

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT SİSTEMLERDE  
ENERJİ YÖNETİMİ VE OPTİMİZASYONU

BÜLENT URUL

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİMDALI

MALATYA-2012

**Tezin Başlığı** : Hibrit Sistemlerde Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu

**Tezi Hazırlayan** : Bülent URUL

**Sınav Tarihi** : 12.01.2012

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değeriendirilerek Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jürisi Üyeleri**

Doç. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI (Başkan) .....

Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ (Danışman) .....

Doç. Dr. Müslüm ARKAN .....

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Asım KÜNKÜL

## **ONUR SÖZÜ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan, “Hibrit Sistemlerde Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Bülent URUL

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### HİBRİT SİSTEMLERDE ENERJİ YÖNETİMİ VE OPTİMİZASYONU

Bülent URUL

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Anabilim Dalı

xi+61 Sayfa  
2012

Danışman: Yrd. Doç.Dr. Asım KAYGUSUZ

Petrol rezervlerinin azalması ve global ısınmanın artması, ulaşım için gerekli olan enerjinin üretimi için başka kaynaklardan yararlanmayı ve yeni çözümler aramayı teşvik etmektedir. Yakıt hücresi (YH) sistemleri, taşıt enerji sistemleri için yenilenebilir enerji kullanması ve çevreye dost olması sebebiyle, uygun bir çözüm olduğu düşünülmektedir. Ancak araç tahriki için, YH sisteminin tek başına kullanılması, tüm yük taleplerini özellikle yüksek güç taleplerini karşılamak noktasında yeterli olmayabilir. Ayrıca tek başına YH kullanımı, sistemin hacim ve maliyetini arttıracaktır. Ek olarak, YH sistemi, bir yenilenebilir enerji kaynağı olan frenleme enerjisinin geri kazanımı yeteneğine sahip değildir. Dahası YH'nin anlık aşırı yük talebi esnasında tek başına kullanılması, YH'nin en önemli alt elemanı olan membranda nemlenme eksikliği veya aşırı nemlenmeye neden olmaktadır. Bu problemleri çözmek için, YH sisteminin, çabuk şarj olma ve yüksek güç yoğunluğu özelliklerine sahip bir enerji depolama sistemiyle beraber hibrit olarak kullanılması gerekmektedir. Ayrıca sistemin bir kontrol metoduyla kontrolü, sistem performansını arttıracak ve enerji kazanımı sağlamış olacaktır.

Bu tez, YH ve bir enerji depolama sisteminin hibrit olarak kullanımı ve en iyi verimi almak için bulanık mantık kontrol kullanılarak, sistemin

optimizasyonunun sağlanmasını ele almaktadır. Enerji depolama sistemi için, yüksek güç yoğunluğuna sahip ve çabuk şarj olabilen ultrakapasitör (UK) sistemi ve kontrol metodu olarak bulanık mantık tercih edilmiştir. YH/UK hibrit sisteminin matematiksel modeli ve bilgisayar ortamında benzetimi yapılmış ve bulanık mantık kullanılarak sistemin optimizasyonu sağlanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Yakıt Hücresi Sistemi, Ultrakapasitör, Bulanık Mantık, Yenilenebilir Enerji Kaynakları

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **ENERGY MANAGEMENT AND OPTIMIZATION IN HYBRID SYSTEMS**

Bülent URUL

Inonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electric-Electronic Engineering

xi+61 Pages

2012

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Decline in petroleum reserves and increase in global warming encourage to benefit from other sources and seeking new solutions to produce transportation energy requirements. Fuel cell (FC) systems are expected to become an applicable solution for vehicular applications since they use renewable fuel and are environment friendly. However, using only a FC system for vehicle propulsion may not be sufficient to satisfy all the load demands, especially during high power demands. Besides, standalone using of FC system would increase the size and cost of the FC system. In addition, FC systems are not capable of recovering the braking energy that is renewable. Moreover, using FC system alone during high power demand may cause insufficient humidification or flooding problems in fuel cell membrane, which is the most important component of a FC system. To resolve these problems, FC must be used with a proper energy storage unit, which can be charged rapidly and has high power density. Also, using a control method will increase system performance and provide energy gain.

This thesis deals using FC and an energy storage unit together and providing optimization of system with a control method to obtain best efficiency. For energy storage system, ultracapacitor (UK) system was preferred that has high power density and can be charged rapidly and for the control method,

fuzzy logic controller was preferred. The mathematical model and simulation of FC/UK was carried out on computer environment and the optimization of system was executed with fuzzy logic.

Keywords : Fuel Cell system, Ultracapacitor, Fuzzy Logic, Renewable Energy Sources

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının her aşamasında yardımlarını, öneri ve desteğini benden esirgemeyen, karar vermekte zorlandığım anlarda beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ'a;

Kaynak ve program konusunda yardımlarıyla bana destek olan Sayın Doç. Dr. Mehmet UZUNOğLU'na, Yrd. Doç. Dr. Bülent VURAL'a ve Ozan ERDİNÇ beye;

Özellikle İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans çalıőmalarım süresince de bana destekleriyle güç veren değerli aileme ve eőime

teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vi
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	viii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	3
2.1. Elektrikli Araç Teknolojisinin Tarihine Bir Bakış .....	3
2.2. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması .....	5
2.2.1. Sadece Elektrik Motoru Kullanan Elektrikli Araçlar .....	5
2.2.2. İçten Yanmalı Motor ve Elektrik Motoru Kullanan Elektrikli Araçlar.....	7
2.2.2.1. İçten Yanmalı Motor ve Elektrik Motoru Kullanan Elektrikli Araç Tipleri .....	8
2.2.2.1.1. Seri Hibrit Araçlar .....	8
2.2.2.1.2. Paralel Hibrit Araçlar .....	9
2.2.2.1.3. Seri-Paralel Hibrit Araçlar.....	10
2.2.3. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar.....	11
2.2.3.1. Yakıt Hücresi Teknolojisi.....	11
2.2.3.1.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri.....	15
2.2.3.2. UltraKapasitör Teknolojisi.....	17
2.2.3.3. Bulanık Mantık.....	19
2.2.3.3.1. Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları.....	20
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	25
3.1. Hibrit Sistem Konfigürasyonu.....	25
3.2. Sürüş Çevrimi.....	27
3.3. YH'nin Modellemesi.....	30
3.4. Ultrakapasitör Sisteminin Modellenmesi.....	34

3.5.	Hibrit Sistemin Enerji Yönetim Stratejisi için Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Sistemi.....	39
3.6.	Dalgacık dönüşümü.....	44
3.7.	Güç düzenleme ünitesi.....	45
<b>4.</b>	<b>ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>46</b>
<b>5.</b>	<b>TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>57</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>58</b>
	ÖZGEÇMİŞ.....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR

ECE-15	Avrupa standart şehir içi sürüş çevrimi
PDMYH	Proton değişim membranlı yakıt hücresi
P-YH-ref	Yakıt hücresi referans güç sinyali
P-YH-talep	Yakıt hücresinden talep edilen güç değeri
SOC	Ultrakapasitörün şarj seviyesi
UDDS	Standart şehir içi sürüş çevrimi
UK	Ultrakapasitör
YH	Yakıt hücresi
A	Aktivasyon alanı [ $\text{cm}^2$ (hücre <sup>-1</sup> )]
B	Konsantrasyon kayıplarının modellenmesinde kullanılan sabit [V]
C	Kapasite [F]
$C_{O_2}$	Çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu
$E_{Nerst}$	Nernst anlık gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [ $\text{C (kmol)}^{-1}$ ]
I	Akım [A]
J	Akım yoğunluğu [ $\text{A (cm)}^{-2}$ ]
L	Endüktans [H]
$N_s$	Yakıt hücresi yığınındaki seri hücre sayısı
$N_p$	Yakıt hücresi yığınındaki paralel hücre sayısı
$P_{H_2}$	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
$O_{H_2}$	Oksijen kısmi basıncı [atm]
$q_{H_2}$	Yük değişimini karşılamak için gerekli olan hidrojen akış miktarı [ $\text{kmol (sn)}^{-1}$ ]
$r_m$	Nafion proton değişimli membranın öz direnci [ $\Omega (\text{cm})^2 \text{m}^{-1}$ ]
R	Direnç [ $\Omega$ ]
T	Sıcaklık [ $^{\circ}\text{K}$ ]
V	Gerilim [V]
$\lambda$	Yakıt hücresi membranındaki su içeriği
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	Aktivasyon gerilim düşümünün modellenmesinde kullanılan sabitler

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	1901 yılında geliştirilen ve elektrik motoru ile tahrik edilen bir taksinin görünümü.....	3
Şekil 2.2.	Sadece elektrik motoru kullanan araç modeli.....	6
Şekil 2.3.	Seri Hibrit Araç Konfigürasyonu.....	9
Şekil 2.4.	Paralel Hibrit Araç konfigürasyonu.....	10
Şekil 2.5.	Seri/Paralel Hibrit Araç Konfigürasyonu.....	10
Şekil 2.6.	Yakıt hücreli bir elektrikli araç modeli.....	11
Şekil 2.7.	PDM yakıt hücresinin yapısı.....	12
Şekil 2.8.	Proton değişim membranlı yakıt hücreli Toyota FCHV.....	14
Şekil 2.9.	UK'nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı.....	17
Şekil 2.10.	UK'nın yapısında yer alan nano boyutlardaki yüzeysel elektrotlar.....	18
Şekil 2.11.	Sayıların Komşuluğu.....	21
Şekil 2.12.	(-5,-11) Kümesinin Komşuluğu.....	23
Şekil 2.13.	Yamuk Sayı Komşuluğu.....	23
Şekil 3.1.	Hibrit Sistem Konfigürasyonu.....	26
Şekil 3.2.	UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.....	27
Şekil 3.3.	UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.....	28
Şekil 3.4.	ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi .....	29
Şekil 3.5.	ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.....	30
Şekil 3.6.	YH dinamik modeli.....	34
Şekil.3.7.	UK benzetim modelinin geliştirilmesinde yararlanılan Eşdeğer devre.....	36
Şekil 3.8.	430 F, 16.2 V ve 23 °C parametrelerine sahip 3 A'lık akım için UK'nın çıkış gerilimindeki değişim.....	38
Şekil 3.9.	UK Dinamik Modeli.....	38
Şekil 3.10.	Bulanık Mantık Kontrol Yapısı.....	39
Şekil 3.11.	Ece-15 Sürüş Çevrimi için P-YH-Ref Üyelik Fonksiyonu.....	41

Şekil 3.12.	Ece-15 Sürüş Çevrimi için SOC Üyelik Fonksiyonu.....	41
Şekil 3.13.	Ece-15 Sürüş Çevrimi için P-YH-Talep Üyelik Fonksiyonu.....	41
Şekil 3.14.	Ece-15 Sürüş Çevrimi Çıkış Yüzeyleri Üyelik Fonksiyonu.....	43
Şekil 3.15.	Dalgacık Dönüşümü ile elde edilen ECE-15 için güç ayrışımı.....	44
Şekil 3.16.	YH'ye ait tek yönlü DC/DC dönüştürücü.....	45
Şekil 3.17.	UK'ya ait çift yönlü DC/DC dönüştürücü.....	45
Şekil 4.1.	Hibrit Sistem Matlab/Simulink Modeli.....	47
Şekil 4.2.	ECE-15 sürüş çevrimi için YH yığın geriliminin değişimi.....	48
Şekil 4.3.	ECE-15 sürüş çevrimi için sadece YH kullanılması durumunda YH yığın geriliminin değişimi.....	49
Şekil 4.4.	Yük paylaşım algoritması ve bulanık mantık kontrolör olmaması durumunda YH yığın gerilimi değişimi.....	50
Şekil 4.5.	ECE-15 sürüş çevrimi için YH dönüştürücü çıkışına ait güç değişimi.....	51
Şekil 4.6.	Tek başına YH sistemi kullanılması durumunda YH çıkışına ait güç değişimi.....	51
Şekil 4.7.	UK' ya ait dönüştürücü çıkışındaki güç değişimi.....	52
Şekil 4.8.	Sistemden yük paylaşım algoritması ve kontrolörün çıkartılması durumunda UK' ya ait dönüştürücü çıkışındaki güç değişimi.....	53
Şekil 4.9.	YH/UK sisteminde bulanık mantık kontrolör devrede iken UK'nın şarj seviyesi değişimi.....	54
Şekil 4.10.	YH/UK sisteminde bulanık mantık kontrolörün devreden çıkartılması ile UK 'nın şarj seviyesi değişimi.....	54
Şekil 4.11.	DC bara gerilimi değişimi.....	55
Şekil 4.12.	Hidrojen akış miktarı değişimi.....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Yakıt Hücresi Türleri.....	16
Çizelge 2.2. Kurşun Asit Batarya ve Ultrakapasitörün Bazı Değerleri.....	19
Çizelge 2.3. Bulanık mantık örneği için sonuç çıktıları.....	24
Çizelge 3.1. UDDS sürüş çevriminin özellikleri.....	28
Çizelge 3.2. ECE-15 sürüş çevriminin özellikleri.....	29
Çizelge 3.3. Bulanık Mantık kural tabanı.....	42
Çizelge 4.1. YH parametreleri.....	46

## 1.GİRİŞ

Dünyamızda gittikçe gelişen teknoloji ve ülkeler beraberinde artan araç sayısını getirmektedir. Dolayısıyla ulaşım için artan araç sayılarına paralel olarak daha fazla yakıt tüketimi ve daha fazla hava kirliliği ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber dünyada petrol rezervleri tükenmekte ve ülkeler arası savaşlara dahi neden olmaktadır. Bu enerji kaynaklarının sınırlı oluşu ve bir gün biteceği düşüncesi insanları alternatif enerji kaynaklarına ve çözümlerine götürmektedir. Günümüzde bu problemlerin ortaya çıkması, araç sistemleri üzerinde de etkisini göstermiş ve elektrikli araçların popülerliğini arttırmıştır.

Elektrikli araçlar son yıllarda otomobil sektöründeki altyapı çalışmalarını temel ölçüde bitirmiştir. Seri üretime ise birçok otomobil şirketi geçmiştir. Bilhassa hibrit elektrikli araçların, önümüzdeki on yıl içerisinde tüm araç sınıflarında ağırlıklı olarak tercih edileceği düşünülmektedir. Ayrıca güç elektroniğinin ve batarya sistemlerinin gelişimiyle daha verimli ve çevreye çok daha duyarlı teknolojilerin ortaya çıktığı gözükmemektedir. Bunların başında da YH (Yakıt Hücre) sistemleri gelmektedir. YH sistemleri, alternatif enerji kaynağı olarak önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Özellikle YH/UK (Yakıt Hücre-Ultrakapasitör) temelli hibrit güç sistemleri, araç uygulamalarının yüksek enerji ve yüksek güç ihtiyaçlarını karşılamak için gelecek vaat eden ve içten yanmalı motorlar yerine kullanılacak sistemler olarak görülmektedirler [1]. Bunun yanında birçok uygulamada kullanılan ve deneysel çalışmalarda denenmiş proton değişim membranlı (PDM) YH sistemi, birçok avantajından dolayı günümüz şartlarında en iyi YH sistemi olarak düşünülmektedir [2].

YH sisteminin birçok avantajına rağmen taşıt sistemlerinde tek başına kullanılması bazı dezavantajları beraberinde getirmektedir. Yakıt hücreleri yüksek güç taleplerine maruz kaldığı zaman YH'de çok nemlenme veya hiç nemlenmeme problemleri ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucunda da YH'nin ömrü kısalmakta ve yüksek güç taleplerine karşılık verememektedir. Ayrıca YH'nin frenleme enerjisini depo etme özelliği yoktur. Bu yüzden YH sisteminin yüksek güç yoğunluğuna sahip UK sistemleri ile beraber kullanımı hem araç performansı hem de YH'nin ömrü noktasında avantajlı olmaktadır.

Yapılan bu tez çalışmasının düzeni şu şekilde kurgulanmıştır: 2. bölüm olan kuramsal temeller kısmında elektrikli araç teknolojisi ve çeşitlerinden

bahsedilmiştir. Ayrıca yine bu bölümde YH'li elektrikli araçların bünyesinde bulundurduğu YH teknolojisi, UK teknolojisi ve bulanık mantık teorisinden bahsedilmektedir. 3. bölümde YH/UK hibrit sistem konfigürasyonu, YH ve UK'nın modellenmesi, ayrıca hibrit sistemin enerji yönetim stratejisi için kullanılan bulanık mantık kontrolör yapısı ve dalgacık dönüşümü anlatılmaktadır. 4. Bölümde ise YH/UK hibrit sisteminin benzetim sonuçları ve bu sonuçların yorumlanması yer alırken, 5. bölümde çalışmanın sonuçları verilmektedir.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

Literatürde genellikle elektrikli araç kavramı üç farklı grup altında incelenmektedir. Bunlar sırası ile sadece elektrik motoru kullanan elektrikli araçlar, elektrik ve içten yanmalı motor kullanan hibrit elektrikli araçlar ve yakıt pilli elektrikli araçlardır. Bu bölümde en sık kullanılan elektrikli araç teknolojilerinden bahsedilecektir.

### 2.1. Elektrikli Araç Teknolojisinin Tarihine Bir Bakış

19. yüzyılın sonunda elektriğin keşfinden sonra, elektrikle çalışan ilk motorlu araçlar ortaya çıkmıştır. Elektrikle çalışan motorların tarihi, içten yanmalı motorlarla yaklaşık olarak aynı yıllara aittir. O yıllarda petrol rezervlerinin yeterli olması, içten yanmalı motorların uzun menzilli olması, yakıtın kolay bulunması ve çevre tehdidinin göz önüne alınmaması nedeniyle, içten yanmalı motorlar elektrikli motorlara göre daha fazla tercih edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı elektrikli motorların gelişimi büyük bir oranda duraklamıştır.

Yine aynı yıllarda şarj edilebilir bataryaların gelişmesi ile birlikte hususi taşıt, taksi, vb. gibi elektrikli taşıt sistemlerinde büyük bir kullanım alanına sahip olmuşlardır [3]. Şekil 2.1’de, 1901 yılında geliştirilen ve elektrik motoru ile tahrik edilen bir taksinin fotoğrafı görülmektedir.



**Şekil 2.1.** 1901 yılında geliştirilen ve elektrik motoru ile tahrik edilen bir taksinin görünümü [4]

Bu dönemlerde, elektrikli taşıt sistemleri, içten yanmalı motorlarla ve buhar sistemleriyle tahrik edilen taşıtlarla kıyaslandığında performans, güvenilirlik ve verimlilik açısından oldukça ileri bir konumda bulunmaktaydı. 1920'li yıllara gelindiğinde otobüs, taksi, hususi taşıt, yük taşıtı, vb. olarak kullanılmak üzere yüz binlerce elektrikli taşıt ticari olarak üretilmişti [4]. Ancak bu dönemde petrolün oldukça ucuz olması ve buna bağlı olarak da, yeni geliştirilen içten yanmalı motorların, taşıtların tahrik edilmesinde daha cazip ve ekonomik bir çözüm sunması, içten yanmalı motorlu taşıtlara olan ilgiyi önemli oranda arttırmıştır. Ayrıca üretilen elektrikli taşıtların menzilin az olması da içten yanmalı taşıtların önemini artırmıştır. İçten yanmalı motorlu taşıtlara olan ilginin artmasının diğer bir nedeni de içten yanmalı motorlarda kullanılan petrolün özgül enerjisinin, bataryaların özgül enerjisine kıyasla oldukça yüksek olmasıdır. Burada bahsi geçen özgül enerji, kilogram başına depolanabilen enerji miktarıdır.

1920'li yılların ortasından itibaren 1960'lı yıllara kadar içten yanmalı motora sahip taşıtlar, taşıt piyasasına tamamen hâkim konumda kalmışlardır. Ancak 1970'li yılların ortalarına doğru meydana gelen ve bütün dünyayı etkileyen petrol krizi, taşıt üreticilerini yeniden elektrikli taşıt teknolojisine yatırım yapmaya yönlendirmiştir [5]. Büyük taşıt üreticileri, 1990'lı yıllara kadar çeşitli elektrikli taşıt prototipleri geliştirmişlerdir. Ancak bu prototipler, performans ve özellikle de menzil açısından içten yanmalı motorlu taşıtlarla rekabet edebilecek düzeyde değillerdi [6]. Bu durum, içten yanmalı motor ve batarya sistemi tarafından tahrik edilen elektrik motorunun beraberce kullanıldığı hibrit elektrikli taşıt sistemlerinin geliştirilmesi fikrini ortaya çıkarmıştır.

Son yıllarda ise, trafik yoğunluğu gittikçe artmış ve buna paralel olarak da çevre kirliliği ortaya çıkmıştır. Fosil yakıt kullanan içten yanmalı motorların yaydığı emisyonlar (CO, CO<sub>2</sub> vs) dünya çapında çevreye zarar vermektedir. Yayılan bu gazların standartların üstünde olduğu günümüzde tartışılmaz hale gelmiştir. Dizel motorlar, LPG'li ve benzinli araçlara göre çok daha fazla partikül ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple şehirlerdeki hava kirliliğinin önemli sebeplerinden birinin de trafik olduğu görülmektedir. Bazı dönüştürücüler kullanılması ile, emisyon oranı azaltılmış olsa bile, trafiğin artması nedeniyle havadaki emisyon oranının artmaya devam ettiği saptanmıştır [7].

Ortaya çıkan bu zararlı gaz oranı, dolayısıyla da sera gazlarının

oluşmasıyla iklim değışikliklerine de neden olmaktadır. Her geçen gün bu oranların artması nedeniyle, bu zararları en aza indirecek alternatif yakıtlar ile daha verimli ve çevreye dost ozmlerin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bunun için araç ağırlıklarının düşürülmesi, yol zeminin düzeltilmesi ve yeşil dalga gibi bazı düzenlemeler yapılırsa da, bu konuda ciddi verim almak yolunda yapılan en büyük çalışma elektrikli ve hibrit elektrikli araçların geliştirilmesi ve piyasaya seri üretim şeklinde sürülmesi olarak görülmektedir.

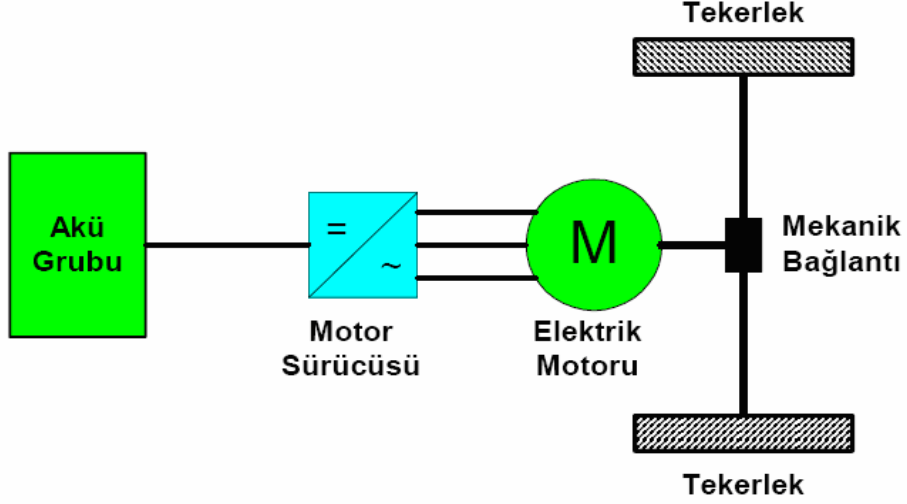
İki Japon otomobil firması, Toyota ve Honda, 1997 yıllarında pazara çıkardıkları Toyota Prius ve Honda Insight elektrikli araç modelleri ile ciddi olarak pazarda dikkat çekmiş ve birçok otomobil firması da yeni modellerini hibrit sistemlerle üretmeye başlamıştır. şimdilerde ise neredeyse bütün otomobil üreticileri bu elektrikli sistemlere yönelmişlerdir.

## **2.2. Elektrikli Araçların Sınıflandırılması**

Günümüzde var olan teknolojiler göz önüne alındığında, elektrikli araç sistemleri genel olarak üç kısımda incelenmektedir. Bunlar elektrik motoru kullanan elektrikli araçlar, elektrik ve içten yanmalı motor kullanan hibrit elektrikli araçlar ve yakıt pilli elektrikli araçlardır.

### **2.2.1. Sadece Elektrik Motoru Kullanan Elektrikli Araçlar**

Sadece elektrik motoru kullanan elektrikli araçlarda, tekerlekleri tahrik etmek için kullanılan güç, elektrik motoru tarafından sağlanmaktadır. Talep edilen güç miktarının arttığı sistemlerde, kullanılan elektrik motorunun sayısı da artmaktadır. Elektrik motoru için gerekli olan enerji, depolama sisteminden elde edilmektedir. Dolayısıyla CO<sub>2</sub> ve diğer zararlı gazların salınımının olmamasından dolayı, bu araçlara sıfır emisyonlu araçlar denilebilir. şekil 2.2'de sadece elektrik motoru kullanan araç modeli verilmiştir.



**Şekil 2.2.** Sadece elektrik motoru kullanan araç modeli

Sadece elektrik motoru kullanan taşıtların birçok avantajı vardır. Bunlar çevreyle tamamen dost olması, çok sessiz çalışması ve fosil yakıtlarının gittikçe tükendiği bu zamanda yakıt tüketimi noktasında çok ekonomik olması şeklinde verilebilir.

Bunların yanında, elektrikli araçların en önemli dezavantajı maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Sadece elektrik motoru kullanan bir taşıtın maliyeti, içten yanmalı motor kullanan bir taşıtın maliyetinin yaklaşık 2 katı kadardır. Diğer bir dezavantajı da, içten yanmalı bir araç bir depo ile sürüş mesafesi yaklaşık 500–600 kilometre civarındayken, sadece elektrik motoru kullanan bir taşıtta bu mesafe çok daha az olmaktadır [8]. Örneğin Türkiye’de üretilen Renault Fluence’in tam şarjlı halinde şehir içi ve şehir dışı karma olarak sürüş mesafesi yaklaşık 185 km civarındadır. Ayrıca elektrik motoru ile çalışan bir aracı şarj etmek gerekir. Dolayısıyla şarj olma süresi de bu noktada önem kazanmaktadır. Sadece elektrik motoru kullanan bir araçtaki bataryaların şarj süresi 5-8 saat civarındadır ve geleneksel bir prizle evdeki elektrik şebekesinden veya profesyonel bir elektrik şebekesinden yapılır. Mesela yine Renault firmasının verdiği teknik bilgilere göre, normal ev şebekesi ile Renault Fluence için şarj 6 ile 8 saat arasında sürmektedir Eğer sanayi elektriği kullanılırsa çok daha hızlı bir şekilde 30 dakikada yüzde 80 şarj oranına erişilebilmektedir. Diğer önemli bir

nokta ise, akü veya pillerin ömrüdür. Piller yaklaşık birkaç bin doluma kadar kullanılmakta bu da şarj etme sayısına göre yaklaşık 4-5 yılda bir pillerin değişimini gerektirmektedir.

### **2.2.2. İçten Yanmalı Motor ve Elektrik Motoru Kullanan Elektrikli Araçlar**

Sadece elektrik motoru kullanan taşıtların, dolu şarj ile gidiş mesafesinin kısıtlı olması, pillerin şarj süresinin uzun olması gibi dezavantajlarının, içten yanmalı motor ve elektrik motoru kullanan elektrikli araçlar ile giderilmesi hedeflenmiştir. Bu hibrit araçlar çevreye yayılan zararlı gazlar noktasında sadece elektrik motoru kullanan taşıtlara göre dezavantajlı olmasına karşın, sadece içten yanmalı motor kullanan taşıt sistemlerine göre çok avantajlıdır. Ayrıca içten yanmalı motorlara göre yakıt noktasında çok daha verimlidirler.

Bu sistemin diğer bir avantajı da, araç boşta çalışırken içten yanmalı motorun çalışmamasından dolayı, araç titreşimi ve motor gürültüsünün olmamasıdır.

Hibrit elektrikli araçların da, sadece elektrik motoru kullanan taşıt sistemlerinde olduğu gibi frenleme enerjisini geri kazanma özelliği vardır. Bu yetenek sayesinde yavaşlarken veya dururken boşa giden frenleme enerjisi, elektrik motorunun jeneratör gibi davranmasıyla hareket enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile enerji kazanımı sağlanmış olur.

Ayrıca içten yanmalı motor ağırlığının düşürülmesi de yakıt tasarrufu noktasında önemlidir. Bu nedenle içten yanmalı motorun elektrik motoru ile beraber kullanımı ile, içten yanmalı motorun yüksek güç taleplerinde değil de daha sürekli bir bölgede yani temel yükü karşılayacak şekilde kullanımı sağlanmaktadır. Böylece motor hacminin düşürülmesiyle içten yanmalı motorun daima aynı güç talebinde çalışması sağlanacak ve yakıttan ciddi oranda tasarruf edilecektir.

### **2.2.2.1. İçten Yanmalı Motor ve Elektrik Motoru Kullanan Elektrikli Araç Tipleri**

Hibrit taşıt sistemleri dışında elektrikli taşıt sistemlerinde, bataryaların etkinlikleri gittikçe artmaktadır. Hatta bu sistemler basit hibrit sistemler olarak bile adlandırılabilirler. Örneğin bir elektrik motoru, rölanti durumunda içten yanmalı motoru açıp kapatmak için kullanılır. Böyle bir sistemle, aracın dengeli güce ulaşması için gereken süre 1/4'e düşürölerek, ilk çalışma anında harcanan fazla yakıttan tasarruf edilmiş olunur [9].

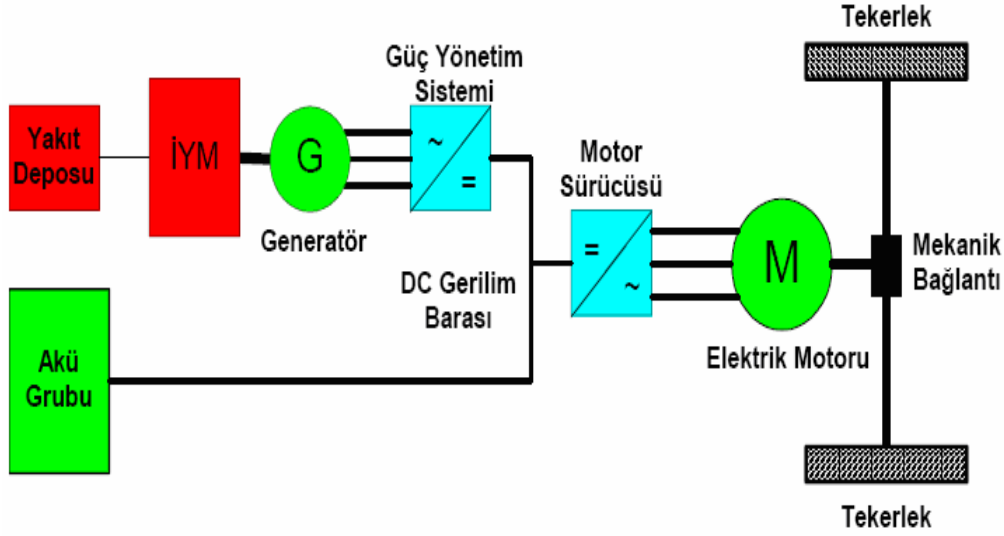
Tam olarak hibritize edilmiş araçlar, aslında güç organlarının bağlantılarına göre üç grupta incelenebilmektedir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- 1.Seri Hibrit Araçlar
- 2.Paralel Hibrit Araçlar
- 3.Seri-Paralel Hibrit Araçlar

#### **2.2.2.1.1. Seri Hibrit Araçlar**

Seri hibrit sistemli bir araçta içten yanmalı bir motor, elektrik motoru, kontrolör, jeneratör ve enerji depolama sistemi olarak bataryalar mevcuttur. Bu sistemde içten yanmalı motorun kullanılmasının sebebi hem DC barasını beslemek hem de jeneratör vasıtasıyla kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye çevirerek bataryaları şarj etmesi içindir. Seri hibrit araçlarda tekerleklerle iletilen tahrik gücü elektrik motorundan sağlanmaktadır. Bu durum elektriksel yükü, mekanik enerjiye çevrilerek gerçekleşmektedir.

İçten yanmalı motor ve jeneratörün beraber kullanılmasıyla elde edilen güç kontrolörde birleşir. Bu kontrolör, enerji kaynaklarından ne oranda güç çekileceğini belirler. Aynı zamanda kontrolör frenleme enerjisinin geri kazanımında açma kapama işlemini yaparak gücü bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Böylece bataryalar, hem jeneratör vasıtasıyla içten yanmalı motorla hem de frenleme enerjisiyle tekrar şarj edilebilmektedir. şekil 2.3'de seri hibrit araç konfigürasyonu görölmektedir.

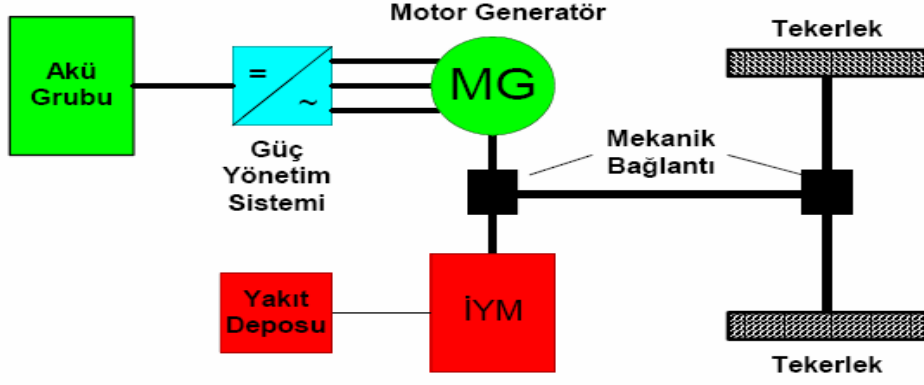


**Şekil 2.3.** Seri hibrit araç konfigürasyonu

Bu sistemde bataryaların maksimum enerji kazanımı sağlayabilmesi ve tekerleklere maksimum verimle enerji aktarılabilmesi için, bataryaların doluluk oranının belirli bir seviyede tutulması gerekmektedir. Örneğin frenleme esnasında bataryanın doluluk oranı % 100 oranında ise, batarya daha fazla şarj olamayacak ve dolayısıyla frenleme enerjisinin geri kazanımı sağlanmamış olacaktır. Bunun zıttı olarak eğer batarya çok düşük bir doluluk oranına sahipse, aracın yokuş tırmanışı gibi yüksek güç taleplerinde bataryadan yeterli enerjiyi alamayacağı için araç güçten düşecektir. Bu nedenlerden dolayı kontrolörün kullanılması büyük önem arz etmektedir.

#### 2.2.2.1.2. Paralel Hibrit Araçlar

Paralel hibrit sistemde içten yanmalı motor, elektrik motoru, kontrolör ve bataryalar mevcuttur. Bu sistemde, seri hibrit sistemde var olan jeneratör yoktur. Dolayısıyla ağırlık ve maliyet noktasında bir tasarruf vardır. İçten yanmalı motor tekerleklere bir transmisyon sistemi ile bağlıdır. Kontrolör yine hangi kaynaktan ne kadar enerji çekileceğini belirler. Burada elektrik motoru ve içten yanmalı motor ikisi de tekerleklere bağlı olduğundan araç daha güçlü olacaktır. Şekil 2.4'de paralel hibrit araç konfigürasyonu görülmektedir.

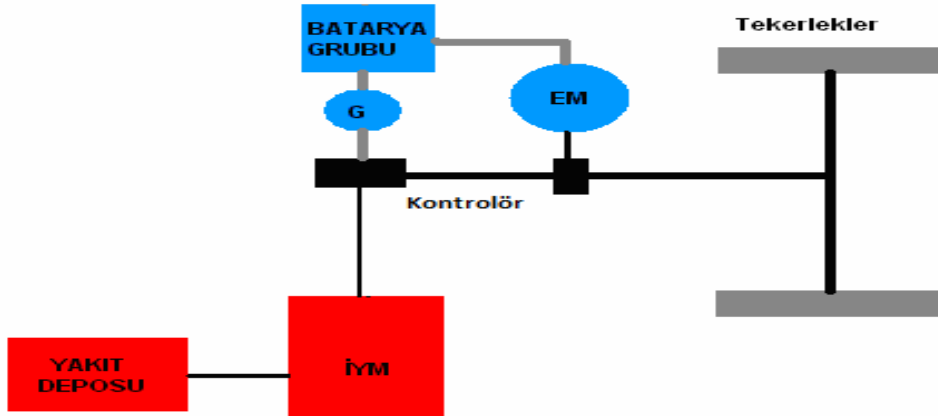


**Şekil 2.4.** Paralel hibrit araç konfigürasyonu

Bu sistemde de, frenleme sırasında elektrik motoru jeneratör görevi yaparak bataryaları şarj eder. Dolayısıyla normal bir içten yanmalı motorda kayıp olan bu enerji kazanımı ile yakıt tasarrufu sağlanmış olacaktır.

### 2.2.2.1.3. Seri-Paralel Hibrit Araçlar

Adından da anlaşılacağı üzere seri-paralel hibrit sistem, seri hibrit ve paralel hibrit sistemin avantajlı özelliklerini üzerinde taşımaktadır. Bu sistemde içten yanmalı motor, elektrik motoru, jeneratör ve batarya grubunu içermektedir. Araçtan daha fazla güç talebi olduğunda içten yanmalı motor devreye girerek dönüşüm olaylarına fazla girilmeyerek tekerleklere direk olarak güç verir. Şekil 2.5'de seri-paralel hibrit aracın konfigürasyonu görülmektedir.

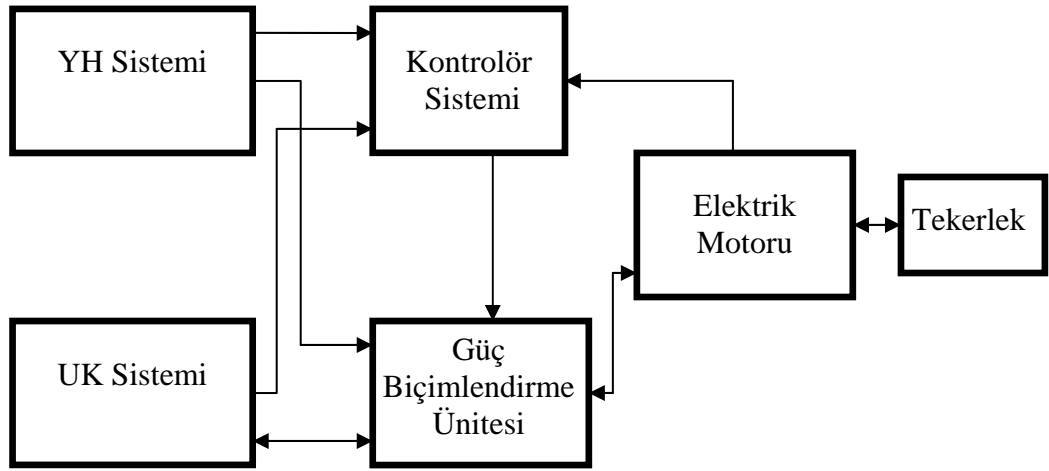


**Şekil 2.5.** Seri-Paralel hibrit araç konfigürasyonu



### 2.2.3. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

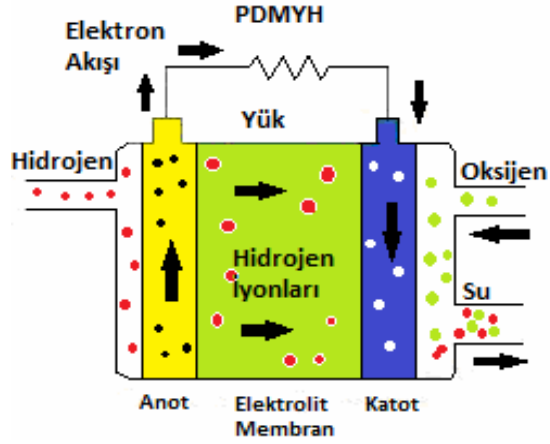
Yakıt pili araçlar, YH sistemi, UK sistemi, bulanık mantık kontrolör gibi elemanları yapısında bulundurmaktadır. 3. bölümde yakıt pili araçlar detaylı olarak incelenecektir. Burada yakıt pili araçların bünyesinde bulundurduğu sistemler tanıtılacaktır. Bunlar YH, UK ve kontrol sisteminin temelini oluşturan bulanık mantıktır. Şekil 2.6'da bu tez çalışmasında kullanılan YH'li, UK'lı ve kontrol sistemli bir elektrikli araç modeli verilmiştir.



Şekil 2.6. Yakıt hücreli bir elektrikli araç modeli

#### 2.2.3.1. Yakıt Hücresi Teknolojisi

Yakıt hücreleri, yanma olmaksızın yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı enerjisine çeviren enerji dönüştürücüleridir. Bir yakıt hücresinde yakıt olarak sadece hidrojen kullanırsa, bu durum hava kirliliğine neden olmayan elektrokimyasal bir işlemle yapılır. Şekil 2.7'de yakıt olarak doğrudan hidrojenin kullanıldığı bir PDM'lı YH sisteminin basit yapısı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonları sonucunda yan ürün olarak sadece saf su açığa çıkmaktadır.



**Şekil 2.7.** PDM yakıt hücresinin yapısı

Yakıt hücresinin çalışma prensibi, kataliz temeline dayanır; reaksiyona giren yakıtın elektron ve protonları ayrılır, elektrolit elektronik iletken olmadığından elektrolitler iyonik iletkenlerdir. Yakıt hücresi tipine göre oksijen iyonu ya da hidrojen iyonlarını ileterek iyonik iletkenlik gerçekleştirmiş olurlar. Elektronlar bir elektronik devre üzerinden akmaya zorlanır ve böylece elektrik akımı üretilmiş olunur. Bir diğer katalitik prosesle de, geri toplanan elektronların protonlarla ve oksitleyici ile birleşerek atık ürünler (su, karbon dioksit ve ısı) açığa çıkar [10].

Hidrojen–Oksijen proton değişim membranlı yakıt hücresi (PDMYH) tasarımında, proton ileten bir polimer membran (elektrolit), anot ve katodu birbirinden ayırır. Anot tarafında, hidrojen, anot katalizöre yayınarak proton ve elektronlara ayrışır. Protonlar membran üzerinden katoda doğru ilerlerken, elektronlar da, membranın elektriksel olarak yalıtkan olması nedeniyle harici bir devre üzerinden akar ve elektrik akımı oluştururlar. Oksijen molekülleri katot katalizör üzerinde elektron ve protonlarla reaksiyona girerek su oluşturur. Bu saf hidrojen tipi yakıt hücrelerine ilaveten, dizel, metanol ve kimyasal hidrürler gibi hidrokarbon yakıtlar da mevcuttur. Bu tip yakıt hücrelerinin atıkları karbon dioksit ve sudur.

Yakıt hücrelerinde çok çeşitli malzemeler kullanılır. Elektrot–çift kutuplu plakalar genellikle metal (nikel veya karbon nano tüpler) olup daha yüksek verim elde etmek için platin, nano demir tozu veya paladyum gibi bir katalizörle kaplanmıştır. Karbon kâğıt bunları seramik veya suni membrandan yapılmış elektrolitten ayırır.

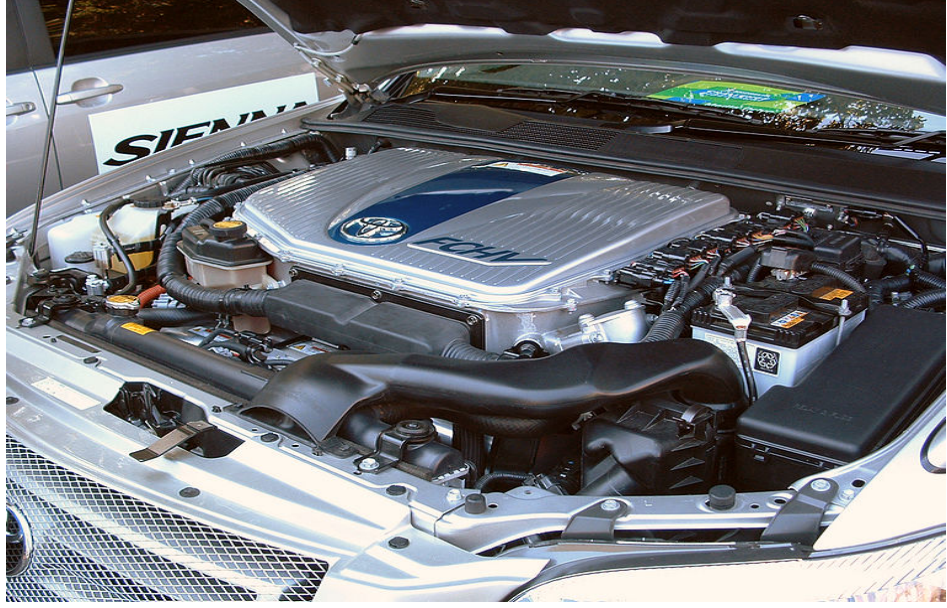
Tipik bir PDM'lı yakıt hücresi 0,6 ila 0,7 V arasında gerilim üretebilir. İstenen miktarda enerji elde etmek için, yakıt hücreleri seri veya paralel devreler halinde bağlanabilir. Seri devreler daha yüksek gerilim, paralel devreler daha yüksek akım çekilmesine olanak verir. Bu tür yapılar "yakıt hücresi yığını" olarak adlandırılır. Ayrıca, her hücreden daha güçlü akım çekebilmek için hücre yüzey alanı da arttırılabilir.

Yakıt hücresi sistemleri, petrol rezervlerinin azaldığı ve hava kirliliğinin ciddi boyutlara ulaştığı günümüzde çözüm için önemli olduğu düşünülmektedir. Taşıt sistemlerinde, YH sistemleri içten yanmalı motorların yerine kullanılacak sistemler olarak görülmektedir. Fakat yakıt hücreleri taşıt sistemlerinde tek başına kullanıldıklarında, normal olarak ani ve yüksek yük taleplerine maruz kalacaktır. Bu da yakıt hücresinin alt elemanı olan membranda yetersiz nemlenme veya tam zıttı aşırı nemlenme gibi problemlere neden olacaktır.

Yakıt hücrelerinde, membranın sürekli ıslak kalabilmesi için, buharlaşan su miktarı, üretilen su miktarına eşit olmalıdır. Eğer su fazla buharlaşırsa membran kurur, direnci artar ve nihayet çatlar ve bu da gaz kaçaqlarına yol açar. Bu çatlaklarda oksijen ve hidrojen doğrudan birleşerek ısı açığa çıkarır ki bu da hücreye zarar verir. Eğer su çok yavaş buharlaşırsa, bu kez de elektrotlar fazla su ile boğulur, reaksiyona giren maddeler katalizöre ulaşamazlar ve reaksiyon durur. Dolayısıyla hidrojen ve oksijen akışı sağlanamadığından dolayı gereken ani güç talebi karşılanamayacaktır. Ayrıca bu problemlerin neticesinde yakıt hücresinin ömrü ve maliyeti noktasında ciddi dezavantajlar ortaya çıkacaktır. İşte bütün bu problemleri ortadan kaldırmak için yakıt hücresi sistemlerini, taşıt sistemlerinde kullanırken bir enerji depolama sistemiyle beraber kullanmak ve yüksek güç taleplerinde yakıt hücresi sistemlerini geri planda bırakmak mantıklı olacaktır.

Bir yakıtın verimliliği, o yakıttan ne kadar güç elde edildiğine bağlıdır. Daha çok güç elde etmek demek, daha fazla akım çekmek anlamına gelir ki bu da aslında o yakıt hücresindeki kayıpları arttırır. Genel kural; "ne kadar fazla güç (akım) çekilirse, verim o kadar düşer" şeklindedir. Kayıplar genellikle hücrede gerilim düşümü şeklinde kendini gösterir. Dolayısıyla, hücrenin verimi, gerilimiyle orantılıdır. Bu nedenle, yakıt hücrelerinin polarizasyon eğrileri (akım-potansiyel diyagramları) hücre hakkında önemli bir göstergedir. 0,7 V ile çalışan

bir hücrenin verimi yaklaşık % 50'dir. Bu, hidrojenin enerji içeriğinin % 50'sinin elektrik enerjisine, geri kalan diğer %50'sinde de ısıya dönüşmesi demektir. Yakıt hücresi tasarımına göre, bir miktar yakıt reaksiyona girmeden de hücreyi terk ediyor olabilir ki bu da ilâve kayıplar demektir. Şekil 2.8'de proton değişim membranlı yakıt hücreli Toyota FCHV görülmektedir.



**Şekil 2.8.** Proton değişim membranlı yakıt hücreli Toyota FCHV

Yakıt olarak oksijen yerine hava kullanıldığında, havanın sıkıştırılması ve nem eklemesi gibi, verimi düşüren ilave kayıplar da olacaktır. Öte yandan yakıt hücreleri, aşırı yüklenmelerde daha düşük verimle çalışırlar. Yakıt hücresi ile çalışan bir taşıtın, yakıt tankından tekerleğe kadar olan verimi, düşük yüklenmelerde yaklaşık % 45, ortalama % 36'dır. Dizel taşıtlar için karşılaştırılabilir değer % 22'dir. Bu hesaplamalara üretim, taşıma ve depolamanın da dâhil edilmesi gerekir. Sıkıştırılmış hidrojenle çalışan yakıt hücreli taşıtların, güç santralinden tekerleğe kadar olan verimi % 22, eğer hidrojen sıvı-hidrojen olarak depolanmış ise % 17'dir [11].

Yakıt hücreleri, pillerdeki gibi enerji depolayamazlar. Fakat, güneş veya rüzgar enerjisi gibi kesintisiz kaynaklardan beslenen güç tesislerinde, elektroliz ve depolama sistemleri ile birleştirilerek enerji depolama sistemi oluştururlar. Bu tür tesislerin, "gidiş-dönüş verim" olarak adlandırılan toplam verimleri

(elektrikten hidrojene ve tekrar elektriğe), şartlara bağılı olarak % 30 ile % 50 arasındadır. Kurşun-asit pili çok daha ucuza % 90'a yakın verimle çalışmasına rağmen, elektroliz/yakıt hücresi sistemi sonsuz miktarda hidrojen depolayabilir ve bu nedenle uzun süreli depolama için daha uygundur.

Katı oksitli yakıt hücreleri, oksijen ve hidrojenin yeniden birleşiminden egzotermik ısı üretirler. Seramik yaklaşık 800 °C'a kadar ısınabilir. Bu ısı yakalanabilir ve su ısıtmada kullanılabilir. Bu durumda toplam verim % 80-90'lara kadar çıkar.

### **2.2.3.1.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri**

Yakıt hücreleri günümüzde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Kullanıldıkları alanlara göre yakıt hücrelerinin birçok çeşidi vardır. En çok kullanılan yakıt hücresi çeşitleri Çizelge 2.1' de verilmektedir

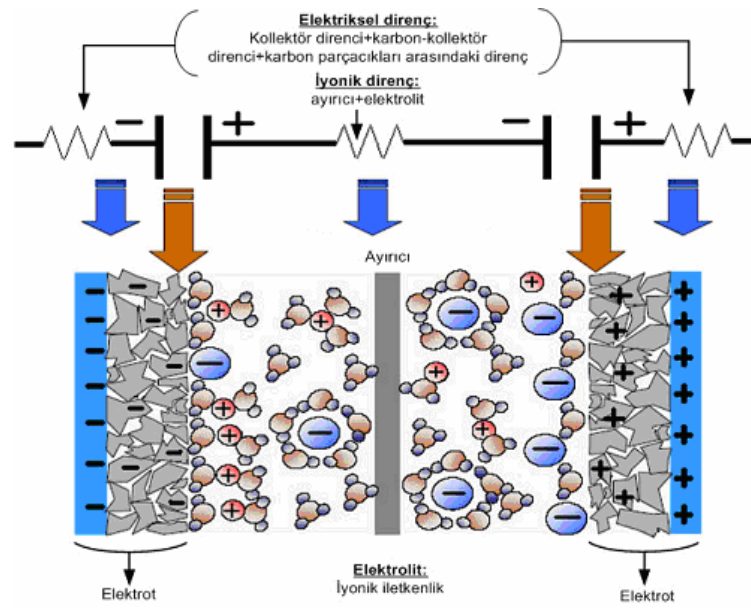
Çizelge 2.1'de özellikleri verilen YH sistemleri arasında, yüksek verimliliğinin yanı sıra, hacim ve ağırlık açısından da sahip olduğu avantajları nedeniyle PDMYH (Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi) sistemleri, günümüzde taşıt uygulamaları için en uygun yakıt hücresi sistemleridir. PDMYH sistemine sahip bir taşıtın kullanılması ile konvansiyonel içten yanmalı motor sistemine sahip bir taşıta göre toplamda yaklaşık 2.5-2.7 kat daha az enerji tüketilir [12]. Proton değişim membranlı yakıt hücresinin her bir hücresinden beklenen güç 0,6 V'da 1.3 W'dan 2W'a kadardır.

**Çizelge 2.1** Yakıt hücresi türleri

Yakıt hücresi adı	Elektrolit	Elektriksel güç (W)	Çalışma sıcaklığı (°C)	Elektrik verimi	Durum
Metal hidrür yakıt hücresi	Sulu alkali çözelti (örn. KOH)	?	> -20 50%P <sub>pik</sub> @ 0	?	Ticari + Araştırma
Elektro-galvanik yakıt hücresi	Sulu alkali çözelti (örn. KOH)	?	< 40	?	Ticari + Araştırma
Formik asit yakıt hücresi	Polimer membran (iyonomer)	50 W a kadar	< 40	?	Ticari + Araştırma
Çinko-hava pili	Sulu alkali çözelti (örn. KOH)	?	< 40	?	Seri üretim
Biyolojik yakıt hücresi	Polimer membran veya hüyük asit	?	< 40	?	Araştırma
<b>Yukarı akımlı biyolojik yakıt hücresi</b>		?	< 40	?	Araştırma
Tersinir yakıt hücresi	Polimer membran (iyonomer)	?	< 50	?	Ticari + Araştırma
Doğrudan borhidrür yakıt hücresi	Sulu alkali çözelti (örn. KOH)	?	70	?	Ticari
Alkali yakıt hücresi	Sulu alkali çözelti (örn. KOH)	10 kW ilâ 100 kW	< 80	Hücre: %60-70 Sistem: %62	Ticari + Araştırma
Doğrudan metanol yakıt hücresi	Polimer membran (iyonomer)	100 kW ilâ 1 mW	90-120	Hücre: %20-30 System: %10-20	Ticari + Araştırma
<b>Geliştirilmiş metanol yakıt hücresi</b>	Polimer membran (iyonomer)	5 W ilâ 100 kW	(Reformer)250-300 (PBI)125-200	Hücre: %50-60 Sistem: %25-40	Ticari + Araştırma
Doğrudan etanol yakıt hücresi	Polimer membran (iyonomer)	140 mW/cm <sup>2</sup>	> 25 ? 90-120	?	Araştırma
Formik asit yakıt hücresi	Polimer membran (iyonomer)	?	90-120	?	Araştırma
Proton değişim membranlı yakıt hücresi	Polimer membran (iyonomer) (örn. Nafion® veya Polibenzimidazol fiber)	100 W ilâ 500 kW	(Nafion) 70-120 (PBI) 125-220	Hücre: %50-70 Sistem: %30-50	Ticari + Araştırma
Fosforik asit yakıt hücresi	Ergimiş fosforik asit (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	< 10 MW	150-200	Hücre: %55 Sistem: %40	Ticari + Araştırma
Ergimiş karbonat yakıt hücresi	Ergimiş alkali karbonat (örn. sodyum bikarbonat NaHCO <sub>3</sub> )	100 MW	600-650	Hücre: %55 Sistem: %47	Ticari + Araştırma
<b>Tüplü katı oksit yakıt hücresi</b>			600-650		Araştırma
Proton seramik yakıt hücresi	H <sup>+</sup> -iletken seramik oksit	?	700	?	Araştırma
<b>Doğrudan karbon yakıt hücresi</b>	Pek çok farklı elektrolit	?	700-850	Hücre: %80 Sistem: %70	Ticari + Araştırma
Katı oksit yakıt hücresi	O <sup>2-</sup> -iletken seramik oksit (örn. zirkonyum dioksit, ZrO <sub>2</sub> )	< 100 MW	700-1000	Hücre: %60-65 Sistem: %55-60	Ticari + Araştırma

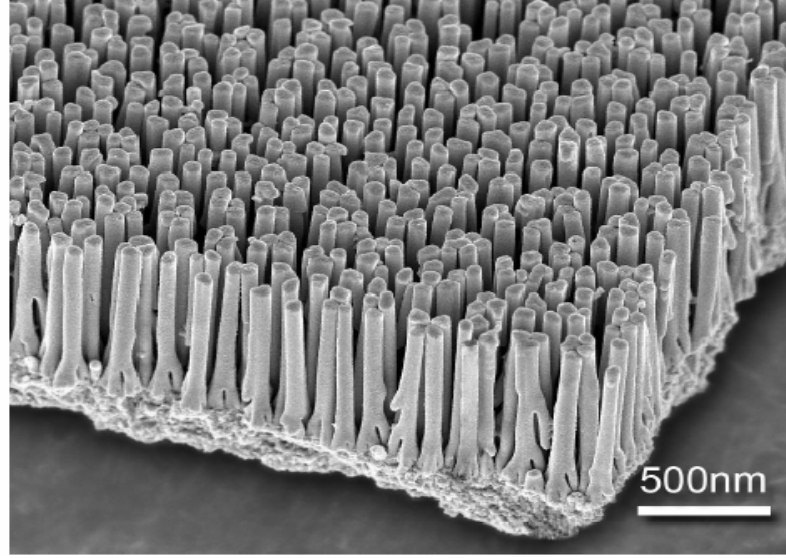
### 2.3.2. UltraKapasitör Teknolojisi

Ultrakapasitörler, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi temel olarak, elektrik enerjisinin depolandığı elektrokimyasal çift katmanlı bir yapı üzerinde çok sayıda yüzeyel elektrotlardan ve bir ayırıcı yüzeyden oluşmaktadır. Ayırıcı yüzey, elektrotlar arasındaki teması fiziksel olarak engellemekte, fakat iyon geçişine izin vermektedir [13]. Kısacası pozitif veya negatif yüklerin ayrıştırılmasıyla enerjiyi depo eden elemanlardır. Şekil 2.9'da UK'nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı görülmektedir.



Şekil 2.9. UK'nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı[14]

UK'lar yüksek gözenekli yapıya sahiptirler. Dolayısıyla yüksek yüzey alanları ile kapasite noktasında normal kondansatörlerden avantajlıdır. UK'nın yüzey alanının ve kapasite değerinin yüksek değerlere çıkmasının nedeni, UK'daki yüzeyel elektrotların nano boyutlarda olmasıdır [10]. Şekil 2.10'da UK'nın yapısında yer alan nano boyutlardaki yüzeyel elektrotlar görülmektedir.



**Şekil 2.10.** UK'nın yapısında yer alan nano boyutlardaki yüzeyel elektrotlar [15]

Hibrit taşıt sistemlerinde yakıt hücresi sisteminin tek başına kullanılması, ani yüksek güç taleplerinde aşırı nemlenme veya nemlenmeme gibi bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu problemlerin neticesinde gaz akışı düzgün olarak sağlanamadığından yüksek güç taleplerinin karşılanması noktasında sıkıntılar meydana gelmektedir. Ayrıca YH'nin tek başına kullanılması durumunda yakıt hücresinin ömrü ciddi oranda kısalmakta ve maliyet artmaktadır. İşte bu problemleri aşmak için yakıt hücresi sisteminin bir enerji depolama sistemi ile beraber kullanılarak, yüksek enerji taleplerinde bu enerji depolama sisteminden yararlanılarak yakıt hücresi sistemini daha kararlı değerlerde çalıştırmak gerekmektedir.

Enerji depolama fikri ortaya çıktığından beri enerji sistemlerinde genellikle bataryalar kullanılmaktaydı. Fakat bataryalar düşük çevrim ömrü, uzun şarj süreleri ve düşük güç yoğunlukları nedeniyle taleplere tam olarak karşılık verememektedir. Çizelge 2.2'de Kurşun asit batarya ve ultrakapasitörün bazı değerleri verilmiştir.



**Çizelge 2.2.** Kurşun asit batarya ve ultrakapasitörün bazı değerleri [8]

	<b>Kurşun Asit Akü</b>	<b>Ultrakapasitör</b>
<b>Özgül enerji (Wh/kg)</b>	50	3-5
<b>Özgül Güç (W/kg)</b>	150	300-500
<b>Depolama verimi (%)</b>	77	80-90
<b>Normal şarj zamanı (saat)</b>	8	Çok Az
<b>Çevrim ömrü</b>	600-1200	1000000

### **2.2.3.3. Bulanık Mantık**

İngilizcede Fuzzy Logic olarak tabir edilen bulanık mantık ilk defa Azerbaycan'lı Prof. Dr. Lutfi A. Zadeh tarafından ortaya konulmuştur. Klasik küme kavramında bir eleman o kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Yani kısmi olarak bir kümenin elemanı olamaz. Diğer bir ifadeyle klasik küme kavramında sadece {0,1} vardır. Fakat gerçek hayatta böyle bir şey tam olarak mümkün değildir. Mesela elini suya sokan birisi derece olarak suyun derecesini bilemez. Fakat genel bir şekilde çok soğuk, soğuk, az sıcak, sıcak, çok sıcak gibi niteleyicilerle ifade edebilir. Daha net olarak ifade etmek gerekirse, sadece sıcak ve soğukun olduğu bir grafikte, 20 °C eğer sıcaksa, 19.9 °C derece soğuk anlamına gelmektedir. Oysa gerçek hayat bu kadar kesin sınırlar üzerine kurulu değildir. Diğer bir ifadeyle gerçek hayatta mutlak siyah ve mutlak beyazın yanında binlerce gri ton mevcuttur.

İşte bu noktada karar süreçlerinde belirsizliğin nasıl öngörüleceği ve nasıl karar süreçlerinin parçası haline getirileceği noktasında bulanık mantık teorisi ortaya çıkmaktadır.

YH/UK sisteminde bulanık mantık kontrolörün kullanılmasının nedeni, YH'nin yüksek güç taleplerine maruz kalmasını önemli oranda azaltmak ve bunun yanında frenleme enerjisini en üst seviyede depolayabilmek için UK sisteminin şarj seviyesini belirli bir noktada tutmaktır.

### 2.2.3.3.1. Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları

Bulanık mantık, sayıların komşuluğu felsefesine dayanır. Karar sürecinde bir durum bir sayıyla ifade ediliyorsa, söz konusu durumun kabul edilirliliği o sayının gerçekleşmesinde sağlanacaktır. Ancak söz konusu sayıya yakın sayılar karar sürecinin bir parçası olarak algılanmayacaktır. Oysa belirli bir güven katsayısında bu sayıların farklı popülasyonların üyeleri olduğunu öne sürmek de istatistiksel açıdan yanlış olacaktır. Örneğin bir tezgahta işlenen bir parçanın sıcaklığının 39 °C'ye ulaşması, tezgahın bakım sürecini başlatan bir durumsa belki de sıcaklığın 36 °C'ye ulaşması da aynı bakım sürecinin başlaması için bir ön şart olarak kabul edilebilir. Bu durumda aynı temel amaca hizmet eden sayıların komşuluğundan söz etmek mümkündür.

Eğer  $A \in R \in (-\infty, +\infty)$ ' da, söz konusu kümenin bir elemanı ise  $\mu_A(x)$  üyelik fonksiyonu  $R \rightarrow [0,1]$  aralığında oluşur. Diğer bir deyişle  $A$  kümesi  $A = [a_1, a_3]$  aralığında ise genel olarak  $\mu_A(x)$  üyelik fonksiyonu (2.1) formülüyle gösterilebilir:

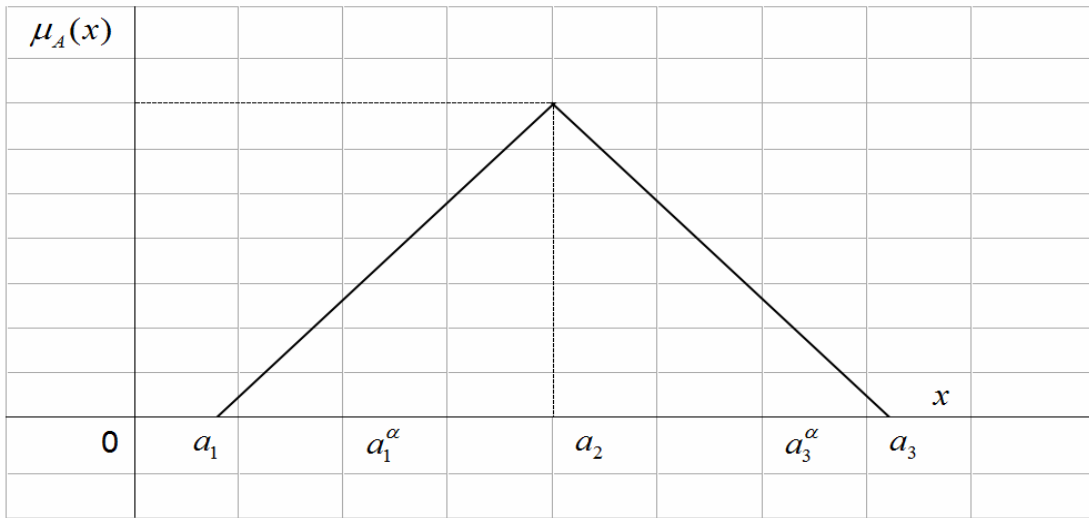
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ 1, & a_1 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases} \quad (2.1)$$

Üyelik fonksiyonları genellikle, üçgensel üyelik fonksiyonları ve yamuk üyelik fonksiyonları olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

$\mu_A(x)$  üçgensel üyelik fonksiyonu, (2.2) formülünde tanımlanmıştır [16]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (2.2)$$

(2.2) formülüne göre küme,  $A = (a_1, a_2, a_3)$  olmalıdır. Burada  $a_2$  normal değerli üyelik olarak tanımlanabilir. Bulanık mantık bu noktada bir  $\alpha$  katsayısına bağlı olarak  $a_2$ ' ye yakın değerlerin, bu değere yüklenen anlam ile temsil edileceğini varsaymaktadır. Diğer bir deyişle  $a_2$ ' deki belirsizlik, varsayılacak ya da dağılıma göre bulunabilecek bir  $\alpha$  katsayısı ile tolere edilebilir. Söz konusu komşuluk Şekil 2.11' de gösterilmiştir



**Şekil 2.11.** Sayıların Komşuluğu

$\alpha$  değeri bulanık mantık terminolojisinde kesim katsayısı olarak adlandırılır.  $a_1^\alpha$  ve  $a_3^\alpha$  sayıları ise  $a_2$  normal değerinin komşuluğunu oluşturan aralığın alt ve üst sınır değerleridir. Diğer bir deyişle  $a_1^\alpha$  ve  $a_3^\alpha$  aralığındaki tüm sayılar  $a_2$  normal değeri ile aynı anlama sahiptir. Burada  $a_1^\alpha$  ve  $a_3^\alpha$  değerleri aşağıda verilen (2.3) ve (2.4) formülleri yardımıyla bulunabilir:

$$\frac{a_1^\alpha - a_1}{a_2 - a_1} = \alpha, \quad (2.3)$$

$$\frac{a_3 - a_3^\alpha}{a_3 - a_2} = \alpha. \quad (2.4)$$

(2.3) ve (2.4) formüllerinden  $\forall \alpha \in [0,1]$  için  $A_\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha]$  aralığı oluşturulabilir.  $a_1^\alpha$  ve  $a_3^\alpha$  değerleri aşağıdaki (2.5) ve (2.6) formüllerinde gösterilmiştir:

$$a_1^\alpha = \alpha(a_2 - a_1) + a_1, \quad (2.5)$$

$$a_3^\alpha = a_3 - (a_3 - a_2)\alpha. \quad (2.6)$$

Örneğin üçgensel bulanık mantık sayılarına ilişkin küme  $A = (-5, -1, 1)$  ise bu durumda (2.2) formülünden üyelik fonksiyonu,

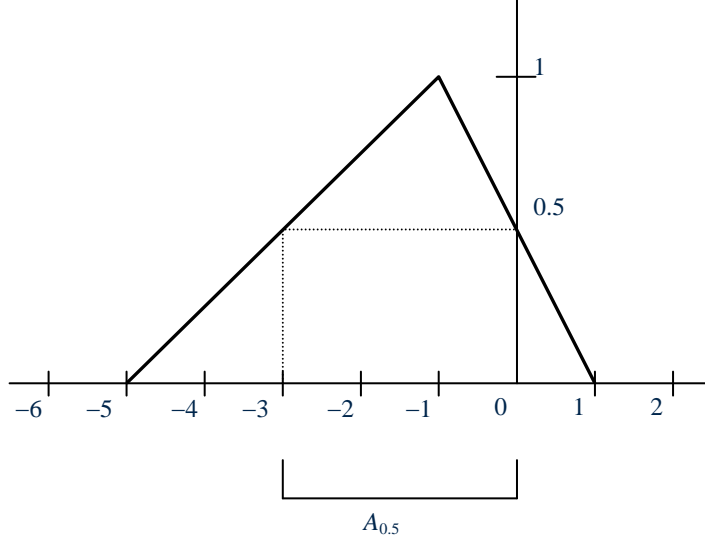
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < -5 \\ \frac{x+5}{4}, & -5 \leq x \leq -1 \\ \frac{1-x}{2}, & -1 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

olarak bulunur. Eğer karar verici  $\alpha$  kesim katsayısını 0,5 olarak saptamışsa -1 normal değerinin komşuları (2.5) ve (2.6) formüllerinden,

$$a_1^{0,5} = -3 \text{ ve } a_3^{0,5} = 0$$

olarak bulunacaktır. Diğer bir deyişle -1 normal değeri ile aynı anlam düzeyinde bulunan sayılar kümesi  $[-3, 0]$  aralığıdır. Söz konusu ilişki Şekil 2.12' de gösterilmiştir.

Eğer bulanık mantık sayılarına ilişkin kümede normal kabul edilen iki değer varsa diğer bir deyişle küme,  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$  şeklinde 4 belirleyici değerden oluşuyorsa bu durumda üyelik fonksiyonu yamuk üyelik fonksiyonu tipinde oluşacaktır. Yamuk üyelik fonksiyonu (2.7) formülünde gösterilmiştir. Şekil 2.12'de  $A = (-5, -1, 1)$  kümesinin komşuluğu gözükmemektedir.

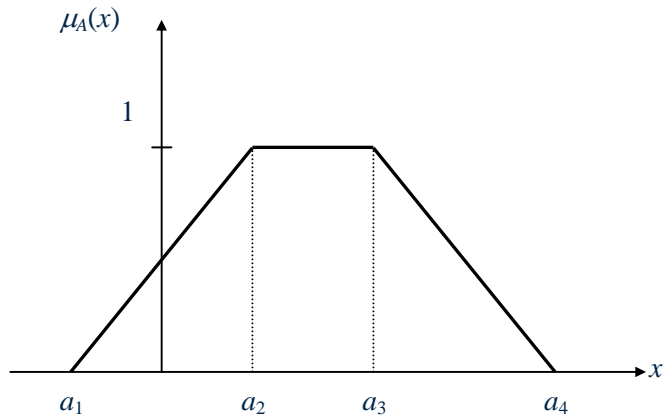


**Şekil 2.12.**  $A = (-5, -1, 1)$  Kümesinin komşuluğu

Üyelik fonksiyonu, (2.8) formülünde tanımlanmıştır:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases} \quad (2.8)$$

Söz konusu komşuluk Şekil 2.13' deki gibi oluşacaktır.



**Şekil 2.13.** Yamuk Sayı Komşuluğu

Örnek olarak, oda sıcaklığının 0-25 °C aralığı soğuk, 25-40 °C aralığı sıcak olduğu düşünülen bir ortam da, normal mantıkla düşünüldüğünde 24.9 °C soğuk ve 25.1 °C sıcak olacaktır. Dolayısıyla soğuk olduğunda manuel olarak ısıtıcı çalıştırılmak istenirse sıkıntı yaşanacaktır. Eğer bulanık mantıkla çözüme ulaşılacak istenirse aşağıdaki işlemler yapılabilir.

Burada 25 °C normal değer seçilmiş ve (0,25,40) bulanık kümesinde aşağıdaki üçgensel üyelik fonksiyonunu oluşturulur:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x-0}{25-0}, & 0 \leq x \leq 25 \\ \frac{40-x}{40-25}, & 25 \leq x \leq 40 \\ 0, & x > 40 \end{cases} \quad (2.9)$$

Bu fonksiyonda  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = 25$  ve  $a_3 = 40$  kabulleri yapılmış ve 25 normal değerinin komşuluğu için aşağıdaki formüller elde edilmiştir:

$$a_1^\alpha = 25.\alpha, \quad (2.10)$$

$$a_3^\alpha = 40 - 15.\alpha. \quad (2.11)$$

**Çizelge 2.3.** Bulanık mantık örneği için sonuç çıktıları

$\alpha$	25 Normal Değerinin Komşuluğu
0,99	24,75-25,15
0,97	24,25-25,45
0,95	23,75-25,75
0,93	23,25-26,05
0,90	22,5-26,5

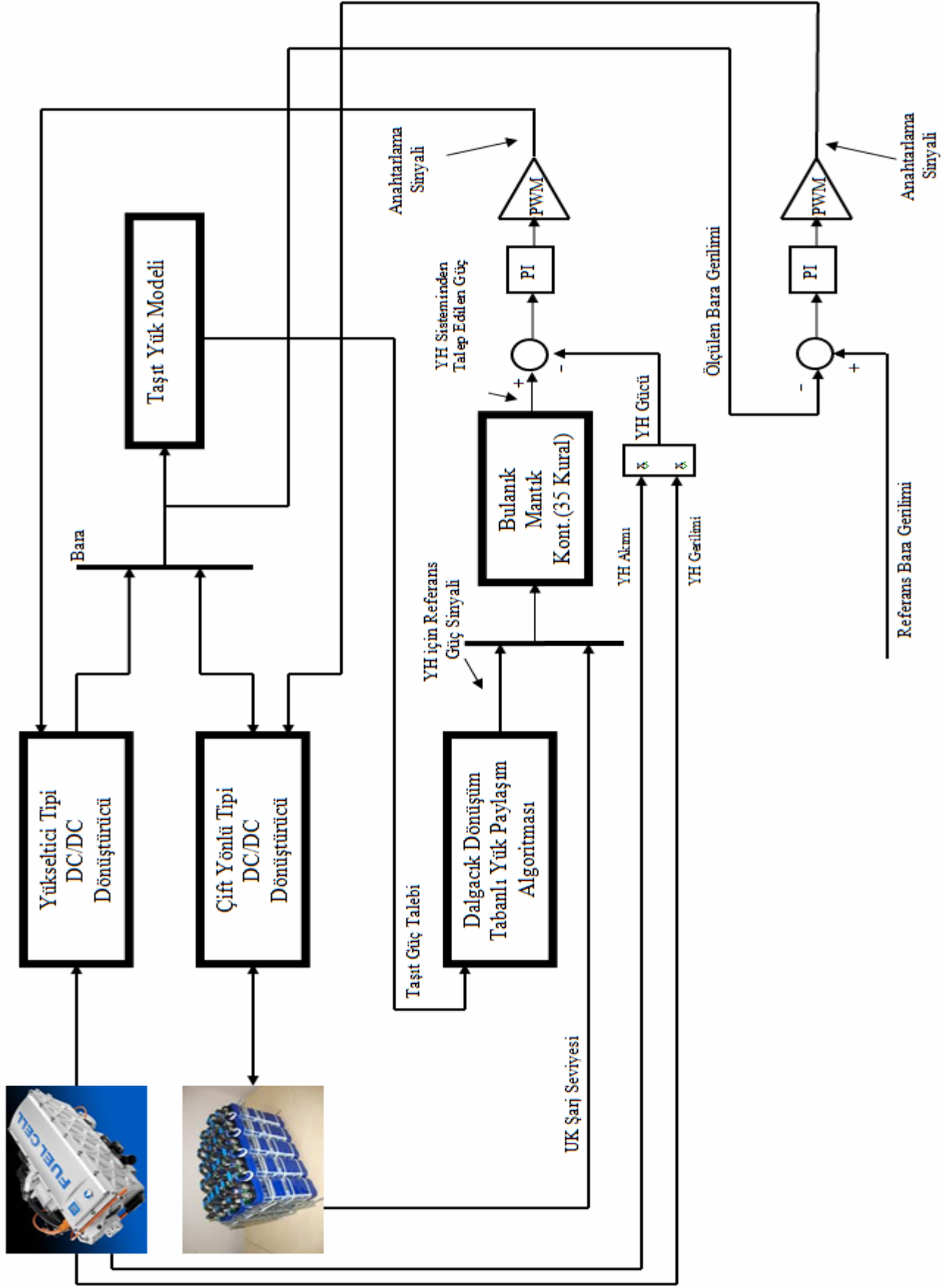
Hesaplamalarda değişik  $\alpha$  kesim katsayıları için elde edilen komşuluklar tablonun 2. sütununda gösterilmiştir. Örneğin 0,90  $\alpha$  değeri için 22,5 altı soğuk ve 26,5 üstü sıcak olarak belirlenebilecektir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Hibrit Sistem Konfigürasyonu

Bu tez çalışmasında göz önüne alınan, hibrit sistemin konfigürasyonu Şekil 3.1'de verilmiştir. Sistemin çalışması şu şekilde ifade özetlenebilir;

Sistemin ana parçaları; YH, UK, güç kontrol üniteleri ve kontrolörden oluşmaktadır. Burada ilk olarak taşıttan başlamak gerekirse, daha sonra Bölüm 3.2'de anlatılacak olan şehir içi sürüş çevrimine göre taşıttın bir yük talebi olacaktır. Bu yük talebi dalgacık dönüşüm tabanlı yük paylaşım algoritmasına giriş yapacak ve buradan YH için referans güç sinyali elde edilecektir. Burada yapılmak istenen, YH sistemi için daha kararlı bir sinyal elde etmek ve dolayısıyla YH'sini daha kararlı değerlerde çalıştırıp, YH'nin çok nemlenme veya az nemlenmesini engelleyip hem YH'nin çalışma ömrünü uzatmak hem de hidrojen tüketimin önemli oranda azaltıp yakıttan tasarruf etmektir. Buradan elde edilen referans güç sinyali ile, UK'nın şarj seviyesi bulanık mantık kontrolöre giriş yapar. Daha sonra detaylı olarak açıklanacak olan 35 kural tabanlı bulanık mantık kontrolörden YH'den talep edilen güç elde edilir. Bu talep edilen güç ile, YH'nin akım ve gerilimi çarpılarak elde edilen güç karşılaştırılmakta ve elde edilen hata sinyali PI kontrolöre girilmektedir. Burada YH çıkışındaki yükseltici tip DC/DC dönüştürücü için üretilen anahtarlama sinyali elde edilecektir. YH sistemi çıkışındaki yükseltici tip DC/DC dönüştürücü, bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen güç değerinin YH sisteminden transfer edilmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Dolayısıyla YH sisteminden talep edilen gücün yüke aktarılması sağlanmaktadır. Öte yandan referans bara gerilimiyle, ölçülen bara gerilimi değeri karşılaştırılmakta ve elde edilen sinyal bir PI kontrolöre girmektedir. Buradan UK çıkışındaki çift yönlü tip DC/DC dönüştürücü için üretilen anahtarlama sinyali elde edilmektedir. Burada çift yönlü DC/DC dönüştürücüden bara gerilimini düzenlemek amacıyla yararlanılmaktadır [17]. Bu sayede bara gerilimi referans değeri civarında tutulabilmekte ve böylece bara gerilimini istenilen değerde tutarken, YH sisteminden istenilen gücün transfer edilebilmesine imkân sağlamaktadır.

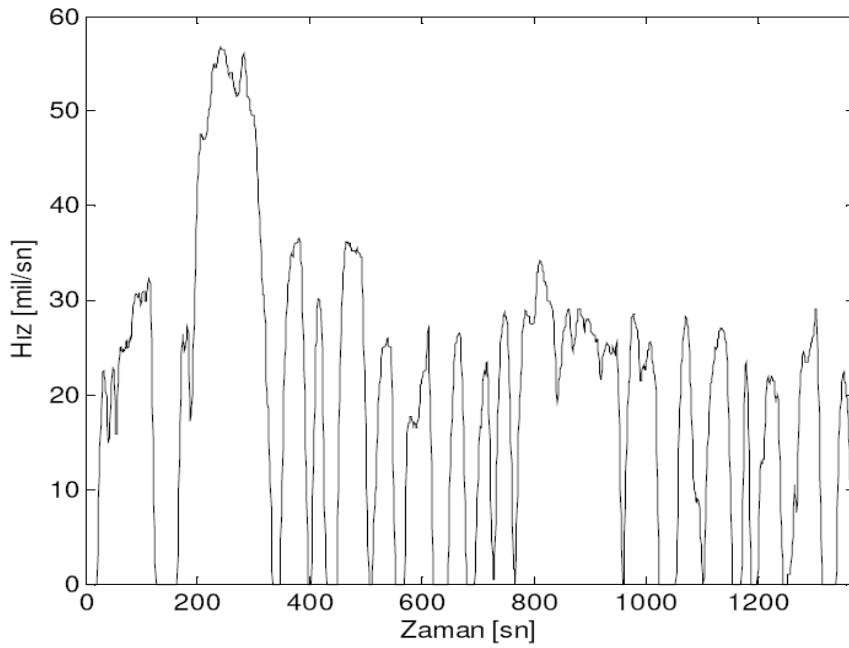


Şekil 3.1. Hibrit Sistem Konfigürasyonu



### 3.2.Sürüş Çevrimi

Sürüş çevrimi, bir taşıtın belirli şartlar altında sürüş esnasındaki, belirli bir süre için hız ve zaman grafiği olarak ifade edilebilir. Bu da geliştirilen bir sistemin dinamik cevabını anlamak ve bunun üzerinde çalışmalar yapabilmek amacıyla kullanılabilir. Daha önce belirli standartlara göre çıkartılmış, standart şehir içi sürüş çevrimi (UDDS) ve Avrupa şehir içi sürüş çevrimi (ECE-15) bunlardan bir kaçıdır. Şekil 3.2' de UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın zamana göre hız değişimi görülmektedir.



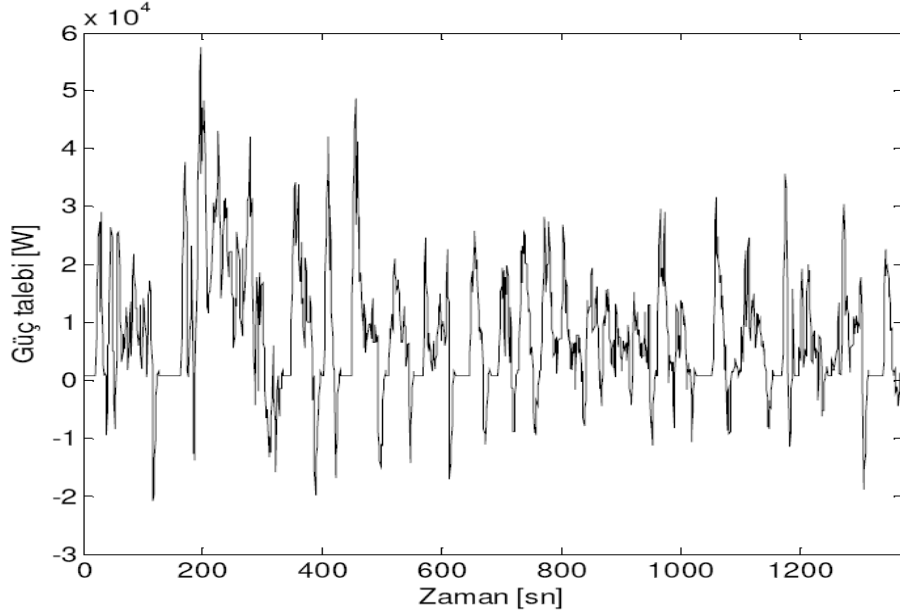
**Şekil 3.2.** UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi [18]

Bu grafikten istenen aracın hangi zamanlarda ne kadar güç talebi olduğunu belirlemek ve sonuç olarak ta güç taleplerini karşılamak ve en fazla enerji kazanımını sağlamak için sistem geliştirmektir. Dolayısıyla çalışmalarda bu sürüş çevrimlerinin önemi oldukça büyüktür. Çizelge 3.1'de UDDS sürüş çevrimi karakteristikleri verilmiştir [18].

**Çizelge 3.1.** UDDS sürüş çevriminin özellikleri

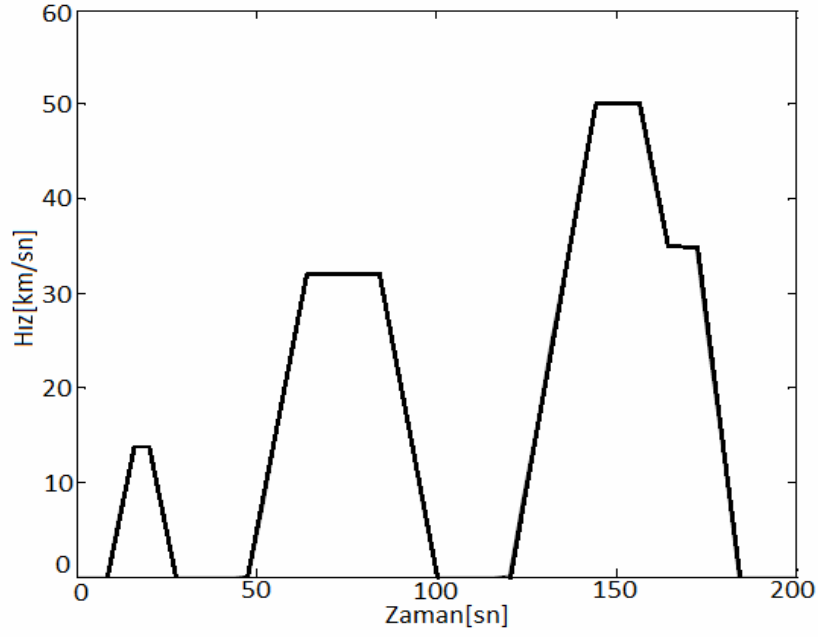
Zaman	1369 [sn]
Menzil	7.45 [mil]
Azami hız	56.7 [mil/s]
Ortalama hız	19.6 [mil/s]
Azami ivmelenme	1.48 [m (sn <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
Azami yavaşlama	-1.48 [m (sn <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
Ortalama ivmelenme	0.51 [m (sn <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
Ortalama yavaşlama	0.58 [m (sn <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
Boşta çalışma zamanı	259 [sn]

Şekil 3.3'de UDDS sürüş çevrimindeki hız değişimine göre taşıtın güç talebi görülmektedir. Burada taşıtın hangi noktalarda yüksek güç talebinde bulunduğu ve hangi noktalarda stabil olduğu açıkça görülmekte, dolayısıyla bazı metotlarla bu güç talepleri birbirinden ayrılıp farklı birimlerden karşılanarak hibrit taşıt sisteminin performansı ve enerji kazanımı artırılabilir.



**Şekil 3.3.**UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi [18]

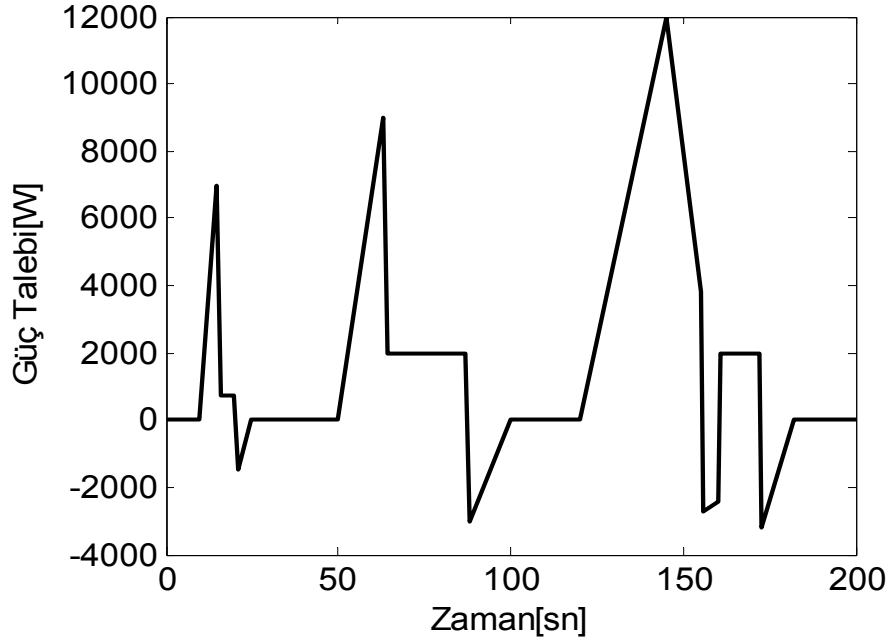
Uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir diğer sürüş çevrimi ise Avrupa şehir içi sürüş çevrimi ECE-15'e ait hız-zaman ve güç-zaman grafikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. UDDS'den farkı 1369 zaman aralığında değil de 200 sn zaman aralığında alınmış verilerden elde edilmiştir. Ayrıca maksimum hız 50 km/s olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.2'de ECE-15'e ait karakteristik değerler verilmiştir.



**Şekil 3.4.** ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.

**Çizelge 3.2.** ECE-15 sürüş çevriminin özellikleri

Zaman	200 [sn]
Menzil	1.05 [km]
Azami hız	50 [km/sn]
Ortalama hız	18.9 [km/s]
Azami ivmelenme	5 [km/sn/s]
Boşta çalışma zamanı	%29.2



**Şekil 3.5.** ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi

### 3.3.YH'nin Modellenmesi

Yakıt hücresi temelli araçlar, yakıt ekonomisinin geliştirilmesi noktasında önemli bir potansiyele sahiptir ve içten yanmalı motorlara sahip otomobillere göre çok daha verimlidir. Bu nedenle YH teknolojileri araç uygulamaları için yakıt tasarrufu noktasında önemli bir çözümdür. Fakat bununla beraber tek başına geçici yüksek güç taleplerine tam olarak karşılık vermesi noktasında bazı sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Bu problem YH sistemini bir depolama sistemiyle beraber kullanarak giderilmektedir.

Bu kısımda benzetim programında kullanılan YH'nin kimyasal denklemleri ve buna bağlı olarak YH'nin modeli verilecektir [19]. Daha sonra hibrit sistem modellenmesinde yakıt hücresinin bu modeli tüm hibrit sistem modeline adapte edilecektir. Aşağıda YH modeli için kullanılan kısaltmalar verilmiştir.

$B, C$  : PDM YH sistemindeki aktivasyon aşırı geriliminin benzetimi için kullanılan sabitler [ $A^{-1}$ ] ve [V]

$E$  : Nernst anlık gerilimi [V]

$E_0$  : Standart yüksüz hal gerilimi [V]

$F$  : Faraday sabiti [C (kmol)<sup>-1</sup>]  
 $I_{FC}$  : YH akımı[A]  
 $K_{an}$  : Anod valf sabiti [ $\sqrt{kmolkg}$  (atm s)<sup>-1</sup>]  
 $K_{H_2}$  : Hidrojen valfi molar sabiti [kmol (atm sn)<sup>-1</sup>]  
 $K_{H_2O}$  : Su valfi molar sabiti [kmol (atm sn)<sup>-1</sup>]  
 $K_{O_2}$  : Oksijen valfi molar sabiti [kmol (atm sn)<sup>-1</sup>]  
 $K_r$  : Modelleme sabiti [kmol (sn A)<sup>-1</sup>]  
 $M_{H_2}$  : Hidrojen molar yığıını [kg (kmol)<sup>-1</sup>]  
 $N_0$  : Yığıındaki seri YH sayısı  
 $P_{H_2}$  : Hidrojen kısmi basıncı [atm]  
 $P_{H_2O}$  : Su kısmi basıncı [atm]  
 $P_{O_2}$  : Oksijen kısmi basıncı [atm]  
 $q_{O_2}$  : Hidrojenin girişteki molar akışı [kmol (sn)<sup>-1</sup>]  
 $q_{H_2}^{in}$  : Hidrojen giriş akışı [kmol (sn)<sup>-1</sup>]  
 $q_{H_2}^{out}$  : Hidrojen çıkış akışı [kmol (sn)<sup>-1</sup>]  
 $q_{H_2}^r$  : Reaktif hidrojen akışı [kmol (sn)<sup>-1</sup>]  
 $q_{H_2}^{req}$  : Yük değişikliğini karşılamak için gerekli hidrojen miktarı  
 $R$  : Evrensel gaz sabiti [(1 atm) (kmol K)<sup>-1</sup>]  
 $R^{int}$  : YH iç direnci [ $\Omega$ ]  
 $T$  : Mutlak sıcaklık [K]  
 $U$  : Faydalanma oranı  
 $V_{an}$  : Anod hacmi [m<sup>-3</sup>]  
 $V_{cell}$  : YH'nin DC çıkış voltajı [V]  
 $\tau_{H_2}$  : Hidrojen zaman sabiti [sn]  
 $\tau_{O_2}$  : Oksijen zaman sabiti [sn]  
 $\tau_{H_2O}$  : Su zaman sabiti [sn]

$\eta_{act}$  : Aktivasyon aşırı gerilimi [V]

$\eta_{ohmic}$  : Omik aşırı gerilimi [V]

YH'inde valfe doğru olan molar gaz akışı ile kanal içerisindeki kısmi basınç arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} . \quad (3.1)$$

Hidrojen molar akışı için üç önemli faktör vardır. Bunlar, hidrojen giriş akışı, hidrojen çıkış akışı ve reaksiyon sırasındaki hidrojen akışıdır. Bu üç faktör arasındaki bağıntı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) . \quad (3.2)$$

Hidrojen akışı ve YH sistemi akımı arasındaki basit elektrokimyasal ilişkiye göre reaktif hidrojen akış oranı

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I_{FC}}{2F} = 2K_r I_{FC} \quad (3.3)$$

şeklinde verilebilir.

Eşitlik 2.1. ve 2.3. kullanılıp Laplace dönüşümü uygulanırsa hidrojen kısmi basıncı s domeninde aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2} RT} , \quad (3.4)$$

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{FC}) . \quad (3.5)$$

Aynı şekilde su ve oksijenin kısmi basıncı elde edilerek YH çıkış voltajı aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohmic} , \quad (3.6)$$

$$\eta_{act} = -B \ln(CI_{FC}) , \quad (3.7)$$

$$\eta_{ohmic} = -R^{int} I_{FC} . \quad (3.8)$$

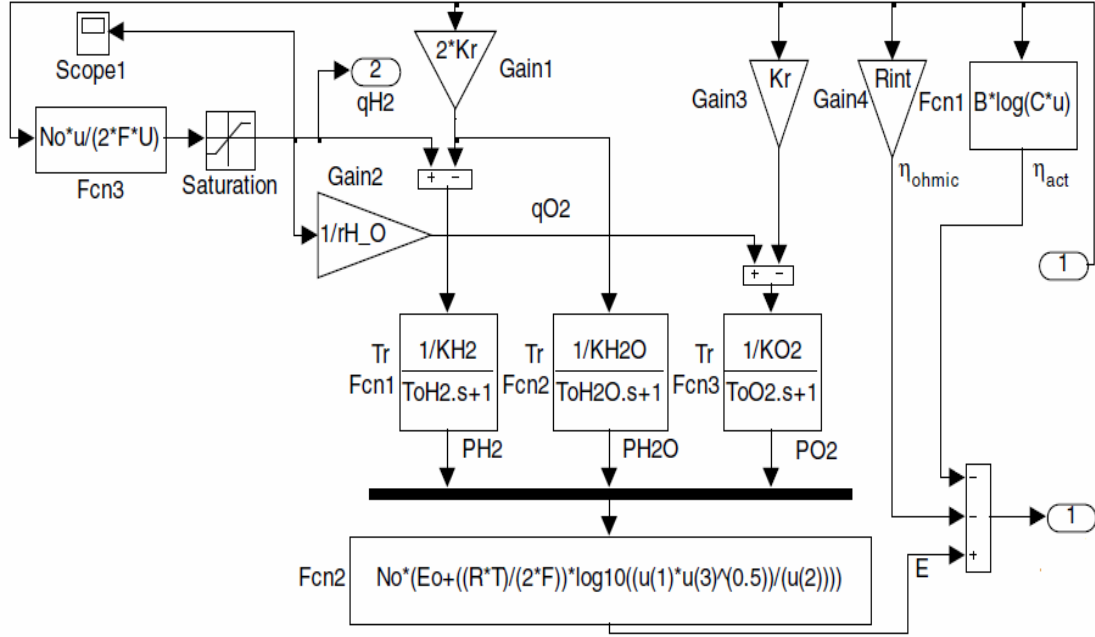
Nernst ani voltajı da şu şekilde ifade edilir [20].

$$E = N_0 \left[ E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left[ \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] \right] . \quad (3.9)$$

YH yük talebine göre hidrojen tüketir. Gerekli olan hidrojen miktarı, yüksek basınç tankından talep edilir. Uygulama şartlarında YH çıkış gücüne göre olan hidrojen akış oranını kontrol etmek için, geri besleme kontrol stratejisinden yararlanılır. Bu geri besleme kontrolünü sağlamak için, çıkıştan alınan YH akımı, hidrojen molar forma çevrilirken girişte tekrar aktarılır. Hidrojen tankından elde edilen hidrojen miktarı

$$q_{H_2}^{req} = \frac{N_0 I_{FC}}{2FU} \quad (3.10)$$

şeklinde verilebilir. Şekil 3.6'da YH dinamik modeli verilmiştir [19-20].



Şekil 3.6. YH dinamik modeli

### 3.4. Ultrakapasitör Sisteminin Modellenmesi

Ultrakapasitörler daha önce belirtildiği gibi güç yoğunluğu açısından sıradan pillerden avantajlı durumdadır. Yakıt hücresi sistemi ile tüm hibrit sistemi arasında bazı zor yol şartlarında veya ani hızlanmalarda bir güç farkı oluşmaktadır. Aracın performans kaybı yaşamaması için bu aradaki yük farkının karşılanması gerekmektedir. Ultrakapasitörün güç yoğunluğu avantajı nedeniyle yakıt hücresi sistemiyle beraber kullanılarak bu aradaki yük farkı düzgün bir şekilde kapatılabilmektedir. Bu kısımda ultrakapasitörün matematiksel modeli açıklanacaktır. Ultrakapasitör modellenirken bazı parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreler aşağıdaki şekildedir [21 ];

$C_1$  : UK ana kapasitesi [F]

$C_2$  : “Yavaş kol” kapasitesi [F]

$R$  : “Yavaş kol” direnci [ $\Omega$ ]

$R_S$  : UK seri direnci (ESR) [ $\Omega$ ]

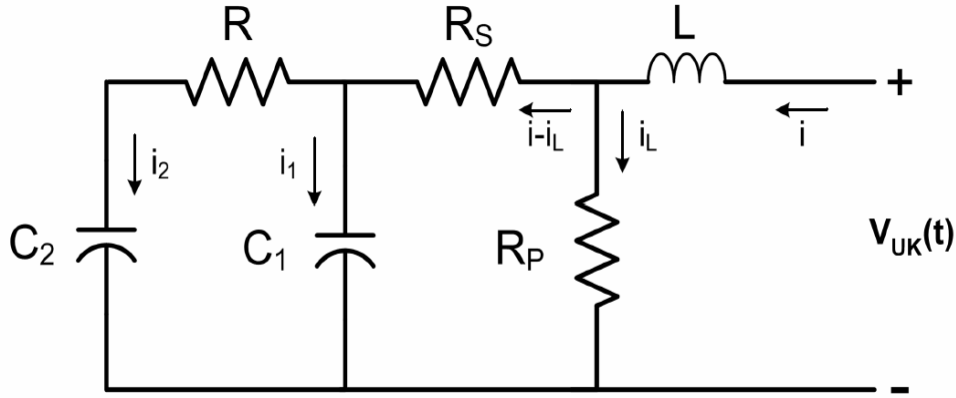
$R_P$  : UK paralel direnci [ $\Omega$ ]



$L$  : UK endüktansı [H]  
 $V_{UC}$  : UK çıkış gerilimi [V]  
 $V_{C1}$  :  $C_1$  uç gerilimi [V]  
 $V_{C2}$  :  $C_2$  uç gerilimi[V]  
 $V_C^0$  : UK başlangıç gerilimi [V]  
 $V_{R_s}$  :  $R_s$  uç gerilimi [V]  
 $V_{R_p}$  :  $R_p$  uç gerilimi [V]  
 $V_L$  :  $L$  uç gerilimi [V]  
 $i$  : UC şarj/deşarj akımı [A]  
 $i_1$  :  $C_1$ 'den geçen akım [A]  
 $i_2$  :  $C_2$ 'den geçen akım [A]  
 $SOC$  : UK'nın şarj durumu  
 $V_{max}$  : Maksimum UK gerilimi[V]

Literatürde en çok kullanılan UK modeli bir kapasite, bir eşdeğer iç direnç ve boştaki kayıpları gösteren bir eşdeğer paralel dirençten oluşan klasik RC eşdeğer devresidir [22-23]. Klasik RC devresi birçok uygulama için kullanışlıdır, ancak son zamanlarda daha etkili UK modelleri geliştirilmiştir.

UK modelinin oluşturulmasında yararlanılan eşdeğer devre Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Eşdeğer devrede  $R_s$  ve  $C_1$ 'den oluşan RC kolu, "hızlı kol" olarak adlandırılmakta ve UK'nın saniyeler mertebesindeki anlık cevabını temsil etmektedir.  $R$  ve  $C_2$ 'den oluşan RC kolu ise "yavaş kol" olarak adlandırılmakta ve şarj vedeşarj sonrasında UK'nın içerisindeki enerji dağılımını temsil etmektedir. Ayrıca  $R_p$  paralel direnci, depolanan enerjinin açık devre durumunda ne kadar süre mevcut kalabileceğini değerlendirebilmek açısından önemli bir etken olan boştaki kayıpları temsil etmektedir [24].



**Şekil 3.7.** UK benzetim modelinin geliştirilmesinde yararlanılan eşdeğer devre

UK çıkış gerilimi, UK'nın ana kapasitesinin uçlarındaki gerilim değeri ile UK seri direnci ve endüktansından kaynaklanan gerilim düşümü kullanılarak elde edilebilir. Buna göre UK çıkış gerilimi, şu şekilde verilebilir;

$$V_{UK} = V_{C1} - V_{R_S} - V_L . \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'den  $V_{R_S}$  şu şekilde bulunabilir;

$$V_{R_S} = R_S (i - i_L) . \quad (3.12)$$

Daha sonra  $V_L$  ,  $V_{C_1}$  ,  $V_{C_2}$  'de aşağıdaki eşitlikten bulunabilir:

$$V_L = L \frac{di}{dt} , \quad (3.13)$$

$$V_{C1} = V_C^0 - \frac{1}{C_1} \int i_1 dt , \quad (3.14)$$

$$V_{C2} = V_C^0 - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt . \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.12) –(3.15)'te kullanılan akım ifadeleri de şu şekilde verilebilir:

$$i_L = \frac{V_{R_p}}{R_p} , \quad (3.16)$$

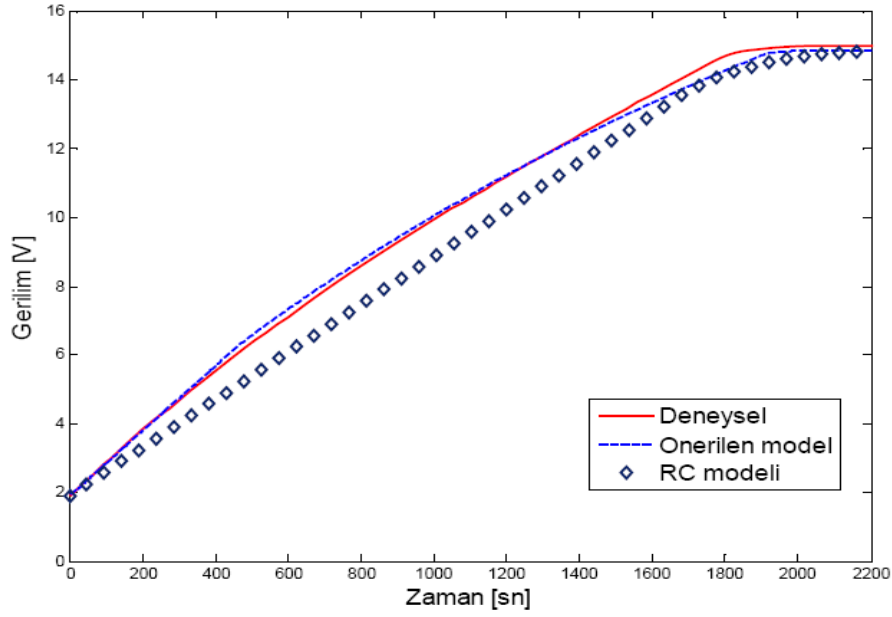
$$i_1 = i - i_L - i_2 , \quad (3.17)$$

$$i_2 = \frac{V_{C_1} - V_{C_2}}{R} . \quad (3.18)$$

UK'nın şarj durumu da şu şekilde verilebilir:

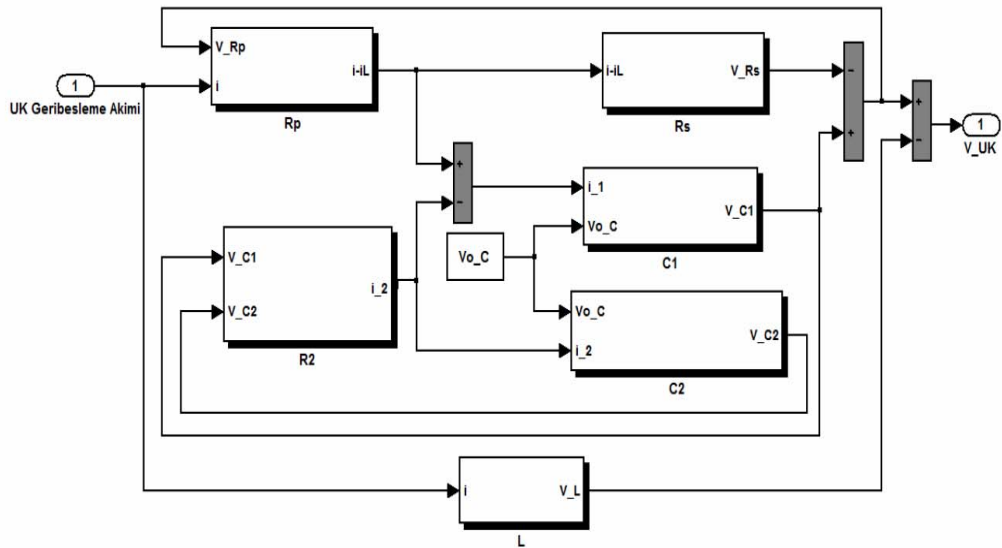
$$SOC = \frac{V_{UK}}{V_{maks}} . \quad (3.19)$$

Yapılan bir çalışmada [24] modelin geçerliliğini kanıtlamak amacıyla bir deney seti kurulmuş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, bir şarj profili altında Maxwell® 430F, 16 V'luk UK'nın dinamik gerilim cevabı incelenmiştir. Şekil 3.8'de, 23 °C'de 430 F, 3 A'lik şarj durumu altında 16 V'luk UK için deneysel çalışmalar ile birlikte, önerilen UK modelinin ve klasik RC modelinin benzetim sonuçları gösterilmektedir. Önerilen modelin benzetim sonuçları ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların oldukça benzerlik gösterdiği Şekil 3.8'de açıkça görülmektedir. Önerilen modelin klasik RC modeliyle kıyaslandığında daha doğru sonuçlar verdiği de Şekil 3.8'de görülebilmektedir.



**Şekil 3.8.** 430 F, 16.2 V ve 23 °C parametrelerine sahip 3 A'lik akım için UK'nın çıkış gerilimindeki değişim [24]

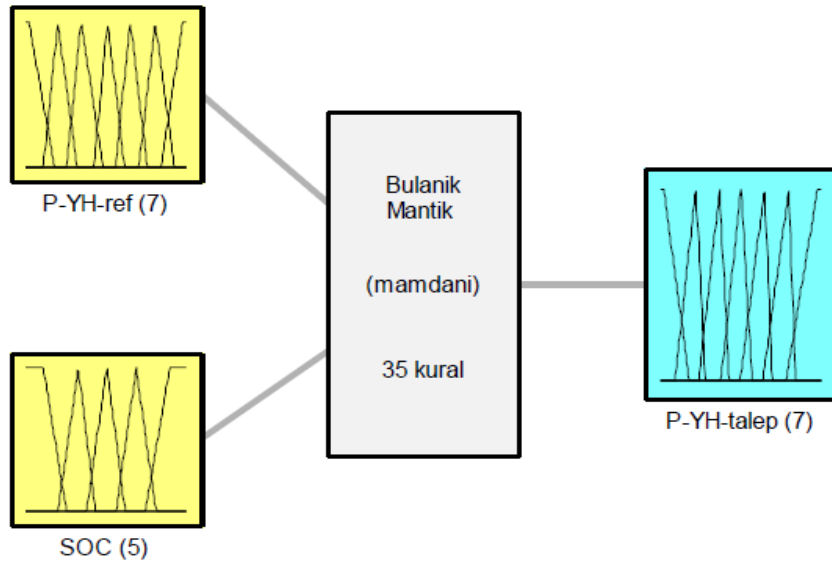
Yukarıdaki eşitliklerden yararlanılarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan UK modeli Şekil 3.9'da görülmektedir. Oluşturulan bu model daha sonra bütün sisteme kontrollü gerilim kaynağı olarak entegre edilmiştir.



**Şekil 3.9.** UK Dinamik Modeli

### 3.5. Hibrit Sistemin Enerji Yönetim Stratejisi için Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Sistemi

Bulanık mantık kontrolör sistemi hibrit enerji sistemlerinin kontrolü için oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Bu nedenle hibrit sistemin modellenmesi için bulanık mantık kontrolörden yararlanılmıştır. Sürüş çevriminden elde edilen güç talebi ilk önce dalgalı dönüşümü temelli yük paylaşım sistemine girmekte ve buradan yakıt hücresi referans güç sinyali elde edilmektedir. Buradaki amaç yakıt hücresi için daha kararlı bir sinyal elde ederek, yakıt hücresini daha düşük güç değerleri altında çalıştırıp daha az enerji harcamasını sağlamak ve yakıt hücresinin ömrünü uzatmaktır. Dalgalı dönüşüm temelli yük paylaşım sistemi basit olarak Bölüm 3.6'da anlatılacaktır. Şekil 3.10'da 35 kurallı bulanık mantık yapısı görülmektedir.



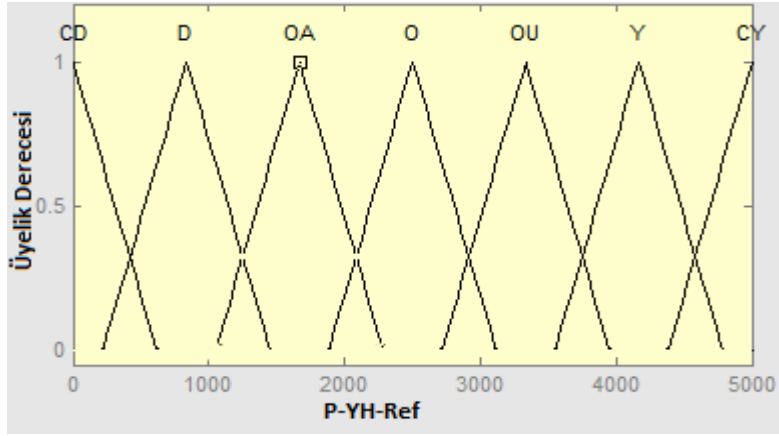
**Şekil 3.10.** Bulanık mantık kontrol yapısı

Dalgacık dönüşüm temelli yük paylaşım sisteminden elde edilen yakıt hücresi referans güç sinyali ve ultrakapasitörün şarj seviyesi olmak üzere iki giriş Şekil 3.10'da görüldüğü üzere, bulanık mantık kontrolörün girişine uygulanmaktadır. Çıkış olarak da yakıt hücresi sisteminden talep edilen güç elde edilecektir. Yakıt hücresi sistemi de bulanık mantık sistemin belirlediği güç miktarını yüke aktarmaktadır.

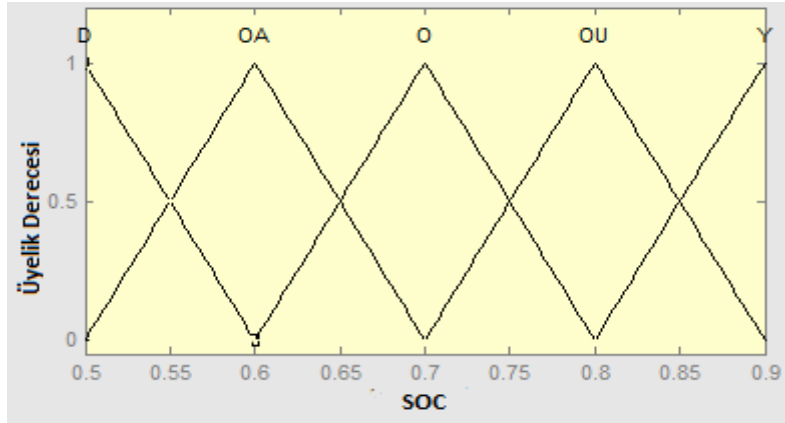
Diğer bir önemli hususta ultrakapasitörün şarj durumudur. Daha öncede ifade edildiği gibi ultrakapasitörün şarj durumu belirli bir değerde tutulmalıdır [25]. Böylece ultrakapasitör talep edilen gücü sağlayabilecek aynı zamanda frenleme enerjisini de en etkili biçimde depolayabilecektir. Eğer şarj seviyesi istenen değer üstünde ise yakıt hücresinin sisteme aktardığı güç referans güç değerinin altında olmaktadır. Çünkü ultrakapasitör şarj seviyesinin istenen değer civarına çekmek için sisteme enerji verecek ve dolayısıyla yakıt hücresi sisteme daha az güç transfer edecektir. Eğer şarj seviyesi istenen değer altında ise yakıt hücresi sistemi, sistemden talep edilen yükü karşılamak için sisteme daha fazla güç aktaracaktır. Böylece ultrakapasitör sisteminin şarj seviyesi istenen aralıkta tutulurken, yakıt hücresi sistemi dalgacık dönüşümü tarafından sağlanan uygun bir transfer ile sisteme güç aktarmaktadır. Sonuç olarak oluşturulan kontrol stratejisi sayesinde sistemin verimliliği artırılırken, yakıt hücresinin ani güç taleplerine maruz kalması engellenerek, çok nemlenme veya hiç nemlenmeme olaylarına maruz kalması önlenir ve yakıt hücresinin ömrü uzatılabilir.

Tüm sistem konfigürasyonu şöyle özetlenebilir, sürüş çevriminden elde edilen güç talebi ilk önce dalgacık dönüşüm tabanlı yük paylaşım algoritmasına girer. Buradan yakıt hücresi referans güç sinyali elde edilir. Buradan elde edilen yakıt hücresi referans güç sinyali ve ultrakapasitörün şarj seviyesi 35 kurallı bulanık mantık kontrolöre giriş yapar ve kontrolör çıkışında yakıt hücresi sisteminden talep edilen güç elde edilir.

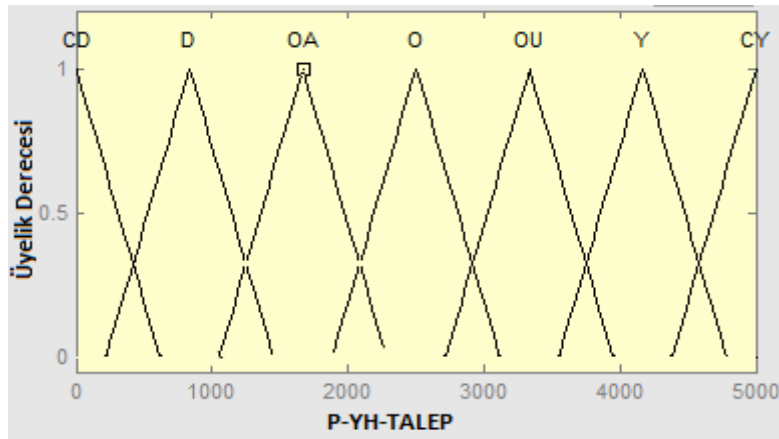
Bu verilere göre aşağıda, bulanık mantık kontrolörün 1. girişi olan yakıt hücresi referans gücü, 2. girişi olan ultrakapasitörün şarj durumu ve çıkış olarak yakıt hücresinden talep edilen referans güçlere ait üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Şekil 3.11-3.13'de sırasıyla ECE-15 sürüş çevrimi için YH için referans güç sinyali üyelik fonksiyonu, SOC üyelik fonksiyonu ve YH'den talep edilen referans güç sinyali üyelik fonksiyonu görülmektedir.



**Şekil 3.11.** ECE-15 sürüş çevrimi için P-YH-Ref üyelik fonksiyonu



**Şekil 3.12.** ECE-15 sürüş çevrimi için SOC üyelik fonksiyonu



**Şekil 3.13.** ECE-15 sürüş çevrimi için P-YH-Talep üyelik fonksiyonu

Şekillerde görülen üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan bulanık mantık kontrolörün kuralları Çizelge 3.3’ de verilmiştir. Burada kullanılan kısaltmalar; “CD: Çok Düşük, D:Düşük, OA: Orta Altı, O:Orta, OU: Orta Üstü, Y:Yüksek ve CY:Çok Yüksek” seklindedir.

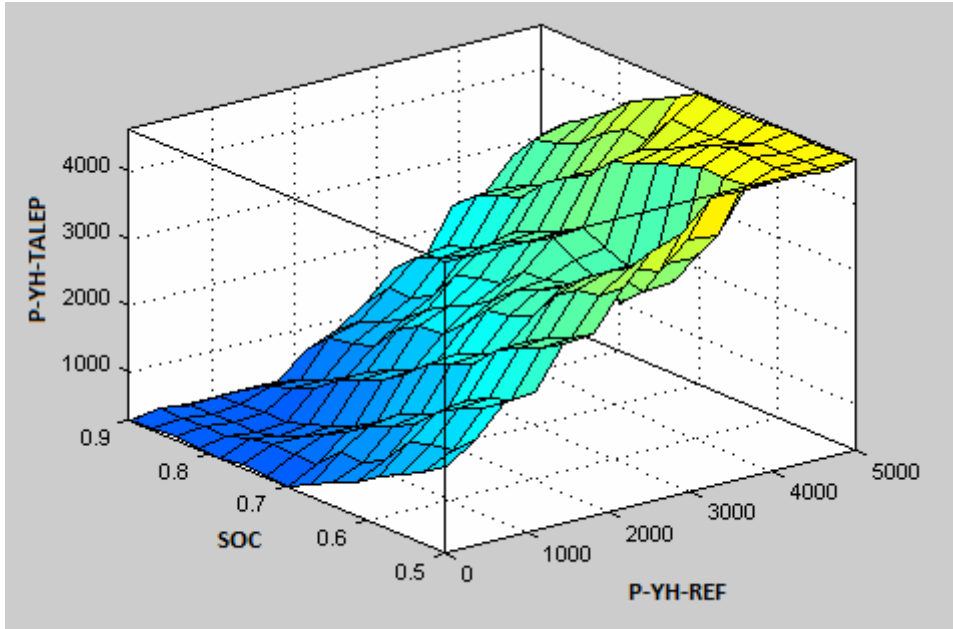
**Çizelge 3.3.** Bulanık mantık kural tabanı

KURAL 1	Eğer YH referans gücü CD ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü OA’dır.
KURAL 2	Eğer YH referans gücü CD ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü D’dir.
KURAL 3	Eğer YH referans gücü CD ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü CD’dir.
KURAL 4	Eğer YH referans gücü CD ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü CD’dir.
KURAL 5	Eğer YH referans gücü CD ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü CD’dir.
KURAL 6	Eğer YH referans gücü D ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü O’dir.
KURAL 7	Eğer YH referans gücü D ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü OA’dır.
KURAL 8	Eğer YH referans gücü D ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü D’dir.
KURAL 9	Eğer YH referans gücü D ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü CD’dir.
KURAL 10	Eğer YH referans gücü D ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü CD’dir.
KURAL 11	Eğer YH referans gücü OA ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü OU’dir.
KURAL 12	Eğer YH referans gücü OA ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü OA’dır.
KURAL 13	Eğer YH referans gücü OA ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü OA’dır.
KURAL 14	Eğer YH referans gücü OA ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü D’dir.
KURAL 15	Eğer YH referans gücü OA ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü CD’dir.
KURAL 16	Eğer YH referans gücü O ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü Y’dir.
KURAL 17	Eğer YH referans gücü O ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü OU’dir.
KURAL 18	Eğer YH referans gücü O ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü O’dir.
KURAL 19	Eğer YH referans gücü O ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü OA’dır.
KURAL 20	Eğer YH referans gücü O ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü D’dir.
KURAL 21	Eğer YH referans gücü OU ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü CY’dir.
KURAL 22	Eğer YH referans gücü OU ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü O’dir.
KURAL 23	Eğer YH referans gücü OU ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü OU’dir.
KURAL 24	Eğer YH referans gücü OU ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü O’dir.
KURAL 25	Eğer YH referans gücü OU ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü OA’dır.



KURAL 26	Eğer YH referans gücü Y ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü CY'dir.
KURAL 27	Eğer YH referans gücü Y ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü CY'dir.
KURAL 28	Eğer YH referans gücü Y ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü Y'dir.
KURAL 29	Eğer YH referans gücü Y ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü OU'dir.
KURAL 30	Eğer YH referans gücü Y ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü O'dir.
KURAL 31	Eğer YH referans gücü CY ve şarj seviyesi D ise, YH talep gücü CY'dir.
KURAL 32	Eğer YH referans gücü CY ve şarj seviyesi OA ise, YH talep gücü CY'dir.
KURAL 33	Eğer YH referans gücü CY ve şarj seviyesi O ise, YH talep gücü CY'dir.
KURAL 34	Eğer YH referans gücü CY ve şarj seviyesi OU ise, YH talep gücü Y'dir.
KURAL 35	Eğer YH referans gücü CY ve şarj seviyesi Y ise, YH talep gücü OA'dir.

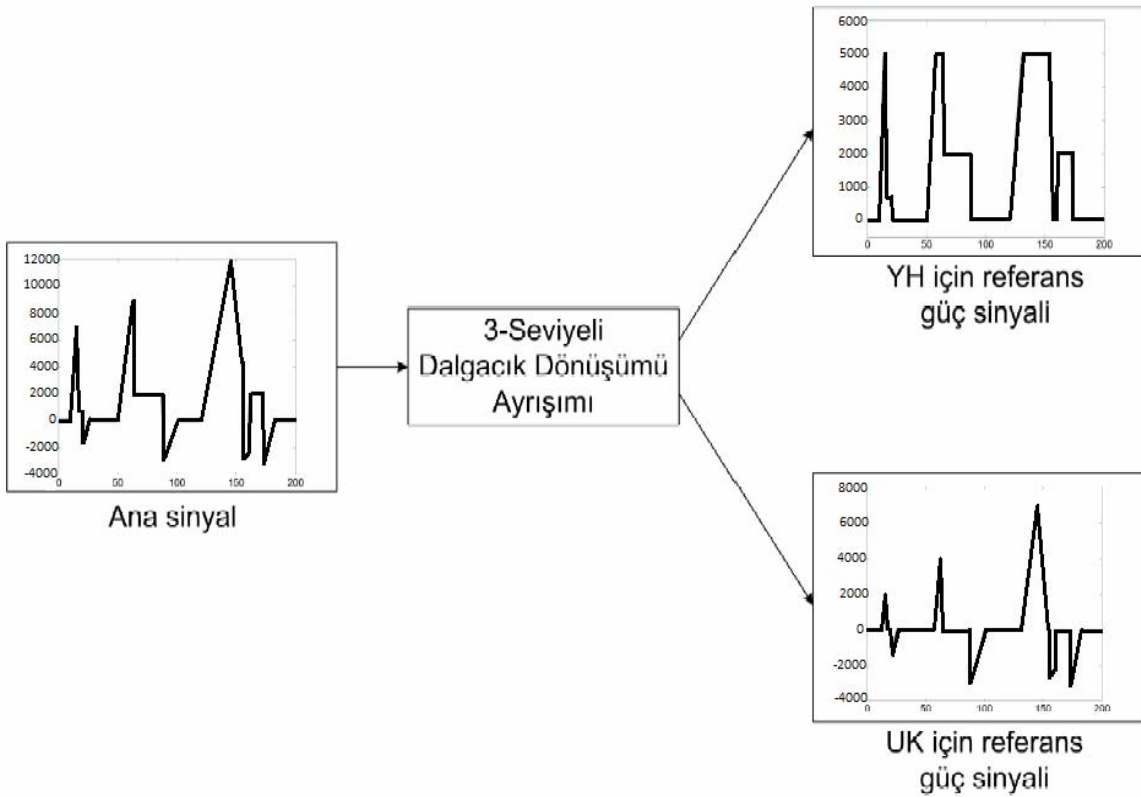
Ece-15 sürüş çevrimi için oluşturulan bulanık mantık kontrolöre ait çıkış yüzeyleri aşağıdaki Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.14.** Ece-15 sürüş çevrimi çıkış yüzeyleri üyelik fonksiyonu

### 3.6. Dalgacık dönüşümü

Benzetim programı için ele alınan sistemde ECE-15 sürüş çevrimi kullanılmaktadır. ECE-15 sürüş çevrimi sisteme adapte edildiğinde, ana sinyal için herhangi bir paylaşım algoritması kullanılmadığı durumda YH anlık güç taleplerine maruz kalacak ve dolayısıyla YH'nin verimi azalacak ve ömrü de kısalmaktadır. Bu problemi önlemek için dalgacık dönüşümlü yük paylaşım algoritması sisteme dahil edilmiştir. Böylece Şekil 3.15'de görüldüğü gibi ECE-15 sürüş çevrimi sinyalinin güç ayrışımı yapılacak ve daha uygun bir sinyal YH için kullanılacaktır. Şekilde 3.15'de ana sinyalin tepe değeri 12000 W civarındayken, YH için üretilen referans güç sinyali 5000 W civarında kalmaktadır. Bu durum YH'nin yüksek güç taleplerine maruz kalmayacağını göstermektedir [24]. Dalgacık dönüşümlü yük paylaşım algoritması sisteme hazır fonksiyon olarak dâhil edilecektir.

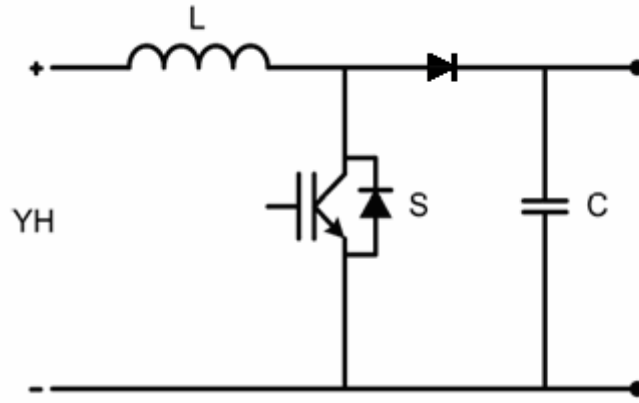


Şekil 3.15. Dalgacık Dönüşümü ile elde edilen ECE-15 için güç ayrışımı

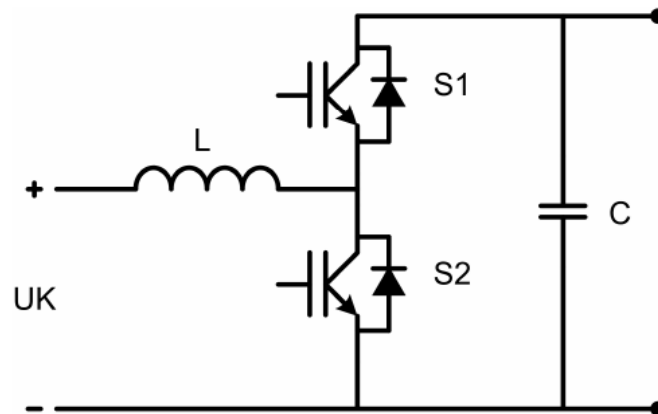
### 3.7. Güç düzenleme ünitesi

YH/UK hibrit sisteminde YH çıkışında, bulanık mantık kontrolöre göre belirlenen gücü YH sisteminden aktarılmasını sağlamak için tek yönlü yükseltici tip bir DC/DC dönüştürücü kullanılmaktadır. Şekil 3.16'da yükseltici tip DC/DC dönüştürücünün temel şekli verilmiştir.

UK çıkışında da, bara gerilimini düzenlemek amacı ile bir çift yönlü DC/DC dönüştürücü kullanılmıştır. Şekil 3.17'de çift yönlü DC/DC dönüştürücünün basit yapısı verilmiştir.



Şekil 3.16. YH'ye ait tek yönlü DC/DC dönüştürücü



Şekil 3.17. UK'ya ait çift yönlü DC/DC dönüştürücü

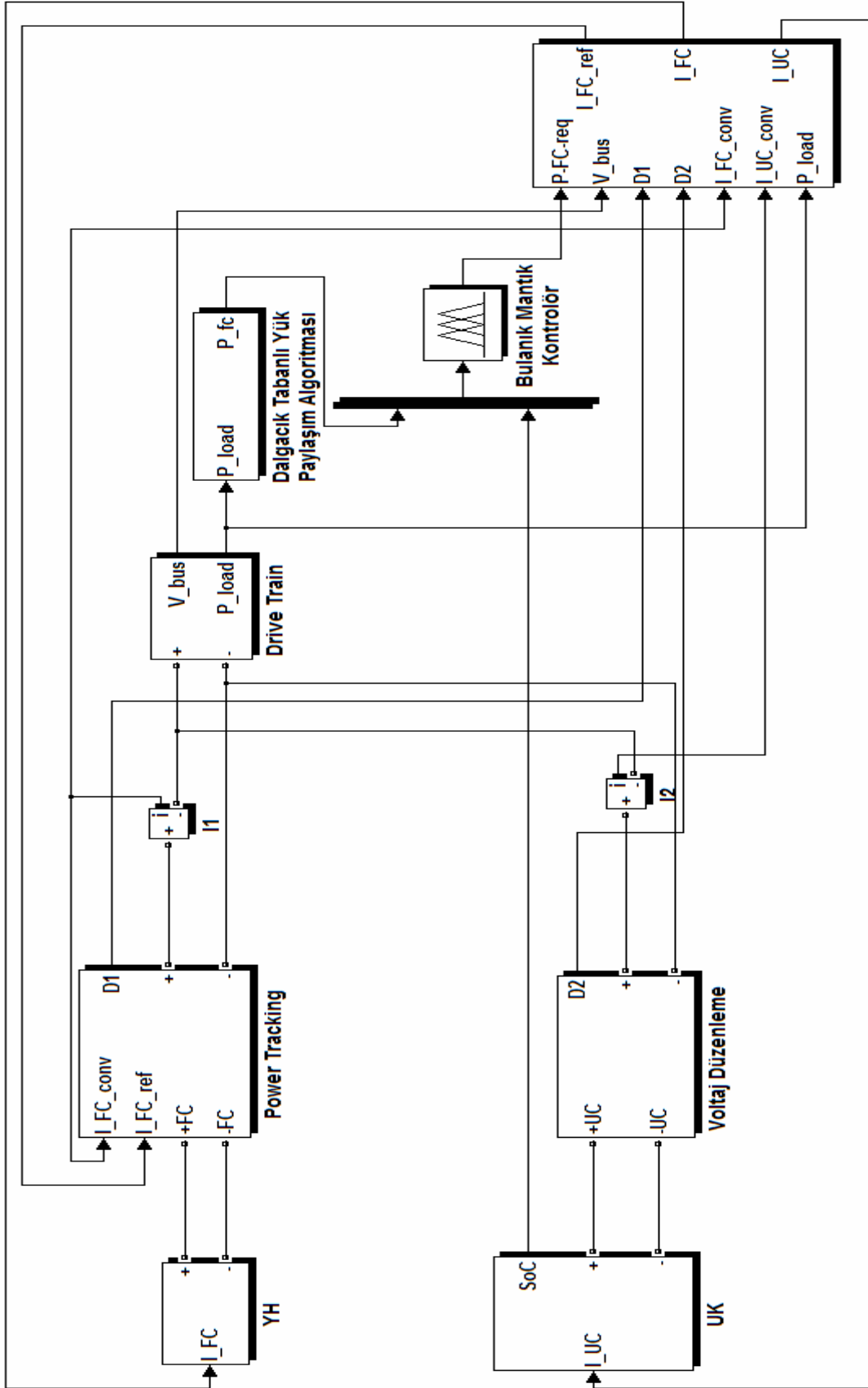
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, daha önceki bölümlerde matematiksel ifadeleri verilmiş olan YH, UK'nın ve bulanık mantık tabanlı kontrolörün tüm sisteme dahil edilmesiyle, YH/UK sisteminin Matlab/Simulink modelinin oluşturulması ve bu modele göre optimizasyon işleminin yapılması ele alınacaktır. Oluşturulan hibrit model Şekil 4.1'de verilmiştir.

ECE-15 sürüş çevrimi için 5 kW nominal güce sahip YH sisteminden yararlanılmaktadır. Kullanılan YH modeline ait parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir [18].

**Çizelge 4.1.** YH parametreleri

A	6.25[cm <sup>2</sup> (hücre <sup>-1</sup> )]
B	0.016 [V]
C	2.5 [F]
F	96486.7 [ C(kmol) <sup>-1</sup> ]
J <sub>maks</sub>	1.5 [ A (cm) <sup>2</sup> ]
N <sub>s</sub>	ECE-15 çevrimi için : 88
N <sub>p</sub>	ECE-15 çevrimi için : 1
R <sub>c</sub>	4.8 x 10 <sup>-4</sup> [Ω]
T <sub>0</sub>	28 [°C]
T <sub>rt</sub>	20
T <sub>ic</sub>	0.7
T <sub>it</sub>	4000
λ	12
ζ <sub>1</sub>	-0.9514
ζ <sub>2</sub>	0.00312
ζ <sub>3</sub>	7.4 x 10 <sup>-5</sup>
ζ <sub>4</sub>	-1.87 x 10 <sup>-4</sup>

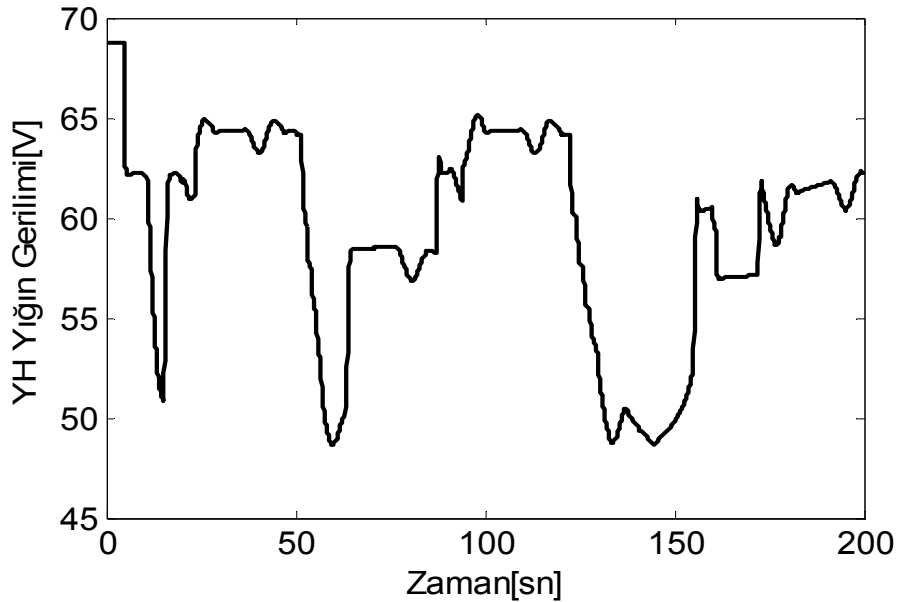


**Şekil 4.1.** Hibrit Sistemin Matlab/Simulink Modeli

Bu çalışmada, kapasite değeri 430 F, gerilimi 16.2 V, DC direnci 2.5 m $\Omega$ , AC direnci 2 m $\Omega$  olan Maxwell Boostcap BMOD0430 UK ünitesi referans alınmıştır. ECE-15 sürüş çevriminde kullanılan UK sistemi 3 adet seri bağlı UK ünitesinden oluşmaktadır.

Oluşturulan hibrit YH/UK taşıt sisteminde Çizelge 3.3'deki 35 kural tabanlı ve Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'deki üyelik fonksiyonlu bulanık mantık kontrolör kullanılarak gerçekleştirilen sistemde YH yığın gerilimi, YH sistemi çıkış gücü, UK sisteminin şarj durumu, DC bara gerilimi ve hidrojen akış miktarı sırasıyla verilmektedir.

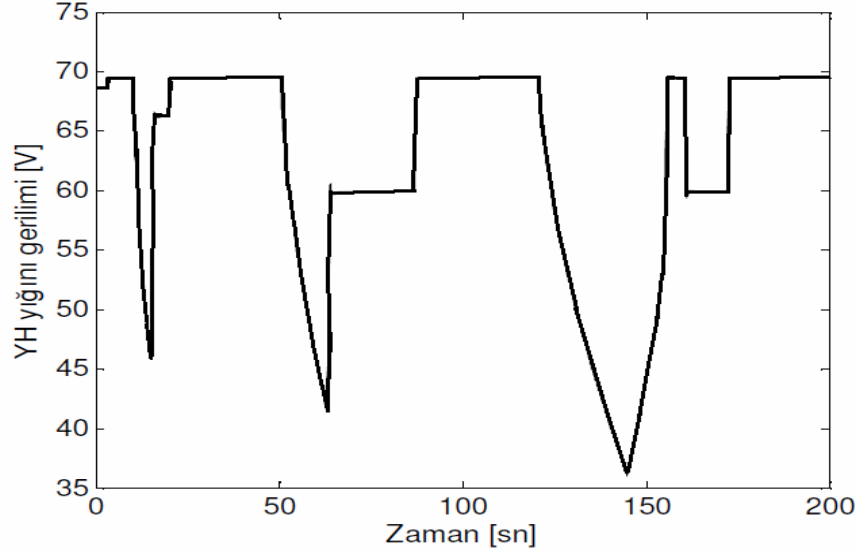
Şekil 4.2'de ECE-15 sürüş çevrimi için YH yığın geriliminin değişimi verilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde 88 adet YH kullanılmıştır. Burada YH gerilimi 48.65 V'tan 68.7 V'a kadar olan aralıkta değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla 88 adet YH hücresi için hücre başına 0.55 V ile 0.78 V arasında bir gerilim düştüğü görülmektedir. YH'nin 0.55 V ile 0.8 V arası en verimli olarak çalıştığı bölge olduğu hesaba katılınca [26], bulanık mantık kontrolörün sistem üzerindeki olumlu etkisi net bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 4.2.** ECE-15 sürüş çevrimi için YH yığın geriliminin değişimi

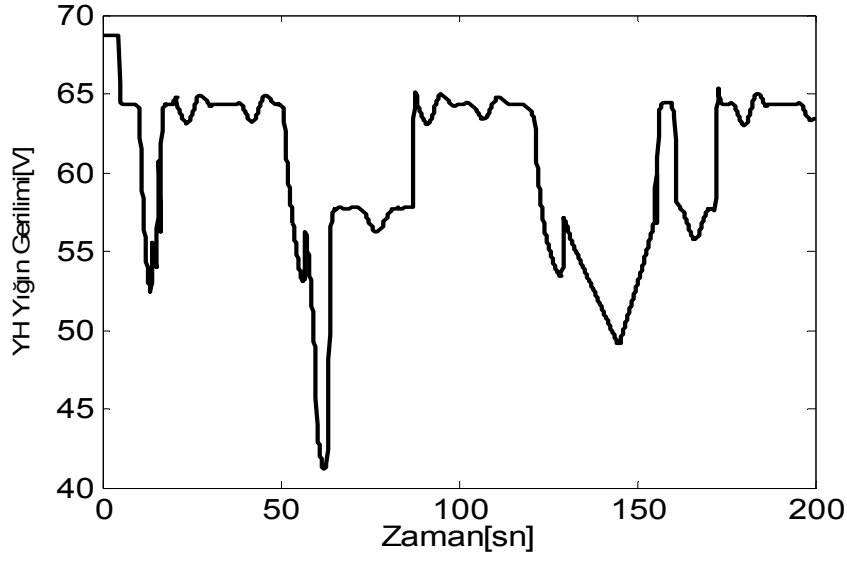
Sistemde tek başına YH bulunması durumunda Şekil 4.3'deki YH yığın gerilimi değişimi elde edilir. Şekil 4.3'de görülen gerilim değişimi, Şekil 4.2 ile kıyaslandığında YH hücresinin en verimli aralığı olan hücre başına 0.55–0.8 V'luk aralıktan saptığı

görülmekte ve değişimin daha büyük bir aralıkla ta gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca yalnız başına YH kullanılması durumunda değişimler ani olarak gerçekleşecek ve sonuçta YH'nin ömrü noktasında olumsuz sonuçlar meydana gelecektir.



**Şekil 4.3.** ECE-15 sürüş çevrimi için sadece YH kullanılması durumunda YH yığın geriliminin değişimi

Sistemden bulanık mantık kontrolör çıkartıldığı durumda da Şekil 4.4'deki grafik elde edilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, değişim aralığı tek başına YH kullanılan sisteme göre daha dar fakat YH ve bulanık mantık kontrolör kullanılan sisteme göre daha geniş olduğu görülmektedir. Bu da bulanık mantık kontrolörün sistem üzerindeki etkisini göstermektedir.

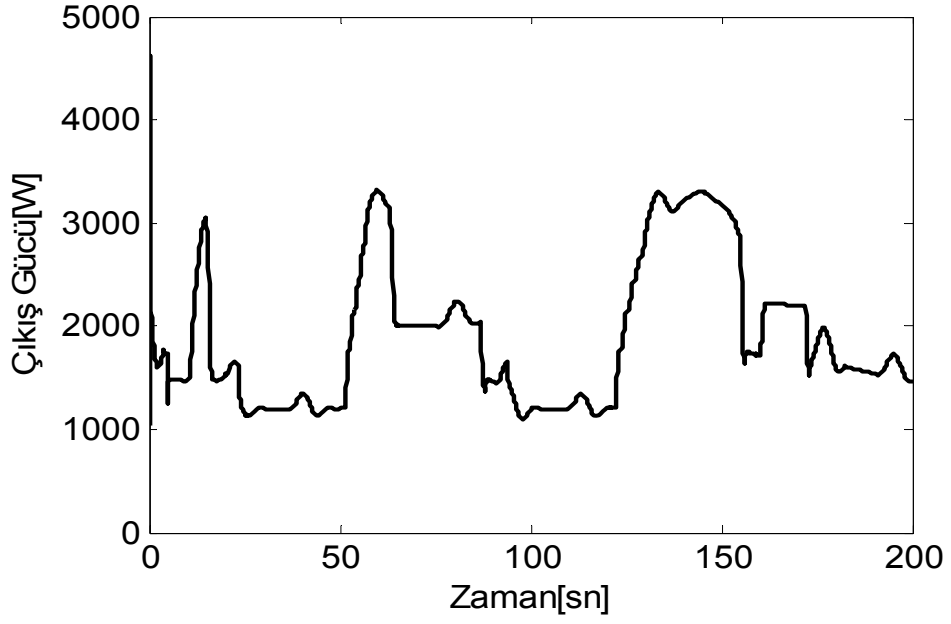


**Şekil 4.4.** Yük paylaşım algoritması ve bulanık mantık kontrolör olmaması durumunda YH yığın gerilimi değişimi

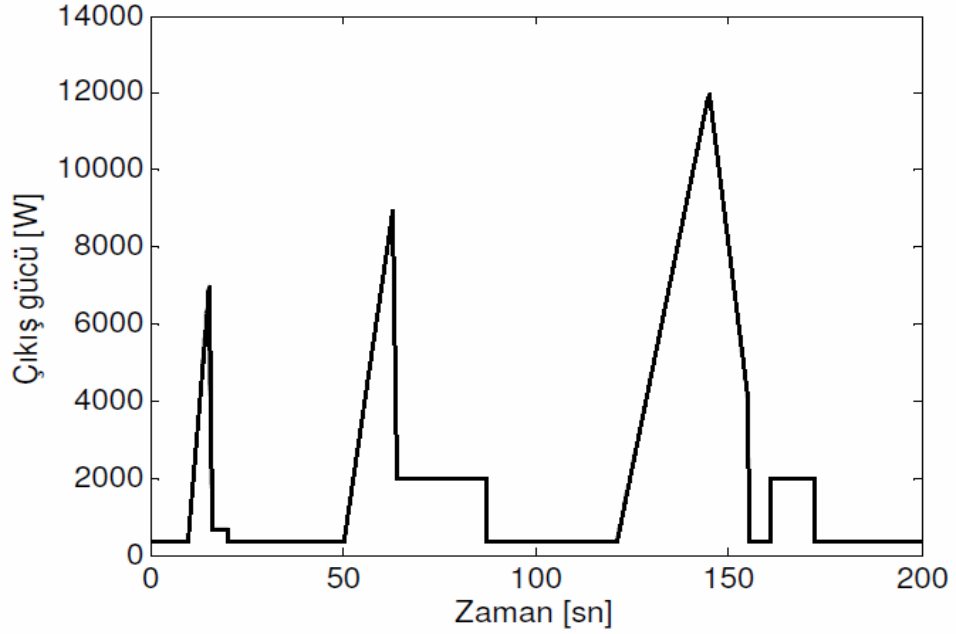
Şekil 4.2-4.4'den görüleceği üzere YH ve UK'nın beraber kullanılması ve sisteme yük paylaşım algoritması ile bulanık mantık kontrolörün beraber adapte edilmesi ile YH'nin verimli olduğu bölgede çalıştırılması sağlanabilmektedir. Bu şekilde tüm sistemin verimliliği artırılırken YH sisteminin ömrünün uzatılacağı verilere göre görülmektedir.

Şekil 4.5-4.6'da sırasıyla YH/UK'nın yük paylaşım algoritması ve kontrolör ile beraber kullanımı ve tek başına YH kullanımı durumu için YH'nin dönüştürücü çıkışına ait güç değişim grafikleri verilmektedir.





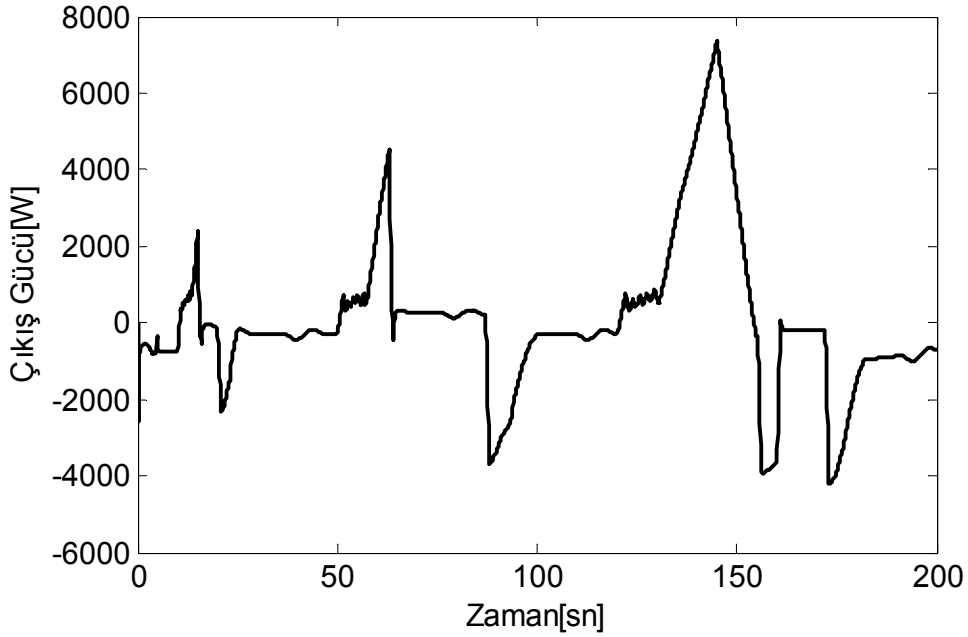
**Şekil 4.5.** ECE-15 sürüş çevrimi için YH dönüştürücü çıkışına ait güç değişimi



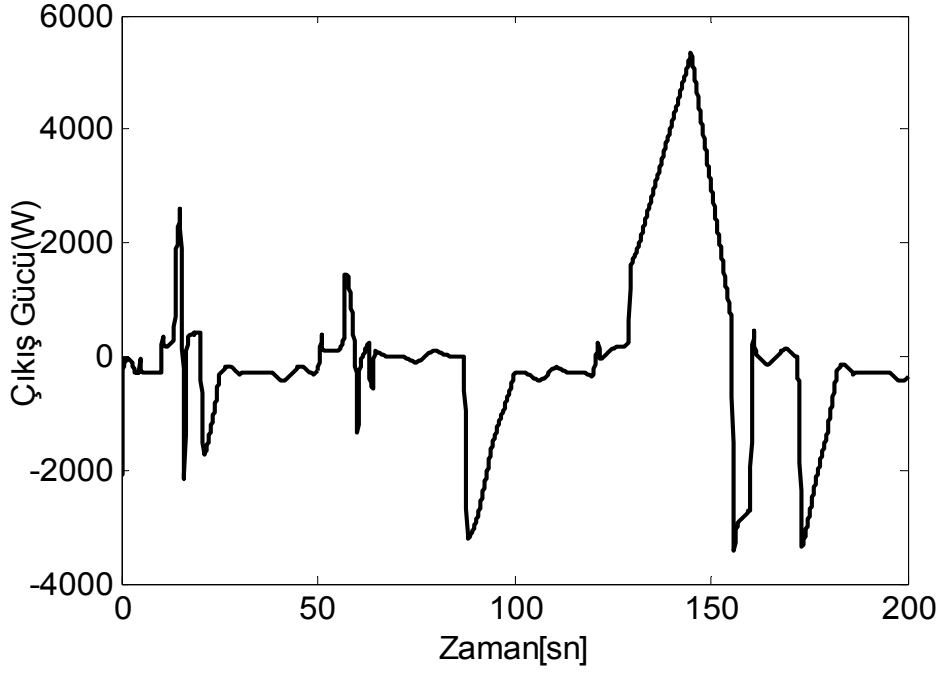
**Şekil 4.6.** Tek başına YH sistemi kullanılması durumunda YH çıkışına ait güç değişimi

Şekil 4.6'dan açıkça görüleceği üzere tek başına YH kullanımı durumunda YH'nin daha yüksek güç değerlerini karşılamak zorunda olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu durum sistemin daha fazla hidrojen tüketiminde bulanacağını

göstermektedir. Ayrıca sistemin ani olarak daha yüksek güç değerlerini karşılamak zorunda olması YH'nin ömrü noktasında büyük bir dezavantajdır [27]. Bunların ötesinde tek başına YH kullanımı ile, sistemde frenleme enerjisini tekrar kazanabilme yeteneğine sahip UK olmadığı için frenleme enerji geri kazanımı sağlanamamış olacaktır. Böylece elde edilebilecek olan enerji boşa gidecektir. Sisteme UK'nın dahil edilmesiyle frenleme enerjisinin geri kazanımı sağlanacak ve enerji noktasında tasarruf edilecektir. Şekil 4.7'de UK çıkışındaki güç değişim eğrisi ve Şekil 4.8'de sistemden yük paylaşım algoritması ve kontrolörün çıkartılması durumunda UK' ya ait dönüştürücü çıkışındaki güç değişimi gösterilmektedir.



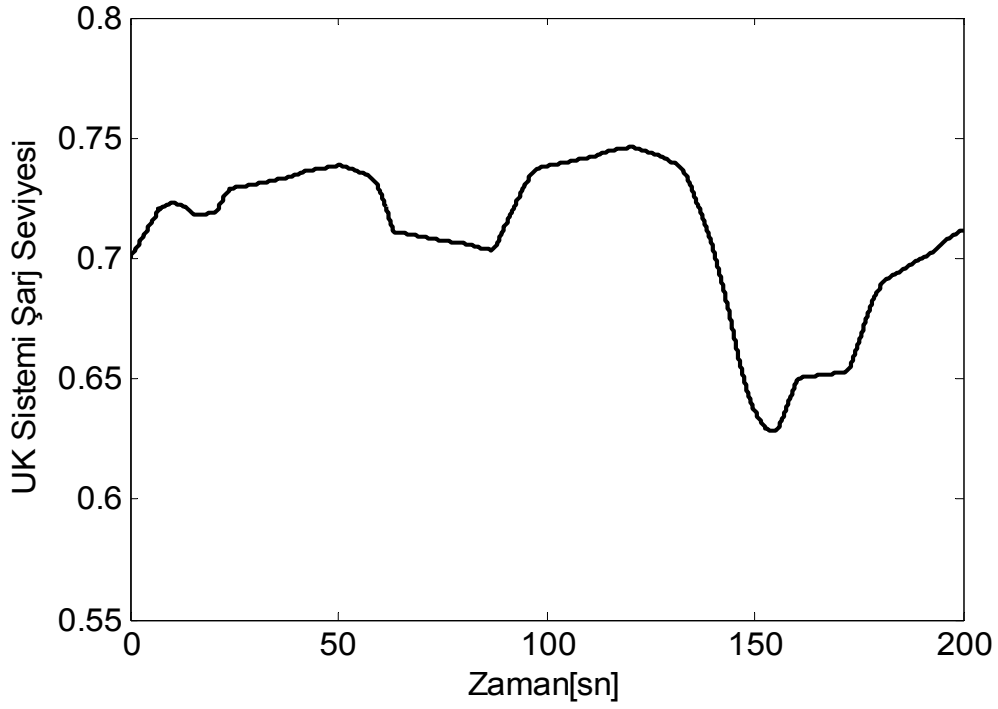
**Şekil 4.7.** UK' ya ait dönüştürücü çıkışındaki güç değişimi



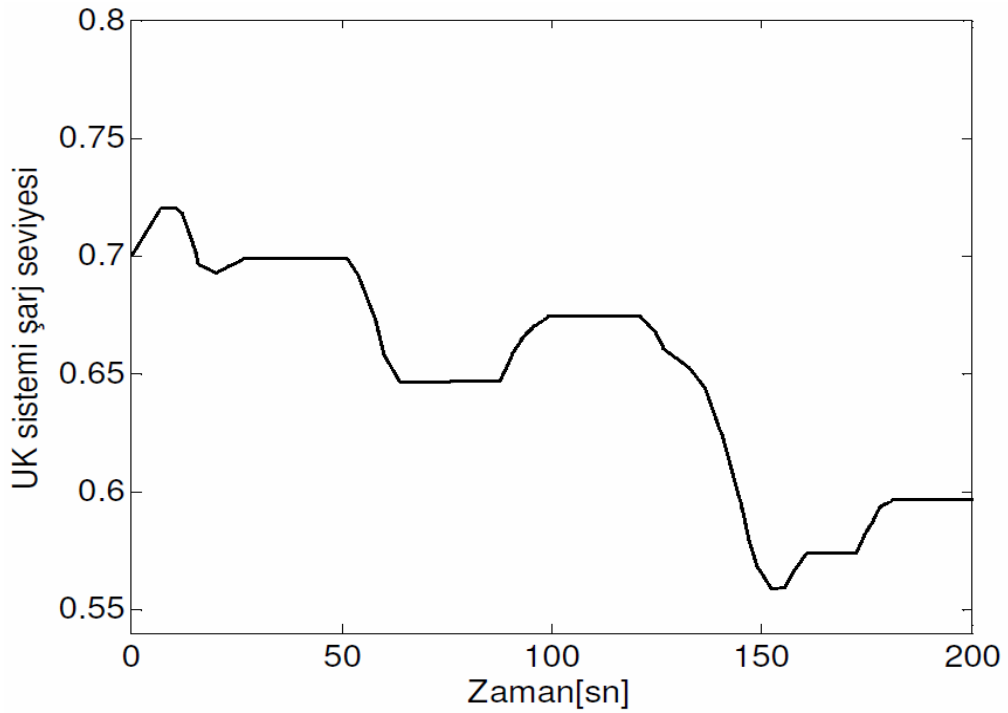
**Şekil 4.8.** Sistemden yük paylaşım algoritması ve kontrolörün çıkartılması durumunda UK' ya ait dönüştürücü çıkışındaki güç değişimi

Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi UK sistemi YH sisteminin gücünün değişimi ve yük talebine göre şarj ve deşarj olmaktadır. Ayrıca UK'nın sistem dinamiklerine hızlı cevap verme özelliği olduğu gözükmemektedir. Bu da tüm sistemin toplam güç yoğunluğunu arttırmaktadır. Tek başına YH kullanıldığında frenleme enerjisi kazanımı yok iken, YH/UK sistemini yük paylaşım algoritması ve kontrolörle beraber kullanımı ile 117 kWsn frenleme enerjisi kazanımı sağlanabilmiştir. Sistemden yük paylaşım algoritması ve kontrolörün çıkartılması durumunda çok daha az frenleme enerjisi kazanımı hesaplanmıştır.

Bulanık mantık kontrolörün, UK'nın şarj seviyesi üzerine etkisi kontrol etmek için ilk olarak Şekil 4.9'da YH/UK sisteminde bulanık mantık kontrolör devrede iken UK'nın şarj seviyesi grafiği ve daha sonra bulanık mantık kontrolörün devreden çıkartılması ile Şekil 4.10'da UK 'nın şarj seviyesi grafiği verilmiştir.

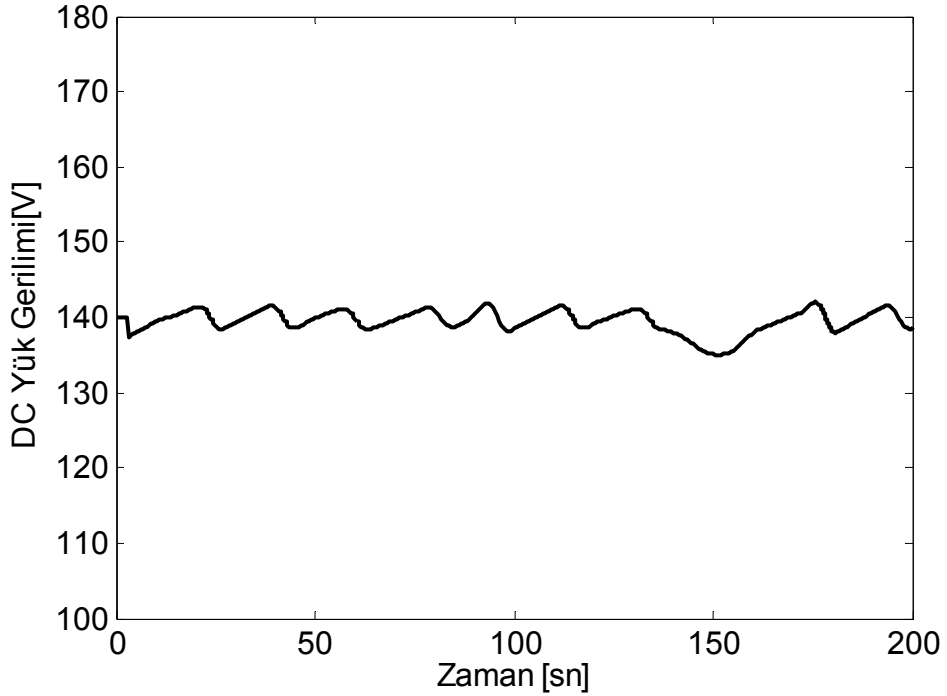


**Şekil 4.9.** YH/UK sisteminde bulanık mantık kontrolör devrede iken UK'nın şarj seviyesi değişimi



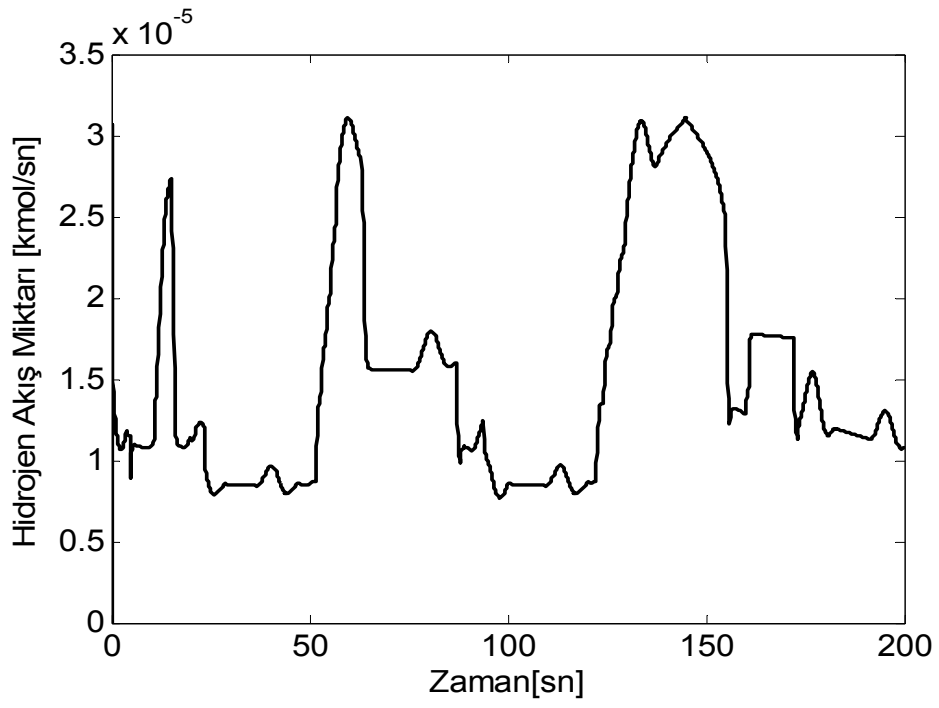
**Şekil 4.10.** YH/UK sisteminde bulanık mantık kontrolörün devreden çıkartılması ile UK 'nın şarj seviyesi değişimi

Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi ECE-15 sürüş çevrimi için UK'nın şarj seviyesi değişiminde bulanık mantık kontrolör olmadığı durumda UK'nın şarj seviyesi gittikçe düşmektedir. Bu durum, sistemin herhangi bir yüksek güç talebine karşılık veremeyeceğini göstermektedir. Şekil 4.9'da bulanık mantık kontrolör devreye alınması ile UK'nın şarj seviyesi istenilen değerler arasında tutulduğu görülmektedir. Bu da bulanık mantık kontrolörün önemini göstermektedir. Şekil 4.11'de tüm sisteme ait DC bara geriliminin uygun aralıkta olduğu görülmektedir. Bu da sistemin sağlıklı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.



**Şekil 4.11.** DC bara gerilimi değişimi

Şekil 4.12'de gerekli hidrojen akış miktarı verilmiştir. Grafiğin yaklaşık 150. saniyesinde hidrojen akış miktarı yüksek bir seviyeye çıkmıştır. Şekil 4.9'daki grafiğe bakıldığında UK'nın şarj seviyesinin düşük bir değere gittiği görülmektedir. Bunun nedeni UK sisteminin şarj seviyesinin düşük bir seviyede olması nedeniyle, YH sistemi UK sistemini şarj etmek için ihtiyaç duyulan güç seviyesinin daha üstünde bir hidrojen tüketimi sağlamıştır.



**Şekil 4.12.** Hidrojen akış miktarı değişimi

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde YH/UK hibrit taşıt sisteminde, YH'yi belirli limit değerlerde çalıştırılıp YH'nin ömrünü uzatılırken, UK'nın şarj seviyesini de belirli değerde tutup frenleme enerjisini en üst seviyede kazanılmasını sağlamak ve bu kazanılan frenleme enerjisini araç performansını arttırmak için kullanmak amaçlanmıştır.

Burada YH ve UK hibrit sistemi modellenmiştir. Sisteme dalgacık dönüşüm tabanlı yük paylaşım algoritması ve bulanık mantık kontrolör adapte edilmiştir. Yük talebini sistemin doğru olarak algılayabilmesi için Avrupa şehir içi sürüş çevriminden (ECE-15) yararlanılmıştır. YH sisteminden, yük tarafından talep edilen temel gücün alınması için dalgacık dönüşümlü yük paylaşım algoritması ve UK'nın şarj durumunu istenen limitler içinde tutup frenleme enerjisini en üst düzeyde kazanmak için bulanık mantık kontrolörden yararlanılmıştır.

Bulanık mantık kontrolörün YH/UK hibrit sistemi üzerindeki olumlu etkisi alınan sonuçlar neticesinde net olarak görülmüştür. Bulanık mantık kontrolörün başarılı bir performans göstermesi sonucu UK'nın şarj seviyesi istenen değerler arasında tutulmuş ve dolayısıyla frenleme enerjisinden maksimum düzeyde yararlanılmıştır. Bunun yanında UK sisteminin şarj değerinin istenen değerler içinde tutulması ile UK sisteminin ani yüksek güç taleplerine istenen performansta cevap verdiği görülmüştür. Ayrıca önerilen yük paylaşım algoritması ile YH'nin en verimli çalışma bölgesinde ve yüksek güç taleplerine maruz kalmadan işletilmesi sağlanmıştır. Böylece YH'nin anlık güç taleplerine maruz kaldığında karşılaştığı aşırı nemlenme veya hiç nemlenmeme probleminin önleneyeceği düşünülmektedir. Bu sayede YH'nin ömrü ve verimliliği artacak ve dolayısıyla tüm sistemin verimliliği ve performansı artacağı görülmektedir.

Hibrit araçlar için geliştirilen YH/UK sistemi ve uygulanan bu enerji yönetim stratejisi istenilen düzenlemeler ve boyutlandırmalar gerçekleştirilerek, sadece taşıt sistemlerinde değil birçok uygulamada kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu sistemi, gelişme aşamasında olan akıllı şebekeler ve akıllı ev uygulamaları için daha farklı enerji dönüşüm sistemleri ile birleştirilip daha yüksek kazançlı sistemler geliştirilebileceği öngörülmekte ve planlanmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] M. Granovskii, I. Dincer, A. R. Marc, "Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles", *Int. J. Hydrogen Energy*, (2006), 31(3):337-352.
- [2] P. Fontela, A. Soria, J. Mielgo, J. F. Sierra, J. de Blas, L. Gauchia, J. M. Martinez, "Airport electric vehicle powered by fuel cell", *J Power Sources* (2007), 169: 184–193.
- [3] W. R. Young, "Electric vehicles of yesterday carry us into tomorrow", *IEEE Conference Record, Southcon*, (1994), 14-16.
- [4] J.Larminie, J.Lowry, "Electric Vehicle Tecnology Explained", John Wiley&Sons, West Sussex, England, (2003).
- [5] K. T.Chau, Y.S. Wong, C.C. Chan, "An overview of energy sources for electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, (1999),40(10):1021-1039.
- [6] R. P. Joshi, A.P. Deshmukh, "Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution" *IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles*, 18-20 Dec., (2006), 1-6.
- [7] H. Uçarol, "Karma Elektrikli Araç", Yüksek Lisans Tez Çalışması, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 2003.
- [8] N. Ünlü, Ş. Karahan, O. Tür, H. Uçarol, E. Özsu, A. Yazar, L. Turhan, F. Akgün, M. Tırıs, "Tubitak-Marmara araştırma merkezi, Elektrikli araçlar projesi", Gebze,Kocaeli,Türkiye,2003.
- [9] M.W.T. Koot, "Energy Management for Vehicular Electric Power Systems", *PhD Thesis*, Eindhoven Technical University, Eindhoven, 2006
- [10] James Larminie," *Fuel Cell Systems Explained*", 2.Baskı. SAE International, (2003), ISBN 0-7680-1259-7.
- [11] V. R. Helmolt, U. Eberle, GM "Fuel Cell Activities, Hydrogen & Fuel Cell Research Strategy (Europe )", *Journal of Power Sources*, (2007),Volume 165, Issue 2,Pages 833-84.
- [12] M.Ouyang, L. Xu, J. Li, L. Lu, D. Gao, Q. Xie, "Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies", (2006),*Journal of Power Sources*; 163(1):467-479.



- [13] R. Kötzt, M. Carlen, “*Principles and applications of electrochemical capacitors*”, *Electrochimica Acta*, (2000), 45(15-16): 2483-2498.
- [14] Maxwell Technologies, “*UltraCapacitor Product Guide*”, (2006)
- [15] B. Scrosati, M. Armand, W. Henderson, K.Lian,”*Capacitive Storage Science, Basic Research for Energy Storage, Meeting of the American Chemical Society* “(ACS), (2007), April 2-4.
- [16] E. Triantaphyllou, “*Data Mining and Knowledge Discovery Via Logic-Based Methods*”,(2000)
- [17] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi, L. A. Silva, “*Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System*”, (2008), *IEEE Trans. Power Electronics*, 23(1):107-115.
- [18] O.Erdinç, “*Dalgacık dönüşümü/bulanık mantık tabanlı enerji yönetim stratejisi kullanılarak YH/UK’lı hibrit taşıt sisteminin modellenmesi ve analizi*”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul,2008
- [19] M. Uzunoglu, M. S Alam, “*Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications*”, (2007), *Energy Conversion and Management*, 48(5):1544-1553.
- [20] MY. El-Sharkh, A. Rahman, MS. Alam, PC. Byrne, AA.Sakla, T. A.Thomas “*Dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications*”, *J Power Sources* 2004;138(1–2):,199–204.
- [21] O. Erdinç, Y. Ateş, M. Uzunoğlu, B. Vural, “*UGHEK’2008: II.Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*”, ESOGÜ, Eskişehir,12-13 Haziran,2008,syf148-166
- [22] JR. Miller, “*Electrochemical capacitor thermal management issues at high-rate cycling*”, *Electrochimica Acta*, 2006;52(4):1703-1708.
- [23] M. Pagano, L. Piegari, “*Hybrid Electrochemical Power Sources for Onboard Applications*” *IEEE Trans Energy Conversion* , 2007;22(2):450-456.
- [24] Rafik F, Gualous H, Gallay R, Crausaz A, Berthon A. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. *J Power Sources* 2007;165(2):928-934.

- [25] M. Amrhein, P. T. Krein, "*Dynamic Simulation for Analysis of Hybrid Electric Vehicle System and Subsystem Interactions, Including Power Electronics*", (2005), IEEE Trans.Vehicular Technology, 54(3):825-836.
- [26] F. Barbir, "*PEM fuel cells: theory and practice*", (2005), UK:Elsevier Academic Pres, London,
- [27] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, (2008), "*PEFC stacks as power sources for Hybrid propulsion systems*", Int. Journal of Hydrogen Energy, Article in Press.

## **ÖZGEÇMİŞ**

10.04.1979 yılında Adana'da doğdu. 4 çocuklu bir ailenin en küçük çocuğudur. İlk, Orta ve Lise'yi Adana'da bitirdi. 1997 yılında Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünü kazandı. 2003 yılında üniversiteden mezun oldu. Askerliğini 2005 yılında İstanbul'da kısa dönem olarak yaptı. Halen Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.