaları, elastisite modülünün ise 1 TPa değerine ulaşması, vakum ortamında 2800^{o}C ye kadar ısıl dayanım göstermeleri, eşsiz bir malzeme olduğunu göstermektedir. Yüksek boy/en

oranlarına sahip olmalarından dolayı, kompozit malzeme üretimi için çok avantajlı malzemelerdir (Üstündağ, 2011).

7.2. Spin Yöntemi İle Kaplama Tekniği

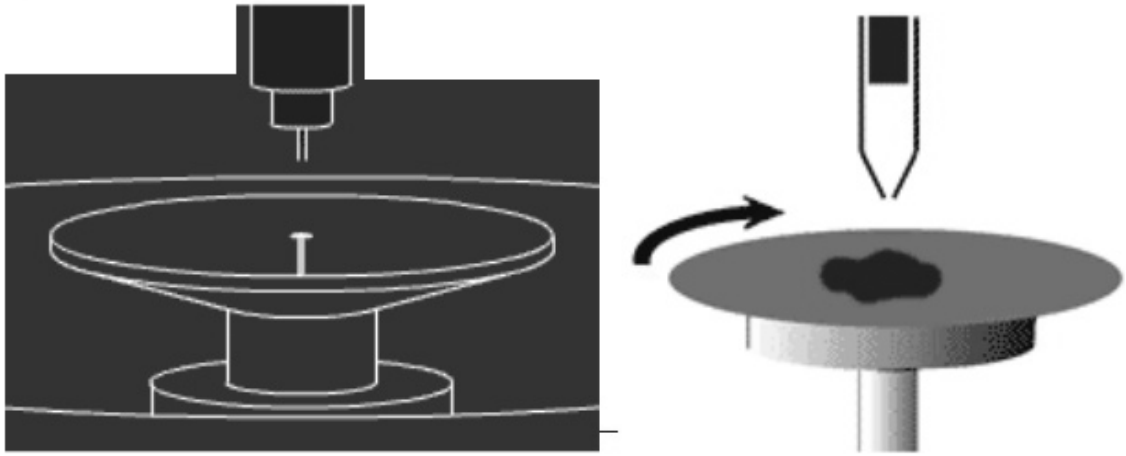
Kaplama yapılacak yüzey üzerinde homojen ve ince film oluşturmak için spin yönteminden yani döndürerek kaplamadan yararlanılır. Şekil 7.2'de görüldüğü gibi kaplama için kullanılacak malzemenin uygun bir çözücü içinde çözülmesi sonucu elde edilen çözelti, kaplanacak yüzey üzerine damlatılır. Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle çözeltinin yüzey üzerine homojen bir şekilde yayılması sağlanır, bunun için belli devir/dk'da dönem hareketi uygulanır. Daha sonra çözücünün buharlaşması ile istenilen incelikte kaplama elde edilir (Şeker, 2011).

Spin yöntemi ile kaplama işlemi temel olarak üç adımdan oluşur (Babür, 2012).

- Hazırlanan çözeltinin cam altlık üzerine damlatılması
- Yüksek hızlı döndürme ile fazla çözücünün kaplanan altlık yüzeyinden uzaklaştırılması ile birlikte çözeltinin altlık yüzeye yayılması
- Kurutma işlemi ile altlık yüzeyde kalan çözeltinin buharlaştırılması

Yüzey üzerine bir miktar sıvı dökülmesi ile kaplama safhası gerçekleştirilir, daha sonra döndürme işleminde, sıvı merkezcil kuvvet nedeni ile radyal bir şekilde taşıyıcı yüzeyin dışına doğru akar. Bu işlemin sonunda, fazla olan sıvı taşıyıcı yüzeyinden taşarak yüzeyi terk eder. Son aşama, cam altlık üzerinde buharlaşmanın etkisiyle fazla çözeltinin yüzeyden uzaklaştırılmasıdır. Spin yöntemi ile kaplamanın avantajı, ince film oluşurken altlık yüzeyde oluşmaya başlayan filmin düzgün bir şekilde dağılmasıdır. Bunun sonucu olarak film kalınlığı, yüzey boyunca homojen bir özellik gösterir (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

Altlığın boyutlarına ve çözelti viskozitesine bağlı olarak gerekli çözelti miktarı 1-10 mikron arasında değişir. Yüksek viskozitelerde veya büyük altlıklarda yüksek dönme hızlarında altlığın yüzeyini tamamen kaplaması için daha fazla çözelti damlatılması gerekir. Bu proseste yaklaşık 500 d/dk dönüş hızları kullanılır. Bu hızlar sıvının tüm altlık boyunca dağılmasını ve daha az çözelti kullanılmasını sağlar (Evcin, 2006).

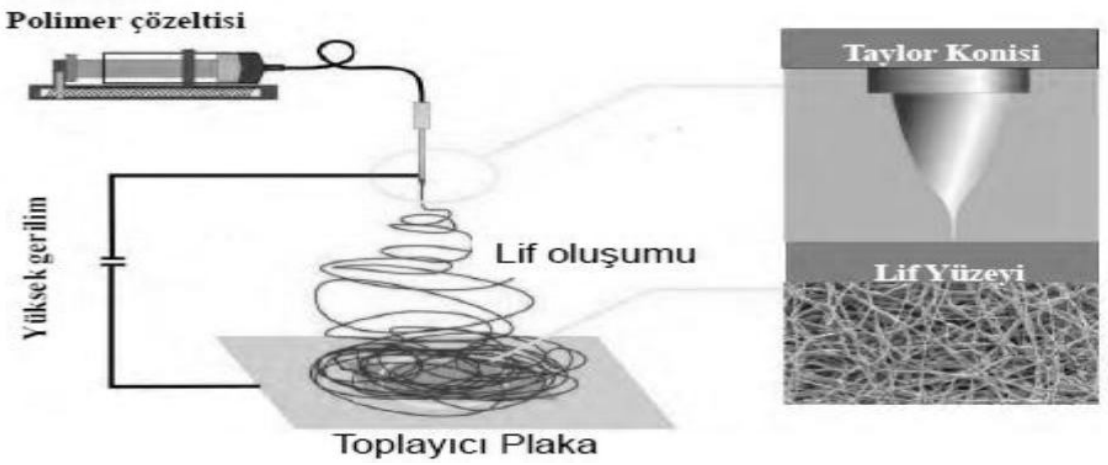


Şekil 7.3. Spin yönteminin çalışma prensibi (Uslu, 2013)

7.3. Elektrospin Yöntemi ile Kaplama Tekniği

Elektrospin yönteminin prensibi, kontrollü olarak belirli büyüklükte bir elektriksel kuvvet uygulanmasıyla, polimer çözeltilerinin başka bir noktaya, yapı ve boyut değişimiyle transfer edilmesi temeline dayanmaktadır. Bu yöntemde yüksek doğru akım voltajına maruz bırakılan polimer çözeltisinin, benzer yükler ile yüklenerek ayrışması sonucu, çok ince lifli yapılar oluşturulabilmektedir (Şeker, 2011).

Bu teknikte, polimer uygun bir çözücüde çözüldükten sonra ucunda küçük bir delik bulunan cam bir pipetin içine yerleştirilir. Daha sonra Şekil 7.3'de gösterildiği gibi polimer çözeltisi ile pipetin açık ucunun karsısındaki bir toplayıcı levha arasına yüksek gerilim uygulanır. Besleyici ünitedeki iğnenin ucunda asılı duran polimer damlası kritik bir voltaj değerine kadar küresel bir biçimde bulunur. Yüzey geriliminin uyguladığı kuvvetlerden dolayı bu şekilde olduğu bilinmektedir. Elektrostatik kuvvetlerin yüzey gerilimine eşitlenmesi uygulanan potansiyel farkın bir eşik değerine ulaşmasıyla gerçekleşir. Bu noktada polimer damlası şekil değiştirerek koni biçimini alır. Bu koniye, Taylor konisi denir (Dinç, 2013).



Şekil 7.3. Elektrospin yönteminin çalışma prensibi (Dinç, 2013)

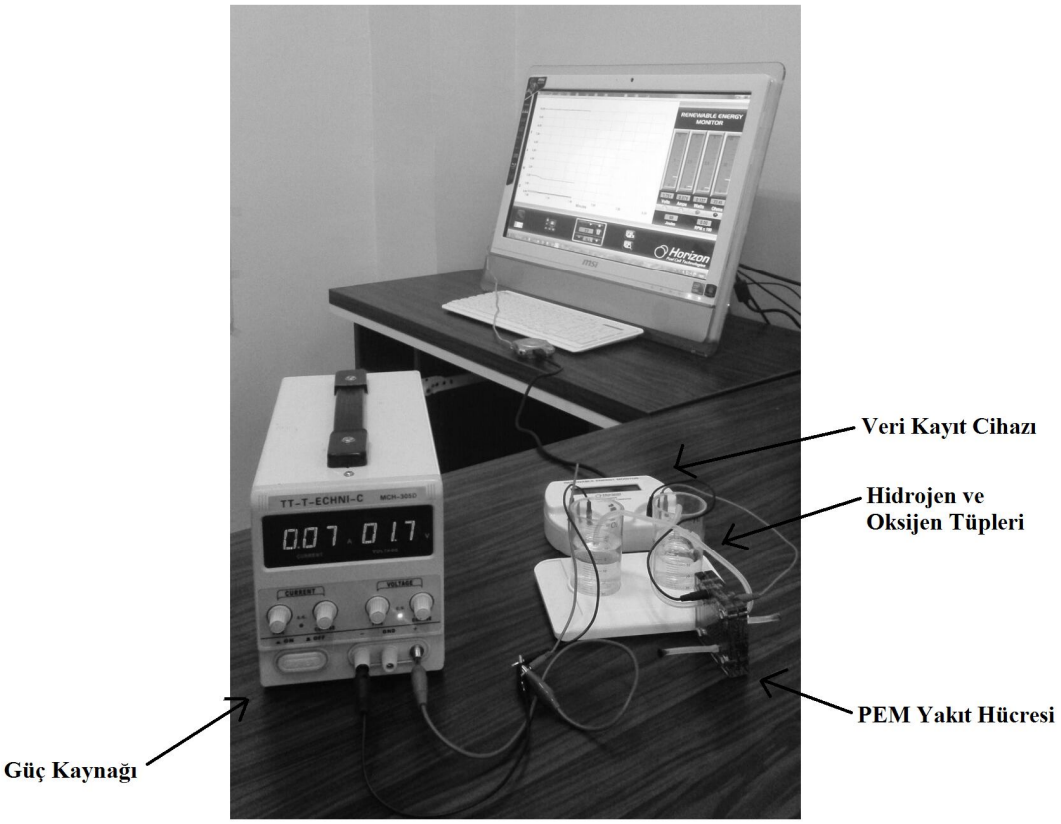
7.4. Deneysel Çalışma

Bu tez çalışmasında, PEM yakıt hücresi membran performansının arttırılması için yakıt hücresinin anot tarafı spin yöntemiyle karbon nanotüp ile kaplanmıştır. Karbon nanotüplerin göstermiş olduğu özellikleri nedeniyle daha yüksek performansa sahip PEM yakıt hücresi elde edilmesi amaçlanmıştır.

7.4.1. Deneysel Sistem

Şekil 7.4, deneysel çalışmada kullanılan sistemi göstermektedir. Şekilde gösterilen parçalar aşağıda görevleriyle birlikte açıklanmıştır.

i. PEM Yakıt Hücresi: Tersinir özelliğe sahip olan PEM yakıt hücresi, güç kaynağı ile beslendiğinde içerisindeki suyu oksijen ve hidrojene ayırır, bu durum şarj sırasındaki durum olarak belirtilebilir. Eğer PEM yakıt hücresinden elektrik akım çekerek motor çalıştırdığımızda, ayırmış olduğu hidrojen ve oksijeni birleştirerek sistem için gerekli olan elektrik akımını oluşturur, bu durum da PEM yakıt hücresinin deşarj sırasındaki durumu olarak değerlendirilmektedir.
ii. Güç Kaynağı: Doğru akım güç kaynağı, PEM yakıt hücresine enerji vererek sistemin hidrojen ve oksijene ayrılmasını sağlamaktadır.
iii. Elektrik Motoru: 1.5 V doğru akım motoru, PEM yakıt hücresinden deşarj sırasında elde edilen elektriği hareket enerjisine çevirir.



Şekil 7.4. Deneysel sistem

iv. Hidrojen ve Oksijen Tüpleri: PEM yakıt hücresinde suyun elektrolizi sonucu oluşan hidrojen ve oksijenin ayrı ayrı depolandığı kaplardır. Elektroliz sırasında hacim olarak 1 birim oksijen oluşurken 2 birim hidrojen oluşmaktadır.

v. Veri Kayıt Cihazı (Datalogger): PEM yakıt hücresinin şarj ve deşarj durumlarında gerilim, direnç, akım ve güç değerlerini ölçerek bilgisayara veri aktarımı yapan araçtır.

7.4.2. PEM yakıt hücresinin spin yöntemiyle KNT ile kaplanma aşamaları

7.4.2.1. Kaplama öncesi performans analizinin belirlenmesi

İlk olarak, doğru akım güç kaynağı ile PEM yakıt hücresinin anot ve katot ucuna farklı voltajlarda gerilim uygulanmıştır. Deneysel çalışmada başlangıç voltajı 0.9 volt, maksimum voltaj ise 1.9 volt olmak üzere, bu aralıktaki değerlerde ölçümler yapılmıştır. PEM yakıt hücresine 0.9 volt gerilim uygulandığında hücreden hiç akım

geçmemiş, dolayısıyla hidrojen ve oksijen üretilememiştir. Bu yüzden akımın geçeceği gerilim değerine kadar gerilim arttırılmıştır. Akım geçmeye başladığı an itibariyle hidrojen ve oksijen üretiminin başladığı gözlemlenmiştir. Devreden geçen akım arttıkça üretilen hidrojen ve oksijen hızı da artmıştır. Bu şekilde, hidrojen ve oksijen tüplerinin dolumu yapılmıştır.

Sistemden akım geçmeye başladığı an itibariyle veri kayıt cihazı (datalogger), maksimum volt, akım, güç değerlerini gösterirken direnç minimumdur. Belirli bir süre sonra direncin artmaya başladığı ve buna bağlı olarak akım ve gücün azaldığı, bunun sebebinin ise sistemin ısınmasına bağlı olarak direncin artması olarak belirtilmiştir. Şarj sırasında üretilen hidrojen ve oksijenin, PEM yakıt hücresinde birleşmesiyle anot ve katot arasında potansiyel fark oluşturarak elektrik motorunun çalışması için gerekli olan doğru akım elde edilir. Tüplerde biriken hidrojen veya oksijenin birisi bitinceye kadar PEM yakıt hücresi elektrik üretmeye ve elektrik motorunu çalıştırmaya devam etmiştir.

Bu tez çalışmasında, üç farklı deneysel çalışma yapılmıştır. Birinci deneysel çalışmada gerilim değerleri 0.9 V ile 1.5 V arasında, ikinci deneysel çalışmada 1.7 V ile 1.9 V arasında çalıştırılmıştır. Üçüncü deneysel çalışmada, sistemin belli bir zaman sonra soğumasından sonra ikinci deneysel çalışmada kullanılan gerilim değerleri kullanılmış, aradaki değişimler izlenmiştir.

7.4.2.2. PEM yakıt hücresinin demontajı

PEM yakıt hücresi membranının anot yüzeyinin KNT ile kaplanması için 2x2 cm^2'lik PEM yakıt hücresi demonte hale getirilerek, bileşenleri içinden membranın çıkartılması sağlanmıştır. PEM yakıt hücresini oluşturan fiber dış şasesinin, cıvataları sökülerek silikonla yapıştırılmış membran, çok dikkatli bir şekilde fiber şaseden ayrılarak arasından çıkartılmıştır.

7.4.2.3 PEM yakıt hücresi membranın KNT ile kaplanması

i. Başlangıçta, kaplama yapılan KNT'nin miktarını belirleyebilmek için, kaplama öncesi durumda demonte sırasında çıkardığımız membran hassas terazi ile tartıldı. Kütlesi Şekil 7.5'de görüldüğü gibi 1896.8 mg olarak belirlenmiştir.



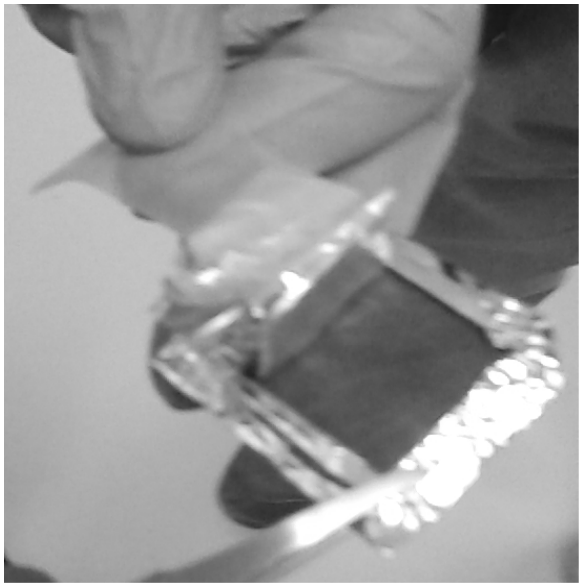
Şekil 7.5. Kaplama öncesi membranın hassas terazi ile ölçülmesi

ii. KNT katı olduğundan dolayı membranın anot yüzeyine yapıştırılması için metil alkol Şekil 7.6'da görüldüğü gibi mikropipet ile çekilerek, yine mikropipet ile KNT'nin bulunduğu tüpe şırınga edildi. Yapıştırma işleminden sonra yüzeyde sadece KNT kalması istendiği için sıvı akışkanın uçması gerekmektedir. Bunun için metil alkol kullanılmıştır. Ayrıca metil alkol membrana herhangi bir zarar vermemektedir.



Şekil 7.6. Metil alkolün KNT ile karıştırılma aşamaları

iii. Membran, Şekil 7.7'de görüldüğü gibi anot kısmı açık kalacak biçimde diğer kısımları alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Bunun sebebi, spin yöntemiyle sadece KNT'nin anot yüzeyine kaplanmasını sağlamaktır. Isıdan ve kullandığımız metil alkolden etkilenmeyip membrana zarar vermediğinden dolayı alüminyum folyo tercih edilmiştir.



Şekil 7.7. Membranın anot tarafının folyo ile kapatılması

iv. KNT ile metil alkolün homojen bir şekilde karışması için, tüpün içine balık atılarak manyetik karıştırıcı olarak da belirtebileceğimiz santrifüj makinesinde Şekil 7.8'de görüldüğü gibi 10 dk boyunca 40 ^{o}C'de 1140 d/dk'da karıştırma işlemi yapılmıştır. Balığın içerisinde bulunan manyetik madde sayesinde, santrifüj cihazının üzerine konulan tüpün homojen karışımı sağlanmıştır. Santrifüj cihazının içerisindeki dönen mıknatıs, balığın manyetik olarak etkilenerek tüpün içerisinde dönmesini sağlar. Bu şekilde mekanik bir karışma işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır.



Şekil 7.8. Santrifüj makinesinde yapılan karıştırma işlemi

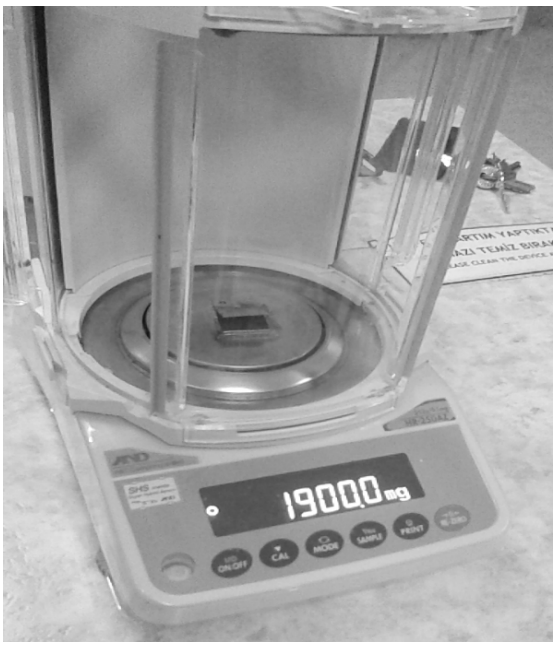
v. Cismin dairesel hareket yaptırılarak kaplanıldığı yönteme spin kaplama yöntemi denir. Membranın anot tarafi üstte kalacak şekilde spin makinesine yerleştirilir. Spin makinesinin üzerine konup dairesel olarak dönmeye başlayan membranın anot kısmına, manyetik karıştırıcıda homojen olarak karışmış olan CNT-Metil alkol karışımı, Şekil 7.9'da görüldüğü gibi mikropipet ile çekilerek yine aynı mikropipet yardımıyla şekilde görüldüğü gibi yukarıdan damlatılır.



Şekil 7.9. Membrana KNT-Metil alkol karışımının ilave edilme aşamaları

vi. Bu aşamadan sonra, 3 dk boyunca 600 d/dk'da membran, spin cihazında dairesel hareket yaparak KNT'nin membran yüzeyine homojen bir şekilde yayılması sağlanmış olur. Bu esnada, metil alkol KNT'nin yüzeye yayılmasındaki taşıyıcı akışkan faktörüdür.

vii. Bu işlemden sonra metil alkolün buharlaşması için membran kurumaya bırakılmıştır. Membran tamamen kuruduktan sonra, daha önce ölçüm yapılan hassas terazi ile bir kez daha membranın tartılmasıyla, membranın üzerine ne kadar KNT kaplandığı tespit edilmiştir. Şekil 7.10'da görüldüğü gibi kaplama sonrası kütlesi 1900.0 mg olduğu bunun sonucunda, kaplama öncesine göre membran kütlesinin 3.2 mg arttığı belirlenmiştir.



Şekil 7.10. Kaplama öncesi membranın hassas terazi ile ölçülmesi

7.4.2.4. PEM Yakıt Hücresinin Montajı

Anot tarafı KNT ile kaplanan PEM yakıt hücresinde membranın kuruması neticesinde, yakıt hücresi monte edilmiştir. Monte edilen PEM yakıt hücresi, kaplama sonrası membran performansının belirlenmesi için hazır hale getirilmiştir.

7.5. Bulanık Mantık Modeli Çalışma Prensibi

Bulanık mantık modeli oluşturmanın temel aşamaları, bulanıklaştırma, kural tabanı oluşturma, bulanık çıkarım mekanizması ve son olarak durulaştırma adımlarından oluşur. Bulanıklaştırma işleminde, bilgisayara ölçüm yoluyla alınan ve kesin bir sayısal değere sahip olan giriş verisi sözel ifadelere dönüştürülür. Bu aşamada bilgi tabanında belirlenen üyelik fonksiyonlarından yararlanılır. Bulanıklaştırma sonunda elde edilen sözel ifadeler kullanılarak, sistemin giriş ve çıkışı arasındaki ilişkiyi tanımlayan kurallar belirlenir. Bulanık çıkarımda ise sözel ifadeler ve kurallar kullanılarak bulanık çıkış elde edilir. Bulanık çıkışların, sayısal çıkış değerine dönüştürülmesi işlemi de durulaştırma ya da berraklaştırma katında yapılır (Tektaş, 2010).

Şekil 7.11'de, bulanık mantık modelinin çalışma prensibi gösterilmiştir. Giriş üyelik fonksiyonları tarafından bulanıklaştırma işlemi, bulanık mantık kuralları ile çıkarım mekanizması ve son olarak da çıkış üyelik fonksiyonu tarafından da durulaştırma işlemi yapılarak çıkış değerine ulaşılır.



Şekil 7.11. Bulanık mantık çalışma mekanizması (Yılmaz ve Ocak, 2008).

7.5.1. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, sistemden alınan sayısal bilgilerin dilsel değişkenler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemidir. Dilsel değişkenlerin sayısı, üyelik fonksiyon çeşitleri ve bunların üyelik derecelerinin tespiti bu aşamada yapılır. Sistemin verimli çalışmasını sağlamak amacıyla değişik şekillerde (üçgen, yamuk, çan eğrisi vs.) bulanık kümeler seçilebilir (Elmas, 2011).

Sistem üzerinde çalışan uzman kişi, hangi üyelik fonksiyonunun kullanılacağına karar verir. Bu aşama, sistemin doğru bir şekilde modelinin oluşturulmasında çok önemlidir. Dilsel değişkenlerin sayısının belirlenmesinde yapılan yanlışlık, üyelik

fonksiyonu oluşumunu, bununla birlikte sistem için belirlenecek olan kuralları da etkiler.

7.5.2. Karar Verme Birimi

İnsanlar, bir durum hakkında yorum veya değerlendirme yaparken, bilgi ve tecrübeleri sonucu edindiği kurallardan yararlanır. Karar verme sürecinde, bu kuralların doğrultusunda hareket eder ve bir sonuca varır. Bilgisayarların ise bir durum karşısında yorum yapabilmesi için o durumla ilgili bilgi, tecrübe ve sezgilerimizden oluşan kuralları bilgisayara aktarabilmemiz gerekir. Bilgisayara, "Eğer A durumu böyleyse ve B durumu da şöyleyse, o halde C şunu yap" şeklinde sözel kurallar ile üzerinde çalışılan sistem öğretilir. Bu aşamaya bulanık karar verme süreci denir (Çınar, 2013).

Kurallar, modelleme çalışması üzerinde çalışan uzman kişi tarafından sistemin giriş ve çıkışı arasındaki durumların değerlendirilmesi sonucunda belirlenir. Bu değerlendirmede eksik ya da hatalı bilgilerin bilgisayara aktarılması durumunda, sistem hatalı sonuçlara karar vermektedir. Bundan dolayı, modellemesi yapılan sistemin detaylı olarak analiz edilmesi, tüm durumların bilgisayara aktarılması gerekmektedir.

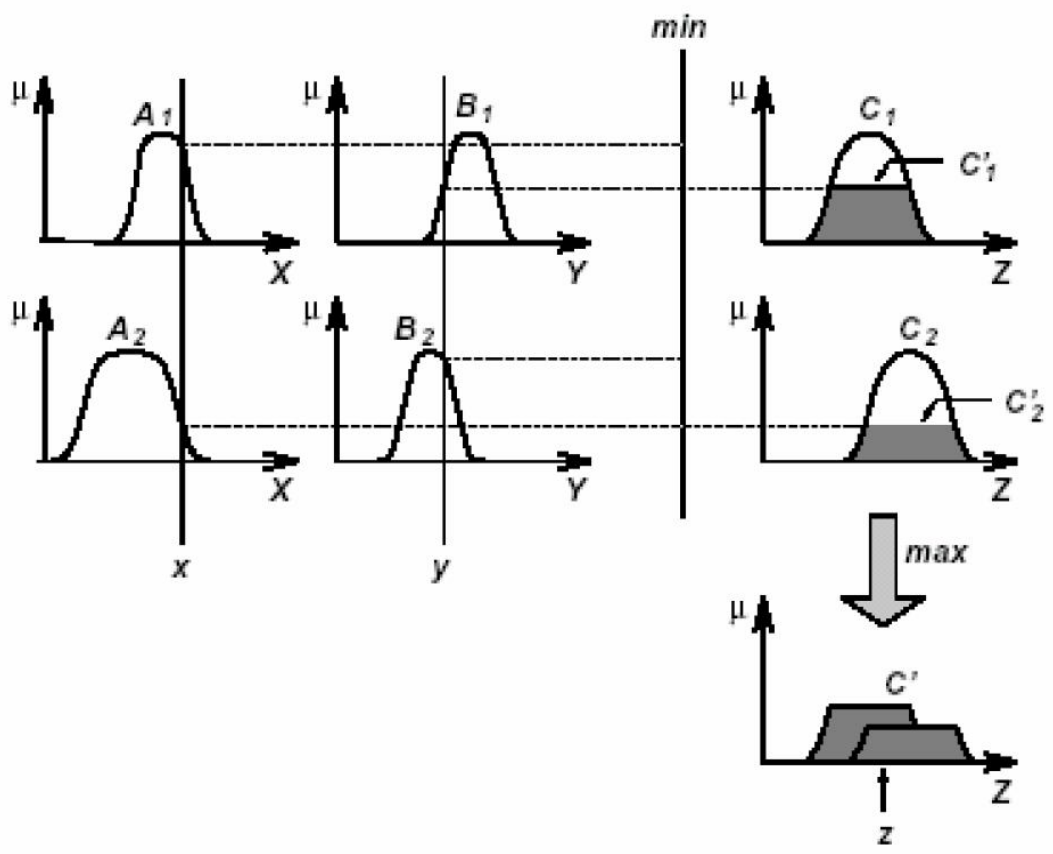
7.5.3. Bulanık Çıkarım Mekanizması

Bulandırma işlemi sonucunda, sayısal değerlerden sembolik değerler elde edilmişti, daha sonra karar verme biriminde belirlenen kurallar ile çıkarım mekanizması kullanılarak sembolik sonuç elde edilir. Bulanık çıkarım için en çok kullanılan yapılar, Mamdani yöntemi ve Takagi-Sugeno yöntemidir. (Elmas, 2011).

Mamdani bulanık modeli ilk kez, uzman insan operatörler tarafından elde edilen sözel kurallar ile, buhar makinesi ve kazan bileşiminin kontrolü için İngiliz Prof. Ebraham Mamdani tarafından önerildi (Karakuzu, 2006). Mamdani yönteminde sisteme ait girdi değişkenleri ve çıktı değişkenleri üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. Bundan dolayı her türlü problemin çözümüne uygulanabilen, yaygın olarak kullanım alanı olan bir bulanık mantık yöntemidir. Mamdani tipi bir bulanık model, girdilerin bulanıklaştırılması, sistemin giriş-çıkış analizinin yapıldığı kuralların belirlenmesi, bulanık kümeye ait mantıksal işlemcinin uygulanması, çıkış üyelik fonksiyonları ile durulaştırma işlemlerinden oluşturulur (Yumuşak ve Ekmekçi, 2011).

Kural tabanlı Mamdani tip bulanık modelin bilgi tabanını bulanık eğer-ise kuralları topluluğu oluşturmaktadır. Mamdani yöntemi; giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki fonksiyonel bağımlılıkların, genel dil kullanımındaki ve-veya-değil operatörleri ile eğer-ise kurallar kümesi aracılığıyla açıklanmasını sağlayan bir modelleme yaklaşımını İfade eder. Mamdani bulanık mantık modeli, her kuralın bir eğer-ise ilişkisi ile temsil edildiği bir bulanık ilişkisel model türüdür (Tosun vd., 2010).

Şekil 7.12'de, iki girişli ve iki kurallı bir bulanık sistemde, çıkış değeri z'nin nasıl x ve y gibi iki giriş değerinden elde edilişi gösterilmektedir. Sistemin çalışması şu biçimde işler. Önce, x ve y girişlerinin herhangi bir andaki değerine göre kuralın tanımladığı giriş bulanık kümesinde, her bir kural için bu girişlerin üyelik dereceleri belirlenir. Bu iki keskin üyelik derecesi min operatöründen geçirilir. Her kural için yapıldığında, kural sayısı kadar çıkış bulanık küme elde edilir. Bu kümelerin de birleşimi alınır yani max operatöründen geçirilir. Sonuçta sayısal bir değere ulaşılmamıştır, elde edilen çıkış bulanık kümesi durulaştırma işleminden geçirilerek net bir değere ulaşılır (Karakuzu, 2006).



Şekil 7.12. Bulanık ve-veya işlemleri için sırasıyla minimizasyon ve maksimizasyon operatörlerini kullanan Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi (Abduljabar, 2011).

Mamdani tipi bulanık model oluşturulması insan davranışlarına daha uygundur. Diğer bulanık mantık modellemelerinin temelini oluşturur. Bulanık mantık çıkarım yöntemlerinden ikincisi olan Takagi – Sugeno bulanık mantık ya da Sugeno bulanık mantık ilk kez 1985 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Girdi değişkenlerinin bulanıklaştırılma adımları Mamdani bulanık modelleme ile tamamen aynıdır. İki yöntem arasındaki tek fark çıktı üyelik fonksiyonlarındadır. Sugeno tipi bulanık modellemede çıktı üyelik fonksiyonları lineer ya da sabittir. Giriş ve çıkış değişkenleri için, x = A ve y = B, ise z = f(x,y) olarak söylenebilir. Matematiksel analiz için uygun olup, yüksek derecedeki modelleme kullanıldığında oldukça kompleks bir yapıya sahip olur. İnsan sezgilerine çok uygun değildir (Abduljabar, 2011).

Mamdani yönteminde çıkış değerlerinin üyelik fonksiyonları ile ifade edilmesi, deneysel çalışmanın modellenmesi çalışmalarında çok fazla kullanılmasını sağlar. Sugeno yönteminde çıkış değeri, katsayılar ve girişlerden oluşan bir polinom şeklinde olduğu için deneysel çalışmaların modellenmesindeki kullanım alanı Mamdani yöntemine göre daha azdır.

7.5.4. Durulama Birimi

Giriş değerlerinin bulanıklaştırılması, sistem için kuralların belirlenmesi ve bu kurallar ile bulanık çıkarım mekanizmaları ile sembolik değerlerin elde edilmesi işlemleri sonucu ulaştığımız değer bulanık bir kümedir. Çıkış değerinin de giriş değeri gibi sayısal değere dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüştürme işleminin yapıldığı birim durulaştırma birimi olarak adlandırılır. Bu birim, bulanık çıkarım mekanizması sonucunda ulaşılan değerden uygulamada kullanılacak gerçek değerlerin elde edilmesini sağlar (Elmas, 2011).

Durulama işleminde değişik yöntemler kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntemler maksimum değeri alma, maksimumların ortasını alma ve ağırlık merkezi yöntemidir. Maksimum değeri alma yönteminde, bulanık küme içinde en büyük değere sahip eleman kesin değer olarak alınır. Fakat birden fazla maksimum değeri olması halinde bu yöntem ile karar vermek oldukça zordur. Maksimumların ortasını alma yöntemi, sistemin birden fazla maksimum noktası olması halinde çözüm üreten bir yöntemdir. Maksimum değerlerin ortalaması kesin değer olarak alınır. Ağırlık merkezi yöntemi, en çok kullanılan netleştirme yöntemlerinden biridir ve ağırlık merkezi hesaplanarak yapılmaktadır. Burada, sistem için belirlenen kuralların bulanık çıkışlarına ilişkin üyelik fonksiyon değerleri ile skaler ağırlıkları çarpılarak, toplamları alınır. Elde

edilen değerin, üyelik fonksiyon değerlerinin toplamına bölünmesiyle kesin değer bulunur (Çobanoğlu, 2000).

Deneysel çalışmalarda, zaman, maliyet ve en önemlisi güvenlik durumu göz önüne alındığında bulanık mantık modeli oluşturmanın yararları görülebilir. İnsan karar verme mekanizmasına benzer bir şekilde çalışma prensibine sahip olduğu için çok fazla kullanılmaktadır.

7.6. HHO Hücre Performansının BM Yöntemi İle Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, hidroksi (HHO) kuru hücre performansları, kural tabanlı Mamdani tipi bulanık modelleme tekniği ile gerilim, akım ve sıcaklık parametreleri bakımından modellenmiştir. Giriş parametreleri kombinasyon ve zaman; çıkış parametreleri voltaj, akım ve sıcaklık; BM tarafından tanımlanmıştır. Bu modelleme çalışmasında 300 deneysel veri kullanılmıştır. Giriş ve çıkış değişkenlerinin sayısal parametreleri bulanıklaştırılarak sözel değişkenlere çevrilmiştir. Çok çok düşük (L_1), çok düşük (L_2), düşük (L_3), negatif orta (L_4), orta (L_5), pozitif orta (L_6), yüksek (L_7), çok yüksek (L_8) ve çok çok yüksek (L_9) dil sınıflarını ifade etmektedir. Sistemin giriş ve çıkış arasındaki ilişkinin davranışları tespit için kullanılan kurallar belirlenmiştir. Bu sistem için kullanılan dil değişkenleri ile 243 kural elde edilmiştir. Bu kuralların bir sonucu olarak, deneysel çalışmadan elde edilen her bir değer aynı zamanda bulanık mantık ile belirlenmiştir. Deneysel veriler ve BM arasındaki karşılaştırma istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Çoklu Determinasyon katsayısı (R^2) yönteminde, voltaj, akım ve sıcaklık için sırasıyla % 98,29, % 99,5, % 96,47 değerleri tespit edilmiştir. 90 ve 570 saniye arasında yer alan, deneysel çalışmada yapılmamış her plakaya ait toplam 270 çıkış değeri için voltaj, akım ve sıcaklık değerleri BM ile tahmin edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, bir bulanık mantık modeli üreterek HHO kuru hücresinin performansını değerlendirmenin mümkün olduğunu sunmaktır. Gerçek değerler ve BM sonuçları, HHO kuru hücresinin analizi için bulanık mantık yönteminin kullanılabileceğini göstermiştir.

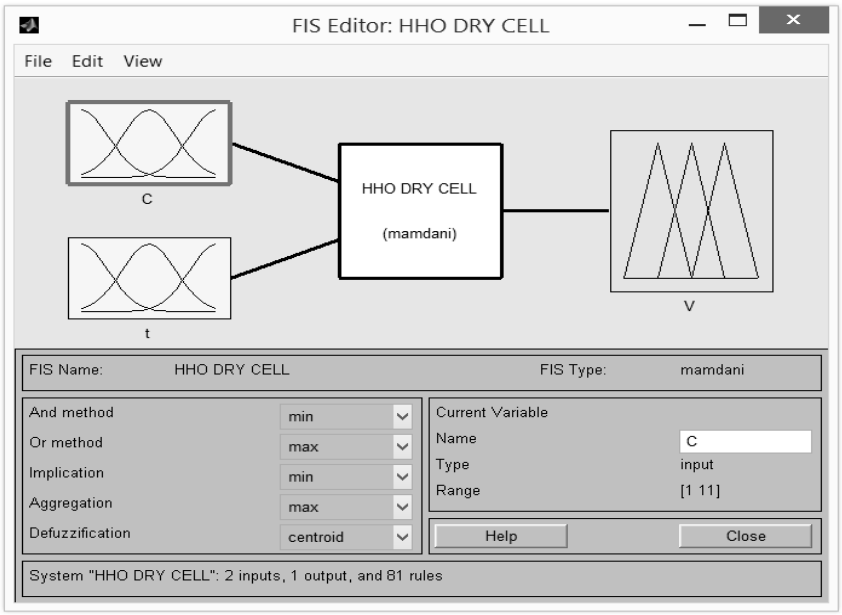
7.6.1. BM modelinin oluşturulması

Bu çalışmada, deneysel verilerden yararlanılarak oluşturulan bulanık mantık model çalışması için Matlab programının Fuzzy Logic modülü kullanılmıştır. Bu

modül, sisteme ait giriş ve çıkış parametrelerinin belirlenmesi, her bir parametreye ait bulanık küme oluşturulması ve bu sistemin çalışması için kuralların belirlenmesi aşamalarına sahiptir. Oluşturulan kurallar ile sisteme öğrettiğimiz çalışma sonucunda, tüm parametrelerin üç boyutlu değişimini gösteren yüzey izleyici şeklini ve istenen giriş değerlerine göre çıkış değerinde nasıl bir sonuçla karşılaşacağımızı bize sunar.

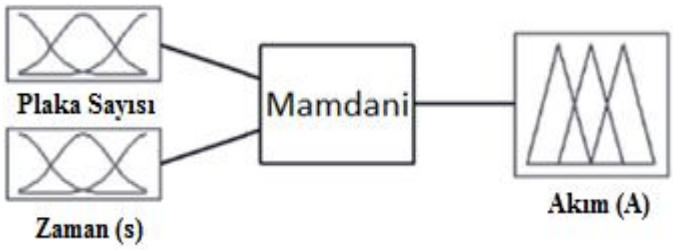
Bulanık mantık modülüne ilk giriş yapıldığında bulanık çıkarım yöntemlerinden Mamdani veya Sugeno yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı seçilir. Bu tez çalışmasında Mamdani yöntemi kullanılmıştır. Mamdani yöntemi, deneysel çalışmaların bulanık mantık modeli oluşturulmasında çok fazla kullanılan, deneysel çalışmadaki her bir aşamada bilgi sahibi olan uzman bilgisi gerektiren ve her türlü problemin çözümüne uygulanabilen bir bulanık mantık yöntemidir. Sugeno yönteminde çıkış üyelik fonksiyonları katsayılar ve girişlerden oluşan polinom şeklinde olduğu durumlar ve değişken sayısının çok fazla olmadığı durumlarda tercih edilir.

Modelleme çalışması için sisteme ait giriş-çıkış parametreleri belirlenir. Şekil 7.13'de HHO kuru hücresinin kombinasyon ve zamana bağlı, gerilim değişiminin analizi için oluşturulmuş bir model gösterilmiştir. Ayrıca bu ana sayfada, kural tabanı metodu ve durulaştırma yöntemi seçilir.

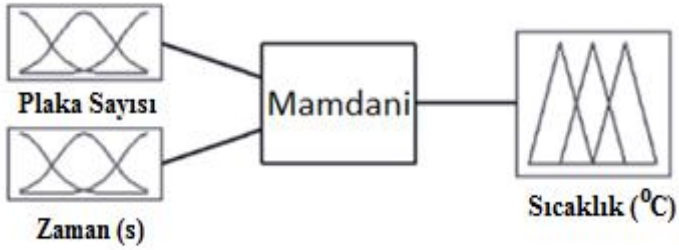


Şekil 7.13. Gerilim değeri için oluşturulan BM modelinin Matlab görüntüsü

Kombinasyon ve zamana bağlı, akım ve sıcaklık değişimleri için oluşturulan BM model şematik çizimleri Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'de verilmiştir.



Şekil 7.14. Akım değeri için oluşturulan BM modeli



Şekil 7.15. Sıcaklık değeri için oluşturulan BM modeli

7.6.2. Dilsel değişkenler ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi

Giriş-çıkış parametrelerini belirledikten sonra her birisinin fonksiyon kümeleri oluşturulur. Elde ettiğimiz deneysel verilerin yorumlanmasından sonra, bu değerlerin kaç tane dilsel değişkenle isimlendirileceğine karar verilir. Bu aşamadan sonra üyelik fonksiyonu çeşitlerinden hangisinin kullanılacağı belirlenir. Bu çalışmada, deneysel verilerin modellenmesinde çok fazla kullanılan üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sisteme öğretilen bu aşamasında yapılan yanlışlar, sonucu direk olarak etkileyecektir. Deneysel çalışmadaki verilerin iyi bir şekilde analiz edilmesi, bundan sonra dilsel değişken ve üyelik fonksiyonu çeşidinin belirlenmesi gerekir.

Girdi ve çıktı değişkenlerinin sayısal parametreleri sözel değişkenler olarak bulanıklaştırılmıştır. Çok çok düşük (L_1), çok düşük (L_2), düşük (L_3), negatif orta (L_4), orta (L_5), pozitif orta (L_6), yüksek (L_7), çok yüksek (L_8) ve çok çok yüksek (L_9) sözel değişkenlerinin hangi sayısal değerlere karşılık geldiği Tablo 1-2'de gösterilmiştir.

Tablo 7.1. Giriş değerlerinin bulanık gösterimi

Dilsel Değişkenler	Çok çok düşük	Çok düşük	Düşük	Negatif orta	Orta	Pozitif Orta	Yüksek	Çok Yüksek	Çok çok yüksek
Plaka sayısı (C)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
	0-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10
t (s)	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
	1- 120	60- 180	120-240	180-300	240-360	300-420	360-480	420-540	480-600

Tablo 7.2. Çıkış değerlerinin bulanık gösterimi **a**. Volt (V) **b**. Akım (A) **c**. Sıcaklık (^oC)

(a)

Dilsel Değişkenler	Çok Düşük	Düşük	Negatif Orta	Orta	Pozitif Orta	Yüksek	Çok Yüksek
Gerilim (V)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
	0-15.83	9.4-22.26	15.83-28.69	22.26-35.12	28.69-41.55	35.12- 48	41.55- 48

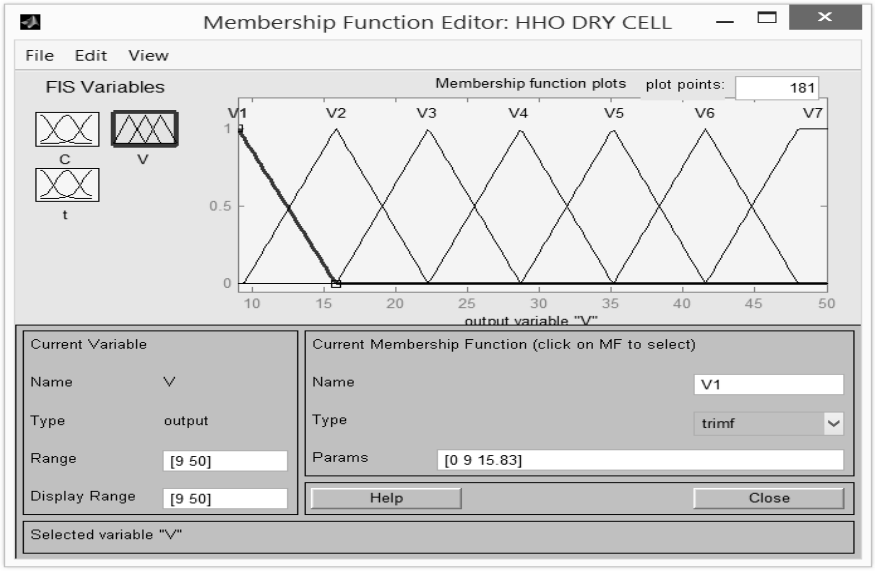
(b)

Dilsel Değişkenler	Çok çok düşük	Çok düşük	Düşük	Negatif orta	Orta	Pozitif Orta	Yüksek	Çok Yüksek	Çok çok yüksek
Akım (A)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
	0-0.9275	0.3-1.555	0.927-2.182	1.555-2.81	2.182-3.437	2.81-4.065	3.437-4.692	4.065-5.32	4.6925-5.32

(c)

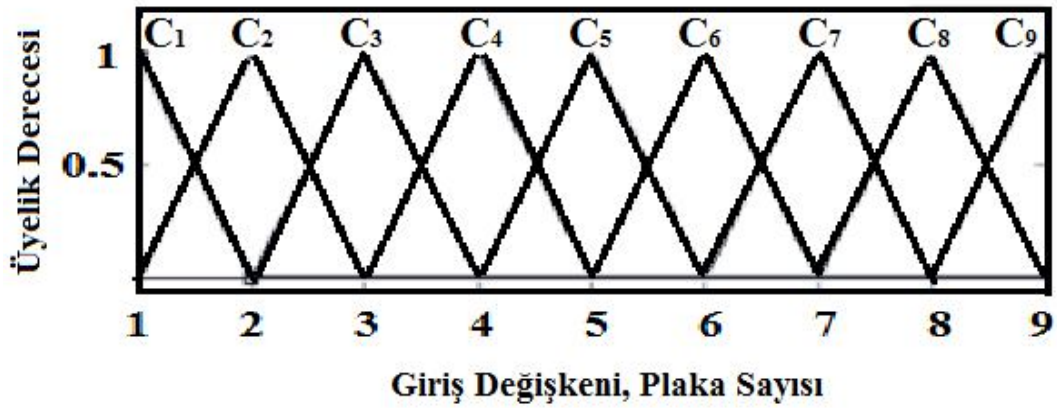
Dilsel Değişkenler	Çok çok düşük	Çok düşük	Düşük	Negatif orta	Orta	Pozitif Orta	Yüksek	Çok Yüksek	Çok çok yüksek
Sıcaklık (^oC)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
	0-18.93	16.3-21.56	18.93-24.19	21.56-26.83	24.2-29.46	26.83-32.09	29.46-34.73	32.1-37.36	34.73-40

Şekil 7.16'da volt değerlerinin, V1'den V7'ye kadar isimlendirildiği, V6'ya kadar üçgen üyelik fonksiyonu kullanıldığı daha sonra yamuk üyelik fonksiyonunun kullanıldığı görülmektedir. Her bir kümenin fonksiyon içerisinde 0-1 aralığında bir ağırlığı vardır. Bir (1) olması, tam olarak o kümenin elemanı olduğunu, sıfıra (0) yaklaşması ise o kümedeki etkisinin azaldığını belirtmektedir.

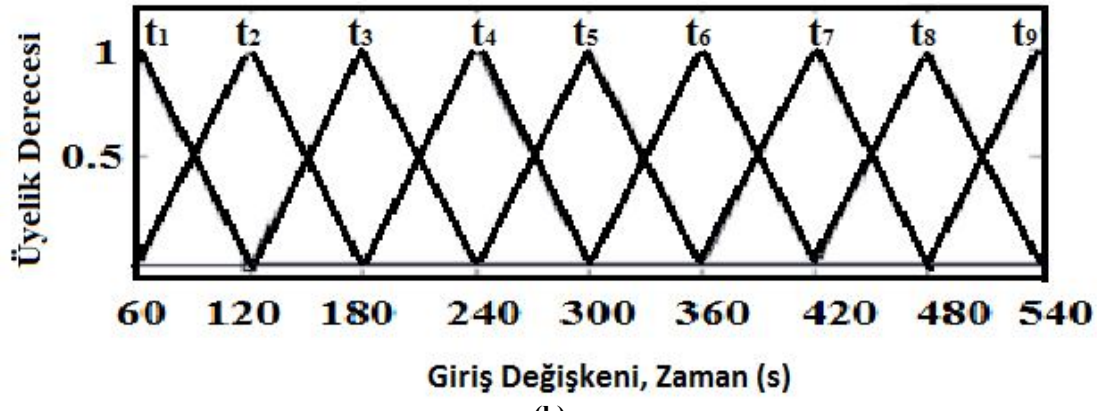


Şekil 7.16. Gerilim değerinin üyelik fonksiyonu grafiğine ait Matlab görüntüsü

Diğer çıkış değişkenleri ve giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyon grafiklerine ait model çizimleri Şekil 7.17-7.18'de verilmiştir.

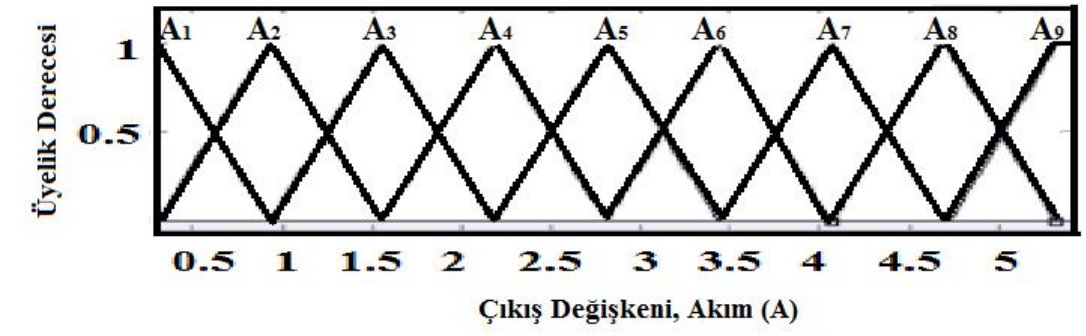


(a)

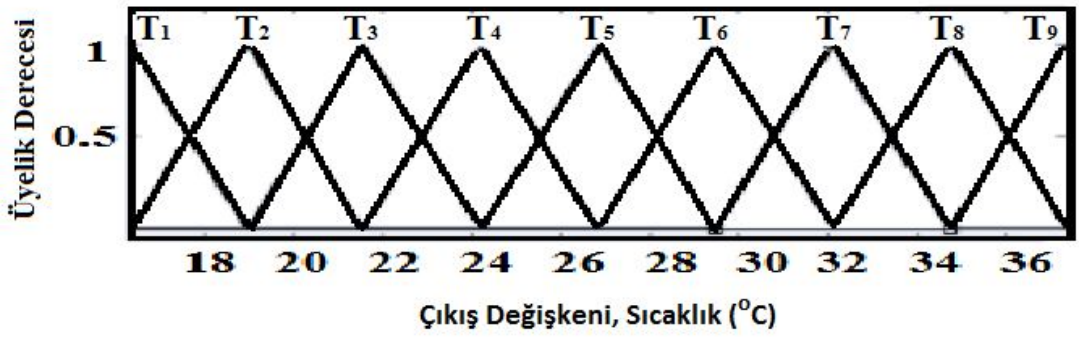


(b)

Şekil 7.17. Giriş değişkenlerinin bulanık kümeler grafiği (a) Plaka Sayısı (b) Zaman (s).



(a)



(b)

Şekil 7.18. Çıkış değişkenlerinin bulanık kümeler grafiği **(a)** Akım (Amper/cm^2), (b) Sıcaklık (^{o}C).

Analitik formda bulanık üyelik fonksiyonları, V için denklem (7.1-7.4), A için denklem (7.5-7.8), ^{o}C için denklem (7.9-7.12) denklemleri ile ifade edilmiştir.

$$V(x) = \begin{pmatrix} x; 9.4 \le x \le 48 \\ 0; \text{ otherwise} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

$$V(x_1) = \begin{pmatrix} 0; \text{ otherwise} \\ 15.83 - x / 6.43; \quad \text{if } 9.4 \le x \le 15.83 \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

$$V(x_4) = \begin{pmatrix} 0; x \le 22.26 \\ x - 22.26/6.43; \text{ if } 22.26 \le x \le 28.69 \\ 35.12 - x/6.43; \text{if } 28.69 \le x \le 35.12 \\ 0; x \ge 35.12 \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

$$V(x_7) = \begin{pmatrix} 0; \text{ otherwise} \\ 48 - x / 6.43; \quad \text{if } 41.55 \le x \le 48 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

$$A(x) = \begin{pmatrix} x; 0.3 \le x \le 5.32 \\ 0; \text{ otherwise} \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

$$A(x_1) = \begin{pmatrix} 0; \text{ otherwise} \\ 0.9275 - x/0.6275; \quad \text{if } 0.3 \le x \le 0.9275 \end{pmatrix} \quad (7.6)$$

$$A(x_5) = \begin{pmatrix} 0; x \le 2.1825 \\ x - 2.1825/0.6275; \text{ if } 2.1825 \le x \le 2.81 \\ 3.4375 - x/0.6275; \text{if } 2.81 \le x \le 3.4375 \\ 0; x \ge 3.4375 \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

$$A(x_9) = \begin{pmatrix} 0; \text{ otherwise} \\ 5.32 - x/0.6275; \quad \text{if } 4.6925 \le x \le 5.32 \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

$$T(x)=\begin{pmatrix} x; 16.43 \le x \le 37.36 \\ 0; \text{ otherwise} \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

$$T(x_1)=\begin{pmatrix} 0; \text{ otherwise} \\ 18.93-x/2.63; \text{ if } 16,3 \le x \le 18.93 \end{pmatrix} \quad (7.10)$$

$$T(x_5)=\begin{pmatrix} 0; x \le 24.19 \\ x-24.19/2.63; \text{ if } 24.19 \le x \le 26.83 \\ 29.46-x/2.63; \text{ if } 26.83 \le x \le 29.46 \\ 0; x \ge 29.46 \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

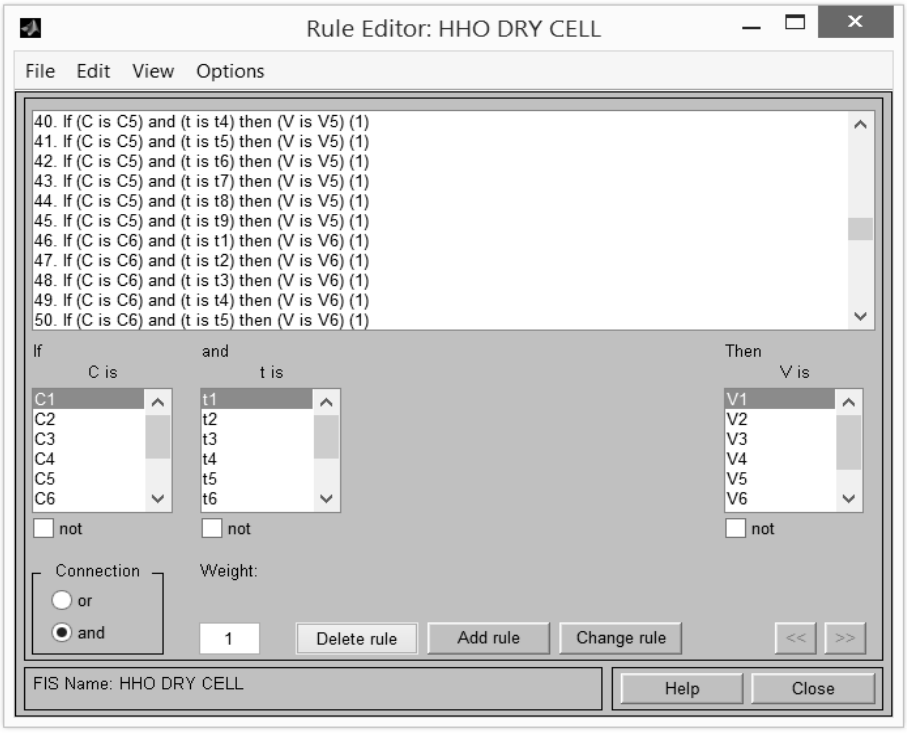
$$T(x_9)=\begin{pmatrix} 0; \text{ otherwise} \\ 37.36-x/2.63; \text{ if } 34.73 \le x \le 37.36 \end{pmatrix} \quad (7.12)$$

7.6.3. Kural tabanı oluşturulması

Üyelik fonksiyonu editöründe kümeler ve ağırlıkları belirlendikten sonra bu sistemin çalışmasında esnasındaki giriş-çıkış fonksiyonları arasındaki kurallarını tespit etmek gerekir. Kurallar, giriş değerlerinin bağlı olarak çıkış değerlerinin sonucunu belirtir.

Bulanık mantık sisteminin performansını etkileyen en önemli faktör; sistemin kuralları ve bunların doğruluğudur. Kurallar belirlenirken deneysel çalışmada elde edilmiş her değer iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Bunun için dilsel değişkenler ile bulanık küme oluşturulmasındaki her yanlış adım, doğrudan yanlış kural yazımına sebep olur. Sisteme öğretilen her yanlış kural da BM modelinin doğruluk hassasiyetinin bozulmasına neden olur.

Bu çalışmada, 2 giriş ve 3 çıkışlı bir sistem için, her çıkış için 81 kural ve toplamda 243 kural oluşturulmuştur. Şekil 7.19'da gerilim değerinin analizi için yazılmış kurallardan 40. ile 50. kural arasına ait Matlab görüntüsü gösterilmektedir. Kurallar "eğer..ise" durumuna göre yazılmıştır. Örnek vermek gerekirse, 40. kural, C değerinin C5 dilsel değişkenine, t değerinin t4 dilsel değişkenine karşılık geldiği zaman, çıkış parametresi olan V değerinin V5 dilsel değişkenine karşılık gelmesi gerektiğini belirtiyor. V, A ve T için oluşturulan BM kuralları sırasıyla tablo 7.3-7.5'de verilmiştir.



Şekil 7.19. Gerilim değeri için belirlenmiş kural sayfasının Matlab görüntüsü

Tablo 7.3. Bulanık modelleme ile gerilim değeri için belirlenen kurallar

Rule no.		C		t		V	Rule no.	If	C	and	t	then	V
1	If	C is C_1	and	t is t_1	then	V is V_1	42	If	C is C_5	and	t is t_6	then	V is V_5
2	If	C is C_1	and	t is t_2	then	V is V_1	43	If	C is C_5	and	t is t_7	then	V is V_5
3	If	C is C_1	and	t is t_3	then	V is V_1	44	If	C is C_5	and	t is t_8	then	V is V_5
4	If	C is C_1	and	t is t_4	then	V is V_1	45	If	C is C_5	and	t is t_9	then	V is V_5
5	If	C is C_1	and	t is t_5	then	V is V_1	46	If	C is C_6	and	t is t_1	then	V is V_6
6	If	C is C_1	and	t is t_6	then	V is V_1	47	If	C is C_6	and	t is t_2	then	V is V_6
7	If	C is C_1	and	t is t_7	then	V is V_1	48	If	C is C_6	and	t is t_3	then	V is V_6
8	If	C is C_1	and	t is t_8	then	V is V_1	49	If	C is C_6	and	t is t_4	then	V is V_6
9	If	C is C_1	and	t is t_9	then	V is V_1	50	If	C is C_6	and	t is t_5	then	V is V_6
10	If	C is C_2	and	t is t_1	then	V is V_2	51	If	C is C_6	and	t is t_6	then	V is V_6
11	If	C is C_2	and	t is t_2	then	V is V_2	52	If	C is C_6	and	t is t_7	then	V is V_6
12	If	C is C_2	and	t is t_3	then	V is V_2	53	If	C is C_6	and	t is t_8	then	V is V_6
13	If	C is C_2	and	t is t_4	then	V is V_2	54	If	C is C_6	and	t is t_9	then	V is V_6
14	If	C is C_2	and	t is t_5	then	V is V_2	55	If	C is C_7	and	t is t_1	then	V is V_7
15	If	C is C_2	and	t is t_6	then	V is V_2	56	If	C is C_7	and	t is t_2	then	V is V_7
16	If	C is C_2	and	t is t_7	then	V is V_2	57	If	C is C_7	and	t is t_3	then	V is V_7
17	If	C is C_2	and	t is t_8	then	V is V_2	58	If	C is C_7	and	t is t_4	then	V is V_7
18	If	C is C_2	and	t is t_9	then	V is V_2	59	If	C is C_7	and	t is t_5	then	V is V_7
19	If	C is C_3	and	t is t_1	then	V is V_3	60	If	C is C_7	and	t is t_6	then	V is V_7
20	If	C is C_3	and	t is t_2	then	V is V_3	61	If	C is C_7	and	t is t_7	then	V is V_7
21	If	C is C_3	and	t is t_3	then	V is V_3	62	If	C is C_7	and	t is t_8	then	V is V_7
22	If	C is C_3	and	t is t_4	then	V is V_3	63	If	C is C_7	and	t is t_9	then	V is V_7
23	If	C is C_3	and	t is t_5	then	V is V_3	64	If	C is C_8	and	t is t_1	then	V is V_7
24	If	C is C_3	and	t is t_6	then	V is V_3	65	If	C is C_8	and	t is t_2	then	V is V_7
25	If	C is C_3	and	t is t_7	then	V is V_3	66	If	C is C_8	and	t is t_3	then	V is V_7
26	If	C is C_3	and	t is t_8	then	V is V_3	67	If	C is C_8	and	t is t_4	then	V is V_7
27	If	C is C_3	and	t is t_9	then	V is V_3	68	If	C is C_8	and	t is t_5	then	V is V_7
28	If	C is C_4	and	t is t_1	then	V is V_5	69	If	C is C_8	and	t is t_6	then	V is V_7
29	If	C is C_4	and	t is t_2	then	V is V_4	70	If	C is C_8	and	t is t_7	then	V is V_7
30	If	C is C_4	and	t is t_3	then	V is V_4	71	If	C is C_8	and	t is t_8	then	V is V_7
31	If	C is C_4	and	t is t_4	then	V is V_4	72	If	C is C_8	and	t is t_9	then	V is V_7
32	If	C is C_4	and	t is t_5	then	V is V_4	73	If	C is C_9	and	t is t_1	then	V is V_7
33	If	C is C_4	and	t is t_6	then	V is V_4	74	If	C is C_9	and	t is t_2	then	V is V_7
34	If	C is C_4	and	t is t_7	then	V is V_4	75	If	C is C_9	and	t is t_3	then	V is V_7
35	If	C is C_4	and	t is t_8	then	V is V_4	76	If	C is C_9	and	t is t_4	then	V is V_7
36	If	C is C_4	and	t is t_9	then	V is V_4	77	If	C is C_9	and	t is t_5	then	V is V_7
37	If	C is C_5	and	t is t_1	then	V is V_6	78	If	C is C_9	and	t is t_6	then	V is V_7
38	If	C is C_5	and	t is t_2	then	V is V_5	79	If	C is C_9	and	t is t_7	then	V is V_7
39	If	C is C_5	and	t is t_3	then	V is V_5	80	If	C is C_9	and	t is t_8	then	V is V_7
40	If	C is C_5	and	t is t_4	then	V is V_5	81	If	C is C_9	and	t is t_9	then	V is V_7
41	If	C is C_5	and	t is t_5	then	V is V_5							

Tablo 7.4. Bulanık modelleme ile akım değeri için belirlenen kurallar

Rule number	C	t	A	Rule number	C	t	A
1	If C is C_1 and	t is t_1 then	A is A_9	42	If C is C_5 and	t is t_6 then	A is A_9
2	If C is C_1 and	t is t_2 then	A is A_9	43	If C is C_5 and	t is t_7 then	A is A_9
3	If C is C_1 and	t is t_3 then	A is A_9	44	If C is C_5 and	t is t_8 then	A is A_9
4	If C is C_1 and	t is t_4 then	A is A_9	45	If C is C_5 and	t is t_9 then	A is A_9
5	If C is C_1 and	t is t_5 then	A is A_9	46	If C is C_6 and	t is t_1 then	A is A_3
6	If C is C_1 and	t is t_6 then	A is A_9	47	If C is C_6 and	t is t_2 then	A is A_3
7	If C is C_1 and	t is t_7 then	A is A_9	48	If C is C_6 and	t is t_3 then	A is A_4
8	If C is C_1 and	t is t_8 then	A is A_9	49	If C is C_6 and	t is t_4 then	A is A_4
9	If C is C_1 and	t is t_9 then	A is A_9	50	If C is C_6 and	t is t_5 then	A is A_4
10	If C is C_2 and	t is t_1 then	A is A_9	51	If C is C_6 and	t is t_6 then	A is A_5
11	If C is C_2 and	t is t_2 then	A is A_9	52	If C is C_6 and	t is t_7 then	A is A_5
12	If C is C_2 and	t is t_3 then	A is A_9	53	If C is C_6 and	t is t_8 then	A is A_5
13	If C is C_2 and	t is t_4 then	A is A_9	54	If C is C_6 and	t is t_9 then	A is A_5
14	If C is C_2 and	t is t_5 then	A is A_9	55	If C is C_7 and	t is t_1 then	A is A_1
15	If C is C_2 and	t is t_6 then	A is A_9	56	If C is C_7 and	t is t_2 then	A is A_1
16	If C is C_2 and	t is t_7 then	A is A_9	57	If C is C_7 and	t is t_3 then	A is A_1
17	If C is C_2 and	t is t_8 then	A is A_9	58	If C is C_7 and	t is t_4 then	A is A_2
18	If C is C_2 and	t is t_9 then	A is A_9	59	If C is C_7 and	t is t_5 then	A is A_2
19	If C is C_3 and	t is t_1 then	A is A_9	60	If C is C_7 and	t is t_6 then	A is A_2
20	If C is C_3 and	t is t_2 then	A is A_9	61	If C is C_7 and	t is t_7 then	A is A_2
21	If C is C_3 and	t is t_3 then	A is A_9	62	If C is C_7 and	t is t_8 then	A is A_2
22	If C is C_3 and	t is t_4 then	A is A_9	63	If C is C_7 and	t is t_9 then	A is A_2
23	If C is C_3 and	t is t_5 then	A is A_9	64	If C is C_8 and	t is t_1 then	A is A_1
24	If C is C_3 and	t is t_6 then	A is A_9	65	If C is C_8 and	t is t_2 then	A is A_1
25	If C is C_3 and	t is t_7 then	A is A_9	66	If C is C_8 and	t is t_3 then	A is A_1
26	If C is C_3 and	t is t_8 then	A is A_9	67	If C is C_8 and	t is t_4 then	A is A_1
27	If C is C_3 and	t is t_9 then	A is A_9	68	If C is C_8 and	t is t_5 then	A is A_1
28	If C is C_4 and	t is t_1 then	A is A_8	69	If C is C_8 and	t is t_6 then	A is A_1
29	If C is C_4 and	t is t_2 then	A is A_9	70	If C is C_8 and	t is t_7 then	A is A_1
30	If C is C_4 and	t is t_3 then	A is A_9	71	If C is C_8 and	t is t_8 then	A is A_2
31	If C is C_4 and	t is t_4 then	A is A_9	72	If C is C_8 and	t is t_9 then	A is A_2
32	If C is C_4 and	t is t_5 then	A is A_9	73	If C is C_9 and	t is t_1 then	A is A_1
33	If C is C_4 and	t is t_6 then	A is A_9	74	If C is C_9 and	t is t_2 then	A is A_1
34	If C is C_4 and	t is t_7 then	A is A_9	75	If C is C_9 and	t is t_3 then	A is A_1
35	If C is C_4 and	t is t_8 then	A is A_9	76	If C is C_9 and	t is t_4 then	A is A_1
36	If C is C_4 and	t is t_9 then	A is A_9	77	If C is C_9 and	t is t_5 then	A is A_1
37	If C is C_5 and	t is t_1 then	A is A_4	78	If C is C_9 and	t is t_6 then	A is A_1
38	If C is C_5 and	t is t_2 then	A is A_5	79	If C is C_9 and	t is t_7 then	A is A_1
39	If C is C_5 and	t is t_3 then	A is A_7	80	If C is C_9 and	t is t_8 then	A is A_1
40	If C is C_5 and	t is t_4 then	A is A_8	81	If C is C_9 and	t is t_9 then	A is A_1
41	If C is C_5 and	t is t_5 then	A is A_9				

Tablo 7.5. Bulanık modelleme ile sıcaklık değeri için belirlenen kurallar

Rule number		C		t		T	Rule number		C		t		T
1	If	C is C_1	and	t is t_1	then	T is T_2	42	If	C is C_5	and	t is t_6	then	T is T_7
2	If	C is C_1	and	t is t_2	then	T is T_3	43	If	C is C_5	and	t is t_7	then	T is T_8
3	If	C is C_1	and	t is t_3	then	T is T_3	44	If	C is C_5	and	t is t_8	then	T is T_9
4	If	C is C_1	and	t is t_4	then	T is T_3	45	If	C is C_5	and	t is t_9	then	T is T_9
5	If	C is C_1	and	t is t_5	then	T is T_3	46	If	C is C_6	and	t is t_1	then	T is T_2
6	If	C is C_1	and	t is t_6	then	T is T_3	47	If	C is C_6	and	t is t_2	then	T is T_3
7	If	C is C_1	and	t is t_7	then	T is T_3	48	If	C is C_6	and	t is t_3	then	T is T_3
8	If	C is C_1	and	t is t_8	then	T is T_3	49	If	C is C_6	and	t is t_4	then	T is T_4
9	If	C is C_1	and	t is t_9	then	T is T_4	50	If	C is C_6	and	t is t_5	then	T is T_5
10	If	C is C_2	and	t is t_1	then	T is T_2	51	If	C is C_6	and	t is t_6	then	T is T_5
11	If	C is C_2	and	t is t_2	then	T is T_3	52	If	C is C_6	and	t is t_7	then	T is T_7
12	If	C is C_2	and	t is t_3	then	T is T_3	53	If	C is C_6	and	t is t_8	then	T is T_8
13	If	C is C_2	and	t is t_4	then	T is T_4	54	If	C is C_6	and	t is t_9	then	T is T_9
14	If	C is C_2	and	t is t_5	then	T is T_4	55	If	C is C_7	and	t is t_1	then	T is T_1
15	If	C is C_2	and	t is t_6	then	T is T_4	56	If	C is C_7	and	t is t_2	then	T is T_2
16	If	C is C_2	and	t is t_7	then	T is T_5	57	If	C is C_7	and	t is t_3	then	T is T_2
17	If	C is C_2	and	t is t_8	then	T is T_5	58	If	C is C_7	and	t is t_4	then	T is T_3
18	If	C is C_2	and	t is t_9	then	T is T_6	59	If	C is C_7	and	t is t_5	then	T is T_3
19	If	C is C_3	and	t is t_1	then	T is T_3	60	If	C is C_7	and	t is t_6	then	T is T_3
20	If	C is C_3	and	t is t_2	then	T is T_4	61	If	C is C_7	and	t is t_7	then	T is T_4
21	If	C is C_3	and	t is t_3	then	T is T_4	62	If	C is C_7	and	t is t_8	then	T is T_4
22	If	C is C_3	and	t is t_4	then	T is T_4	63	If	C is C_7	and	t is t_9	then	T is T_5
23	If	C is C_3	and	t is t_5	then	T is T_5	64	If	C is C_8	and	t is t_1	then	T is T_1
24	If	C is C_3	and	t is t_6	then	T is T_5	65	If	C is C_8	and	t is t_2	then	T is T_1
25	If	C is C_3	and	t is t_7	then	T is T_6	66	If	C is C_8	and	t is t_3	then	T is T_1
26	If	C is C_3	and	t is t_8	then	T is T_6	67	If	C is C_8	and	t is t_4	then	T is T_1
27	If	C is C_3	and	t is t_9	then	T is T_7	68	If	C is C_8	and	t is t_5	then	T is T_1
28	If	C is C_4	and	t is t_1	then	T is T_3	69	If	C is C_8	and	t is t_6	then	T is T_2
29	If	C is C_4	and	t is t_2	then	T is T_3	70	If	C is C_8	and	t is t_7	then	T is T_2
30	If	C is C_4	and	t is t_3	then	T is T_4	71	If	C is C_8	and	t is t_8	then	T is T_2
31	If	C is C_4	and	t is t_4	then	T is T_5	72	If	C is C_8	and	t is t_9	then	T is T_2
32	If	C is C_4	and	t is t_5	then	T is T_5	73	If	C is C_9	and	t is t_1	then	T is T_1
33	If	C is C_4	and	t is t_6	then	T is T_6	74	If	C is C_9	and	t is t_2	then	T is T_2
34	If	C is C_4	and	t is t_7	then	T is T_7	75	If	C is C_9	and	t is t_3	then	T is T_2
35	If	C is C_4	and	t is t_8	then	T is T_8	76	If	C is C_9	and	t is t_4	then	T is T_3
36	If	C is C_4	and	t is t_9	then	T is T_9	77	If	C is C_9	and	t is t_5	then	T is T_3
37	If	C is C_5	and	t is t_1	then	T is T_3	78	If	C is C_9	and	t is t_6	then	T is T_3
38	If	C is C_5	and	t is t_2	then	T is T_3	79	If	C is C_9	and	t is t_7	then	T is T_3
39	If	C is C_5	and	t is t_3	then	T is T_4	80	If	C is C_9	and	t is t_8	then	T is T_3
40	If	C is C_5	and	t is t_4	then	T is T_5	81	If	C is C_9	and	t is t_9	then	T is T_3
41	If	C is C_5	and	t is t_5	then	T is T_6							

7.7. PEM Yakıt Hücresi Performansının BM Yöntemi İle Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında, PEM yakıt hücresinin performansını belirlemek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Performans parametreleri; zaman, gerilim yoğunluğu, akım yoğunluğu, sıcaklık ve güç yoğunluğudur. Çalışma; giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılmasını, 9 sözel değişken ile bulanık kümenin oluşturulmasını, kural tabanı oluşumunu ve oluşturulan kurallar ile kural tabanlı Mamdani tipi bulanık model tekniğine dayalı hesaplama ile elde edilen çıkış değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasını içermektedir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile BM modelinden elde edilen sonuçlar çoklu determinasyon katsayı yöntemi kullanılarak karşılaştırılması yapılmış, ayrıca çalışmada deneysel çalışmada gerçekleştirilmemiş deneyler, bulanık mantık modeli sayesinde tahmin ettirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, bir bulanık mantık modeli üreterek PEM yakıt hücresi performansını değerlendirmenin mümkün olduğunu sunmaktır.

Aşağıda belirtilen farklı şekillerdeki PEM yakıt hücresi kaplamalarında performans analizi için deneysel verilerden yararlanılarak her biri için ayrı ayrı bulanık mantık modeli oluşturulmuştur.

a) Anot tarafı KNT ile kaplanmış PEM yakıt hücresinin şarj sırasındaki performansının BM yöntemi ile modellenmesi

b) Anot tarafı KNT ile kaplanmış PEM yakıt hücresinin deşarj sırasındaki performansının BM yöntemi ile modellenmesi

c) Anot tarafı YSZ ile kaplanmış PEM yakıt hücresinin şarj sırasındaki performansının BM yöntemi ile modellenmesi

Tüm modelleme çalışmalarında, yakıt hücresinin 20 ^{o}C'de kaplama öncesi ve kaplama sonrası için tespit edilen deneysel veriler analiz edilmiştir. Kaplama sonrası durumun, kaplama öncesi duruma göre nasıl değiştiği grafiklerle açıklanmıştır. İki durumda da deneysel veriler ile BM modelinin uyumu şekillerle gösterilmiştir. Ayrıca 20 ^{o}C, 40 ^{o}C, 60 ^{o}C, 80 ^{o}C sıcaklıklarında tespit edilen deneysel veriler incelenmiş ve bu sıcaklık değerlerine ait BM modeli oluşturulmuştur. BM modeli; Windows 8 MATLAB bulanık mantık araç kutusu kullanılarak tasarlanmıştır. Bu modelde, giriş parametreleri, zaman (t), gerilim yoğunluğu (Volt/cm^2), akım yoğunluğu (Amper/cm^2), sıcaklık (T), çıkış parametresi ise güç yoğunluğu (Watt/cm^2) olarak tasarlanmıştır. Giriş ve çıkış parametrelerinin sayısal değerleri 9 dilsel değişken olmak üzere sözel değerler ile bulanıklaştırılmıştır. Sistemin girişi ile çıkışı arasındaki ilişkiyi tanımlayan ve bulanık

mantık denetleyicinin davranışlarını tespit eden denetim kuralları oluşturulmuştur. Her bir modelleme çalışması için 81 adet kural oluşturulmuştur. Bu kuralların bir sonucu olarak, deneysel çalışmadan elde edilen her bir değer aynı zamanda bulanık mantık yöntemi ile de belirlenmiştir.

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

8.1. Yakıt Hücresinin Kaplama Sonrası Analiz Sonuçları

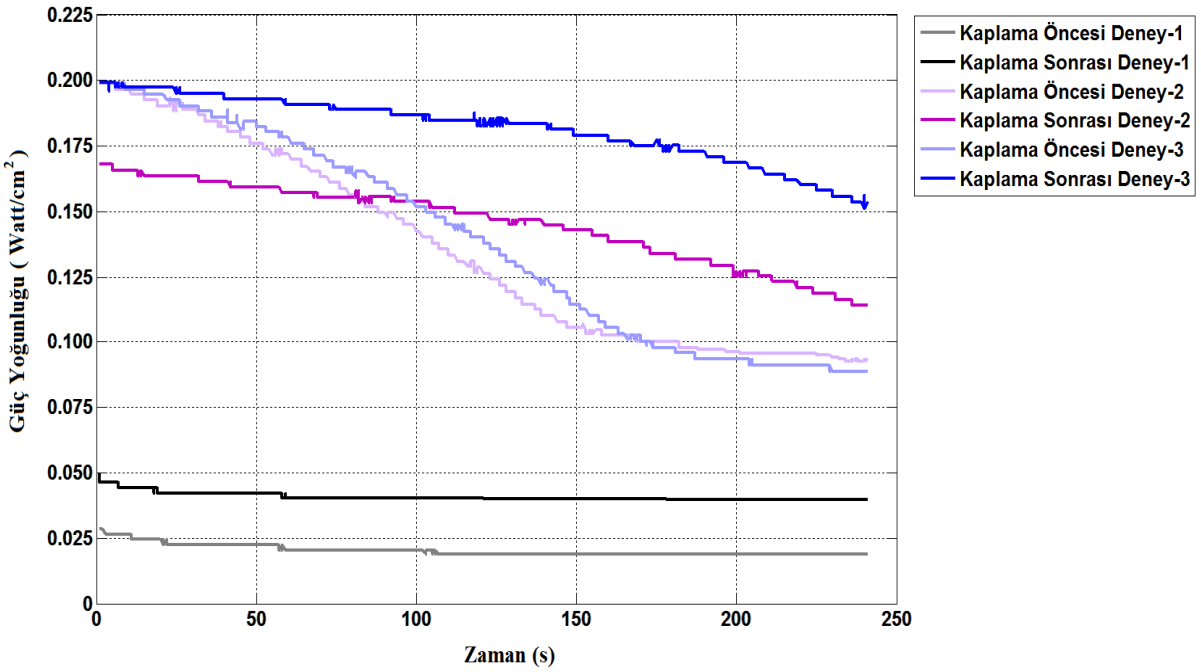
Kaplama sonrası membran performansının belirlenmesi için kaplama öncesi yapılan deneyler tekrarlanarak KNT'nin membran performansındaki etkisi belirlenmiştir.

Deneylerde çalışılan gerilim değerleri;

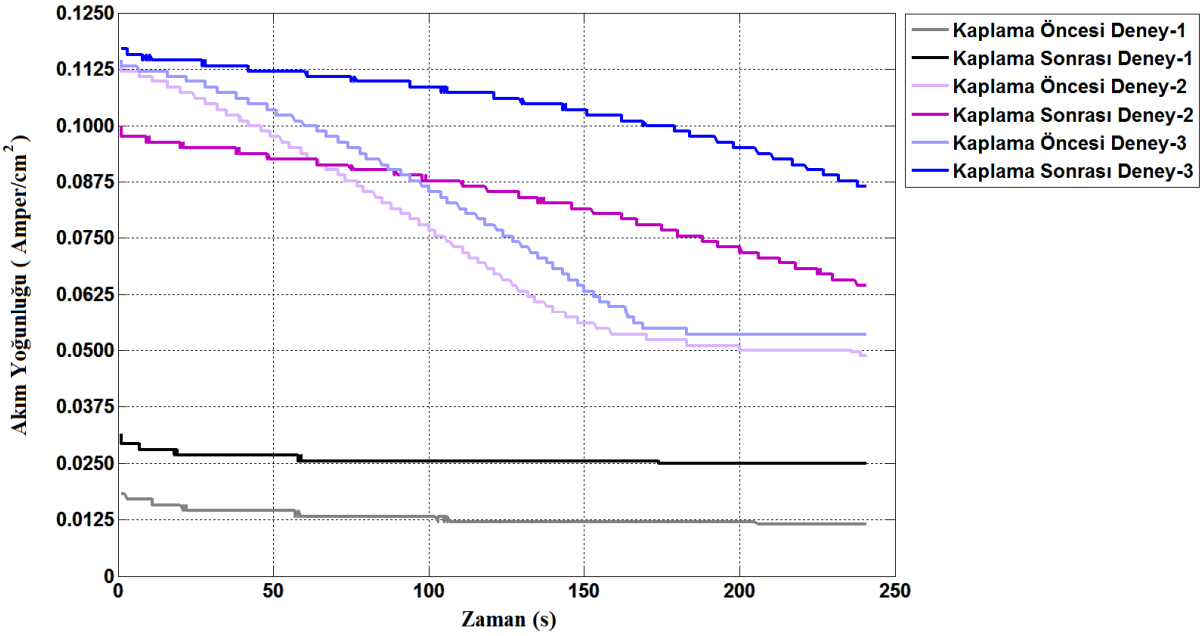
- 1.deney, 0.9 V-1.5 V
- 2.deney, 1.7 V-1.9 V
- 3.deney, 1.7 V-1.9 V

1.deneyin amacı, düşük voltajdaki zaman-güç değişimini görmek olup, 2. ve 3. deneyin amacı ise aynı voltaj değerlerinde sıcaklık değişimine bağlı olarak güç değişiminin gözlenmesidir.

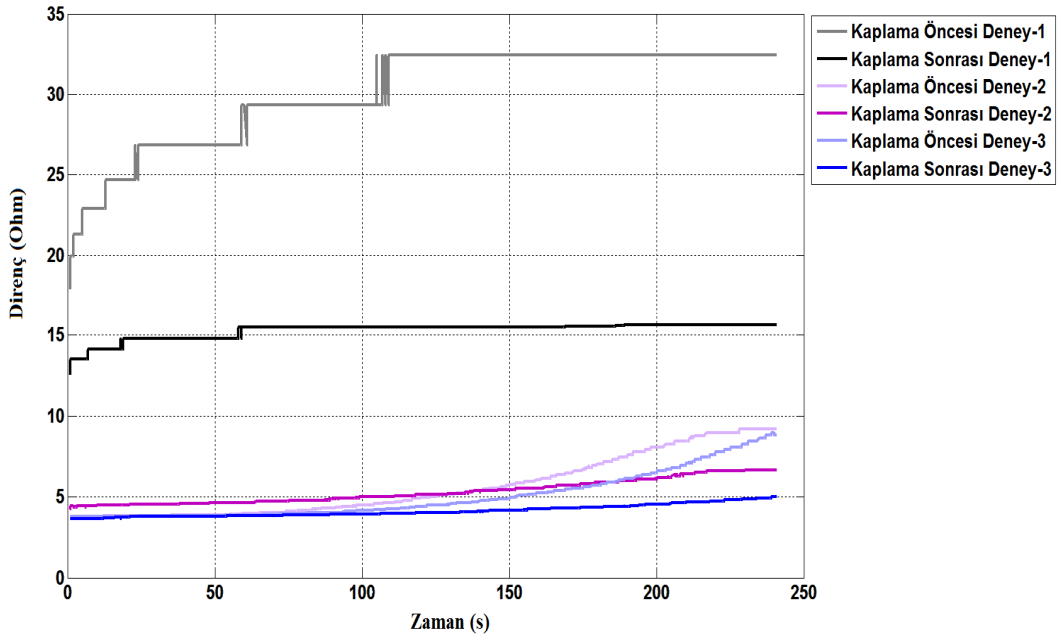
Şekil 8.1-8.3, kaplama öncesi ve kaplama sonrası yapılan toplam altı deney için, zaman ile sırasıyla, güç yoğunluğu, akım yoğunluğu ve direnç ilişkisini göstermektedir.



Şekil 8.1. Kaplama öncesi ve kaplama sonrası için zaman-güç yoğunluğu değişimi



Şekil 8.2. Kaplama öncesi ve kaplama sonrası için zaman-akım yoğunluğu değişimi

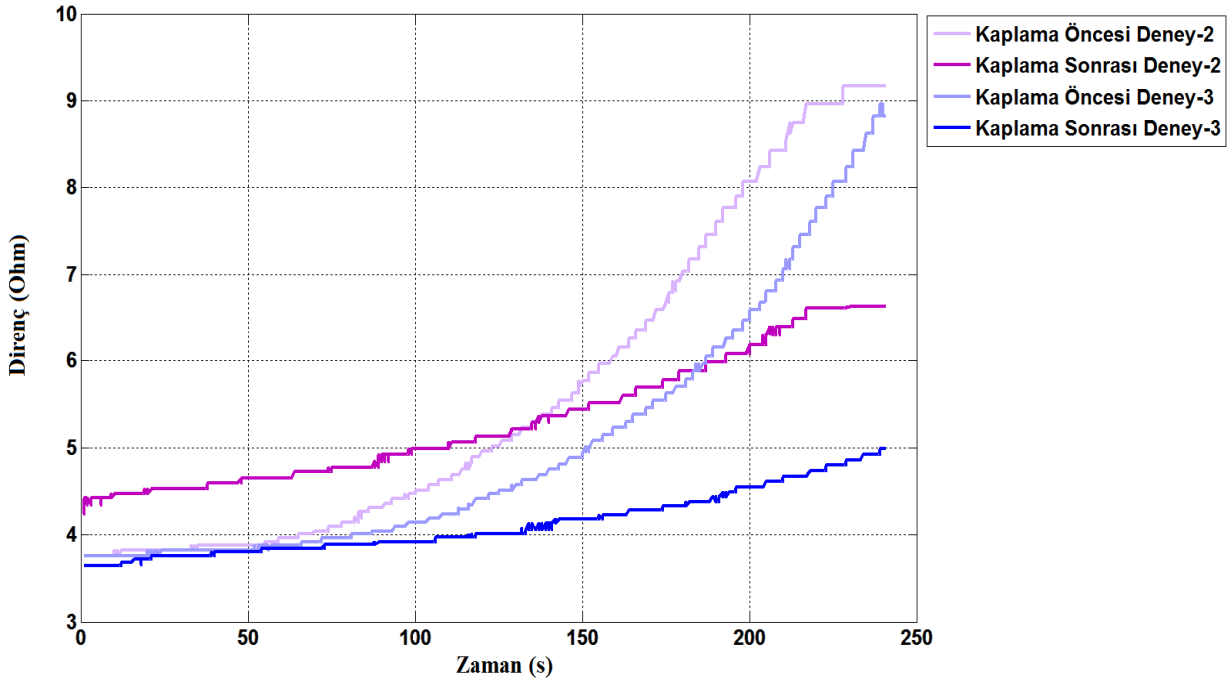


Şekil 8.3. Kaplama öncesi ve kaplama sonrası için zaman-direnç değişimi

Deneysel çalışmada membranın direnci, güç ve akım ile ilgili olduğundan iki bakımdan incelenmiştir. İlk olarak membranın KNT ile kaplanmasının direnç üzerindeki etkisi, ikinci olarak da sıcaklığa bağlı olarak direncin değişimi incelenmiştir. Güç ve akım dirençteki değişme ile ters orantılı olarak değişir.

Bu kapsamda, aşağıdaki sonuçlara ulaşmak mümkündür.

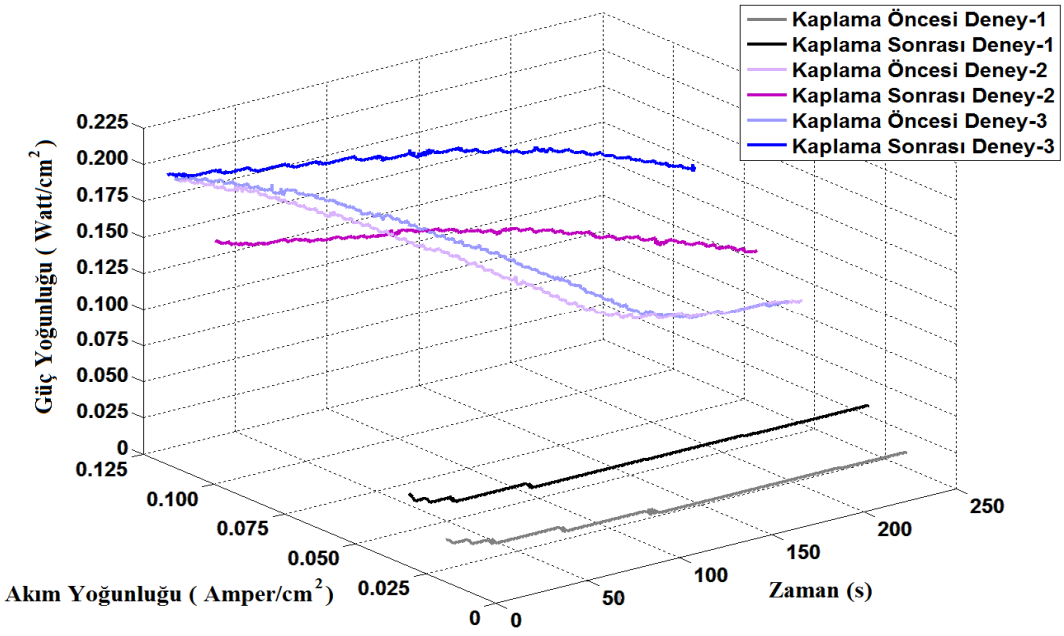
- Altı deneyde de zamanla gücün azalmasının nedeni, elektroliz sırasında açığa çıkan sıcaklığın direnci arttırmasıdır.
- Birinci deneydeki güç azalması, ikinci veya üçüncü deneye göre daha az gerçekleşmiştir. Bunun sebebi ise suyun elektroliz edilmesi için minimum 1.27 voltluk gerilime ihtiyaç vardır. Bunun üzerinde uygulanan gerilim sisteme ısı enerjisi olarak aktarılır, bu yüzden düşük voltajda yapılan deneyde sistemin ısınması daha yavaş gerçekleşmiş ve birim zamandaki güç azalması çok daha yavaş olmuştur.
- Kaplama sonrası PEM yakıt hücresi, daha yüksek performansta çalışmıştır. Bunun nedeni, yüzeyin KNT ile kaplanması direnci düşürerek iletkenliği arttırmış olmasıdır.
- İkinci ve üçüncü deney aynı gerilim değerlerinde yapılmasına rağmen, üçüncü deneyde, sistemin soğumaya bırakılmasıyla direnç değeri düşmüş, buna bağlı olarak da güç artmıştır. Direncin ikinci ve üçüncü deney üzerindeki etkisi sadece bu deneyler ele alınarak Şekil 8.4'de ayrıca gösterilmiştir.



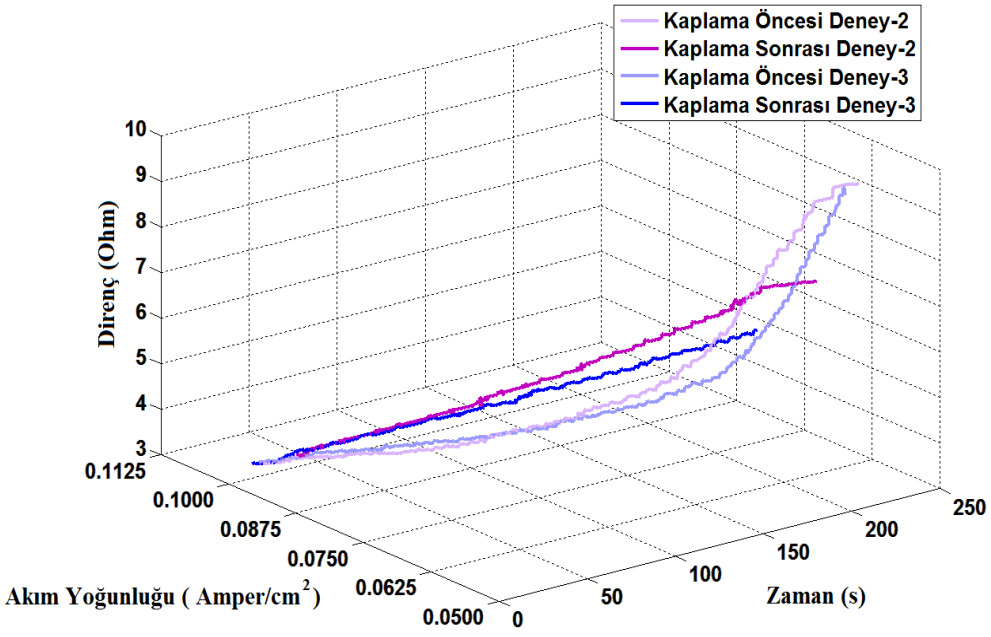
Şekil 8.4. İkinci ve üçüncü deneyde kaplama öncesi ve kaplama sonrası için zaman-direnç değişimi

3.deneyde direnç değerinin başlangıcı, 2.deney sonunda elde edilen değerde kalmamış, sistemin soğumasına bağlı olarak 2.deneyin başlangıcından daha düşük bir değerden başlamıştır.

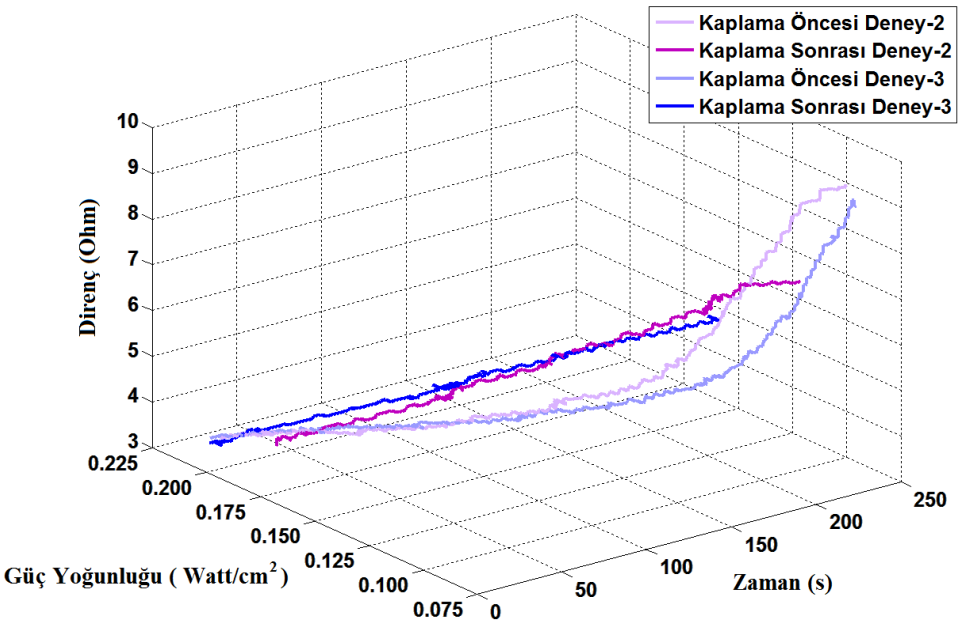
Şekil 8.5-8.7, kaplama öncesi ve kaplama sonrası yapılan deneyler için, güç yoğunluğu, akım yoğunluğu, direnç ve zamanın birbirleri arasındaki ilişkisini göstermektedir. İkinci ve üçüncü deney, sıcaklığın direnç üzerindeki etkisini belirlemek için yapıldığından, direnç değişim grafiklerinde bu iki deney değerlendirilmiştir.



Şekil 8.5. Güç yoğunluğu değerlerinin akım yoğunluğu ve zamanla değişiminin kaplama öncesi ve kaplama sonrası tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması



Şekil 8.6. Direnç değerlerinin akım yoğunluğu ve zamanla değişiminin kaplama öncesi ve kaplama sonrası tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması



Şekil 8.7. Direnç değerlerinin güç yoğunluğu ve zamanla değişiminin kaplama öncesi ve kaplama sonrası tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Bu grafiklerden,

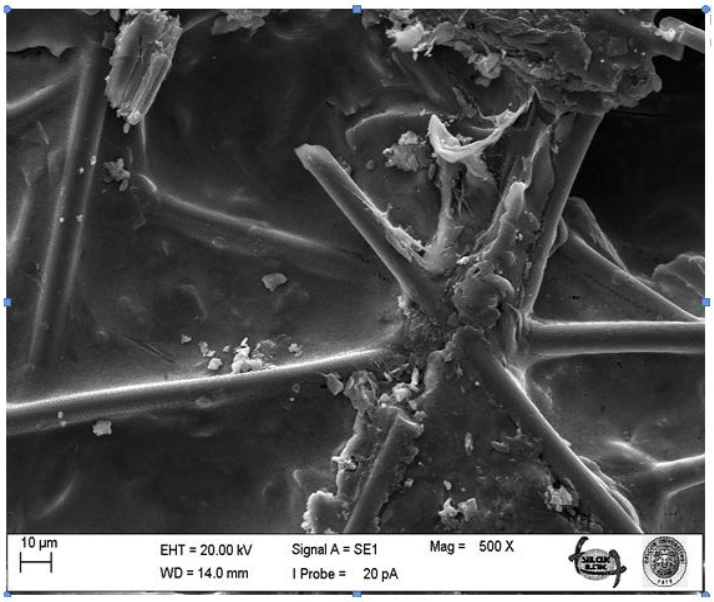
- Kaplama öncesi ve sonrasında devreden geçen akım arttıkça gücün arttığı,
- KNT ile kaplama sonrası direncin düşmesiyle akım ve gücün kaplama öncesine göre birlikte arttığı,
- Sistem soğumasının performans üzerindeki etkisinin araştırıldığı 2. ve 3. deneyde, sistemin soğumasıyla beraber direncin azaldığı, buna bağlı olarak devreden geçen akımın arttığı görülmektedir.

8.2. SEM Analizleri

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme olanağı sınırlıdır. Bu nedenle görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilerek, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu cihazlar, gerek büyütme miktarlarının sınırlı oluşu gerekse elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkânının olmayışı nedeniyle araştırmacıları bu temel üzerinde yeni sistemler geliştirmeye itmiştir. Elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütmelerde üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir.

Elektrooptik prensipler çerçevesinde tasarlanmış taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM), bu amaca hizmet eden cihazlardan birisidir. SEM'de görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

Kaplama öncesine ait SEM görüntüsü Şekil 8.8'de verilmiştir.

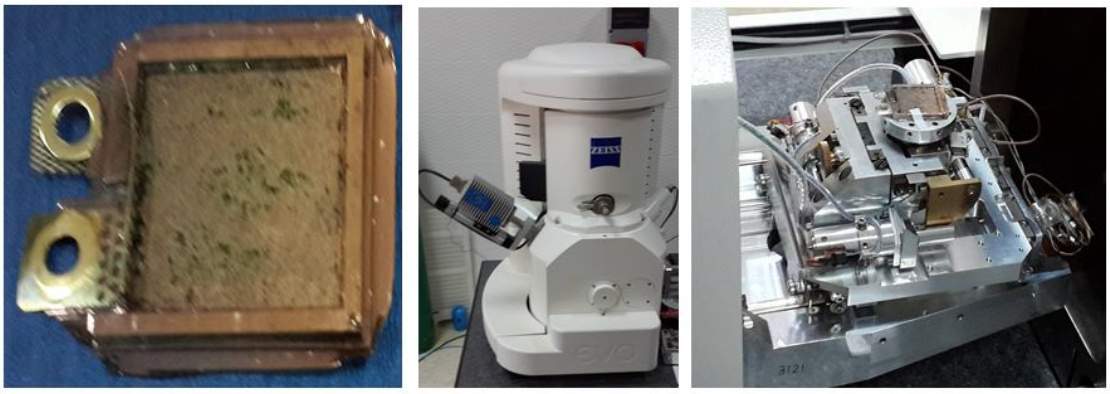


Şekil 8.8. Kaplama öncesi SEM görüntüsü

Membranın anot tarafı KNT ile kaplandıktan sonra kaplama sonrasına dair daha iyi bir SEM görüntüsü için, membrana altın kaplama yapılmıştır. Şekil 8.9'da membranın altın kaplama yapılması için gerekli olan cihaz gösterilmektedir. Şekil 8.10'da sırasıyla altın kaplama sonrası membran, SEM cihazı ve altın membranın SEM cihazına yerleştirilmesi gösterilmiştir.

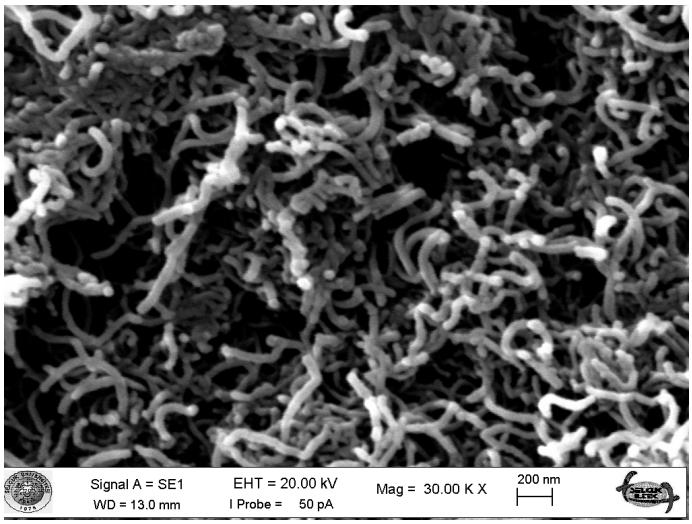


Şekil 8.9. Membrana altın kaplama yapılması için gerekli cihaz

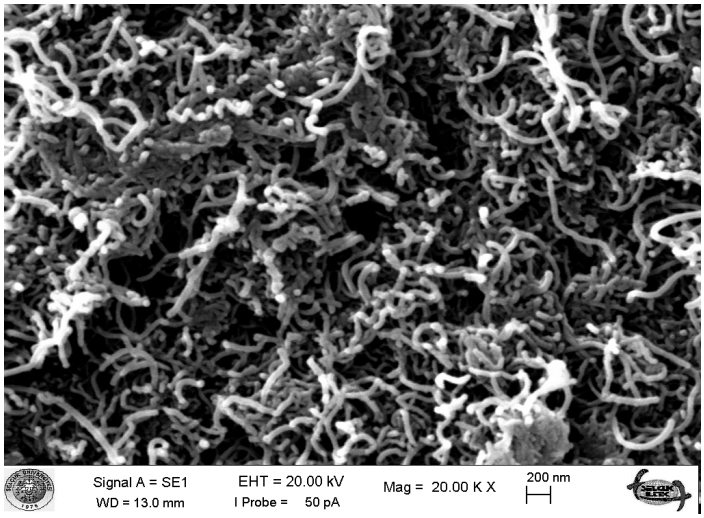


Şekil 8.10. Altın kaplama sonrası membran ve SEM cihazına tespiti

Altın ile kaplanan membranın SEM cihazına tespitinden sonra 1 ve 10 μm'deki görüntüleri Şekil 8.11-8.13'de verilmiştir.



Şekil 8.11. KNT ile kaplama sonrası görüntüsü

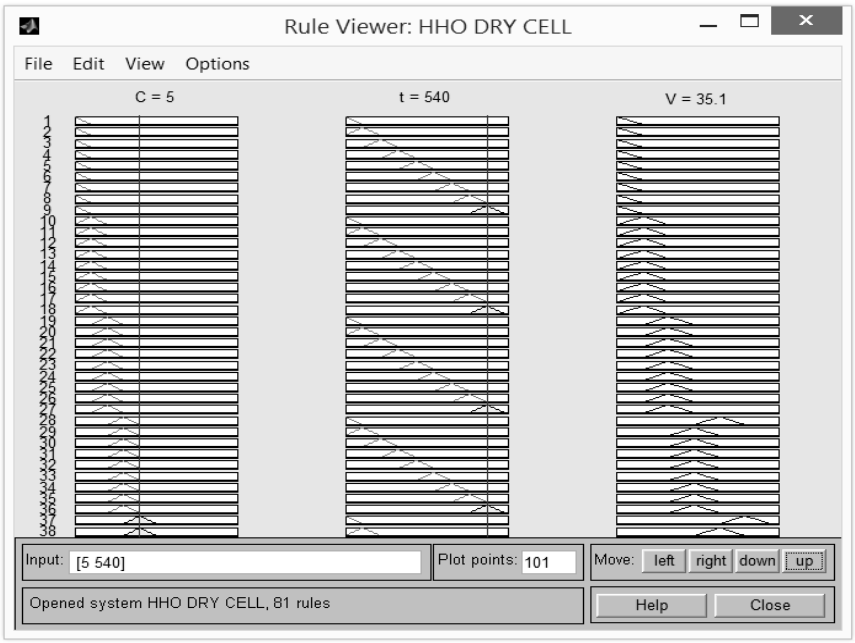


Şekil 8.12. KNT ile kaplama sonrası görüntüsü

8.2. Bulanık Mantık Modeli Analiz Sonuçları

8.2.1. HHO hücre performansının BM modeli analiz sonuçları

İlk aşamada, sistem için belirlenen bulanık küme, üyelik fonksiyonları ve oluşturulan kurallar ile deneysel çalışmanın bilgisayara öğretilme işlemi tamamlanmıştı. Deneysel çalışmalarda elde edilen değerlere, oluşturulan bulanık mantık modeli ile de ulaşabileceğimizi görmek için kural izleyicisi menüsü kullanılır. Şekil 8.13'de giriş değerlerinin yazıldıktan sonra çıkış değerinin sonucunu gösteren kural izleyici sayfasına ait Matlab görüntüsü gösterilmiştir. Şeklin en altında sistemin kaç kuralla bu sonuca karar verdiğini belirten kural sayısı yazılmıştır. Gerilim çıkış değerine ait sonucun gösterildiği şekilde, C değeri 5 ve t değeri 540 iken V değerinin 35.1 olması gerektiğini, belirlenen 81 kural sonucunda karar verdiğini belirtiyor.



Şekil 8.13. Gerilim değeri için kural izleyici sayfasına ait Matlab görüntüsü

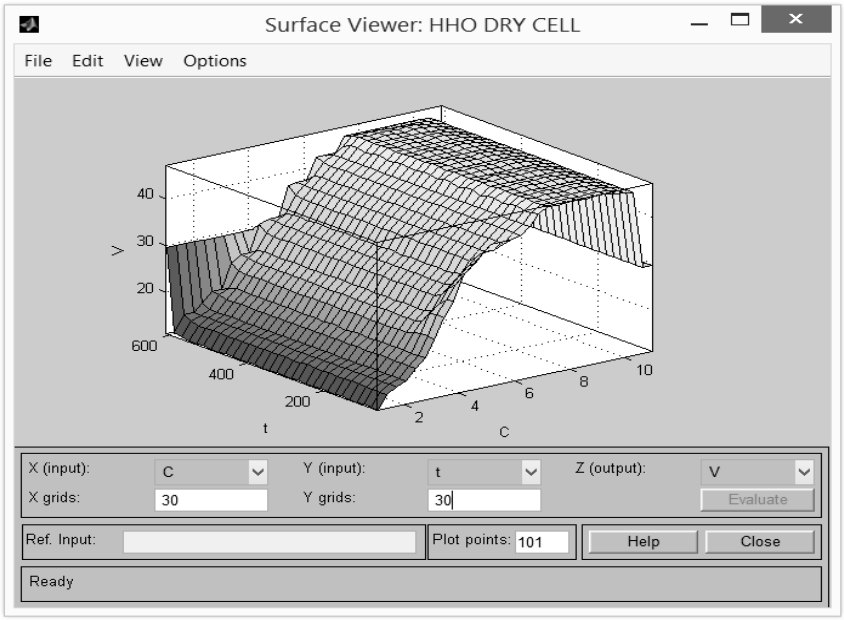
Deneysel çalışmada elde edilen sonuç ile karşılaştırılması yapılarak, hata varsa tekrar bulanık küme oluşturulması ve üyelik fonksiyonu belirlenmesi aşamasına geçilir. Yukarıda verilen örnek gözönüne alınırsa C değerinin 5 olduğu yani 11-6 kombinasyonunda olduğu, t değerinin ise 540.saniye yani 9. dakikada olması durumunda deneysel çalışma elde edilen değerin 35.3 V olduğu, aşağıdaki deneysel verilerin bir kısmının verildiği tabloda görülmektedir. BM modelinin tespit ettiği değere çok yakın bir değer olduğu görülmektedir. Tüm değerler için bu şekilde karşılaştırma yapılarak sistemin hata oranı tespit edilir.

Tablo 8.1. HHO hücresi performansının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmanın bazı sonuçları (Dincer ve ark., 2013)

11-5 Kombinasyonu				11-6 Kombinasyonu			
Zaman (dak.)	(Volt) V	Akım (A)	Sıcaklık (°C)	Zaman (dak.)	(Volt) V	Akım (A)	Sıcaklık (°C)
1	48,0	2,13	19,8	1	47.9	4,1	20,8
2	48,0	2,97	19,9	2	41,0	5,23	21,8
3	47,7	4,0	20,6	3	40.3	5,23	22,6
4	47,7	4,58	21,9	4	39,0	5,23	24,7
5	47,5	5,08	23,8	5	38,0	5,23	27,5
6	44,2	5,2	26,2	6	37,2	5,24	29,7
7	44,3	5,22	28,3	7	36,6	5,24	32,2
8	43,7	5,23	31,3	8	36,1	5,23	35,0
9	42,6	5,23	34,4	9	35,3	5,23	38,3
10	42,3	5,23	37,0	10	35,0	5,23	40,0

Tüm parametrelerin birbiriyle nasıl değiştiğini üç boyutlu gözlemlenmesi için yüzey izleyici sayfasına geçilir. Şekil 8.14'de gerilim değerinin plaka sayısı ve zamana

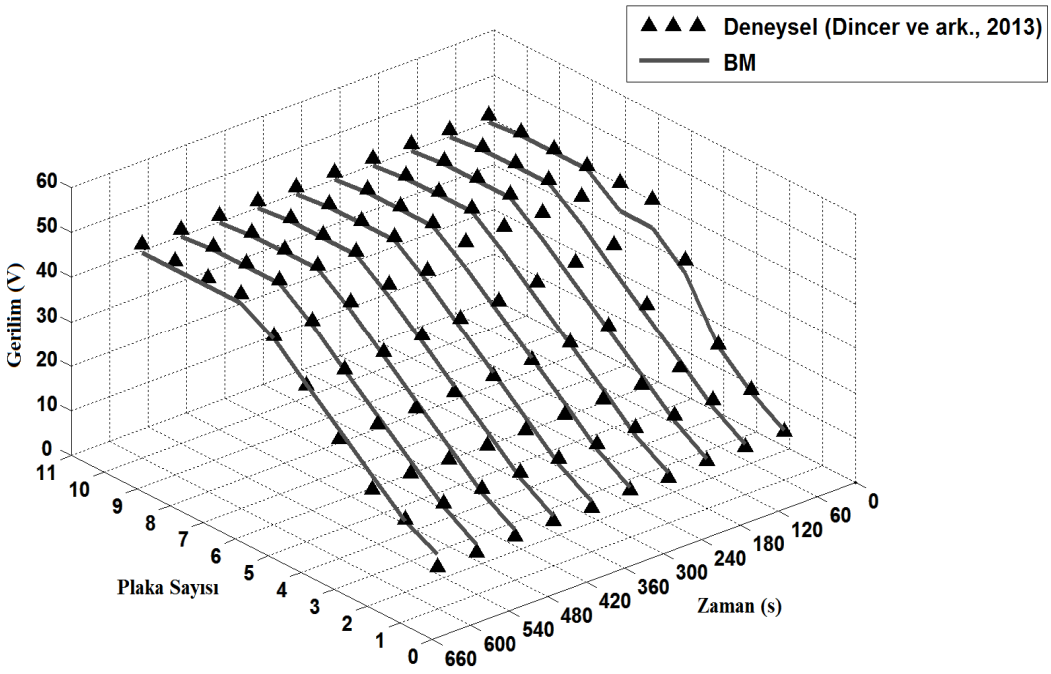
göre değişimini gösteren yüzey izleyici sayfasının Matlab görüntüsü verilmiştir. Modülün bu kısmı, sisteme ait tüm parametrelerin değişim analizi için kullanılır.



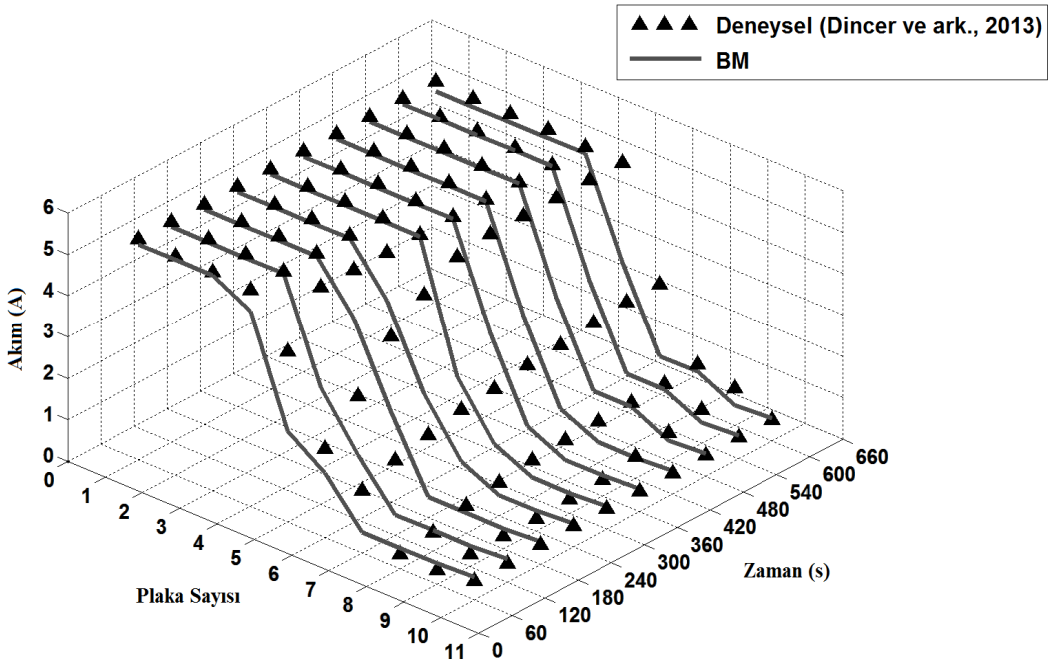
Şekil 8.14. Gerilim değeri için yüzey izleyici sayfasına ait Matlab görüntüsü

Şekil 8.15-8.17, BM ile deneysel verilerin sırasıyla voltaj, akım ve sıcaklık değerlerinin zaman ve plaka sayısına göre değişiminin karşılaştırmasını göstermektedir (plaka numarası = 1-10; t = 60-600s). Bu karşılaştırma sonucunda bulanık mantık değerleri ile gerçek değerlerin birbirlerine oldukça uyumlu olduklarını görmekteyiz.

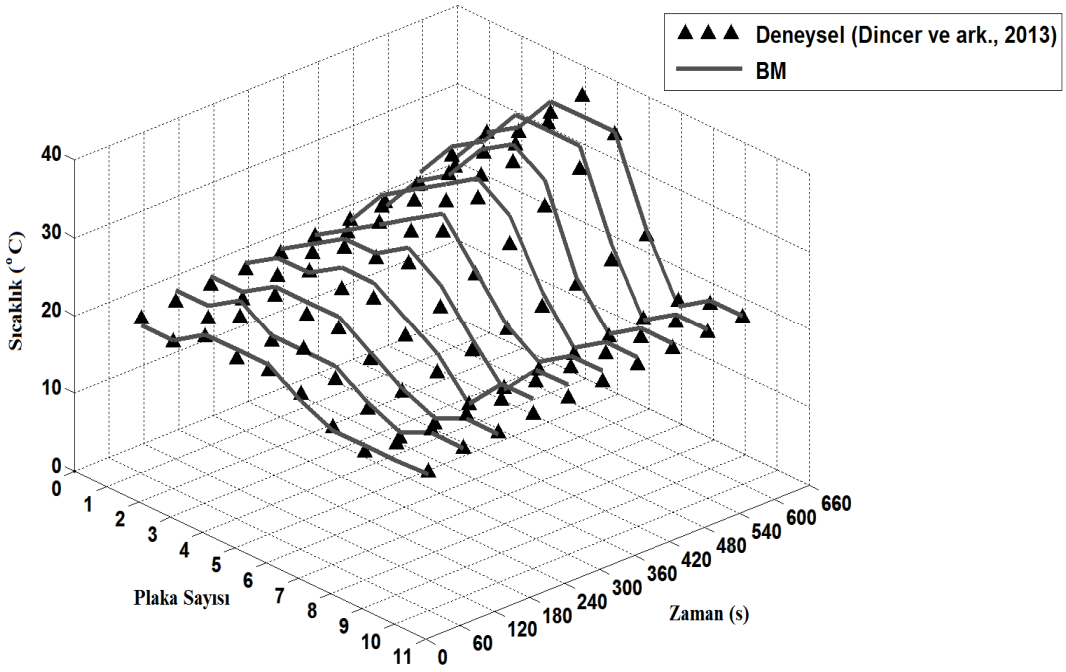
- Sistem 6 ya da daha fazla plakaya sahip ise, voltaj değeri stabildir, ancak 6 ya da daha az plakaya sahip ise voltaj zamanla azalır (Şekil 8.15).
- Akım değeri zamanla ve plaka sayısı arttıkça azalmaktadır, 3 veya daha az plaka olduğunda akım değeri stabildir (Şekil 8.16).
- Her plakada sıcaklık zamanla artmaktadır, 5 plaka olması durumunda sıcaklık maksimum değerini almaktadır (Şekil 8.17).



Şekil 8.15. Volt değerlerinin kombinasyon ve zamana göre değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması



Şekil 8.16. Akım değerlerinin kombinasyon ve zamana göre değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması



Şekil 8.17. Sıcaklık değerlerinin kombinasyon ve zamana göre değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Deneysel veriler ve bulanık mantık arasındaki karşılaştırma istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntemlerden ilki, karekök ortalamadır, t burada hedef değeri, o çıkış değerini, p ise model sayısını ifade etmektedir.

$$\text{RMS} = \left(\left({}^{1}/_{p} \right) \Sigma_j \left(|t_j - o_j| \right)^2 \right)^{1/2} \tag{8.1}$$

Buna ek olarak, çoklu determinasyon katsayısı (R^2) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır (Berber ve ark., 2013).

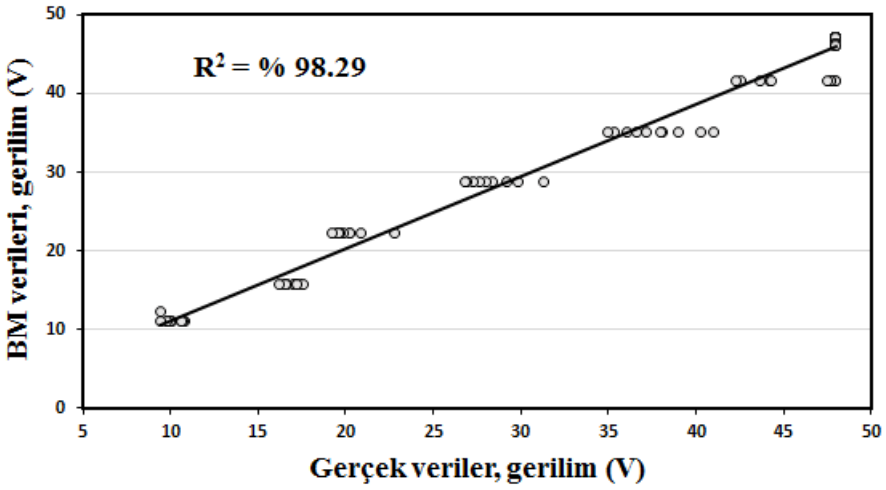
$$R^2 = 1 - \left(\frac{\Sigma_j (t_j - o_j)^2}{\Sigma_j (o_j)^2} \right) \tag{8.2}$$

$$MAPE = \frac{o - t}{o} \times 100 \tag{8.3}$$

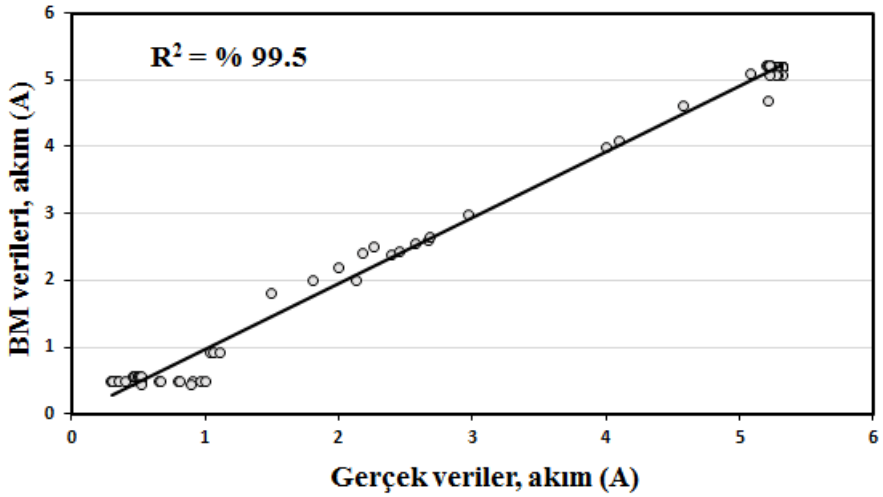
Şekil 8.18-8.20 sırasıyla gerçek sonuçlar ile ve BM model sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Her bir çıkış değeri için uygulanan istatistiksel yöntem sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Voltaj için RMS 1.26, akım için 0.94, sıcaklık için 1.53 olmaktadır. R^2 voltaj için 98.29%, akım için % 99.5 ve sıcaklık 96,47% 'dir. MAPE voltaj için 0,048, akım için 0,022 ve sıcaklık 0,052'dir. Tablo 8.2 ve Şekil 8.15-8.17 incelendiğinde; gerçek değerler ve bulanık mantıktan elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 8.2. Kullanılan istatistiksel yöntemlerde volt (V), akım (A) ve sıcaklık (^{o}C) için hata değerleri

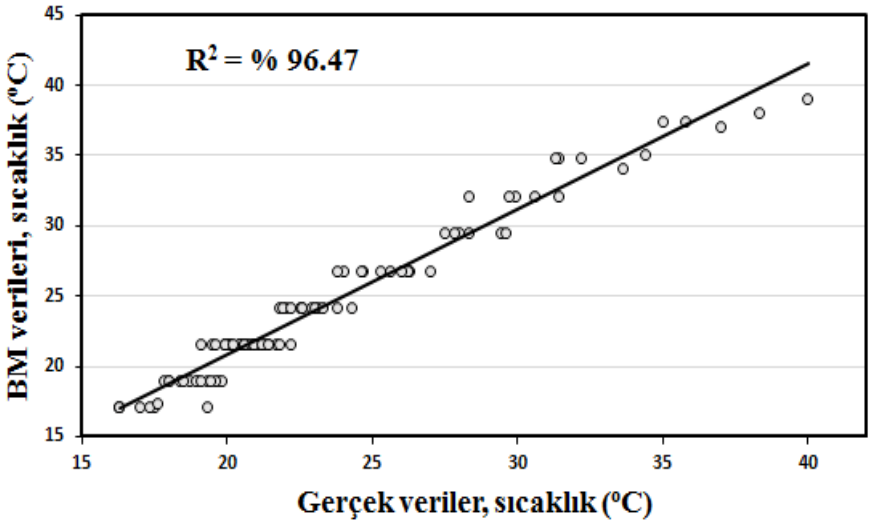
	RMS	R^2 (%)	MAPE
Gerilim (V)	1.26	98.29	0.048
Akım (A)	0.94	99.5	0.022
Sıcaklık (^{o}C)	1.53	96.47	0.052



Şekil 8.18. Gerilim için gerçek veriler ile BM ile tespit edilen değerlerin çoklu determinasyon katsayısı ile karşılaştırılması



Şekil 8.19. Akım için gerçek veriler ile BM ile tespit edilen değerlerin çoklu determinasyon katsayısı ile karşılaştırılması



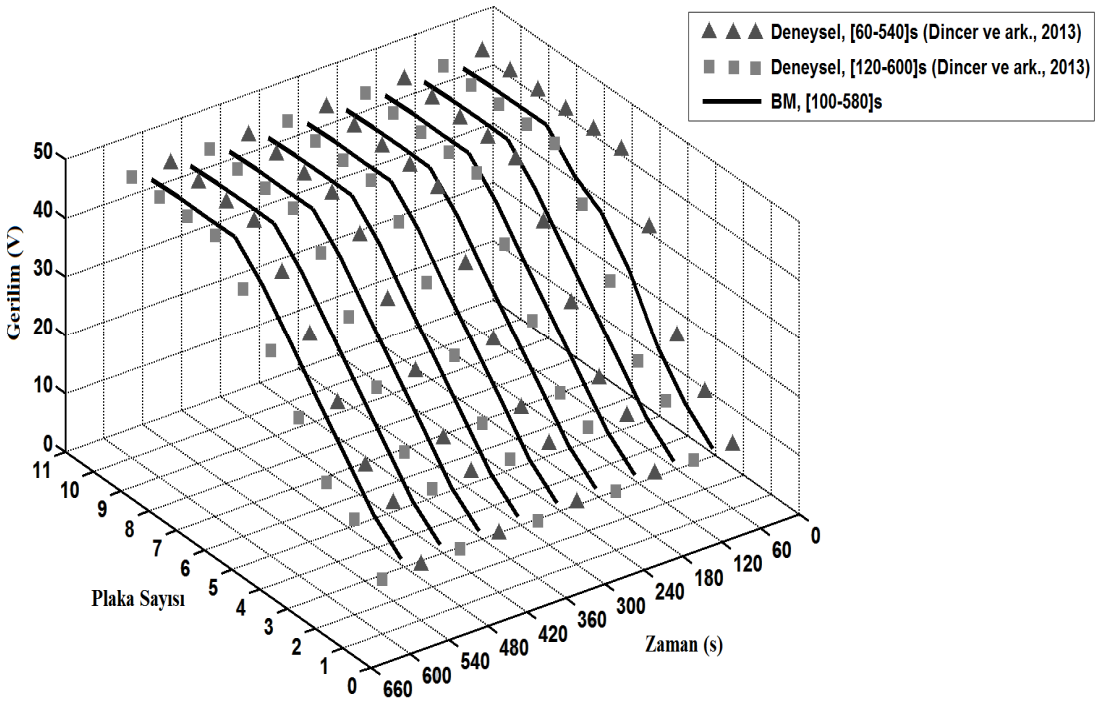
Şekil 8.20. Sıcaklık için gerçek veriler ile BM ile tespit edilen değerlerin çoklu determinasyon katsayısı ile karşılaştırılması

Bulanık mantık, deneysel çalışmalar esnasında karşılaşılan dezavantajları kolaylıkla aşabilmektedir (örneğin ekonomik kayıplar, zaman kaybı, ölçüm hataları, ölçüm cihazlarının hassasiyetleri dolayısıyla ölçüm hataları, zamanla duyarlılık kaybı, ölçüm cihazlarının çevresel sıcaklığın zararlı etkilerinden etkilenmesi gibi). Bulanık mantık, deneyler ile elde etmesi mümkün olmayan ara değerleri de değerlendirme avantajına sahiptir.

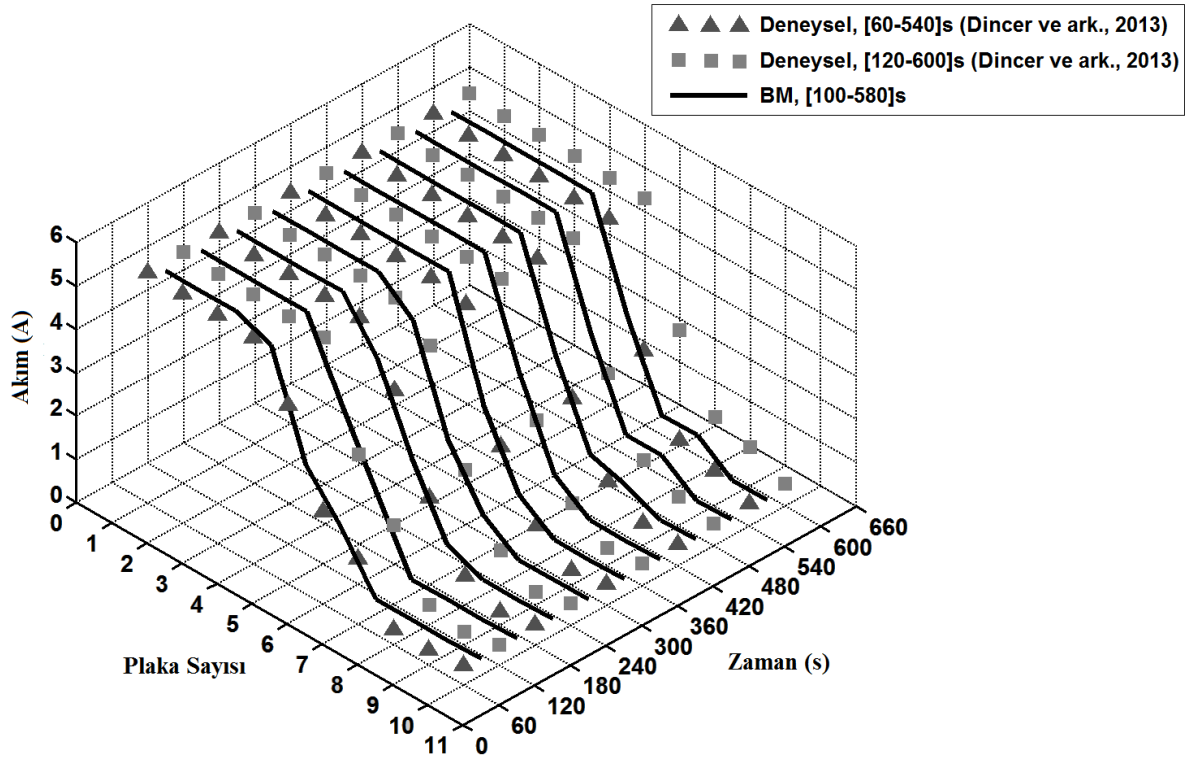
Bu çalışmada, bulanık mantık ayrıca deneysel çalışmada elde edilmeyen değerlerin tahmin edilerek belirlenmesi için de kullanılmıştır. Gerilim, akım ve sıcaklık için deneysel çalışma sırasında elde edilmemiş 90 ve 570 saniye arasındaki 270 değer bulanık mantık yöntemi ile tahmin edilmiştir. Şekil 8.18-8.20, BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin voltaj, akım ve sıcaklık değerlerinin zaman ve plaka sayısına göre değişiminin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu şekiller analiz edildiğinde aşağıdaki bilgilere ulaşılır.

- Plaka sayısı=4 ve t=270s için BM modeli ile elde edilen gerilim değeri, plaka sayısı=4 ve t=240s için deneysel çalışma ile elde edilen gerilim değerinden daha küçüktür, fakat plaka sayısı=4 ve t=300s için deneysel çalışma ile elde edilen değerden daha büyüktür (Şekil 8.21).
- Plaka sayısı=9 ve t=270s için BM modeli ile elde edilen akım değeri, plaka sayısı=9 ve t=240s için deneysel çalışma ile elde edilen akım değerinden daha küçüktür, fakat plaka sayısı=9 ve t=300s için deneysel çalışma ile elde edilen değerden daha büyüktür (Şekil 8.22).

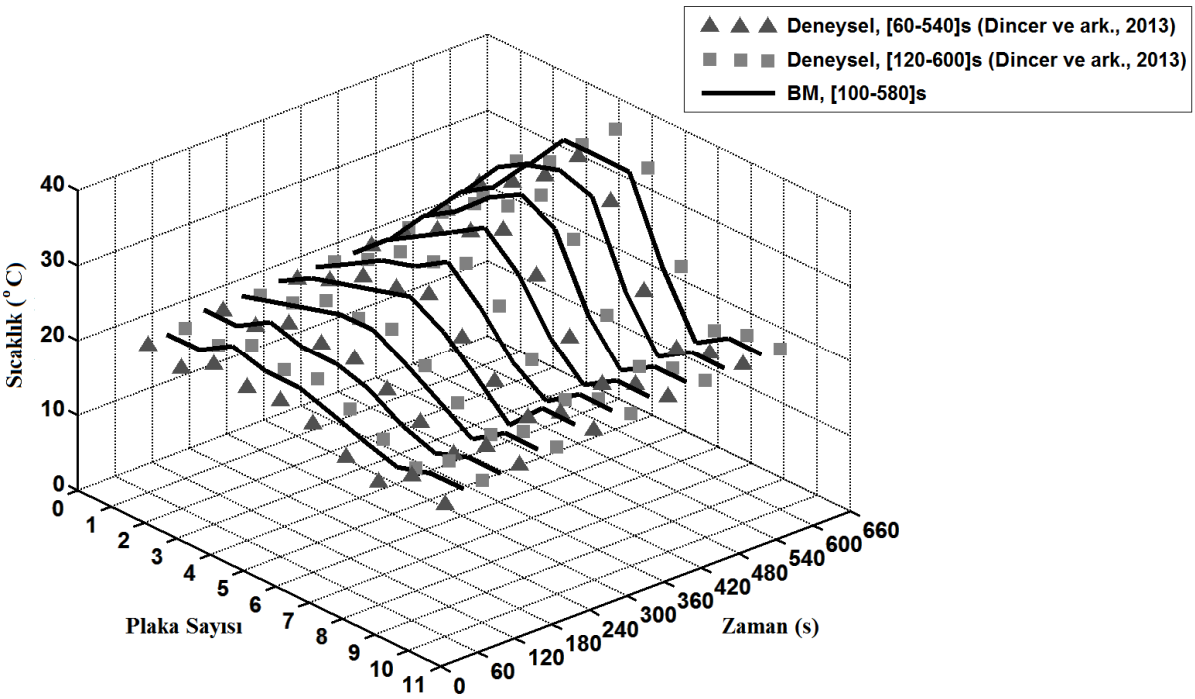
- Plaka sayısı=9 ve t=270s için BM modeli ile elde edilen sıcaklık değeri, plaka sayısı=9 ve t=240s için deneysel çalışma ile elde edilen sıcaklık değerinden daha küçüktür, fakat plaka sayısı=9 ve t=300s için deneysel çalışma ile elde edilen değerden daha büyüktür (Şekil 8.23).



Şekil 8.21. BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin gerilim değerlerinin zaman ve plaka sayısına göre değişiminin karşılaştırılması



Şekil 8.22. BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin akım değerlerinin zaman ve plaka sayısına göre değişiminin karşılaştırılması

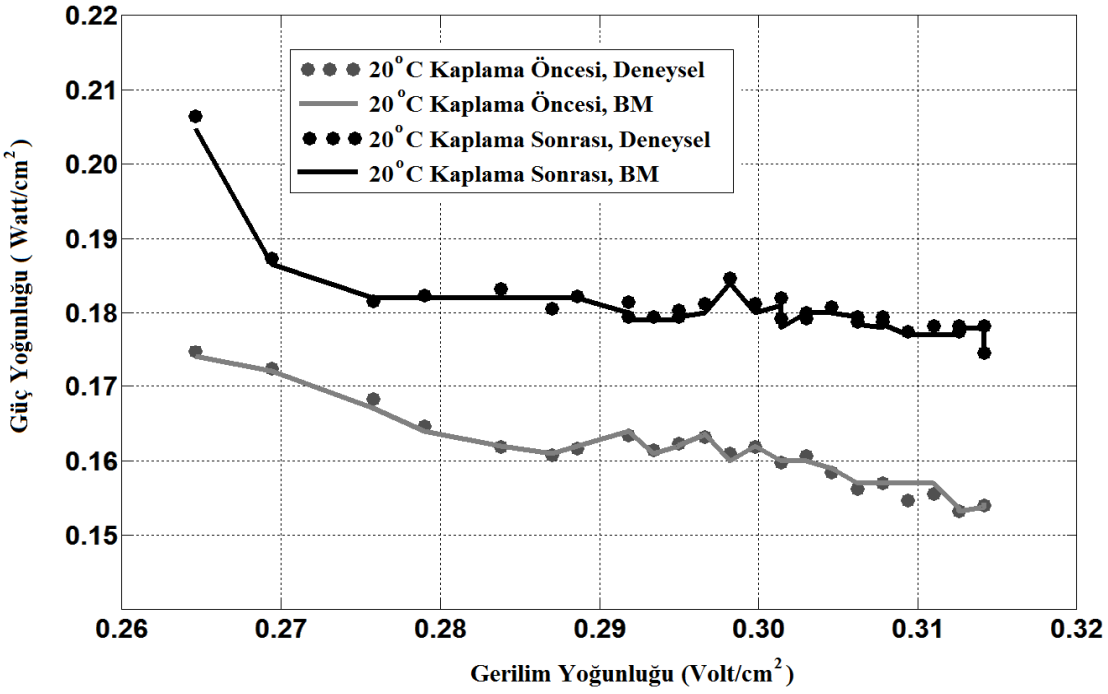


Şekil 8.23. BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin sıcaklık değerlerinin zaman ve plaka sayısına göre değişiminin karşılaştırılması

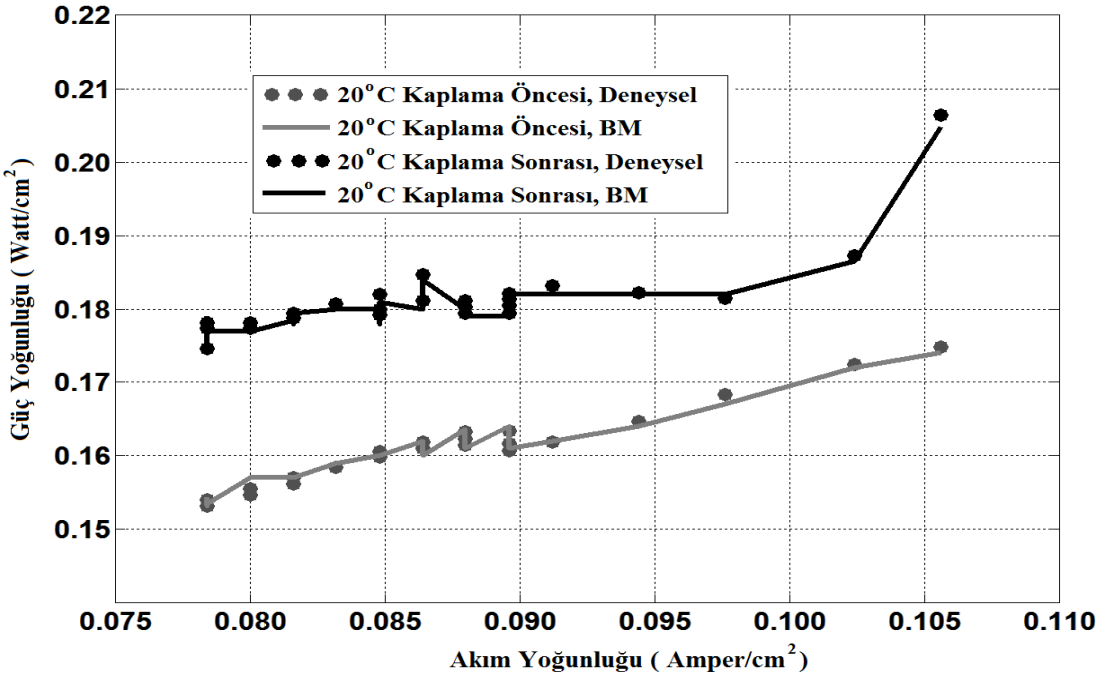
8.2.2. PEM yakıt hücresi performansının BM modeli analiz sonuçları

8.2.2.1. Anot tarafı KNT ile kaplanmış PEM yakıt hücresinin şarj sırasındaki performansının BM model analizi

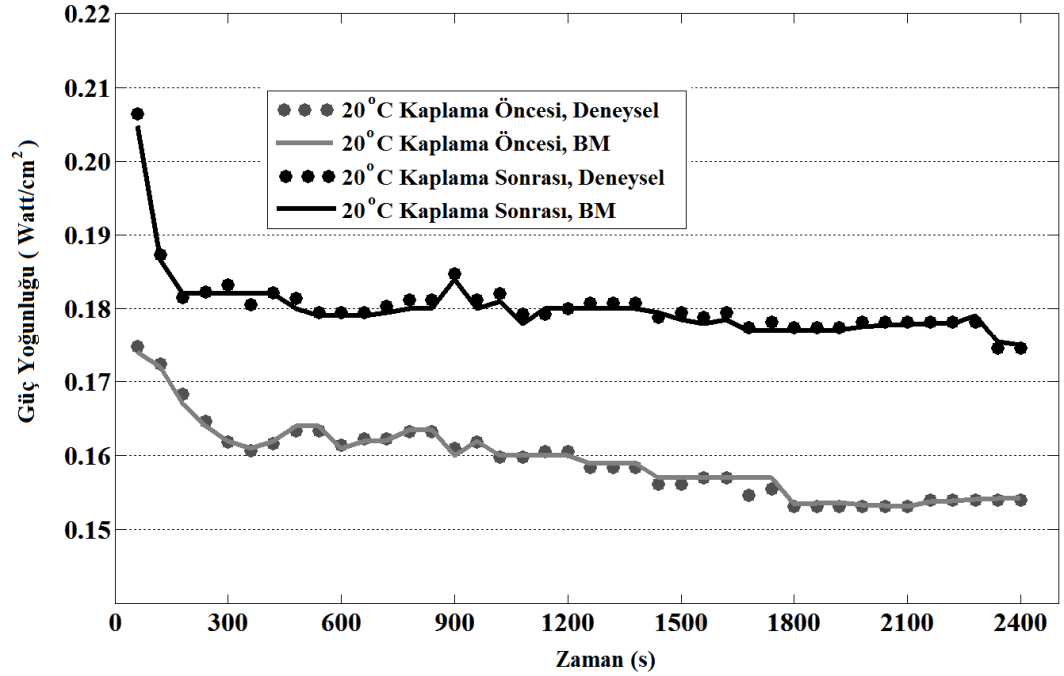
Şekil 8.24-8.26, bulanık mantık modeli ile tespit edilen veriler ile deneysel çalışmada elde edilen verilerin 20 °C'deki şarj durumunda elde edilen, sırasıyla gerilim yoğunluğu, akım yoğunluğu ve zamanın, güç yoğunluğuna göre değişiminin karşılaştırmasını göstermektedir. Kaplanmamış PEM ve KNT Kaplamalı PEM için 20 °C sıcaklıkta 80 adet deneysel veri kullanılarak bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Şekil 8.21-8.23'den bulanık mantık modelinin sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 8.24. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Gerilim yoğunluğu-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması



Şekil 8.25. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Akım yoğunluğu-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması



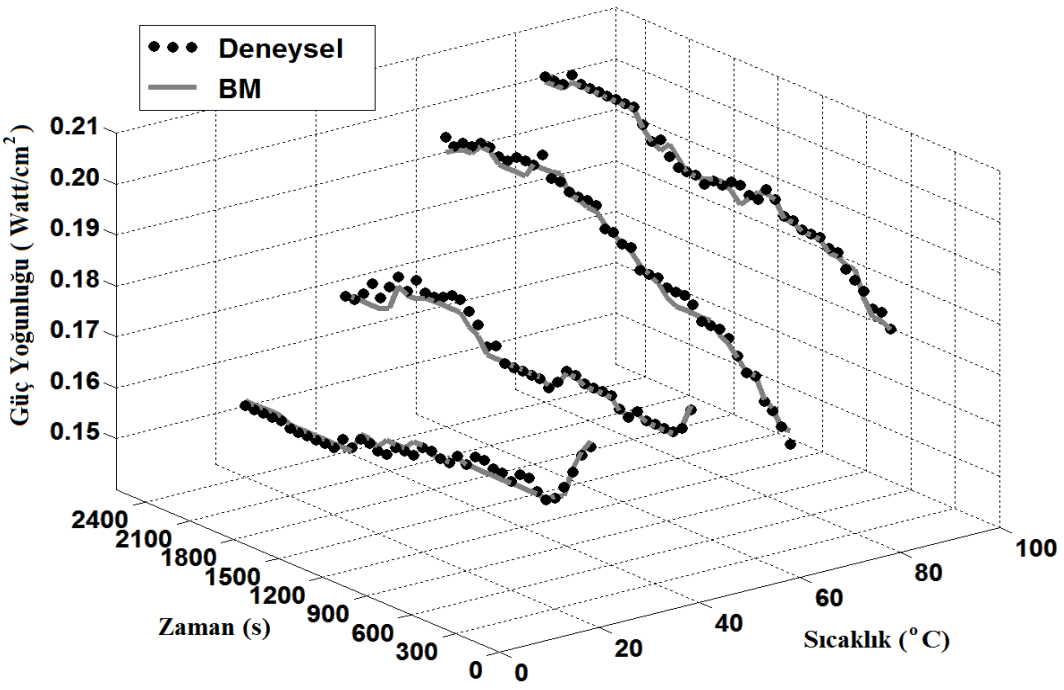
Şekil 8.26. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Zaman-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması

Bu şekiller analiz edildiğinde aşağıdaki bilgilere ulaşmak mümkündür.

- KNT ile kaplamanın güç yoğunluğu değerleri daha yüksektir. Kaplanmamış PEM güç yoğunluğu değeri 0,1747 W/cm^2 iken, KNT kaplı PEM için bu değer 0,2064 W/cm^2 olmaktadır (Şekil 8.24).

- KNT ile kaplamanın gerilim yoğunluğu değeri daha yüksektir. Gerilim yoğunluk değeri kaplanmamış PEM için 0,3142 Volt/cm^2 iken, KNT kaplı PEM için bu değer en fazla 0,3712 Volt/cm^2 olmaktadır (Şekil 8.25).
- KNT ile kaplamanın performansı daha yüksektir. Akım yoğunluğu 0.08 A/cm^2 olduğunda, güç yoğunluğu değeri kaplanmamış PEM için 0,1547 W/cm^2, ama KNT kaplı PEM için bu değer 0,1792 W/cm^2 olmaktadır (Şekil 8.26).

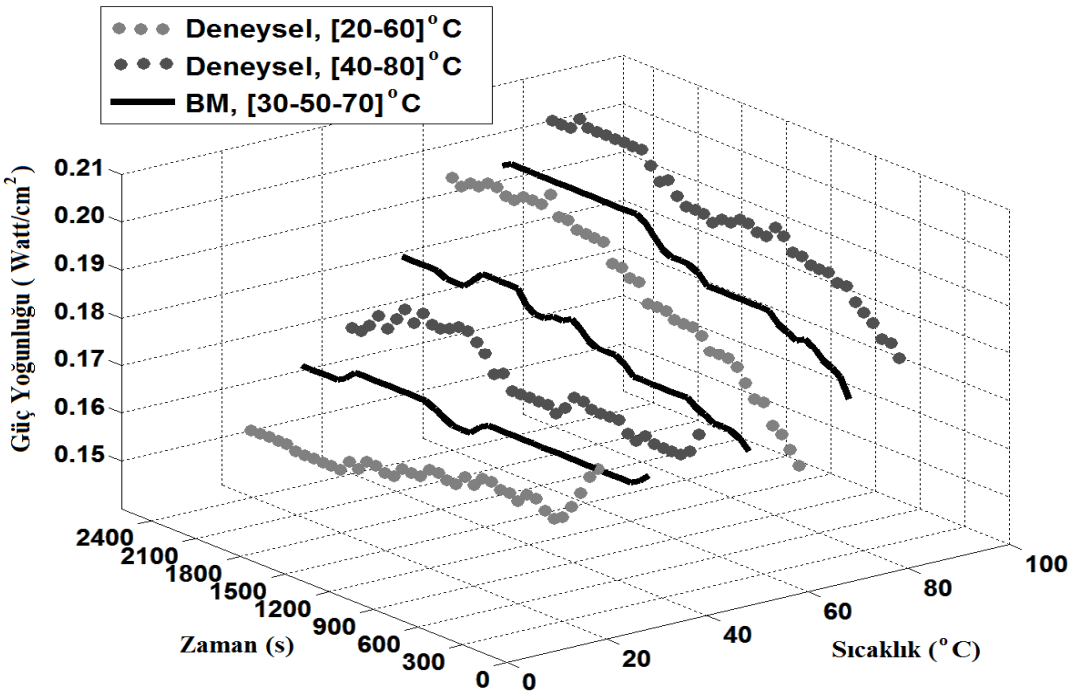
Şekil 8.24, güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-80 ^{o}C; t = 60-2400 s). Deneysel çalışmada elde edilmiş 160 değer, BM tekniği ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.27'de görülmektedir. Bu şekil analiz edildiğinde, güç yoğunluğu değerleri zamanın ve sıcaklık değerlerinin arttırılması ile artış gösterdiği görülmektedir. Minimum güç yoğunluğu değeri 0,1532 W/cm^2 olarak 20 °C'de elde edilirken, maksimum güç yoğunluğu değeri ise 0,2065 W/cm^2 olarak 80 ^{o}C'de elde edilmiştir.



Şekil 8.27. Güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

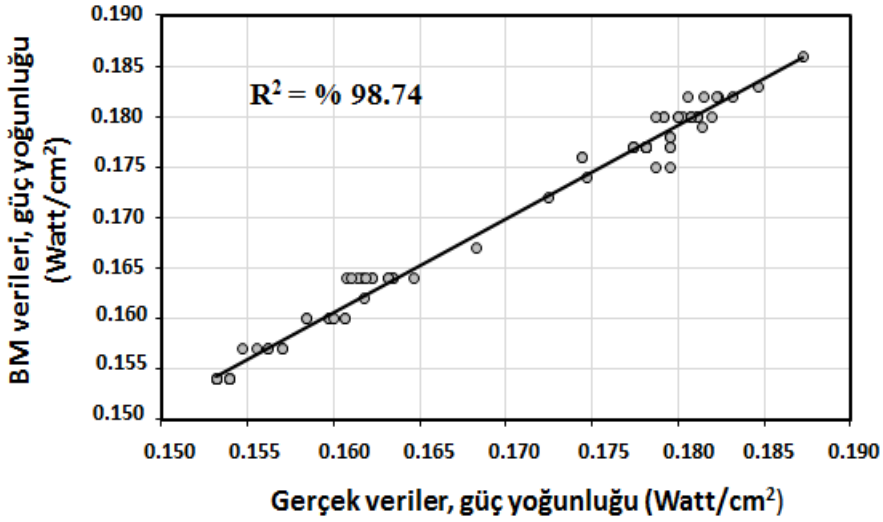
Şekil 8.28, BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin güç yoğunluğu, sıcaklık ve zamana göre değişiminin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu şekle göre; BM modeli tarafından 30^{o}C sıcaklık ve 1140 s zaman

değeri için tahmin edilen güç yoğunluğu değeri, 20°C ve 1140 s zaman değeri için deneysel olarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden daha yüksektir. Fakat 40°C ve 1140 s zaman değeri için deneysel olarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden daha düşük olduğu görülmektedir.

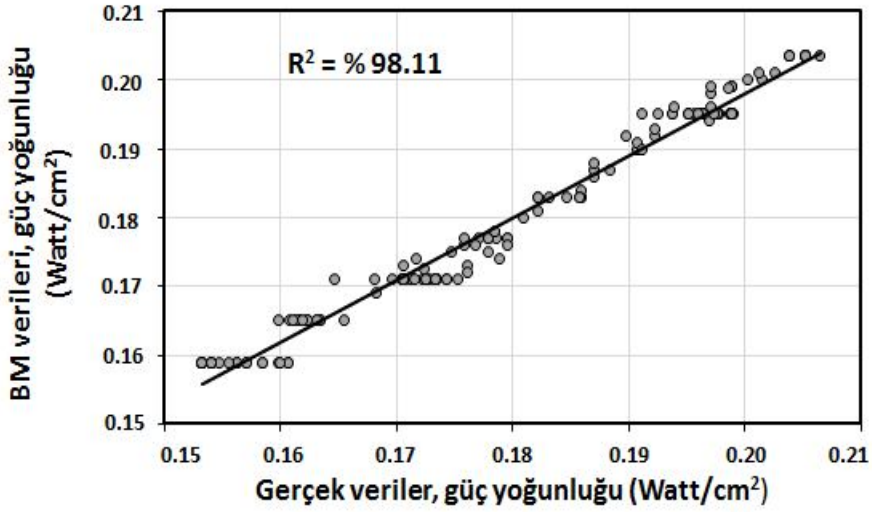


Şekil 8.28. BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin güç yoğunluğu-sıcaklık ve zamana göre değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 8.29 ve 8.30, güç yoğunluğu için gerçek sonuçlar ile BM model sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Kaplanmamış PEM ve KNT kaplı PEM için güç yoğunluğu R^2 değeri 98,74% olmaktadır. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıklarında belirlenen güç yoğunluğu için R^2 değeri 98,11% olmaktadır. Şekil 3a ve 3b incelendiğinde, gerçek değerler ve bulanık mantık modeli ile elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 8.29. BM modeli ile tespit edilen değerlerin ve gerçek sonuçların kaplanmamış PEM ve CNT kaplı PEM için güç yoğunluğu değerleri bakımından karşılaştırılması



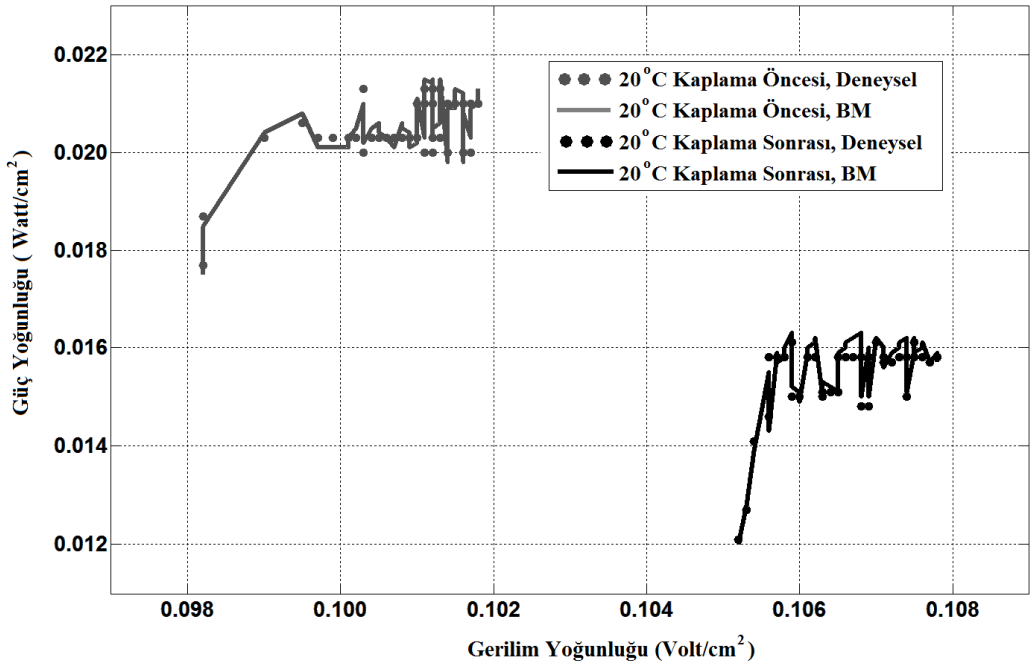
Şekil 8.30. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıkta BM modeli ile tespit edilen değerlerin ve gerçek sonuçların güç yoğunluğu değerleri bakımından karşılaştırılması.

Analiz sonuçları, KNT kaplı şarj sırasındaki PEM yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde bulanık mantık yönteminin kullanılabileceğini göstermektedir.

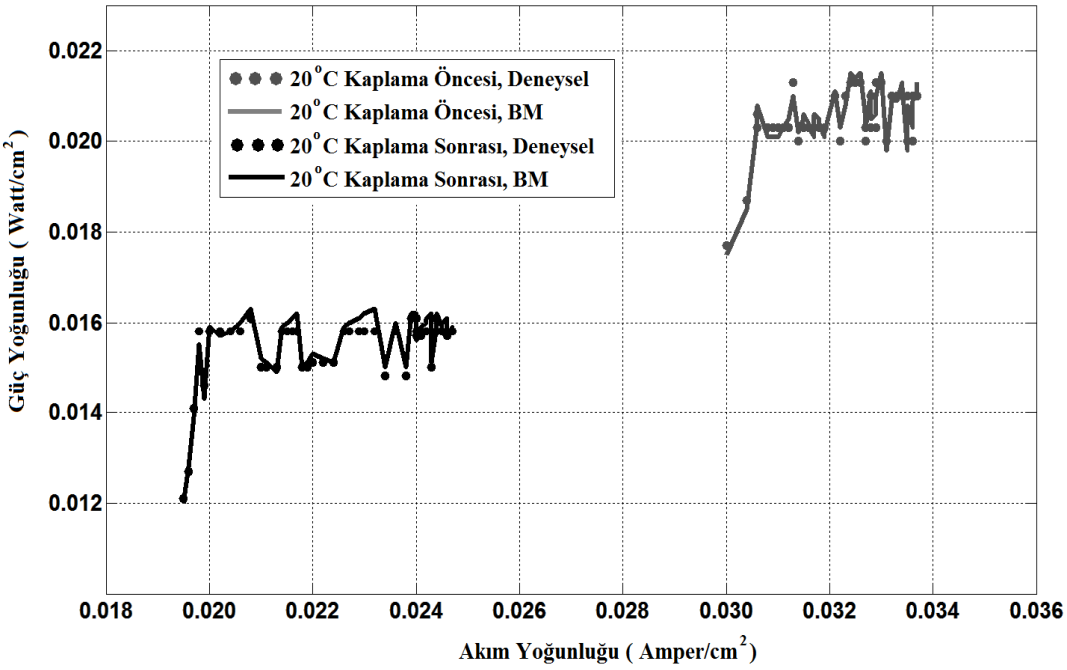
8.2.2.2. Anot tarafı KNT ile kaplanmış PEM yakıt hücresinin deşarj sırasındaki performansının BM model analizi

Şekil 8.31-8.33, bulanık mantık modeli ile tespit edilen veriler ile deneysel çalışmada elde edilen verilerin 20 °C'deki deşarj durumunda elde edilen, sırasıyla gerilim yoğunluğu, akım yoğunluğu ve zamanın, güç yoğunluğuna göre değişiminin

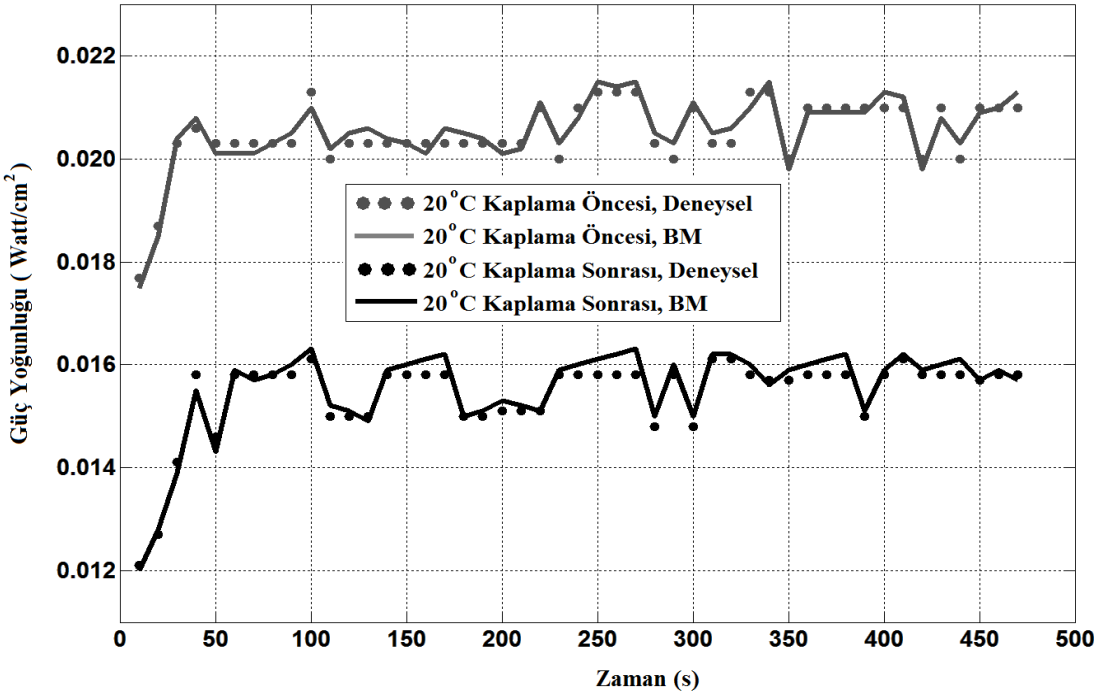
karşılaştırmasını göstermektedir. Kaplanmamış PEM ve KNT Kaplamalı PEM için 20 °C sıcaklıkta 80 adet değer bulanık mantık yöntemi ile elde edilmiştir. Şekil 8.28-8.30'dan bulanık mantık çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 8.31. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Gerilim yoğunluğu-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması



Şekil 8.32. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Akım yoğunluğu-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması



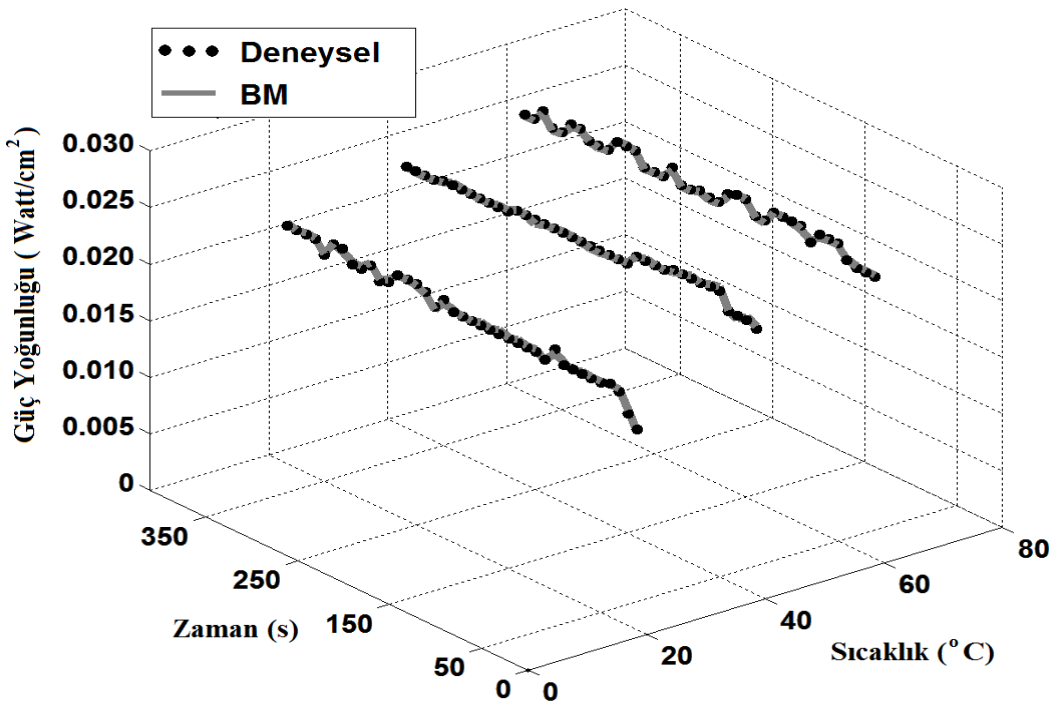
Şekil 8.33. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Zaman-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması

Bu şekiller analiz edildiğinde aşağıdaki bilgilere ulaşmak mümkündür.

- KNT ile kaplamanın gerilim yoğunluğu değeri daha yüksektir. Gerilim yoğunluk değeri kaplanmamış PEM için en fazla 0,103 Volt/cm^2 değerini alıyorken, KNT kaplı PEM için bu değer 0,1072 Volt/cm^2 değerini alabilmektedir (Şekil 8.31).
- KNT ile kaplamanın akım yoğunluğu değeri daha düşük olmaktadır. Akım yoğunluğu değeri kaplanmamış PEM için en fazla 0,0336 Amper/cm^2 değerini alıyorken, KNT kaplı PEM için bu değer 0,0240 Amper/cm^2 değerini alabilmektedir (Şekil 8.32).
- 20^{o}C'de deşarj sırasında KNT ile kaplamanın güç yoğunluğu değeri, kaplama öncesine göre daha düşüktür. Kaplanmamış PEM güç yoğunluğu değeri 0,0213 W/cm^2 iken, KNT kaplı PEM için bu değer 0,0169 W/cm^2 olmaktadır (Şekil 8.33).

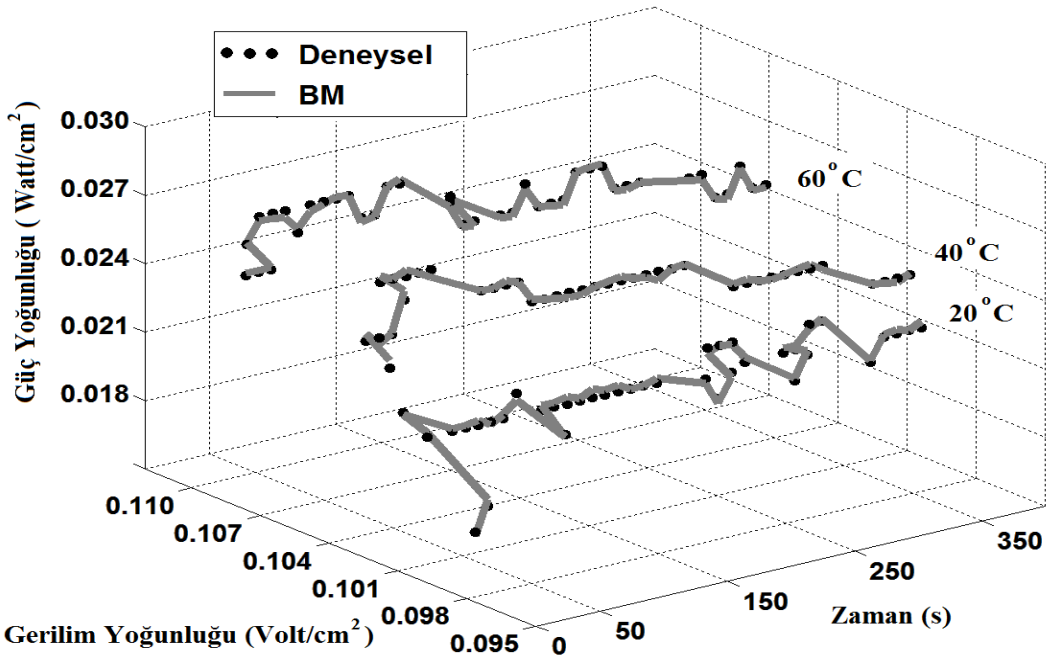
Şekil 8.34, güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-60 ^{o}C; t = 10-390 s). Deneysel çalışmada tespit edilmiş 117 değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.34'de görülmektedir. Bu şekilden, güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık değerlerinin arttırılması ile artış gösterdiği görülmektedir. Minimum güç yoğunluğu değeri 0,0177 W/cm^2 olarak 20

°C'de elde edilmiştir, maksimum güç yoğunluğu değeri ise 0,0263 W/cm^2 olarak 80 ^{o}C'de elde edilmiştir (Şekil 8.34).



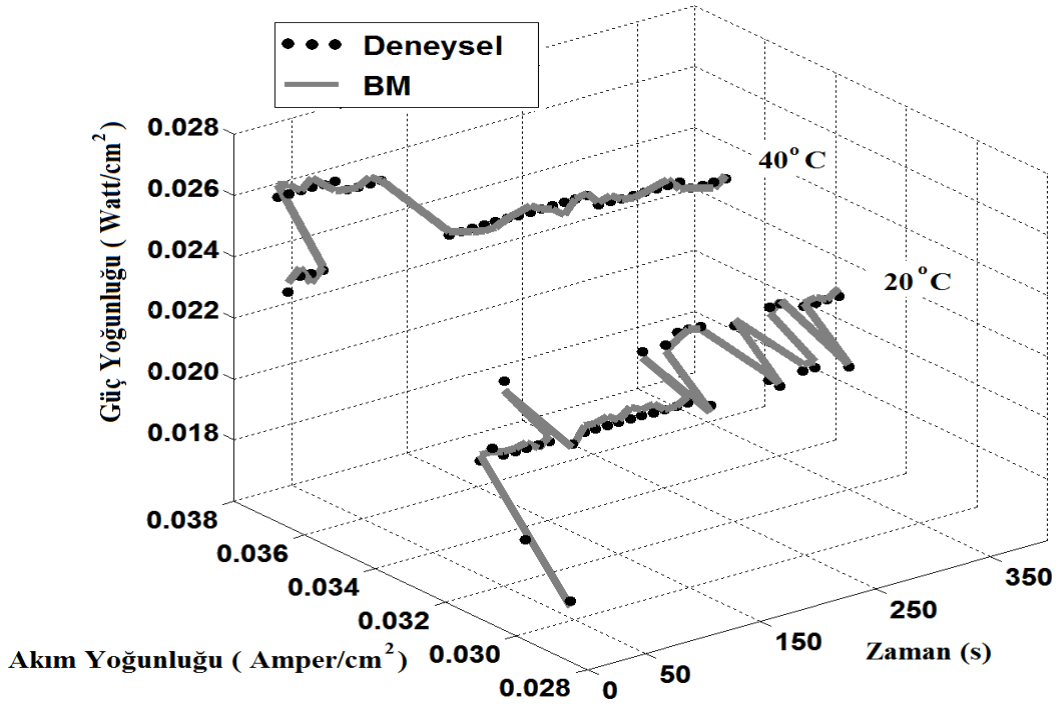
Şekil 8.34. Güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Şekil 8.35, güç yoğunluğu değerlerinin gerilim yoğunluğu, sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-60 ^{o}C, gerilim yoğunluğu = 0.095-0.11 V/cm^2; t = 10-390 s). Deneysel çalışmada tespit edilmiş 117 değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.35'de görülmektedir. Bu şekilden, güç yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinin artmasıyla gerilim yoğunluğu değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir. 20 ^{o}C'de minimum gerilim yoğunluğu değeri 0,0982 V/cm^2 iken güç yoğunluğu değeri 0,0177 W/cm^2 olarak elde edilmiş iken, 60 ^{o}C'de maksimum gerilim yoğunluğu değeri 0,1098 V/cm^2 iken güç yoğunluğu değeri 0,0263 W/cm^2 olarak elde edilmiştir (Şekil 8.35).



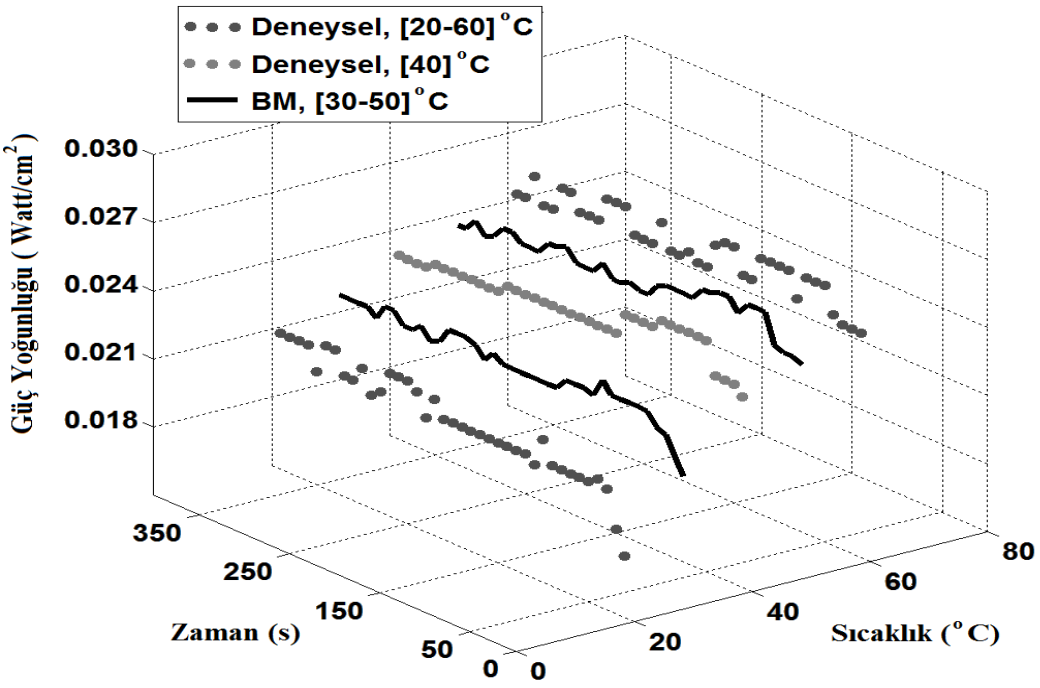
Şekil 8.35. Güç yoğunluğu değerlerinin gerilim yoğunluğu, sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Şekil 8.36, güç yoğunluğu değerlerinin akım yoğunluğu, sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-40 ^{o}C, akım yoğunluğu = 0.027-0.039 A/cm^2; t = 10-390 s). Deneysel çalışmada tespit edilmiş 117 değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.36'da görülmektedir. Bu şekilden; güç yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinin artmasıyla akım yoğunluğu değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir. 20 ^{o}C'de minimum akım yoğunluğu değeri 0,0288 A/cm^2 iken güç yoğunluğu değeri 0.0177 W/cm^2 olarak elde edilmiştir, 40 ^{o}C'de maksimum akım yoğunluğu değeri 0,0384 A/cm^2 iken güç yoğunluğu değeri 0.0252 W/cm^2 olarak elde edilmiştir. 60 ^{o}C'de elde edilen akım değerlerinin 40 ^{o}C'de elde edilen değerlere göre ciddi bir miktarda değişme olmadığı görülmüştür (Şekil 8.36).



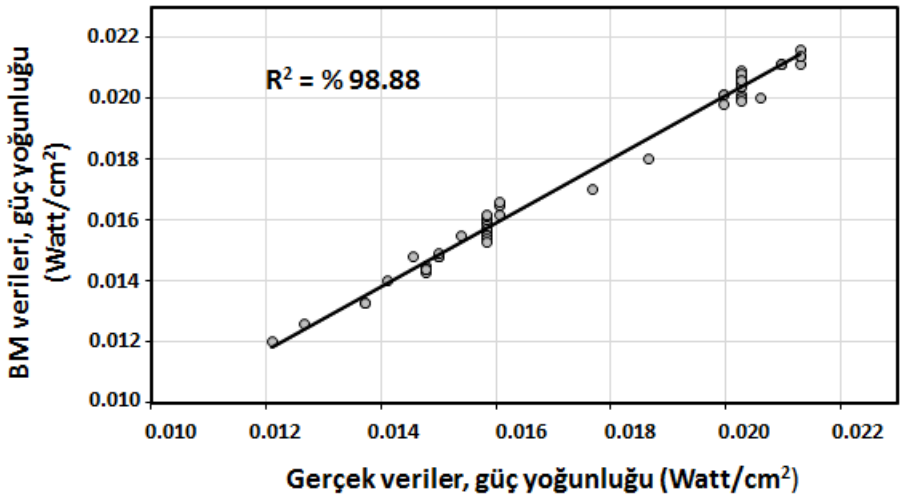
Şekil 8.36. Güç yoğunluğu değerlerinin akım yoğunluğu, sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Şekil 8.37, BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin güç yoğunluğu-sıcaklık ve zamana göre değişiminin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu şekile göre; BM modeli tarafından 30 ^{o}C sıcaklık ve 50 s zaman değeri için tahmin edilen güç yoğunluğu değeri, 20 ^{o}C ve 50 s zaman değeri için deneysel olarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden daha yüksektir. Fakat 40 ^{o}C ve 50 s zaman değeri için deneysel olarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden daha düşüktür (Şekil 8.37).

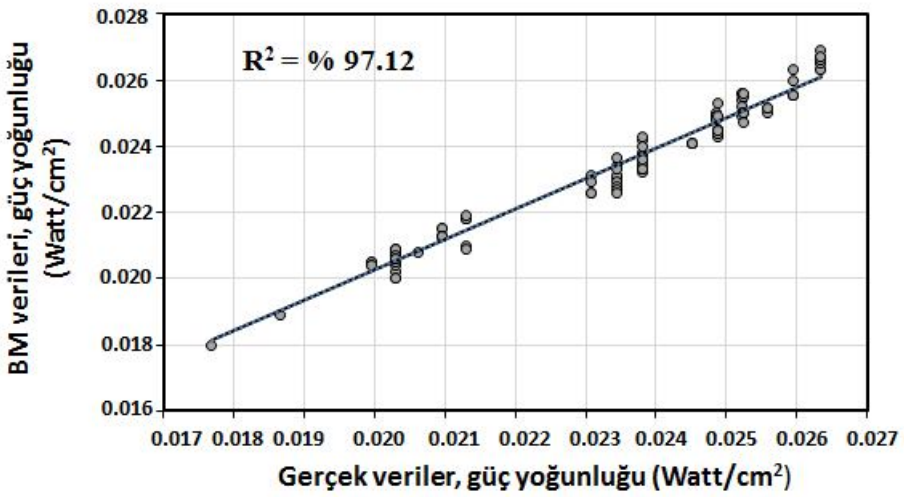


Şekil 8.37. BM model ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin güç yoğunluğu-sıcaklık ve zamana göre değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 8.38 ve 8.39, güç yoğunluğu için gerçek sonuçlar ile BM model sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Kaplanmamış PEM ve KNT kaplı PEM için güç yoğunluğu R^2 değeri 98,88% olmaktadır. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıklarında belirlenen güç yoğunluğu için R^2 değeri 97,12% olmaktadır. Şekil 4a ve 4b incelendiğinde, gerçek değerler ve bulanık mantık modeli ile elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 8.38. BM modeli ile tespit edilen değerlerin ve gerçek sonuçların kaplanmamış PEM ve CNT kaplı PEM için güç yoğunluğu değerleri bakımından karşılaştırılması

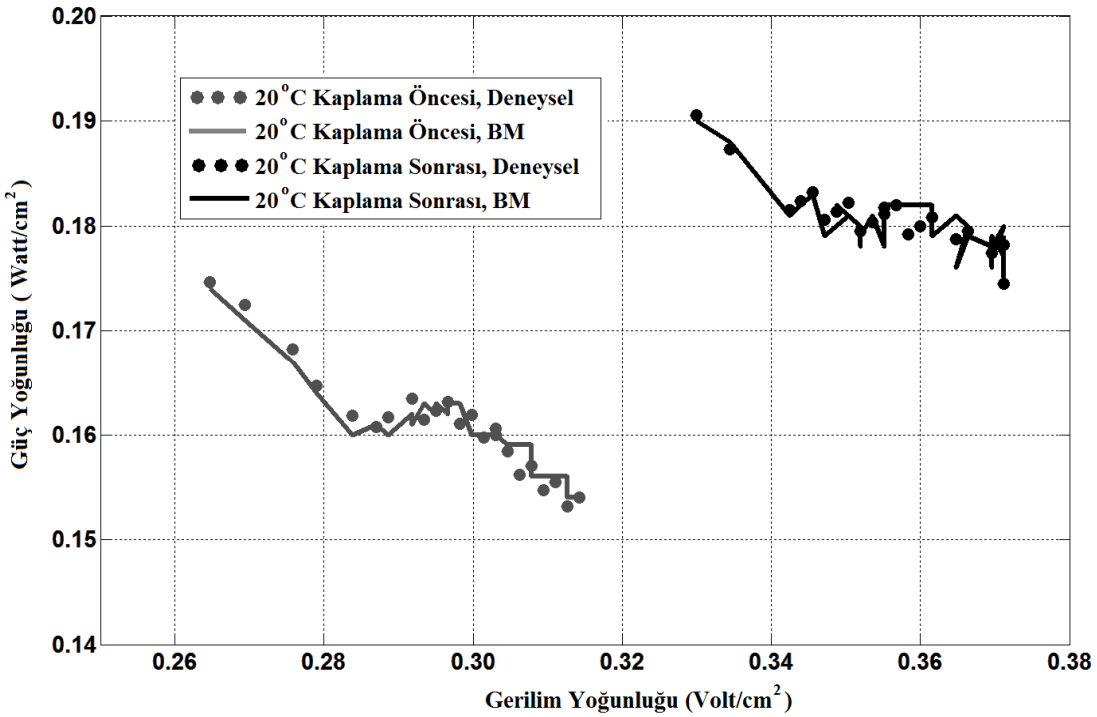


Şekil 8.39. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıkta BM modeli ile tespit edilen değerlerin ve gerçek sonuçların güç yoğunluğu değerleri bakımından karşılaştırılması.

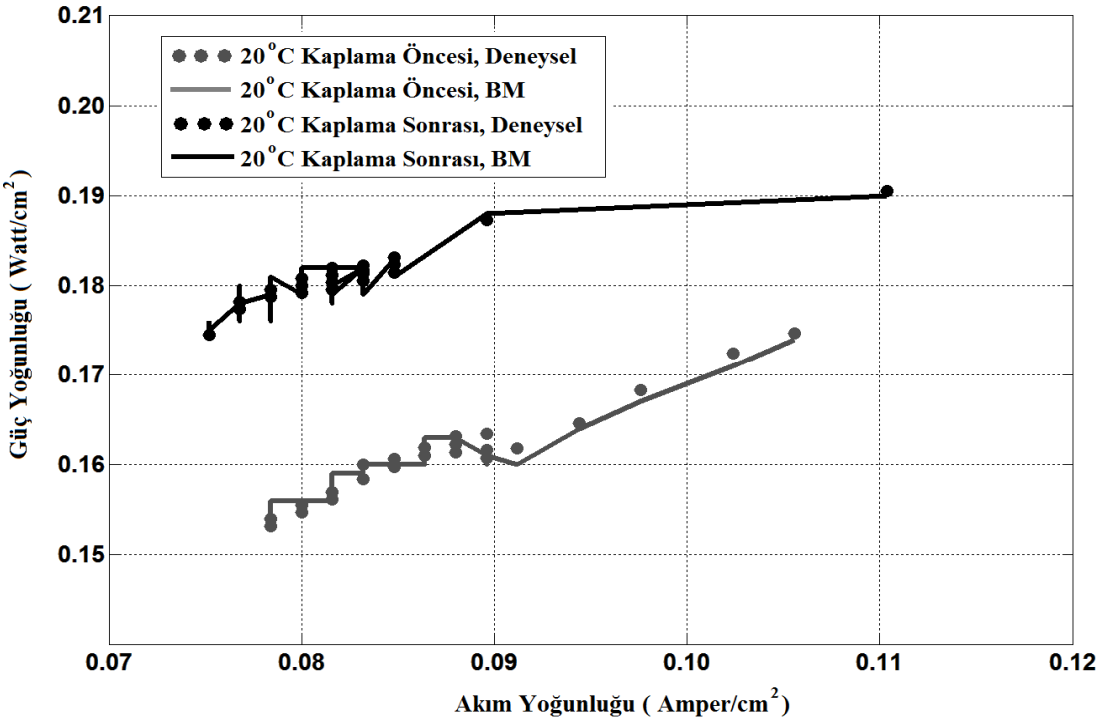
Analiz sonuçları, KNT kaplı deşarj sırasındaki PEM yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde bulanık mantık yönteminin kullanılabileceğini göstermektedir.

8.2.2.3. YSZ ile spin yöntemiyle kaplanmış PEM yakıt hücre performansının BM yöntemiyle oluşturulan modelin analizi

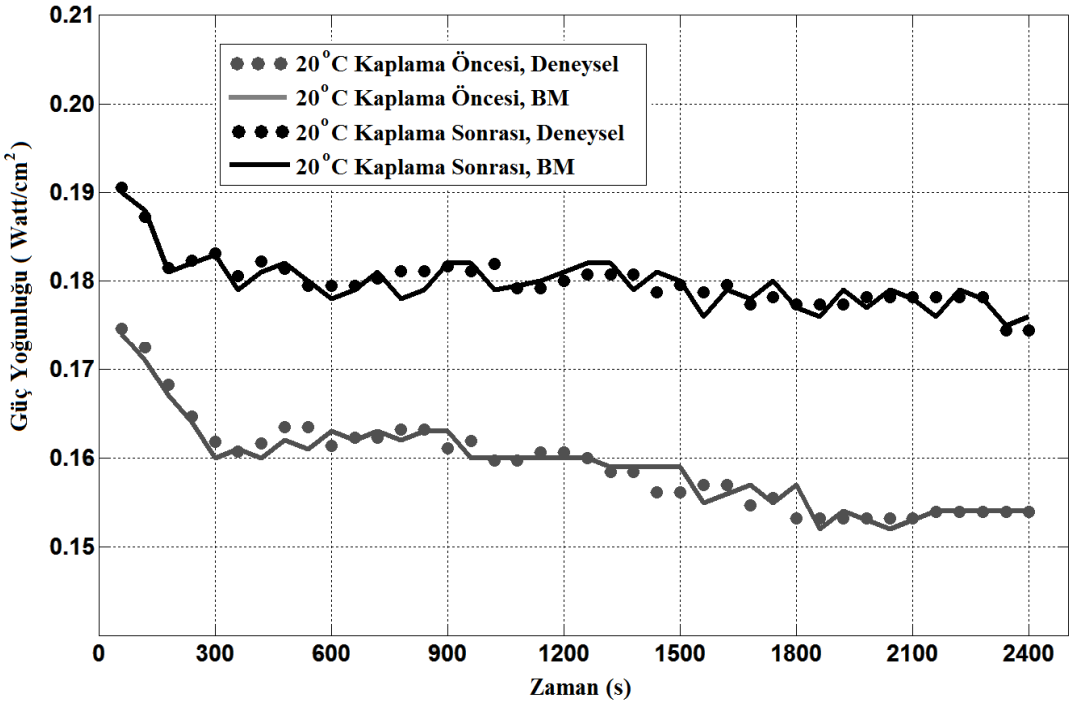
Şekil 8.40-8.42, bulanık mantık modeli ile tespit edilen veriler ile deneysel çalışmada elde edilen verilerin 20 °C'deki şarj durumunda elde edilen, sırasıyla gerilim yoğunluğu, akım yoğunluğu ve zamanın, güç yoğunluğuna göre değişiminin karşılaştırmasını göstermektedir. Kaplanmamış PEM ve YSZ ile spin yöntemiyle kaplanmış PEM için 20 °C sıcaklıkta 80 adet değer bulanık mantık yöntemi ile elde edilmiştir. Şekil 8.40-8.42'den bulanık mantık çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 8.40. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Gerilim yoğunluğu-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması



Şekil 8.41. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Akım yoğunluğu-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması



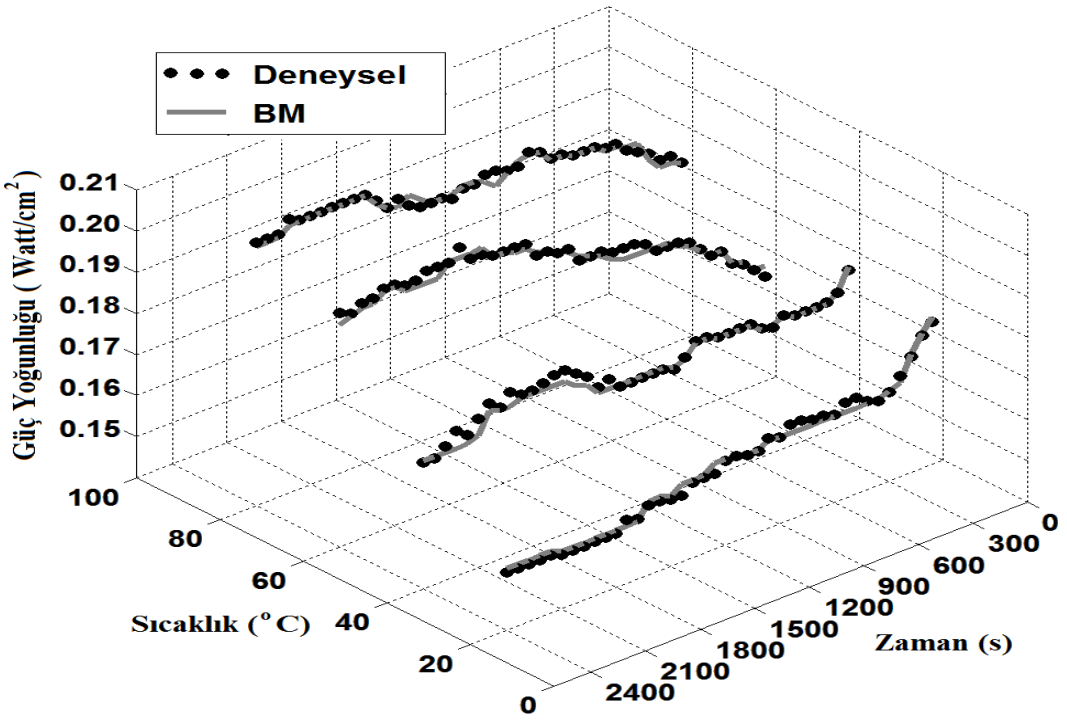
Şekil 8.42. Deneysel veriler ile BM model verilerinin Zaman-Güç yoğunluğu değişiminin karşılaştırılması

Bu şekiller analiz edildiğinde aşağıdaki bilgilere ulaşmak mümkündür.

- YSZ kaplamalı yakıt hücresinin güç yoğunluğu çok daha yüksektir. Kaplanmamış PEM için güç yoğunluğu değeri en fazla 0.1747 W/cm^2 olmaktadır fakat YSZ kaplamalı PEM için bu değer en fazla 0.2064 W/cm^2 'dir (Şekil 8.40).
- YSZ kaplamalı yakıt hücresinin gerilim yoğunluğu çok daha yüksektir. Kaplanmamış PEM için gerilim yoğunluğu değeri en fazla 0.3142 Volt/cm^2 olmaktadır fakat YSZ kaplamalı PEM için bu değer en fazla 0.3712 Volt/cm^2 'dir (Şekil 8.41).
- YSZ kaplamalı yakıt hücresinin performansı çok daha yüksektir. Akım yoğunluğu 0.08 A/cm^2 olduğunda, kaplamasız PEM hücresinin güç yoğunluğu 0.1547 W/cm^2 iken YSZ kaplamalı olan hücrenin güç yoğunluğu değeri 0.1792 W/cm^2 olmuştur (Şekil 8.42).

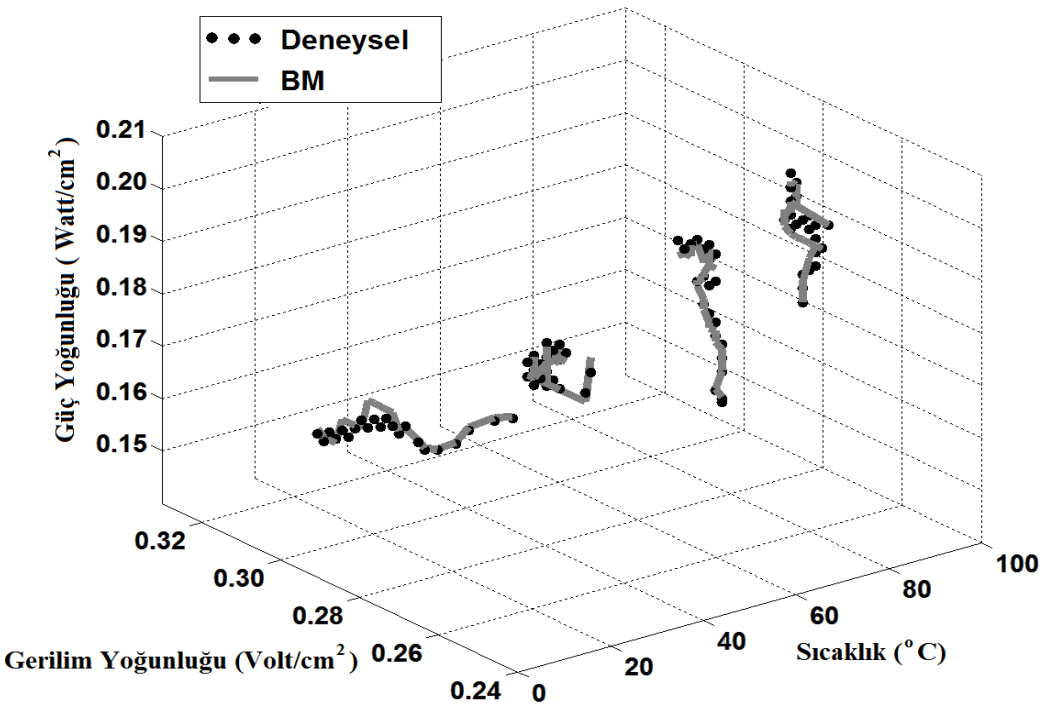
Şekil 8.43, güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-80 ^{o}C; t = 60-2400 s). Deneysel çalışmada tespit edilmiş 160 değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.43'de görülmektedir. Bu

şekilden, güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık değerlerinin arttırılması ile artış gösterdiği görülmektedir. Minimum güç yoğunluğu değeri 0,1532 W/cm^2 olarak 20 °C'de elde edilmiştir, maksimum güç yoğunluğu değeri ise 0,2065 W/cm^2 olarak 80 ^{o}C'de elde edilmiştir (Şekil 8.43).



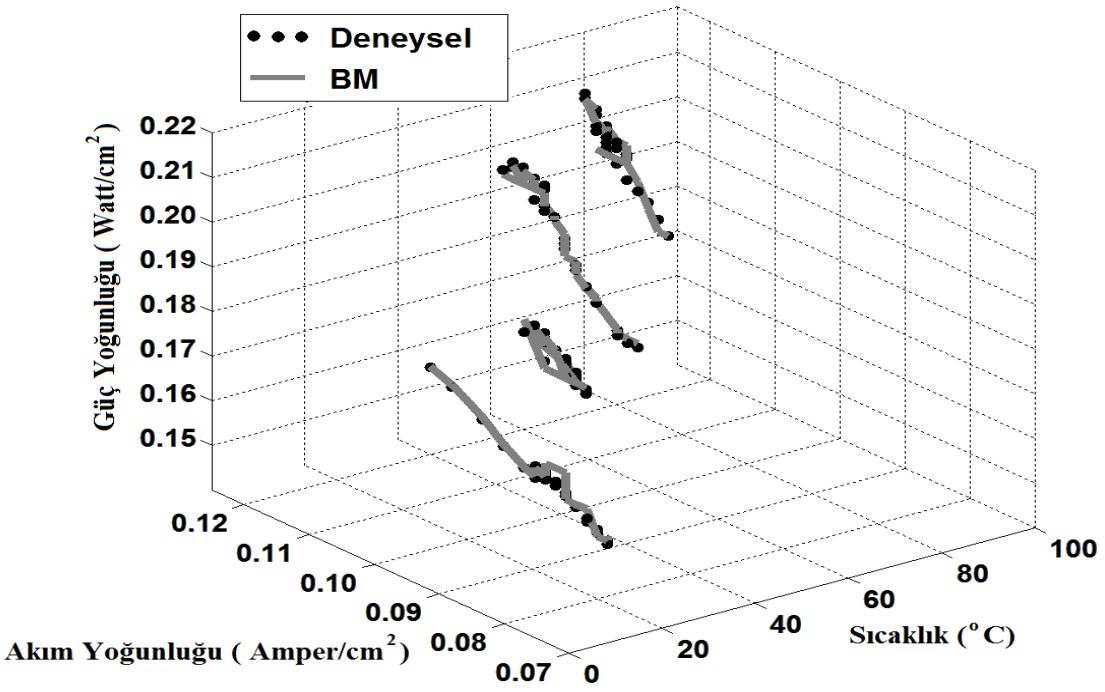
Şekil 8.43. Güç yoğunluğu değerlerinin sıcaklık ve zamanla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Şekil 8.44, güç yoğunluğu değerlerinin gerilim yoğunluğu ve sıcaklıkla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-80 ^{o}C, gerilim yoğunluğu = 0.24-0.32 V/cm^2). Deneysel çalışmada tespit edilmiş 160 değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.44'de görülmektedir. Bu şekilden, maksimum güç yoğunluğu değerinde minimum gerilim yoğunluğu değerinin elde edildiği görülmektedir. 20 ^{o}C'de minimum güç yoğunluğu değeri 0.153 W/cm^2 iken, gerilim yoğunluğu değeri 0,3142 V/cm^2 değeriyle maksimum değerini almıştır. (Şekil 8.44).



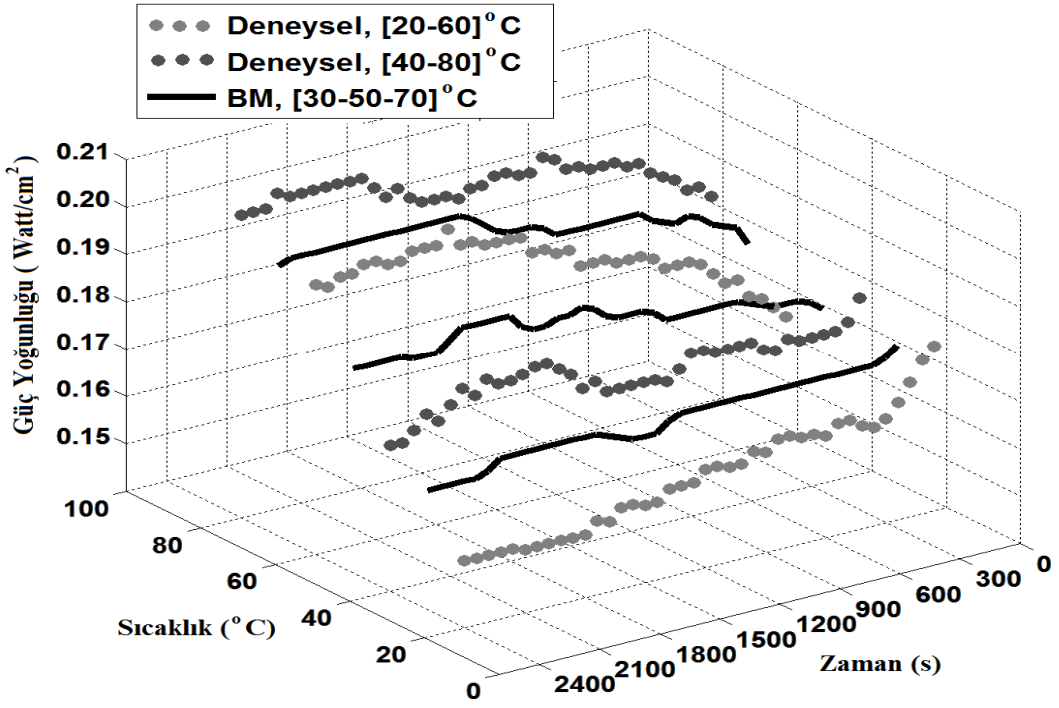
Şekil 8.44. Güç yoğunluğu değerlerinin gerilim yoğunluğu ve sıcaklıkla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Şekil 8.45, güç yoğunluğu değerlerinin akım yoğunluğu ve sıcaklıkla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM modeli ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılmasını göstermektedir (T = 20-80 ^{o}C, akım yoğunluğu = 0.07-0.12 A/cm^2). Deneysel çalışmada tespit edilmiş 160 değer, BM modeli ile de elde edilmiştir. BM model çalışmasının sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında oldukça uyumlu oldukları Şekil 8.45'de görülmektedir. Bu şekilden; güç yoğunluğu ve akım yoğunluğunun sıcaklık değerlerinin artmasıyla artış gösterdiği görülmektedir. 80 ^{o}C'de akım yoğunluğu değeri 0,1248 A/cm^2 ile maksimum değerini alıyor iken güç yoğunluğunun da 0.2065 W/cm^2 değeri ile maksimum noktasına ulaştığı görülmüştür (Şekil 8.45).



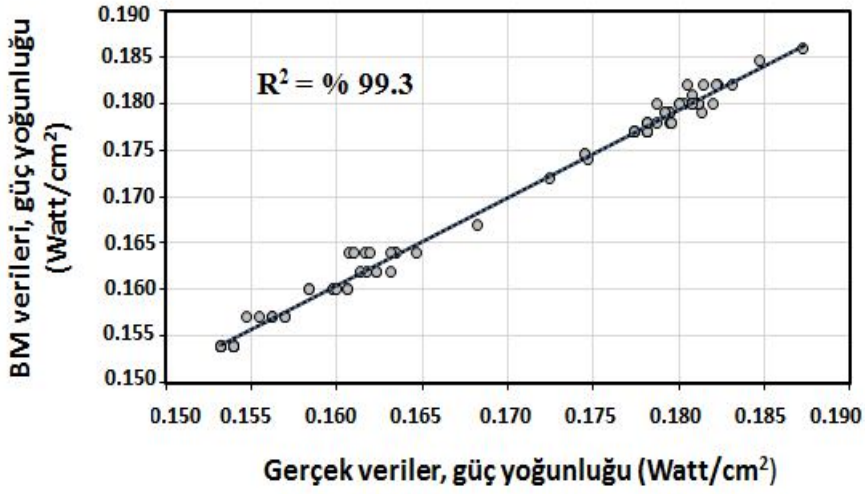
Şekil 8.45. Güç yoğunluğu değerlerinin akım yoğunluğu ve sıcaklıkla değişiminin deneysel çalışma verileri ve BM ile tespit edilen veriler tarafından karşılaştırılması

Şekil 8.46, BM modeli ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin güç yoğunluğu-sıcaklık ve zamana göre değişiminin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu şekile göre; BM modeli tarafından 30 ^{o}C sıcaklık ve 1140 s zaman değeri için tahmin edilen güç yoğunluğu değeri, 20 ^{o}C ve 1140 s zaman değeri için deneysel olarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden daha yüksektir. Fakat 40 ^{o}C ve 1140 s zaman değeri için deneysel olarak elde edilen güç yoğunluğu değerinden daha düşüktür (Şekil 8.46).

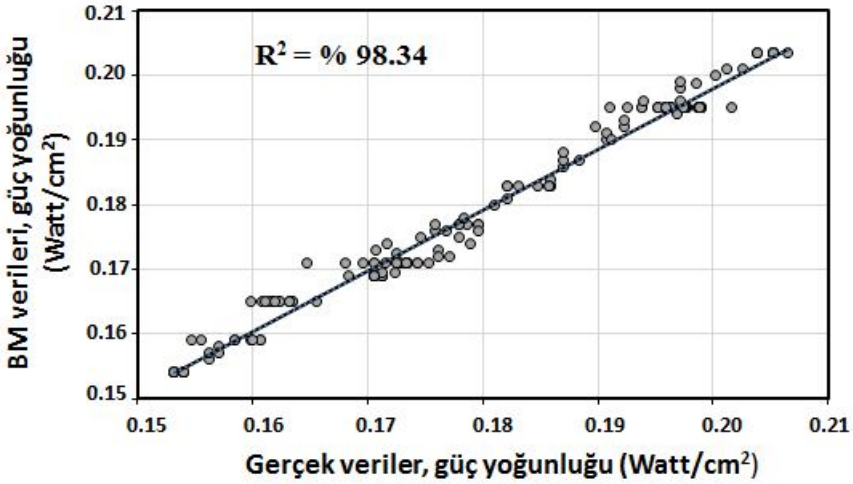


Şekil 8.46. BM model ile tahmin ettirilerek elde edilen değerler ile deneysel verilerin güç yoğunluğu-sıcaklık ve zamana göre değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 8.47 ve 8.48, güç yoğunluğu için gerçek sonuçlar ile BM model sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Kaplanmamış PEM ve YSZ kaplı PEM için güç yoğunluğu R^2 değeri 99,36% olmaktadır. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıklarında belirlenen güç yoğunluğu için R^2 değeri 98,3% olmaktadır. Şekil 8.35 ve 8.36 incelendiğinde, gerçek değerler ve bulanık mantık modeli ile elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 8.47. BM modeli ile tespit edilen değerlerin ve gerçek sonuçların kaplanmamış PEM ve CNT kaplı PEM için güç yoğunluğu değerleri bakımından karşılaştırılması



Şekil 8.48. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıkta BM modeli ile tespit edilen değerlerin ve gerçek sonuçların güç yoğunluğu değerleri bakımından karşılaştırılması.

Analiz sonuçları, YSZ kaplı deşarj sırasındaki PEM yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde bulanık mantık yönteminin kullanılabileceğini göstermektedir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Günümüzde kullanılan yakıtların tükenebilme endişesi ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı zorunlu hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen enerjisine olan ilgi, evrende en çok bulunan element olması, üretilmiş enerjiyi bir yerden başka bir yere taşıması gibi özellikleri nedeniyle artmaktadır. Bu çalışmada hidrojen enerjisini kullanan yakıt hücresi teknolojisi üzerinde durulmuştur.

PEM yakıt hücresinde hidrojen iyonlarının anot tarafından katot tarafına doğru ilerlemesini sağlayan bileşen membrandır. Kimyasal ve mekanik olarak kararlı bir yapıya sahip olması gerekir. Bu kapsamda, yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde en önemli kısmı membran analizi oluşturmaktadır. Grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş hali olan karbon nanotüp çok iyi mekanik dayanım, rijitlik, elektriksel ve ısıl özellikler sergilediği için, membranın anot tarafı spin yöntemiyle karbon nanotüp ile kaplanarak performansı arttırılmıştır.

Bu çalışmada üç farklı deneysel çalışma yapılmıştır. Birinci deneysel çalışma düşük gerilim değerlerinde membran performansının belirlenmesi için yapılmıştır. İkinci ve üçüncü deneysel çalışma aynı gerilim değerlerinde yapılmış olup, iki deney arası belirli bir süre bekleyerek sistemin soğumasının direnç üzerindeki etkisi dolayısıyla performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Membran performansları, birinci deneyde, kaplama öncesi ortalama 0.022 W/cm^2 iken, kaplama sonrası ortalama 0.046 W/cm^2; ikinci deneyde, kaplama öncesi ortalama 0.074 W/cm^2, kaplama sonrası 0.085 W/cm^2; üçüncü deneyde kaplama öncesi ortalama 0.076 W/cm^2, kaplama sonrası 0.1 W/cm^2 değerine ulaşmıştır. Sistem üzerinde oluşan direnç, iki bakımdan incelenmiştir. İlk olarak karbon nanotüp ile kaplanarak hücrenin iletkenliğinin artarak direncin düşmesi bunun sonucunda performansın artmasıdır. İkinci olarak, aynı gerilim değerlerinde belli bir süre aralıkla yapılan deney sonucunda sistemin soğumasının sonucunda direncin düşmesi ve yine aynı şekilde performans artışı gözlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, PEM yakıt hücresi membranının KNT ile kaplanması sonucunda daha verimli bir yakıt hücresine sahip olunabileceği görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda sonuçların elde edilmesinde zaman ve maliyet unsuru, daha önce yapılmış deneylerden elde edilen verilerle genellemeler yaparak, bu genelleme ile daha önce gerçekleştirilmemiş deneylere ilişkin çözümler üretilmesini gerektirmiştir. Bu kapsamda, enerji ayrışımı olayının incelenmesi için hidroksi hücresinin performansının bulanık mantık yöntemi ile modellenmesi üzerine çalışma yapılmıştır. HHO hücresinin belli bir plaka sayısı ve zamandaki değişimin gerilim, akım ve sıcaklık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilmiş veriler üzerinde çalışarak, sistemin bulanık mantık modeli Matlab Fuzzy Logic modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemde bulunan üç çıkış değerinin her biri için oluşturulan 81 kural olmak üzere toplam 243 kural belirlenmiştir. Bu kuralların sisteme aktarılmasıyla, deneysel çalışma ile tespit edilen verilerin bulanık mantık modelinden elde edilen değerler ile çoklu determinasyon katsayısı (R^2) kullanılarak karşılaştırılması yapılmıştır. Gerilim, akım ve sıcaklık için R^2 değerleri sırasıyla %98.29, %99.5 ve %96.47 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra deneysel çalışmalarda tespit edilmeyen ara zaman değerlerine karşılık gelen gerilim, akım ve sıcaklık değerleri, bulanık mantık modeli ile tahmin ettirilmiştir. Aynı şekilde PEM yakıt hücresi membranının KNT ve YSZ ile kaplanması sırasında elde edilen deneysel veriler yardımıyla, o sistemlere ait bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar, HHO hücresinin ve PEM yakıt hücresinin membran performansının belirlenmesinde, bulanık mantık yönteminin başarıyla uygulanabildiğini göstermiştir.

9.2. Öneriler

Fosil yakıtlı kaynakların kullanılmaya devam edilmesi ilerde çok ciddi sorunlara yol açacağı düşünülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda bu enerji kaynaklarının mevcut performanslarının arttırılmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Yakıt hücrelerinin performansının arttırılmasına yönelik yapılan bu çalışma, daha büyük bir hacme sahip yakıt hücresi üzerinde yapılarak yakıt hücresinden elektrik elde etme maliyetinin düşürülmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilebilir.

PEM yakıt hücresinin performansının belirlenmesinde bulanık mantık modelinin uygulanabildiği gösterilmiş, deneysel çalışmalarda zaman ve maliyet unsurunun bu şekilde azaltılacağı vurgulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, bulanık mantık

modelinin uygulanarak hem deneysel çalışmalarda tespit edilmeyen değerlerin tahmin ettirilmesi hem de maliyetin azaltılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Abduljabar, J.S., 2011, Bulanık Mantık Yöntemleri Kullanılarak Gazlı İçeceklerde Karbondioksit Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-23.

Altaş, İ.H., Mengi, O.Ö., 2008, Rüzgar Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin Azaltılması, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008,* İstanbul, 692-698.

Ar, İ., Erşan, K., Tükek, S., Sarıdemir, S., 2003, Laboratuar Şartlarında Geliştirilen ve Denemesi Yapılan Elektrolit - Elektrot Çiftinin Yakıt Pilinde Kullanılarak Paket Haline Getirilmesi Ve İçten Yanmalı Motor İle Karşılaştırılması, *3. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 239-251.

Ata, S., Dincer, K., 2015, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of performance proton exchange membrane fuel cell with carbon nanotube, *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015*, Bulgaria, 487-494. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., 2015, Anot Tarafı Karbon Nanotüp İle Kaplanmış PEM Yakıt Hücresi Performansının Bulanık Mantık Yöntemiyle Modellenmesi, *Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi UHTEK-2015*, İstanbul (Kabul Edildi). (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., 2015, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of performance HHO dry cell, *Neural Computing and Applications* (Submit edildi, Aralık-2015) (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., 2016, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of performance anode side of proton exchange membrane fuel cell with spin method coated with Yttria-Stabilized Zirconia, *18th International Conference on Energy Systems Engineering and Technology*, Paris (Kabul Edildi). (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., Türkel, Y., 2015, Experimental Investigation of Performance Anode Side of PEM Fuel Cell With Electrospin Method Coated With Carbon Nanotube, *International Conference on Energy Systems ICES'15*, İstanbul (Kabul Edildi). (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ay, F., Arslan, M.A., 2010, PEM Tipi Yakıt Hücreleri İçin Grafit-Polimer Kompozit Bipolar Plaka Geliştirilmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (2), 73-79.

Babür, G., 2012, Sol-Jel Yöntemiyle Elde Edilen Bor Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tokat, 24-27.

Barbir, F., 2013, PEM Fuel Cells Theory and Practice, *Elsevier*, USA, 1-12.

Bayrak, S.M., 2011, Proton Değişimli Membran Yakıt Hücresinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-25.

Becker, S., Karri, V., 2010, Predictive models for PEM-electrolyzer performance using adaptive neuro-fuzzy inference systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9963-9972.

Berber, A., Dincer, K., Yılmaz, Y., Ozen, D.N., 2013, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of heating and cooling performances of counter-flow Ranque Hilsch vortex tubes with different geometric construction for steel, *Energy*, 51, 297-304.

Beşergil, B., Hidrojen e-makale, 2009, http://www.bayar.edu.tr/besergil/hidrojen.pdf, [Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2015].

Bhardwaj, S., Verma, A.S., Sharma, S.K., 2014, Effect of Brown Gas On The Performance Of A Four Stroke Gasoline Engine, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 (1), 300-307.

Bıyıkoğlu, A., 2003, Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 523-542.

Bozokalfa, G., 2005, Artificial neural networks and fuzzy logic models for cooling load prediction. Master Thesis, *Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology*, İzmir, 14-23.

Cameron, R., 2012, Effects of on-board HHO and water injection in a diesel generator, Bachelor of Engineering Research Project, *University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying*, 1-5.

Celep, Ş., 2007, Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 79-82.

Chakrapani, K., Neelamegam, P., 2011, Optimization of fuel consumption using HHO in HDL technique verified in FPGA, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 31 (2), 140-145.

Chandesris, M. ve ark., 2015, Membrane degradation in PEM water electrolyzer: Numerical modeling and experimental evidence of the influence of temperature and current density, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 1353-1366.

Çelik, S., 2009, Doğrudan Metanollu Yakıt Pilinde İki Fazlı Akışın Nümerik İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 25-32.

Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., 2003, Yakıt Pilleri, http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/11920.pdf, [Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2015].

Çınar, E., 2013, Hidrolik Silindirin Bulanık Mantık Yöntemi ile Konum Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 36-42.

Çobanoğlu, B., 2000, Bulanık Mantık ve Bulanık Küme Teorisi, *Niksar MYO Ders Notları,* 25-35.

Devrim, Y., Albostan, A., 2015, Enhancement of PEM fuel cell performance at higher temperatures and lower humidities by high performance membrane electrode assembly based on Nafion/zeolite membrane, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-8.

Devrim, Y., Devrim, H., 2015, PEM fuel cell short stack performances of silica doped nanocomposite membranes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 7870-7878.

Devrim, Y., Erkan, S., Baç, N., Eroğlu, İ., 2009, Nafion/TiO2 Nanokompozit Membranların PEM Yakıt Pili Performansları Üzerine TiO2 Miktarının Etkisi, *IV Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi ve Sergisi*, Kocaeli.

Dincer, K., 2013, HHO Hücresinin Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergi*, 12 (3), 66-75.

Dincer, K., 2014, PEM Yakıt Hücresinin Katod Tarafı Performansının Geliştirilmesi, *Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergi*, 13 (2), 38-48.

Dincer, K., Şahin,O., Yayla, S., Avcı,A., 2014, Anot Tarafı Elektrospin Metodu ile YSZ+SDC+NaCaNiBO ile Kaplanmış PEM Yakıt Hücresinin Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergi*, 13 (1), 12-23.

Dincer, K., Taşdemir, Ş., Başkaya, Ş., Uysal, B.Z., 2007, Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpün Performansına Tapa Açısı Etkisinin Bulanık Mantık Yöntemi İle Modellenmesi, ULIBTK'07, *16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Kayseri.

Dinç, H., 2013, Polivinil Borat Sentezi, Elektrospin Yöntemiyle Nanofiber Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 22-28.

Dinçer, M.Z., Aslan, Ö., 2008, Sürdürülebilir Kalkınma, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Hidrojen Enerjisi: Türkiye Değerlendirmesi, *İstanbul Ticaret Odası*, İstanbul, 23-30.

Elmas, Ç., 2011, Yapay Zeka Uygulamaları, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 185-250.

Erdener, H. ve ark., 2013, Sürdürülebilir Enerji ve Hidrojen, *ODTÜ Yayıncılık,* Ankara, 23-65.

Ergun, D., Devrim, Y., Baç, N., Eroğlu, İ., 2010, Yüksek Sıcaklık PEM Yakıt Pilleri için Polibenzimidazole Membranların Hazırlanması ve Performanslarının Belirlenmesi, *Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, UKMK 2010*, Ankara.

Ersoyoğlu, A.S., Dincer, K., Yayla, S., Saygılı, D., 2014, Experimental Investigation Of Membrane Performance, *International Science Index*, 8 (8), 356-359.

Ertunç, H.M., 2012, Bulanık Mantığa Giriş, *Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Ders Notu*, 6-30.

Evcin, A., 2006, Kaplama Teknikleri, *Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Ders Notları*, 9-10.

Fan, L., Liu, Y., 2012, Fuzzy Logic Based Constant Power Control of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *Shenyang University of Chemical Technology*, 88, 72-75.

Fettah, S., 2010, Katı Oksit Yakıt Pilinin Atık Isısından Elektrik Enerjisi Üretim Sisteminin Deneysel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-20.

Gao, D., Jin, Z., Lu, Q., 2008, Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus, *Journal of Power Sources*, 185, 311-317.

Gelen, A., 2012, Yakıt Pillerinin Enerji Sistemlerindeki Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 5-7.

Göksu, A., 2008, Bulanık Analitik Hiyerarşik Proses ve Üniversite Tercih Sıralamasında Uygulanması, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Isparta, 5-15.

Gözütok, B., 2007, Poli Bazlı Membranların Yakıt Hücrelerine Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-30.

Güder, A., PEM Yakıt Pili, 2015, https://www.academia.edu/6656160/PEM_Yakit_Pili [Ziyaret Tarihi: 25 Kasım 2015].

Gülcan B., 2012, Bulanık Doğrusal Programlama ve Bir Bisküvi İşletmesinde Optimum Ürün Formülü Oluşturma, Yüksek Lisans Tezi, *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Karaman, 32-38.

Güvendiren, M., Öztürk, T., 2003, Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/9f3cd308f1455b3_ek.pdf?dergi=53 [Ziyaret Tarihi: 25 Eylül 2015].

Hasgül, Ö., Anagün, A.S., 2005, Deneysel Sonuçların Analizinde Yapay Sinir Ağları Kullanımı ve Beton Dayanım Testi İçin Bir Uygulama, *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul, 133-139.

İbrahimoğlu, B., 2008, Hidrojenli Enerji Üreteçleri, *Nobel Yayın*, Ankara, 155-158.

İçingür, Y., Kireç, L., 2009, Taşıtlar İçin Alternatif Enerji Sistemi Olan Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili Yapımı-Prototip Tasarımı ve Parametrik Olarak İncelenmesi, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük.

Jang, J.H., Yan,W.M., Li, H.Y., Chou, Y.C., 2006, Humidity of reactant fuel on the cell performance of PEM fuel cell with baffle-blocked flow field designs, *Journal of Power Sources*, 159 (1), 468-477.

Kahraman, H., Çevik, I., Coşman, S., 2014, Sıkıştırma Basıncının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi, *2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 1008-1015.

Kahveci, E.E., Taymaz, İ., İşletme Parametrelerinin PEM Tipi Yakıt Pili Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *7.Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON'14*, Bursa.

Kalaycı, T.E., 2006, Yapay Zeka Teknikleri Kullanan Üç Boyutlu Grafik Yazılımları İçin X3D İle Bir Altyapı Oluşturulması ve Gerçekleştirimi, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 66-68.

Kalender, E., 2011, Performance Assessment of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack By Means of Semi-Empirical Model, Master Thesis, *Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology*, İzmir, 5-11.

Karakuzu, C., 2006, Bulanık Modelleme ve Akıllı Denetim, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ders Notu*, 1-10.

Karvonen, S., 2011, Modelling approaches to mass transfer and compression effects in polymer electrolyte fuel cells, Doctoral dissertation, *Aalto University School of Science,* Finland, 18-22.

Kashyap, D.S., Kishor, M., 2012, Fuel Cell Distributed Generation Systems Using Fuzzy Logic Control, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2 (3), 776-782.

Kaya, D., Öztürk, H.H., 2012, Yakıt Pili Teknolojisi, *Umuttepe Yayınları*, Kocaeli, 7-49.

Kellegöz, M., 2005, Farklı Özelliklerdeki Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi Tasarımı ve Ölçümleri, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 4-17.

Keshwani, D.R., Jones, D.D., Meyer, G.E., Brand, M., 2008, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of skin permeability, *Applied Soft Computing*, 8, 285-294.

Kıyak, E., Kahvecioğlu, A., 2003, Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Probleminin Uygulanması, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1 (2), 63-72.

Kim, Y., Kim, S., 1999, An Electrical Modeling and Fuzzy Logic Control of a Fuel Cell Generation System, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (2), 239-244.

Küçükyıldırım, B.O., Eker, A.A., 2012, Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları, *Mühendis ve Makina*, 53 (630), 34-44.

Langemann M. ve ark., 2015, Validation and characterization of suitable materials for bipolar plates in PEM water electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11385-11391.

Larminie, J. ve Dicks, A., 2003, Fuel Cells Systems Explained, *Wiley*, England, 5-10.

Lee, A.H.I. ve ark., 2008, A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan, *Expert Systems with Applications,* 34, 96-107.

Leelakrishnan, E., Lokesh, N., Suriyan, H., 2013, Performance and emission characteristics of Brown's gas enriched air in spark ignition engine, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2 (2), 393-404.

Madyira, D., Harding, W., 2014, Effect of HHO on four stroke petrol engine performance, *9th South African Conference on Computational and Applied Mechanics*, Somerset West.

Mammar, K., Chaker, A., 2009, Fuzzy logic -based control of power of PEM fuel cell system for residential application, *Leonardo Journal of Sciences*, 14, 147-166.

Mammar, K., Chaker, A., 2009, Modelling and Fuzzy Logic Control of PEM Fuel Cell System Power Generation For Residential Application, *Journal of Electrical&Electronics Engineering*, 9 (2), 1073-1081.

Mat, A., 2011, Katı Oksit Yakıt Pilleri İçin İletken Pasta Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 4-10.

Mennola, T., 2004, Mass Transport In Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Using Natural Convection For Air Supply, Doctoral Thesis, *Helsinki University of Technology*, Espoo, 19-20.

Mepsted, G.O., Moore, J.M., 2003, Performance and durability of Bipolar plate materials, Handbook of Fuel Cells Fundamentals, Technology and Applications, 3, Wolf vielstich, Hubert A. Gasteiger, Arnold Lamm, *John Wiley & Sons Ltd.*, 286-293

Önal, G., Dincer, K., Yayla, S., 2014, Experimental Investigation of Performance Anode Side of PEM Fuel Cell With Spin Method Coated With YSZ+SDC, *International Science Index*, 8 (8), 352-355.

Özek, A., Sinecen, M., 2004, Klima Sistem Kontrolünün Bulanık Mantık İle Modellemesi, *P.Ü. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (3), 353-358.

Petrach, E., Abu-Isa, I., Wang, X., 2009, Investigation of Elastomer Graphite Composite Material for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plate, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 6 (031005), 1-6.

Sakthıvel, S., 2014, An experimental assessment of performance and exhaust emission characteristics by addition of hydroxy (HHO) gas in twin cylinder C.I. engine, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (2), 60-65.

San, FGB. ve ark., 2001, Hidrojen Yakıt Pilleri Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamalar ve Geleceği, *Marmara Araştırma Merkezi Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü*, Proje No: 5015403, 33-50.

Sarıdemir, S., Erşan, K., 2010, Farklı İki Destek Maddesi İle Elde Edilen Membranların PEM Yakıt Pilinde Test Edilmesi, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 (3), 29-35.

Shakhawat, C., Tahir, H., Neil, B., 2006, Fuzzy rule-based modelling for human health risk from naturally occurring radioactive materials in produced water, *Journal of Environmental Radioactivity*, 89, 1-17.

Sherif, S.A., Barbir, F., Veziroğlu, N., 2005, Towards a Hydrogen Economy, *The Electricity Journal*, 18 (6), 62-70.

Sönmezoğlu, Ş., Koç, M., Akın, S., 2012, İnce Film Üretim Teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (5), 389-401.

Şahin, O., 2014, PEM Yakıt Hücresi Membranının Geliştirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 3-10.

Şeker, S., 2011, Memeli Hücrelerinin Farklı Substrat Yüzeyler Üzerine Adezyonunun Kuartz Kristal Mikrobalans Sistemi ile Eş-Zamanlı Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 29-30.

Şenol, R., Üçgül, İ., Acar, M., Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, *Mühendis ve Makine,* 47 (563), 42-45.

Taner, T., Eroğlu, L., 2008, Geleceğin Enerjisi Proton Değişimli Membran Yakıt Pilinde Su Yönetiminin Önemi, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008,* İstanbul, 735-741.

Tektaş, M., 2010, Web Tabanlı Yapay Zeka Teknikleri Eğitim Simülatörlerinin Hazırlanması, *Marmara Üniversitesi BAP Komisyonu Başkanlığı Proje Raporu,* 76-90.

Tiryaki, A., Kazan, R., 2007, Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık İle Modellenmesi, *Mühendis ve Makine*, 48 (565), 3-8.

Tong, S.W., Qian, D.W., Fang, J.J., Li, H.X., Integrated Modeling and Variable Universe Fuzzy Control of a Hydrogen-Air Fuel Cell System, *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 3636-3652.

Tosun, M., Dincer, K., Baskaya, S., 2011, Rule-based Mamdani-type fuzzy modelling of thermal performance of multi-layer precast concrete panels used in residential buildings in Turkey, *Expert Systems with Applications*, 38, 5553-5560.

Tosun, M.,Dincer,K.,Baskaya, S.,Rule based Mamdani-type fuzzy modelling of thermal performance of wall types most used in residential buildings in Turkey, *10th International Multidisciplinary ScientificGeoconference SGEM 2010*, Bulgaria, 331-335.

Ural, Z., 2007, Yakıt Pilleri ve Bir Pem Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 16-22.

Uslu, İ., Yüzey İşlemleri, 2013, https://www.academia.edu/3112381/Y%C3%BCzey_%C4%B0%C5%9Flemleri [Ziyaret Tarihi: 2 Kasım 2015].

Üstündağ, C.B., 2011, Karbon Nanotüp Takviyeli Biyoaktif Seramik Tozlarının Sentezi, Karakterizasyonu ve Tİ-6AL-4V Alaşımı Üzerine Kaplanması, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 29-35.

Wee, J. ve Lee, K., 2006. Overview of the development of CO-tolerant anode electrocatalysts for proton-exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 157, 128–135.

Yadav, M.S, Sawant S.M., 2011, Investigations on oxyhydrogen gas and producer gas as alterntive fuels on the performance of twin cylinder diesel engine, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2 (2), 85-98.

Yann, M., Chen, Y., Sheng, M., Soong, Y., Chen, F., 2006, Effects of operating conditions on cell performance of PEM fuel cells with conventional or interdigitated flow field, *Journal of Power Sources*, 162 (2), 1157-1164.

Yetim, A., 2011, Karbon Nanotüpler, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 1-10.

Yıldırım, Y., 2011, Yakıt Pilleri, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ders Notları*, 25-30.

Yıldız, Ş., Kişoğlu, S., 2011, Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Hazır Giyimde Beden Numarası Belirleme, e-Journal of New World Sciences Academy, 6 (1), 12-22.

Yıldızbilir, F., 2006, Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 19-39.

Yılmaz, A., Ayan, K., 2013, Cancer risk analysis by fuzzy logic approach and performance status of the model, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 21, 897-912.

Yılmaz, B., 2006, Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri İçin Anot Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-17.

Yılmaz, Y., Dincer, K., Saygılı, D., 2014, Performance Improvement of The Nano-Composite Based Proton Exchange Membranes (PEMs), *International Science Index*, 8 (8), 347-350.

Yılmaz, Z., Ocak, Ş., 2008, Bulanık Mantık ile Aneminin Belirlenmesi, *1.Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Ankara, 375-378.

Yuan, X.Z., Song, C., Wang, H., Zhang, J., 2010, Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells, *Springer*, New York, 4-11.

Yumuşak, N., Ekmekçi, D., 2011, Bulanık Mantıklı Sürücü Modeli ile Hız Tahmini ve En Kısa Yol Belirleme, *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 217-220.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sadık ATA
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Tokat - 17.03.1989
Telefon : +905072930387
e-mail : atasadik@gmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lisans	:	Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Yenişehir, Mersin	2013
Lisans	:	Anadolu Üniversitesi, İşletme, Eskişehir	2014
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Selçuklu, Konya	2015

UZMANLIK ALANI

PEM Yakıt Hücresi, Bulanık Mantık Modeli

YABANCI DİLLER

İngilizce YDS:75

YAYINLAR

Ata, S., Dincer, K., 2015, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of performance HHO dry cell, *Neural Computing and Applications* (Submit edildi, Aralık-2015) (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., 2015, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of performance proton exchange membrane fuel cell with carbon nanotube, *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015*, Bulgaria, 487-494. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., 2015, Anot Tarafı Karbon Nanotüp İle Kaplanmış PEM Yakıt Hücresi Performansının Bulanık Mantık Yöntemiyle Modellenmesi, *Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi UHTEK-2015*, İstanbul (Kabul Edildi). (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., Türkel, Y., 2015, Experimental Investigation of Performance Anode Side of PEM Fuel Cell With Electrospin Method Coated With Carbon Nanotube, *International Conference on Energy Systems ICES'15*, İstanbul (Kabul Edildi). (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Ata, S., Dincer, K., 2016, Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of performance anode side of proton exchange membrane fuel cell with spin method coated with Yttria-Stabilized Zirconia, *18th International Conference on Energy Systems Engineering and Technology*, Paris (Kabul Edildi). (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)