

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT YAKIT HÜCRESİ/ULTRA-KAPASİTÖRLÜ TAŞIT
GÜÇ SİSTEMİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
KONTROLÜ**

Elektrik Müh. Yavuz ATEŞ

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİ ve YAKIT HÜCRESİ/ULTRA-KAPASİTÖR SİSTEMLERİNE GİRİŞ	4
2.1 Elektrikli Taşıt Teknolojisinin Gelişimi	4
2.2 Yakıt Hücresi Sistemleri	8
2.2.1 Yakıt Hücresi Sistemlerinin Çalışma Prensipleri	8
2.2.2 Yakıt Hücresi Çeşitleri	8
2.2.3 Yakıt Hücresinin Avantajları	9
2.2.4 Yakıt Hücresinin Dezavantajları	10
2.3 Ultra-kapasitör Sistemleri ve Çalışma Prensipleri	10
3. SİSTEM TANIMLAMASI VE METODOLOJİ	12
3.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin (PEMYH) Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı	12
3.2 Ultra-kapasitör Sisteminin Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı	16
3.3 Sürüş Çevrimi	19
4. HİBRİT SİSTEM İÇİN OLUŞTURULAN YAPAY SİNİR AĞLARI TABANLI ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİ	22
4.1 Genel Tanım ve Tarihçe	22
4.2 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri	22
4.3 Yapay Sinir Ağlarının Avantaj ve Dezavantajları	23
4.3.1 Yapay Sinir Ağlarının Avantajları	24
4.3.2 Yapay Sinir Ağlarının Dezavantajları	25
4.4 Yapay Sinir Ağlarının Kullanıldığı Alanlar	26
4.5 Geri Yayılım Algoritması (Backpropagation)	27

4.6	Hibrit Sistemde Kullanılan YSA Tabanlı Kontrolör	28
4.7	Doğrulama Analizi.....	32
5.	BENZETİM SONUÇLARI VE YORUMLAR	35
5.1	Hibrit sistem için geliştirilen farklı kontrol teknikleri.....	36
5.1.1	Kontrolsüz (frenleme enerjisinin kazanılabildiği) çalışma.....	36
5.1.2	Basit bir kontrol stratejisiyle yapılan çalışma.....	38
5.1.3	Lineer kontrol (0 üniteli gizli katman) tekniği ile yapılan çalışma	40
5.1.4	Kernel metotlu 2. Dereceden Polinom lineer kontrol stratejisiyle yapılan çalışma	41
5.1.5	Lineer olmayan kontrol (Geri yayımlı, 100 üniteli 1 gizli katmanlı YSA) ile yapılan çalışma	43
6.	SONUÇLAR.....	48
KAYNAKLAR.....		50
ÖZGEÇMİŞ.....		55

SİMGE LİSTESİ

B	Konsantrasyon kayıplarının modellenmesinde kullanılan sabit [V]
C_1	Ultra-kapasitör ana kapasitesi [F]
C_2	Yavaş kol kapasitesi [F]
D	Taşıt sisteminin toplam güç talebi
E	Sistemdeki hata miktarı
E_{Nernst}	Nernst anlık gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [C (kmol) ⁻¹]
$\hat{F}$	Çıkış katmanında tahmin edilen yakıt hücresi çıkış gücü
F^-	Bir önceki anda elde edilen yakıt hücresi gücü
ΔF	Çıkış katmanında hedeflenen yakıt hücresi çıkışı
$\Delta \hat{F}$	Yakıt hücresi çıkışında tahmin edilen ΔF değeri
i_1	C_1 'den geçen akım [A]
i_2	C_2 'den geçen akım [A]
i_L	L'den geçen akım [A]
I_{UK}	Ultra-kapasitör şarj/deşarj akımı [A]
I_{YH}	Yakıt hücresi akımı [A]
K_{H_2}	Hidrojen valfi molar sabiti [kmol (atm sn) ⁻¹]
K_{H_2O}	Su valfi molar sabiti [kmol (atm sn) ⁻¹]
K_{O_2}	Oksijen valfi molar sabiti [kmol (atm sn) ⁻¹]
K_r	Modelleme sabiti [kmol (sn A) ⁻¹]
L	Ultra-kapasitör endüktansı [H]
N_0	Yığındaki seri yakıt hücresi sayısı
N_s	Yakıt hücresi yığınınındaki seri hücre sayısı
η_{akt}	Aktivasyon aşırı gerilimi [V]
η_{omik}	Omik aşırı gerilim [V]
P_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
P_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı [atm]
p_{H_2O}	Su kısmi basıncı [atm]
q_{H_2}	Yük değişimini karşılamak için gerekli olan hidrojen akış miktarı [kmol (sn) ⁻¹]
R	Evrensel gaz sabiti [(1 atm) (kmol K) ⁻¹]
R_{H-O}	Hidrojen-oksijen akış oranı

R_m	Eşdeğer membran direnci [Ω]
R_{omik}	Yakıt hücresi iç direnci [Ω]
R_P	Ultra-kapasitör paralel direnci [Ω]
R_S	Ultra-kapasitör seri direnci (ESR) [Ω]
S	Ultra-kapasitörün şarj seviyesi
T	Mutlak sıcaklık [0K]
U	Kullanım oranı
$\hat{U}$	Ultra-kapasitörün çıkışından tahmin edilen güç değeri
V_{akt}	Aktivasyon gerilim düşümü [V]
V_C^0	Ultra-kapasitör başlangıç gerilimi [V]
V_{C1}	C_1 uç gerilimi [V]
V_{C2}	C_2 uç gerilimi [V]
V_d	R_a üzerindeki gerilim düşümü [V]
V_{kons}	Konsantrasyon gerilim düşümü [V]
V_L	L uç gerilimi [V]
V_{maks}	Azami ultra-kapasitör gerilimi [V]
V_{omik}	Omik gerilim düşümü [V]
V_{Rp}	R_P uç gerilimi [V]
V_{Rs}	R_S uç gerilimi [V]
V_{UK}	Ultra-kapasitör çıkış gerilimi [V]
V_{YH}	Yakıt hücresi gerilimi [V]
$V_{Yıgım}$	Yakıt hücresi yığılma gerilimi [V]
λ	Membrandaki su içeriği
δ	Tahmin edilen hata miktarı
β	Beta katsayısı
α	Alfa katsayısı
τ_{H_2}	Hidrojen zaman sabiti [sn]
τ_{O_2}	Oksijen zaman sabiti [sn]
τ_{H_2O}	Su zaman sabiti [sn]

KISALTMA LİSTESİ

DC	Doğru akım (Direct Current)
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
GRNN	Genel Regresyon Ağlarını
GYA	Geri Yayılım Algoritması
PEMYH	Proton değişim membranlı yakıt hücresi
PNN	Probabilistik ağlar
SOC	Ultra-kapasitörün şarj seviyesi;
UDDS	Standart şehir içi sürüş çevrimi (Urban Dynamometer Driving Schedule)
UK	Ultra-kapasitör
YH	Yakıt hücresi
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 1895 yılında Morris ve Solomon tarafından geliştirilen iki koltuklu bir EA görünümü (Larminie ve Lowry, 2003)	4
Şekil 2.2 1897 yılında İngiltere’de “Londra Elektrikli Taksi Şirketi” (London Electrical Cab Company) tarafından kullanıma alınan taksilerden biri.....	5
Şekil 2.3. YH ile DC elektrik üretimi	8
Şekil 2.4. YH tiplerinin özellikleri (Barbir, 2005)	9
Şekil 2.5 UK’nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı (Maxwell, 2006).	10
Şekil 3.1 Geliştirilen sisteme ait genel blok diyagramı	12
Şekil 3.2 Örnek YH kutuplanma eğrisi (Barbir, 2005).....	14
Şekil 3.3 YH sisteminin dinamik modeli	16
Şekil 3.4 UK benzetim modelinin geliştirilmesinde yararlanılan elektriksel eşdeğer devre....	17
Şekil 3.5 430 F ve 16.2 V parametrelerine sahip UK’nın 230C’de 3 A’lık akım için çıkış gerilimindeki değişim	19
Şekil 3.6 UK sisteminin dinamik modeli	19
Şekil 3.7 UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.....	20
Şekil 3.8 UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.	21
Şekil 3.9 UDDS sürüş çevrimleri kullanılarak oluşturulan yük modeli	21
Şekil 4.1 YSA genel çalışma yapısı	23
Şekil 4.2 Yapılan çalışmada kullanılan geri yayımlı yapay sinir ağının genel yapısı (k adet gizli nöronlu, j adet girişli, tek çıkışlı).....	27
Şekil 4.3 Yapılan çalışmada kullanılan YSA kontrolör eğitime çalışması şematiği	31
Şekil 4.4 Yapılan çalışmada kullanılan YSA kontrolör test çalışması şematiği	32
Şekil 4.5 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu–1	33
Şekil 4.6 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu–2	33
Şekil 4.7 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu–3	34
Şekil 4.8 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu–4	34
Şekil 5.1 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi–1.....	37
Şekil 5.2 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi–1.	37
Şekil 5.3 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi–1.	38
Şekil 5.4 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi–2.....	38
Şekil 5.5 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi–2.	39
Şekil 5.6 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi–2.	39
Şekil 5.7 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi–3.....	40

Şekil 5.8 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi-3.	41
Şekil 5.9 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi-3.	41
Şekil 5.10 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi-4.....	42
Şekil 5.11 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi-4.....	42
Şekil 5.12 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi-4.	43
Şekil 5.13 YH yığınının geriliminin zamana göre değişimi.	44
Şekil 5.14 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi-5.	45
Şekil 5.15 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi-5.....	45
Şekil 5.16 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi-5.....	46
Şekil 5.17 DC yük barası gerilimindeki değişim.....	46
Şekil 5.18 Yük talebine göre ihtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarının değişimi.	47

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 PEMYH modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler	13
Çizelge 3.2 UK sisteminin modellenmesinde kullanılan parametreler	17
Çizelge 3.3 UDDS sürüş çevriminin özellikleri	20
Çizelge 4.1 Geleneksel algoritmalar ile YSA'lar	26
Çizelge 4.2 Çalışmada kullanılmış olan parametreler	29
Çizelge 5.1 PEMYH parametreleri	35
Çizelge 5.2 Maxwell Boostcap [®] BMOD0430 UK ünitesinin özellikleri (Maxwell, 2008).	36

ÖNSÖZ

Bütün dünyayı etkisi altına alan gaz emisyonundaki artışta taşıtların etkisi çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Ayrıca mevcut taşıt sistemlerinde kullanılan içten yanmalı motorların özellikle düşük devirlerde verimleri oldukça azalmaktadır. Taşıtlarda, alternatif olarak elektrik motorlarının kullanılması hem çevresel faktörler hem de düşük devirlerde yüksek verimlere sahip olmalarından dolayı dikkat çekmektedir. Elektrik motorlarının beslenmesi için de, yakın bir gelecekte, taşıt sistemleri için yakıt hücresi teknolojilerinin verimli, sürdürülebilir, alternatif ve çevre dostu bir çözüm olması beklenmektedir. Ancak özellikle taşıtlar şehir içi trafiğinde ani ve geçici yüklenmelerle çok sık karşılaşmaktadırlar. Bu nedenle tek başına bir yakıt hücresi sistemi, özellikle ilk çalışma anında, ani, geçici ve çok yüksek güç taleplerini tam olarak karşılamada yetersiz kalmaktadır. Yakıt hücresini bir ultra-kapasitör sistemi ile hibrit bir şekilde kullanmak, yakıt hücresinin maliyetini azaltırken, taşıtın bütün güç taleplerine başarıyla cevap verebilme yeteneği sağlamaktadır. Yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda yakıt hücreli hibrit sistemlerin taşıt uygulamalarında gelecekte sıkça kullanılacağı öngörülmektedir.

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren ve bu tezi hazırlayabilecek aşamaya gelmemde en büyük katkı sahibi olan sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, çalışmamın çoğu aşamasında bana yol gösterici olup değerli vakitlerini ayıran Sayın Yrd. Doç. Dr. Olcay KURŞUN'a, hiçbir zaman değerli yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Bülent VURAL'a, dostluğu ve sonsuz desteği için Ozan ERDİNÇ'e, tez aşamasında sürekli moral aşılayan Arş. Gör. Yavuz EREN'e ve beni bugünlere getiren ve her zaman yanımda olan canım aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın belli kısımları, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 107M355 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca yüksek lisans öğrenimim boyunca da bana finansal destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

ÖZET

Dünya gaz emisyonunda taşıtların etkisi çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Ayrıca mevcut taşıt sistemlerinde kullanılan içten yanmalı motorların özellikle düşük devirlerde verimleri oldukça düşüktür. Taşıtlarda, alternatif olarak elektrik motorlarının kullanılması hem çevresel faktörler hem de düşük devirlerde yüksek verimlere sahip olmalarından dolayı dikkat çekmektedir. Elektrik motorlarının beslenmesi için de, yakın bir gelecekte, taşıt sistemleri için yakıt hücresi teknolojilerinin verimli, sürdürülebilir, alternatif ve çevre dostu bir çözüm olması beklenmektedir. Bununla birlikte, yakıt hücreleri, özellikle şehir içi trafiğinde ani ve geçici yüklenmelerle sıkça karşılaşan taşıt sistemlerinin tahrik edilmesinde tek başına optimum bir çözüm oluşturmamaktadır. Güç taleplerindeki bu tür ani ve geçici değişimlerde (ani hızlanma veya frenleme), yakıt hücresi sisteminin en önemli alt elemanı olan membranda yeterince nemlenememe veya aşırı nemlenme ve gaz açlığı (starvation) gibi problemler de ortaya çıkabilmektedir. Bu problemlerin temeli, yük talebinin aniden artarken veya azalırken, gazların (hidrojen ve oksijen) akışının bu talebi karşılayacak şekilde artamaması veya azalamamasıdır. Yakıt hücresi işletiminde, gaz açlığının hücre performansı ve güvenliği açısından önemli etkisi vardır. Bu nedenle yakıt hücresi sistemini mümkün olduğu kadar sürekli hal yüklenmelerinde çalıştırmak, ani güç artışlarını ve yüklenmelerini yakıt hücresi sistemine hissettirmemek, daha güvenilir bir çalışma ortamı sağlayacaktır. Bu sayede hem yakıt hücresi ömrü uzayacak hem de hidrojen tüketimi azaltılmış olacaktır. Bunlara ilaveten şu anki ticari yakıt hücresi sistemleri, yeniden kullanılabilen frenleme enerjisini kazanabilme özelliğine sahip değildir. Enerji depolama sistemlerinden biri olan ultra-kapasitör sistemlerinin, çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme ve frenleme enerjisini de en iyi bir biçimde kazanabilme kabiliyeti vardır. Bu durumlar göz önüne alındığında, yakıt hücresi ve ultra-kapasitör sistemlerinin birlikte kullanılması, taşıtların bütün yük taleplerine cevap verebilecek bir yapı oluşturacaktır. Uygun bir güç akışı ve kontrol stratejisi ile iyi tasarlanmış bir yakıt hücresi/ultra-kapasitör hibrit modeli, yakıt hücresi sisteminin boyutunu ve maliyetini azaltırken daha iyi bir enerji verimliliği sağlama potansiyeline de sahip olacaktır.

Bu tez çalışmasında, yapay sinir ağları tabanlı bir kontrol algoritması kullanılarak, hibrit bir yakıt hücresi/ultra-kapasitör taşıt sisteminin enerji yönetimi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen kontrol algoritması ile birlikte yakıt hücresinin yapısı için uygun bir sürekli hal yüklenmesinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte ultra-kapasitörün şarj seviyesinin kontrolünün sağlanması, bu sayede de taşıt performansının ve enerji tasarrufunun artırılması hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Hibrit elektrikli taşıtlar; ultra-kapasitör; yakıt hücresi; yapay sinir ağları.

ABSTRACT

The effect of vehicles has an important role in global gas emission. Besides, the internal combustion engines of current vehicle systems have poor efficiency ratios particularly in rated rpm. Alternatively, the usage of electric motors has drawn attraction due to the environmental factors and high efficiency in lower rpms. In near future, fuel cell technologies are expected to be a sustainable, alternative and environmental friendly solution for especially vehicular applications in feeding the electric motors. However, using only a fuel cell may not be sufficient for conditions such as start-up, transient events and instantaneous peak power demands (rapid acceleration or hard breaking) which the power source may face in urban traffic conditions. In transient conditions, insufficient humidification with gas starvation or flooding problems may occur due to the instant load changes. The main reason for this problem is the gas (oxygen and hydrogen) flow ratios are relatively slow when compared to a transient load increment or decrement. Gas starvation has a major impact in safe fuel cell operation and performance. Thus, operating the fuel cell in steady state loading conditions and preventing it from subjecting to the rapid load changes will keep secure operation and increase its lifetime and decrease its hydrogen consumption. Also, commercially available fuel cells are not reversible and they do not have capability of capturing the braking energy. Ultra-capacitors, a recently popular energy storage system, have the capability of transferring and capturing high amounts of energy very fast. Considering these issues, utilizing fuel cell and ultra-capacitor systems together will meet all the load demands of a vehicle. Such a hybrid system will not only reduce the size and cost of the fuel cell power technology but also provide a better potential of energy efficiency.

In this thesis, the energy management of a hybrid fuel cell/ultra-capacitor vehicular system is realized utilizing a control algorithm based on artificial neural networks. With the usage of the performed control algorithm, providing a steady state operating condition for fuel cell is realized. Besides, controlling the state-of-charge of the ultra-capacitor and promoting the vehicle performance and energy savings is aimed.

Keywords: Hybrid electric vehicle; ultra-capacitor; fuel cell; artificial neural networks.

1. GİRİŞ

Günümüzde gittikçe artan enerji gereksinimleri ve fosil yakıtların hızla tükenmesi, bütün dünya çapında alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaların hızlanmasına neden olmuştur. Ayrıca, geleneksel sistemlerin olumsuz çevresel etkilerinden dolayı temiz enerji kaynakları üzerine yapılan araştırmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Hava kirliliği üzerinde etkisi büyük olan ulaşım sistemlerinde, bu kirliliğe yol açan geleneksel içten yanmalı motorlu taşıtların yerine gelecek için düşünülen en önemli adaylardan biri yakıt hücresi (YH) sistemine sahip olan elektrikli taşıtlardır (Hussain vd., 2007). YH çeşitlerinden proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMYH), yüksek ömrü, hızlı cevap verebilme yeteneği, yüksek güç yoğunluğu ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi gibi özelliklerinden dolayı taşıt uygulamaları için en elverişli YH sistemi olarak görülmektedir (Corbo vd., 2007; Barbir ve Gomez, 1997; Hou vd., 2007; Bowers vd., 2007; Barbir, 2005).

Taşıt uygulamalarında tek başına bir YH sistemi yerine, YH'yi bir enerji depolama ünitesi ile hibridize ederek kullanmak çeşitli açılardan daha avantajlı bir işletim performansı sağlamaktadır. Böylece yakıt tüketimi azaltılabilmekte, pahalı olan YH'nin maliyeti daha düşük düzeylere indirilebilmekte ve taşıt performansı önemli bir ölçüde arttırılabilmektedir (Hussain vd., 2007). Bunun yanı sıra enerji depolama sisteminin anlık yük taleplerini karşılayacak şekilde kullanılmasıyla YH'nin ömrü ciddi bir oranda arttırılabilir. Birçok hibrit uygulamada batarya, enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır. Fakat günümüzde ticari olarak mevcut olan bataryaların düşük çevrim ömrü, uzun şarj etme süresi, sıcaklıktan etkilenmesi ve düşük güç yoğunluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır. Günümüzde ticari olarak üretilen Ultra-kapasitörler (UK), aynı boyut veya ağırlıktaki bir batarya ile kıyaslandığında oldukça fazla bir güç yoğunluğuna ve uzun çevrim süresine sahiptir. UK'lar taşıt uygulamalarında bataryaların yerini alabilecek sistemler olarak araştırılmaktadırlar (Gualous vd., 2003). UK'ların avantajları, özellikle elektrikli taşıt sistemleri gibi yapılar ele alındığında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. UK'ların iç yapılarında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmediğinden, taşıtlarda oldukça hızlı gerçekleşen frenleme durumunda ortaya çıkan enerjiyi verimli bir şekilde geri kazanmada, kimyasal yapıya sahip bataryalardan çok daha etkilidirler. Bu özelliklerinden dolayı UK'lar özellikle elektrikli taşıt uygulamaları açısından gelecek vaat etmektedirler.

Hibrit bir YH/UK sistemi, günümüzde maliyeti yüksek olan YH sisteminin boyutunun azaltılabilmesini mümkün kılmaktadır (Emadi vd., 2004; Rodatz vd., 2005). Bunun yanı sıra, YH'nin kısmi yükte çalışma durumundaki yüksek verimi ile UK'nın ani yük talebini

karşılamadaki etkinliği birleştirilmektedir (Thounthong vd., 2006, Ahluwalia vd., 2008). Ayrıca UK'lar sayesinde hem frenleme enerjisi geri kazanılabilmekte hem de anlık yüklenmeler YH sistemine hissettirilmeyerek YH ömrü arttırılabilmektedir.

Hibrit taşıt sistemlerindeki en temel hedef, aracın performansını mümkün olan en yüksek seviyeye getirirken yakıt tüketimini de en asgari düzeyde tutabilmektir (Kim ve Peng, 2007). Bu da ancak başarılı bir şekilde oluşturulan kontrol stratejisiyle gerçekleştirilebilir (Corbo vd., 2007). Hibrit bir sistem için geliştirilen kontrol stratejisinin dinamik cevabını değerlendirmek ve buna göre genel sistem yapısında iyileştirmeler yapabilmek için genellikle standart sürüş çevrimlerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, hibrit bir elektrikli taşıtın güç talebinin modellenmesi, standart şehir içi sürüş çevrimlerinden biri olan Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Anlık yüklenmeleri içeren bu yük profili, hibrit bir sistemin performansını değerlendirmek açısından oldukça uygundur. Oluşturulan sistemin kontrolünde, literatürde de birçok uygulaması olan (Sisworahardjo vd., 2008; Taheri ve Mohebbi, 2008; Prokhorov, 2008; Harmon vd., 2008) yapay sinir ağlarından (YSA) faydalanılmıştır. Son yıllarda YSA, sinyal işleme, veri ayrıştırması, görüntü tanıma gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılan ve iyi tanımlanamayan problemlere yeni çözümler üretebilmesiyle ön plana çıkan bir metodur (Negarestani vd., 2003). Güvenilirliği ve verimli bir yapıya sahip olması YSA'ların kontrol stratejisi olarak tercih edilmesindeki en önemli etkenlerin başında gelmektedir (Taheri ve Mohebbi, 2008). Ayrıca, kısa bir sürede sistem için doğru sonuçlar üretebilmesi YSA'nın, hesaplama süreçleri uzun zaman gerektiren birçok kontrol tekniğine göre avantajlı bir konuma gelmesini sağlamaktadır (Sisworahardjo vd., 2008; Taheri ve Mohebbi, 2008). Belirtilen bu özelliklerin yanı sıra lineer olmayan yapıdaki sistemlerde kullanılabilirliği ve sisteme ait genel bir matematiksel modelin oluşturulmasına gerek duymaması gibi sağladığı birçok avantaj sayesinde YSA taşıt sistemlerinin kontrolünde kullanılmaya oldukça elverişli bir yapıya sahiptir (Harmon vd., 2008). YSA kullanılarak, sistem dinamiklerinin kontrolünü gerçekleştirmek ve sistemi oluşturan bileşenler için en uygun güç sinyallerini üretmek amaçlanmıştır.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada, YSA tabanlı yeni bir yük paylaşım ve kontrol algoritması içeren hibrit bir PEMYH/UK sistemi önerilmektedir. Ayrıca önerilen sistemde, deneysel çalışma ile doğruluğu test edilmiş olan bir UK benzetim modelinden yararlanılmaktadır.

Yapılan çalışmanın düzeni şu şekildedir: 2. kısımda YH ve UK sistemlerinin tanıtılması ve bu sistemler hakkında genel bilgiler yer almaktadır. 3. kısımda PEMYH ve UK modeli, ayrıca hibrit sistem için geliştirilen YSA kontrol algoritması anlatılmaktadır. 4. kısımda, oluşturulan

hibrit taşıt sistemi için elde edilen benzetim sonuçları ve bu sonuçların yorumlanması yer alırken, 5. kısımda ise yapılan çalışmaya ait genel sonuçlar verilmektedir.

2. ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİ ve YAKIT HÜCRESİ/ULTRA-KAPASİTÖR SİSTEMLERİNE GİRİŞ

2.1 Elektrikli Taşıt Teknolojisinin Gelişimi

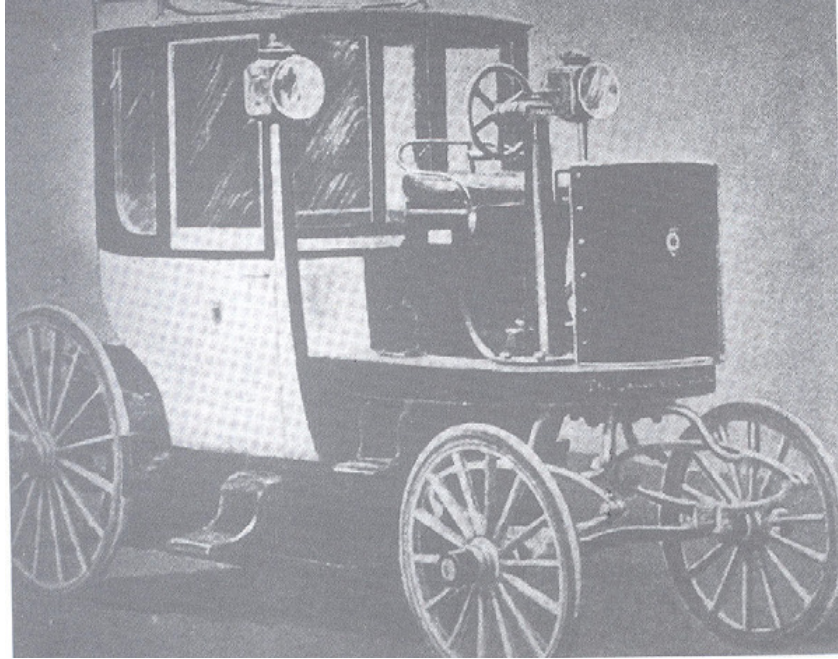
İlk elektrikli araç (EA) modeli 1835 yılında Profesör Stratingh tarafından Hollanda'da yapılmıştır. 1834–1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından ABD'de elektrikli yol aracının geliştirildiği ve uygulamasının yapıldığı raporlanmıştır. Bu araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilmeyen bataryalarla tahrik edilmiştir. 4 yıl sonra Robert Davidson şarj edilemeyen batarya ile tahrik edilen elektrikli lokomotifini geliştirmiştir. 1859 yılından sonra kurşun-asit bataryaları geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. 1882 yılında İngiltere'de Prof. William Ayrton ve John Perry elektrik tahrikli 3 adet tekerlekli aracın uygulamasını yapmıştır. Bu araçların her birinde 10 tane kurşun-asit batarya kullanılmıştır. Aracın menzili araziye bağlı olarak 16–20 km arasında olup azami hızı ise 14 km/saattir. Bundan 3 yıl sonra Carl Benz içten yanmalı motor (İYM) ile 3 tekerlekli aracı geliştirmiştir (Young, 1994).

19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika, İngiltere ve Fransa'da birçok şirket EA üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden en önemlisi Morris ve Salomon'un sahibi olduğu Electric Carriage and Wagon Company adlı şirkettir. Morris ve Salomon 1895 yılında Şekil 2.1'de görülen iki oturma koltuğu olan Electrobats isimli EA'ı geliştirmişlerdir.



Şekil 2.1 1895 yılında Morris ve Solomon tarafından geliştirilen iki koltuklu bir EA görünümü (Larminie ve Lowry, 2003)

EA'larla ilgili bu gelişmeler olurken, İYM'ler da hızla gelişmeye başlamıştır. 1900 yılında Amerika'da üretilen araçların 1684 tanesi buhar tahrikli, 1575 tanesinin elektrik tahrikli ve 963 tanesinin de İYM'li olduğu belirtilmektedir. Amerika'da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" (London Electrical Cab Company) tarafından 15 tane taksi kullanıma alınmıştır. Şekil 2.2'de görülen bu taksiler dönemin önemli olaylarından biri olarak kayıtlara geçmiştir (Larminie ve Lowry, 2003).



Şekil 2.2 1897 yılında İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" (London Electrical Cab Company) tarafından kullanıma alınan taksilerden biri.

1900–1912 arası dönemde menzil ve performansı artırma düşüncesi oluşmaya başlamıştır. Bu amaçla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları geliştirmiştir. Bu araçta elektrikli motor, benzinli motor ile birlikte kullanılmış ve ilk defa hibrit konfigürasyonu denenmiştir. Bu dönemlerde Ferdinand Porsche ilk deneysel hibrit elektrikli aracın (HEA) tasarımını yapmıştır. Mixt Wagen olarak adlandırılan bu araçta yardımcı bir benzinli motor kullanılmıştır. İYM, bataryaları şarj eden generatörü tahrik etmektedir ve daha sonra elektrik motorunu döndürmektedir (Chau ve Wong, 2002). 1916 yılında Woods tarafından HEA üretilmiştir. Bu araçta 4 silindirli küçük benzinli motor direkt olarak elektrik motoru/generatör grubuna ve daha sonra konvansiyonel itici şaftıyla ön tahrik aksına bağlanmıştır. Bu düzenleme ile paralel HEA geliştirilmiştir. 1920'lerin başında ise hemen tüm EA üreticileri İYM kullanarak üretimlerini sürdürmüşlerdir. 1920'lerin ortasından itibaren 1960 yıllara kadar İYM'li araçlar tüm dünyada tamamen üstünlük kurmuştur (Joshi ve Deshmukh, 2006). 1960'lı yıllarda EA'lara duyulan ilgi yeniden artmaya başlamıştır.

İYM’lerden kaynaklanan hava kirliliği bu araçların üretimine geçiş düşüncesini oluşturmuş ve bazı küçük üreticiler hava kirliliğine karşı EA’ların üretimine geçmiştir. Üretilen çoğu EA’lar, konvansiyonel araçların elektrikli hale dönüştürülmüş şeklindedir. Örneğin 1960’da Illinois’deki Eureka Williams Şirketi 4 kapılı Renault Dauphine’i elektrikli versiyona dönüştürmüştür. İYM’li araçları elektrikli versiyona dönüştüren bazı önemli otomotiv firmaları, bu dönemlerde elektrikli aracı baştan sona tasarlamak üzere harekete geçmiştir. Buna bir örnek, İngiltere’deki Ford Motor firmasıdır. 1966 yılında bu firmada aşağıdaki gereksinimleri yerine getirebilecek bir elektrikli aracı tasarlamak üzere işe koyulmuşlardır:

- En düşük kirlilik,
- Kolay çalışma,
- Düşük ilk satın alma ve kullanım maliyeti,
- En düşük yol ve park alanı kaplayacak şekilde küçük boyuta sahip olmasıdır.

1967 yılında ilk prototip yapılmış ve Comuta adı verilmiştir. Comuta her biri ön tekeri tahrik eden 2 tane DC motoruna sahiptir. Her motor 18 kg ağırlığında ve 14 cm çapındadır. Motorun titreşimini kontrol eden bir sistem geliştirilmiştir. Aracın gücü, toplam ağırlığı 170 kg olan 4 adet kurşun-asit bataryasından sağlanmaktadır. Araç 40 km/saat hız ile 64 km menzile sahip olup; azami hızı 64 km/saattir.

1970’lerin ortalarına doğru petrol krizi ile birlikte başta Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya gibi bir çok ülke, EA araştırmalarına tekrar hız vermişlerdir. Amerika’daki bazı küçük firmalar konvansiyonel araçları elektrikli hale dönüştürme çabalarına girmiştir. Avrupa’da 1970’li yıllar çok aktif bir dönemdir. 1973’de Electricite de France 80 tane konvansiyonel aracı elektrik tahrikli hale dönüştürmüştür. Almanya’da Daimler – Benz ve Volkswagen ise deneysel EA’lar yapmışlardır. 1975 yılında İtalya’da Fiat, X1/23 B isimli deneysel bir prototip geliştirmiştir. Bu araç 2 kişilik olup kurşun-asit bataryaları içermekte ve DC elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. Menzili 48 km ve azami hızı 64 km/saatın altındadır (Larminie ve Lowry, 2003).

1980’li yıllarda hükümetler EA’ların çevresel avantajları nedeniyle bu araçlara karşı ilgi duymaya ve elektrikli araç programları için resmi kaynaklardan parasal destek vermeye başlamışlardır. Böylece 1980’li yılların ortalarında ABD Enerji bakanlığının sponsorluğu ile Ford/GE tarafından ETX-1 aracının geliştirilmesi sağlanmıştır. 200 V’luk kurşun-asit bataryaları, 300A AC güç üreten Darlington transistör bazlı evirici ile birlikte 37 kW’lık 2

kutuplu indüksiyon motorunu tahrik etmek için kullanılmıştır (Larminie ve Lowry, 2003; Mierlo vd., 2006).

1990 yılından sonra birçok araç üreticisi elektrikli araç geliştirmeye başlamıştır. Hali hazırda bulunan bazı EA'lara örnek olarak GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric gösterilebilir. Bunlarla birlikte prototip ve deneysel amaçlı üretilmiş birçok elektrikli araç daha bulunmaktadır. Bu araçların çoğu AC indüksiyon motor veya sabit mıknatıslı senkron motor kullanmışlardır. 1990'larda büyük araç üreticileri EA'ların gelişmesi için batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini belirtmekte, bu amaçla da tümü-EA'ların batarya ve menzil kısıtlarını gidermek için hibrit elektrikli araç geliştirme çalışmaları başlatmışlardır. Özellikle Japon endüstrisi Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino modellerini geliştirmiştir.

Hibrit araçların konvansiyonel araçlara göre bazı üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Geriye kazanımlı frenleme enerji kaybını en aza indirir ve taşıt durduğunda ya da yavaşladığında kullanılan enerjiyi geri kazandırarak enerji depolama sistemlerini (EDS) besler.
- İYM'ler ani yükü değil ortalama yükü karşılayacak şekilde boyutlandırıldığından motorun ağırlığı azalmaktadır.
- Yakıt verimi büyük ölçüde artmaktadır.
- Emisyonlar önemli oranda azalmaktadır.
- HEA'lar alternatif yakıtlarla da çalıştığı için fosil yakıtlara çok fazla bağımlı değildirler.

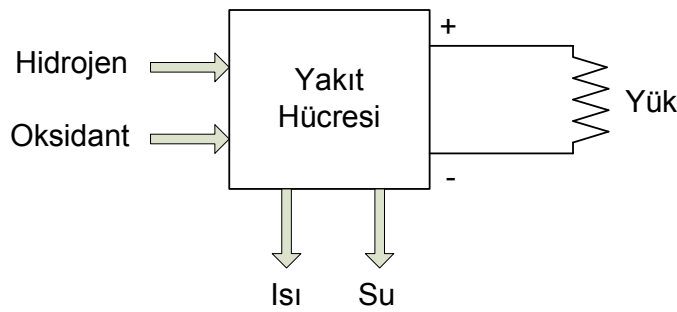
İYM içeren HEA'lar, yakıt tüketiminde ve olumsuz çevresel etkilerde belli oranda bir azalma sağlamışlardır. Ancak bu sistemler taşıt uygulamaları için tamamen bir çözüm oluşturmamaktadır. Sıfır emisyon sağlayan ve fosil yakıtlar kullanan İYM'ler yerine alternatif sistemlerin kullanılması üzerine yapılan çalışmalar, günümüzde özellikle YH'li hibrit elektrikli taşıtların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmış durumdadır (Mierlo vd., 2006). Doğada en fazla bulunan elementin hidrojen olması ve doğrudan hidrojenin kullanılması ile birlikte sıfır emisyon sağlama potansiyeli, YH'nın kullanıldığı taşıt sistemleri üzerine yapılan çalışmalara ivme kazandırmıştır. Fakat YH'lı taşıtlar için günümüzde hala maliyet ve yakıt olarak kullanılan hidrojenin taşıta yüklenebileceği hidrojen istasyonlarının sayısının az olması gibi çeşitli sorunlar mevcuttur (Helmolt ve Eberle, 2007). Bu sorunları çözmek açısından

gerçekleştirilen yoğun araştırma çalışmaları sonucunda YH'lı hibrit elektrikli taşıtların gelecekte otomotiv piyasasında öncü bir konumda olması beklenmektedir.

2.2 Yakıt Hücresi Sistemleri

2.2.1 Yakıt Hücresi Sistemlerinin Çalışma Prensipleri

YH, yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan DC elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal enerji çeviricileridir (Xue vd., 2006). Şekil 2.3'te genel çalışma karakteristiği verilen YH hareketsiz parçalar içerir ve elektriksel enerjiyi bir adımda elde eder.



Şekil 2.3. YH ile DC elektrik üretimi

YH bazı yönlerden bataryaya benzemektedir. YH'de elektrolit, negatif-pozitif elektrotlar mevcuttur ve DC elektrik enerjisini kimyasal reaksiyonlarla üretir. Ancak bataryaların tersine YH sistemleri sabit yakıt (H_2) ve oksidant (O_2) beslemesi gerektirir. Bataryaların kullanıldığı dizüstü bilgisayarlar, elektrikli taşıtlar, vb. birçok uygulamada günümüzde YH sistemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Farklı uygulamalarda kullanılabilen ve farklı özelliklere sahip olan YH çeşitleri ticari olarak günümüzde üretilmektedir.

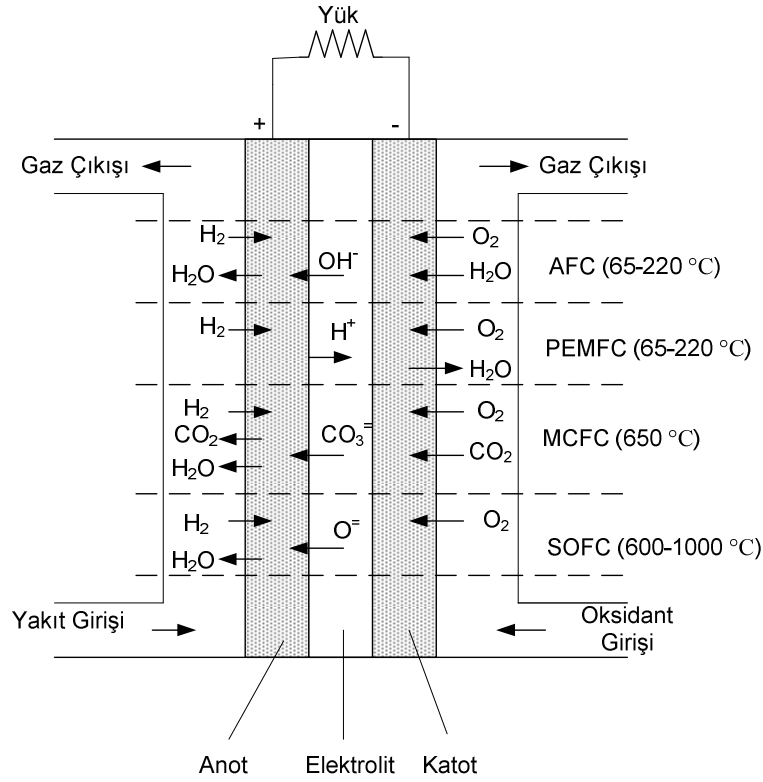
2.2.2 Yakıt Hücresi Çeşitleri

YH'ler kullandıkları elektrolit tipine göre aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Alkalın Yakıt Hücreleri (Alkaline Fuel Cells (AFC))
- Polimer Elektrolit Membran veya Proton Geçirimli Yakıt Hücreleri (Proton Exchange Membran Fuel Cells (PEMFC))
- Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC))
- Molten Karbonat Yakıt Hücresi (Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC))
- Katı Oksit Yakıt Hücreleri (Solide Oxide Fuel Cells (SOFC))

Şekil 2.4'de özellikleri verilen YH sistemleri arasında, yüksek verimliliğinin yanı sıra, hacim ve ağırlık açısından sahip olduğu avantajları nedeniyle PEMYH sistemleri, günümüzde taşıt

uygulamaları için en uygun YH sistemleridir.



Şekil 2.4. YH tiplerinin özellikleri (Barbir, 2005)

PEMYH 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 tüketimi elde edilebilir (Ouyang vd., 2006; Hussain vd., 2007). PEMYH sistemlerinin kullanıldığı taşıtların, ekonomik açıdan da uygun düzeylerde mal edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen yoğun araştırma çalışmaları sonucunda yakın bir gelecekte konvansiyonel taşıt sistemleriyle rekabet edebilir düzeye geleceği öngörülmektedir. Bu sayede, birçok taşıt üreticisinin PEMYH sistemini kullanan taşıtların ticarileştirilmesini sağlamak amacıyla yaptığı çalışmalar ile birlikte PEMYH sistemlerinin taşıt uygulamaları için geleceğin en önemli teknolojisi olacağı şimdiden görülebilmektedir.

2.2.3 Yakıt Hücresinin Avantajları

Geleneksel enerji teknolojileri ile karşılaştırıldığında YH'leri öne çıkaran şu özellikler sayılabilir (Barbir, 2005; Larminie ve Dicks, 2000):

- İçten yanmalı motorlara göre daha verimlidir. Bu sebeple hareketli sistemler için önemli konuma gelmektedir.
- Sıfır veya düşük emisyonu sahip olmasından dolayı kapalı mekânlarda da kullanımı söz konusudur. Ancak saf H_2 yerine, H_2 üretmek için metanol

kullanıldığında CO₂ emisyonu meydana gelse de bu emisyon geleneksel sistemlerinkinden daha azdır.

- YH'ler basit yapılara sahiptir. Hareketli parçaları yoktur. Bu sebeple uzun ömre sahiptir.
- YH'ler modüler yapıya sahiptir. Daha fazla güç gereksiniminde daha çok YH, yığın yapısı şeklinde eklenebilir.
- YH'ler sessiz çalışırlar.
- YH'ler mikroWatt güçlerinden megaWatt güçlerine kadar yapılabilir.
- Taşıtlardaki içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldıklarında daha küçük boyutlarda olmaktadır.

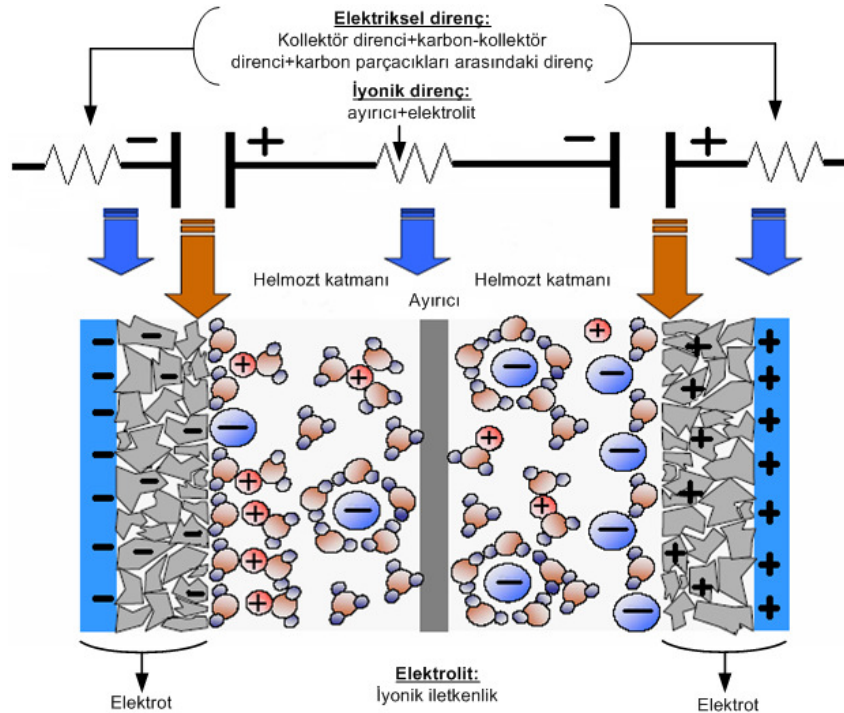
2.2.4 Yakıt Hücresinin Dezavantajları

Geleneksel enerji teknolojileri ile karşılaştırıldığında YH'lerin dezavantajları şunlardır:

- Geleneksel sistemlere göre maliyetleri yüksektir. Ancak sistemlerin optimize edilmesi ve seri üretime geçilmesi ile bu problemin çözülebileceği söylenebilir.
- Geleneksel sistemlere göre uzun süreli çalışmalarda verimsizdirler.
- YH sistemlerinin yaygın kullanımı için altyapı ve kanuni düzenlemeler yoktur.

2.3 Ultra-kapasitör Sistemleri ve Çalışma Prensipleri

İlk olarak elektro-kimyasal kapasitörlerle gelişim süreci başlayan UK'lar, 1957 yılında Becker tarafından yapılan patent başvurusu ile literatüre girmiştir. Araştırmacıların kapasitörlerde daha yüksek kapasite değerlerine ulaşma çabaları, ultra-kapasitörlerin geliştirilmesini sağlamıştır (Burke, 2000).

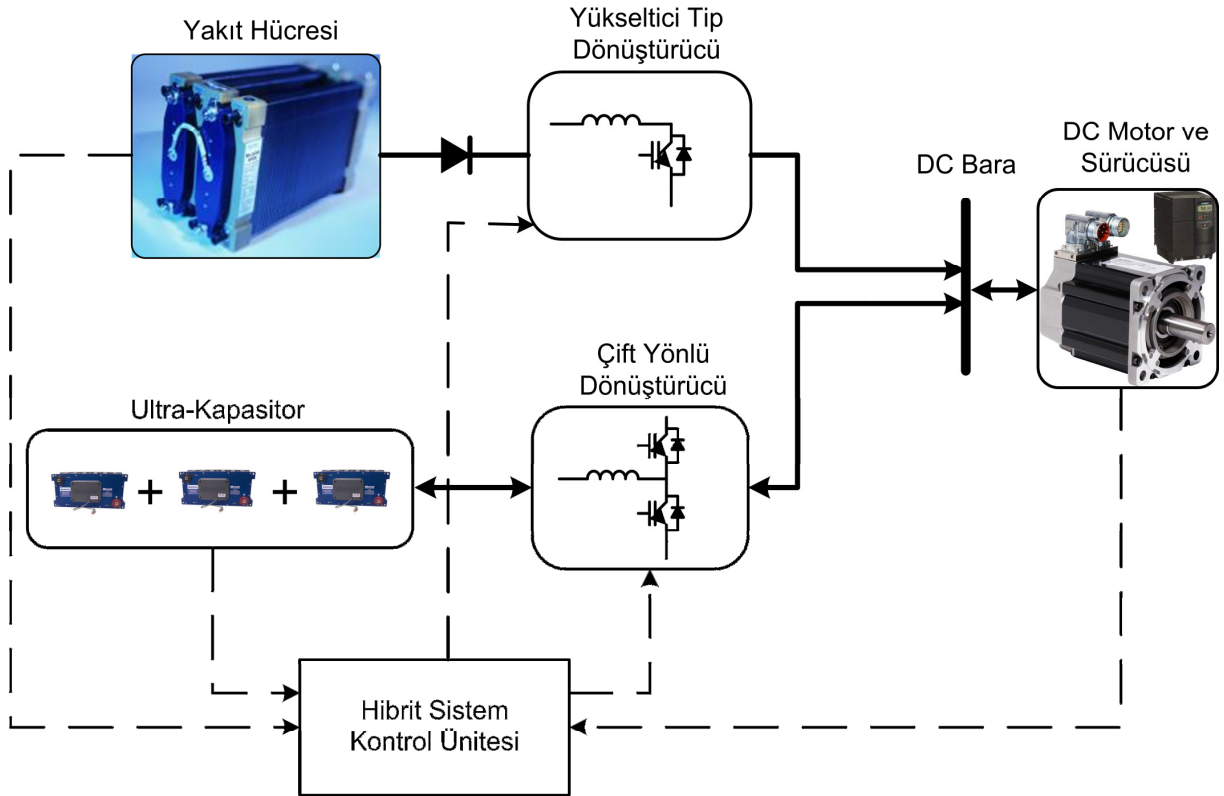


Şekil 2.5 UK'nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı (Maxwell, 2006).

Şekil 2.5'te yapısı görülen UK'lar, elektrik enerjisinin depolandığı elektro-kimyasal yapıdaki elektrotlardan ve bir ayırıcı yüzeyden meydana gelmektedir. Sahip olduğu nano boyutlardaki yüzeysel elektrotlar, UK'ların sıradan kapasitörlere kıyasla çok daha yüksek kapasite değerlerine sahip olmasını sağlamaktadır (Kötz ve Kalen, 2000; Gualous vd., 2003). Yüksek kapasite değeri ve güç yoğunluğu sayesinde UK'lar, birçok açıdan geleneksel kapasitörlerden daha avantajlı konuma gelmiş ve birçok kullanım alanında da bataryaların yerini almaya başlamıştır.

3. SİSTEM TANIMLAMASI VE METODOLOJİ

Oluşturulan hibrit YH/UK taşıt sisteminin genel şeması Şekil 3.1’de görüldüğü gibidir. Sistemde PEMYH ana güç kaynağıdır. UK modülü, yük talebi ile YH sistemi çıkış gücü arasındaki farkı karşılamak için tasarlanmıştır. Hibrit taşıt sistemi için geliştirilen PEMYH ve UK modelleri, sistem için tasarlanan enerji yönetim stratejisi ve güç biçimlendirme ünitesi bu bölümde detaylı olarak tanıtılmaktadır.



Şekil 3.1 Geliştirilen sisteme ait genel blok diyagramı

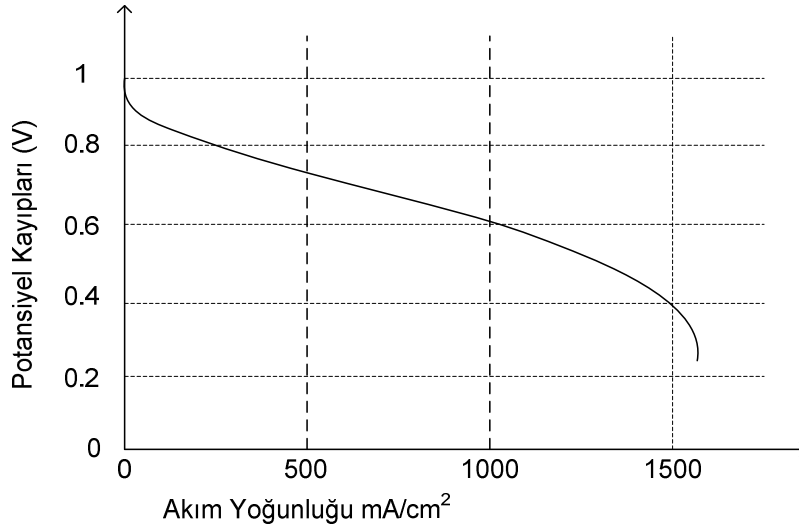
3.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin (PEMYH) Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı

Oluşturulan hibrit YH/UK taşıt sisteminde PEMYH ana güç kaynağıdır ve temel yük talebini karşılamada kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen PEMYH dinamik benzetim modeli, YH potansiyelinde tersinemez kayıpların etkisiyle oluşan değişimin sıcaklık, akım ve basınç gibi parametrelere bağlı matematiksel ifadelerle modellenmesi ile oluşturulmuştur. Modelin oluşturulmasında kullanılan PEMYH parametreleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 PEMYH modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler

$B_{(I/A)}, C_{(V)}$	Aktivasyon gerilim düşümü benzetim sabitleri [A^{-1}] ve [V]
E	Nernst anlık gerilimi [V]
E_0	Standart yüksüz hal gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [$C \text{ kmol}^{-1}$]
I_{YH}	FC sistem akımı [A]
K_{an}	Anod valf sabiti [$\sqrt{KmolKg} (\text{atm s})^{-1}$]
K_{H_2}	Hidrojen valfi molar sabiti [$\text{kmol} (\text{atm s})^{-1}$]
K_{H_2O}	Su valfi molar sabiti [$\text{kmol} (\text{atm s})^{-1}$]
K_{O_2}	Oksijen valfi molar sabiti [$\text{kmol} (\text{atm s})^{-1}$]
K_r	Modelleme sabiti [$\text{kmol} (\text{s A})^{-1}$]
M_{H_2}	Hidrojen molar kütlesi [kg kmol^{-1}]
N_0	YH yığınındaki 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}	Giriş molar hidrojen akışı [kmol s^{-1}]
$q_{H_2}^{gry}$	Hidrojen giriş akışı [kmol s^{-1}]
$q_{H_2}^{ckş}$	Hidrojen çıkış akışı [kmol s^{-1}]
$q_{H_2}^r$	Reaksiyona giren hidrojen akışı [kmol s^{-1}]
q_{H_2}	Yük değişimini karşılamak için gerekli hidrojen akışı [kmol s^{-1}]
R	Evrensel gaz sabiti [$(1 \text{ atm}) (\text{kmol K})^{-1}$]
R^{ic}	YH iç direnci [Ω]
r_{H-O}	Hidrojen-Oksijen akış oranı
T	Mutlak sıcaklık [0K]
U	Kullanım oranı
V_{an}	Anod hacmi [m^3]
$V_{hücre}$	YH sistem DC çıkış gerilimi [V]
τ_{H_2}	Hidrojen zaman sabiti [s]
τ_{O_2}	Oksijen zaman sabiti [s]
τ_{H_2O}	Su zaman sabiti [s]
η_{akt}	Aktivasyon gerilim düşümü [V]
η_{omik}	Omik gerilim düşümü [V]

YH'nın normal şartlar altındaki ideal potansiyeli 1.229 V'tur. Fakat gerçek YH potansiyeli, oluşan gerilim düşümlerinden dolayı bu değerden daha düşük seviyelere inmektedir. YH'lar için; aktivasyon ve omik gerilim düşümleri söz konusudur. YH'deki gerilim düşümleri ve buna göre YH potansiyelinin değişimi, Şekil 3.2'deki örnek YH kutuplanma eğrisinde görülebilmektedir. YH sistemi için en verimli çalışma bölgesi, hücre başına yaklaşık 0.55–0.8 V'luk gerilim aralığına ve Şekil. 3.2'de YH geriliminin nispeten lineer bir biçimde değiştiği bölgeye karşılık gelen lineer çalışma bölgesidir (Barbir, 2005). YH sistemini en verimli olduğu bu lineer bölgede çalıştırmak, genel sistem verimliliği açısından oldukça önemlidir.



Şekil 3.2 Örnek YH kutuplanma eğrisi (Barbir, 2005)

Herhangi bir gazın (hidrojen) valf üzerinden gerçekleşen molar akışı ile bu gazın kanal içerisindeki kısmi basıncı arasındaki ilişki,

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

şeklinde ifade edilebilir.

Hidrojen molar akışı için; hidrojen giriş akışı, hidrojen çıkış akışı ve reaksiyona giren hidrojen akış oranı olmak üzere üç önemli faktör vardır. Bu faktörler arasındaki ilişki,

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{R_{YH} T}{V_{an}} (q_{H_2}^{grş} - q_{H_2}^{çkş} - q_{H_2}^r) \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Hidrojen akışı ile YH sistem akımı arasındaki temel elektrokimyasal ilişkiye göre, reaksiyona

giren hidrojen akış oranı Eşitlik 3.3'teki gibi ifade edilebilir.

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

Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.3 kullanılarak ve Laplace dönüşümü uygulanarak hidrojen kısmi basıncı frekans domeninde Eşitlik 3.4'deki gibi elde edilebilir.

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{grs} - 2K_r I_{YH}) \quad (3.4)$$

Burada τ_{H_2} , Eşitlik 3.5'teki gibi tanımlenebilir.

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2} R T} \quad (3.5)$$

Su ve oksijen kısmi basınçları da benzer şekilde elde edilebilir. PEMYH'ye ait polarizasyon eğrisi; Nernst gerilimi, aktivasyon gerilim düşümü ve omik gerilim düşümünün toplamı şeklinde elde edilir. Sabit sıcaklık ve oksijen konsantrasyonu durumlarında YH çıkış gerilimi Eşitlik 3.6'daki şekilde elde edilebilir.

$$V_{hücre} = E + \eta_{akt} + \eta_{omik} \quad (3.6)$$

Aktivasyon ve omik gerilim düşümleri sırasıyla,

$$\eta_{akt} = -B_{(1/A)} \ln(C_{(V)} I_{YH}) \quad (3.7)$$

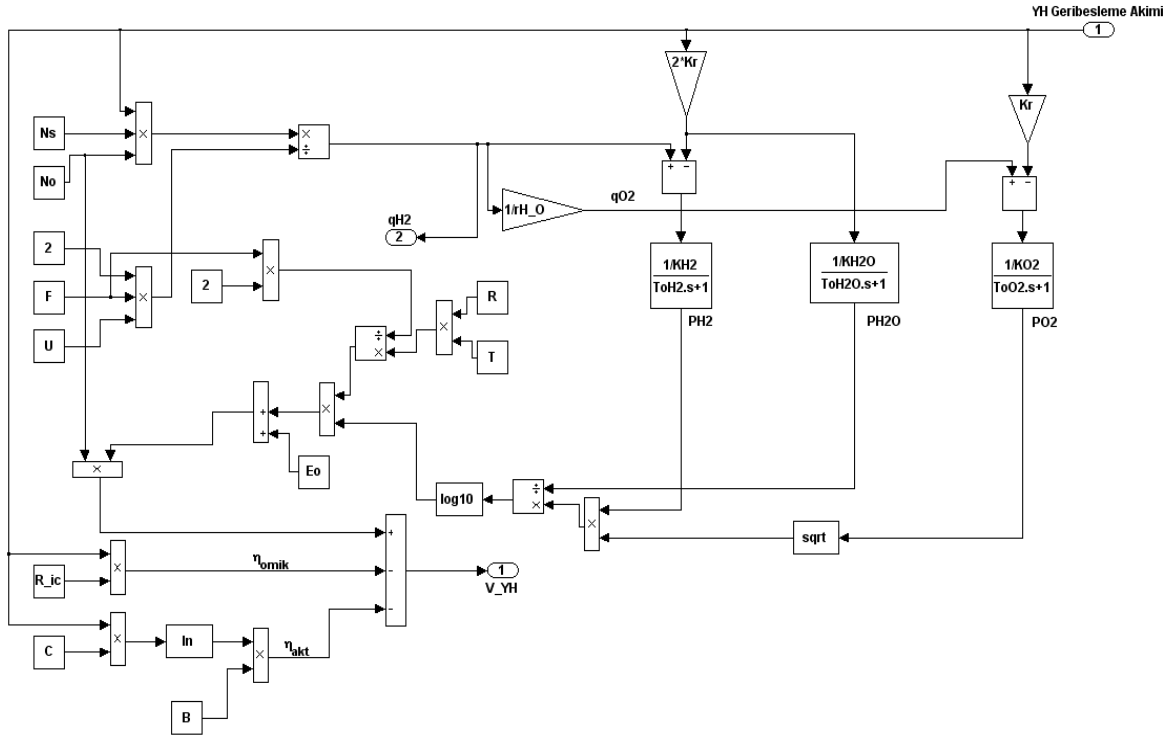
$$\eta_{omik} = -R^i I_{YH} \quad (3.8)$$

Nernst ani gerilimi ise Eşitlik 3.9'daki gibi elde edilebilir.

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

İşletme süresince yararlanılan geri beslemeli kontrol düzeni için YH çıkış akımını YH modelin girişine geri alınmıştır. Çekilen akıma bağlı olarak molar formda gereksinim duyulan hidrojen miktarı Eşitlik 3.10 yoluyla hesaplanabilir.

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



Şekil 3.3 YH sisteminin dinamik modeli

MATLAB ve Simulink ortamlarında oluşturulan PEMYH modeli Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu model daha sonra genel sisteme, kontrollü gerilim kaynağı olarak adapte edilmiştir.

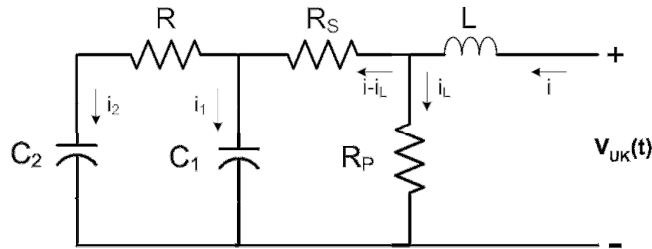
3.2 Ultra-kapasitör Sisteminin Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı

Oluşturulan hibrit sistemde UK modülü, yük talebi ve YH sistemi çıkış gücü arasındaki farkı karşılamak için tasarlanmıştır. Bu bölümde benzetimde kullanılan UK sisteminin matematiksel modeli açıklanmaktadır. UK modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 UK sisteminin modellenmesinde kullanılan parametreler

C_1	UK ana kapasitesi [F];
C_2	“Yavaş kol” kapasitesi [V];
i_1	C_1 ’den geçen akım [A];
i_2	C_2 ’den geçen akım [A];
i_L	L’den geçen akım [A];
I_{UK}	UK şarj/deşarj akımı [A];
L	UK endüktansı [H];
R	“Yavaş kol” direnci [Ω];
R_P	UK paralel direnci [Ω];
R_S	UK seri direnci (ESR) [Ω];
SOC	UK’nın şarj seviyesi;
V_C^0	UK başlangıç gerilimi [V];
V_{C1}	C_1 uç gerilimi [V];
V_{C2}	C_2 uç gerilimi [V];
V_L	L uç gerilimi [V];
V_{maks}	Azami UK gerilimi [V];
V_{Rs}	R_S uç gerilimi [V];
V_{Rp}	R_P uç gerilimi [V];
V_{UK}	UK çıkış gerilimi [V];

UK modelinin oluşturulmasında Şekil 3.4’te görülen elektriksel eşdeğer devreden yararlanılmıştır. R_s ve C_1 ’den oluşan “hızlı kol”, UK’nın saniyeler mertebesindeki anlık cevabını karşılamaktadır. R ve C_2 ’den oluşan “yavaş kol” ise şarj vedeşarj sonrasında UK’nın içerisindeki enerji dağılımını belirtmektedir (Gualous vd., 2003). Kullanılan L endüktansı ise, hızlı değişen yük durumlarında etkin konuma gelmektedir. Bunun yanı sıra R_p paralel direnci, boştaki kayıpları temsil etmektedir (Rafik vd., 2007).



Şekil 3.4 UK benzetim modelinin geliştirilmesinde kullanılan elektriksel eşdeğer devre.

UK seri direnci ve endüktansından kaynaklanan gerilim düşümü ve UK’nın ana kapasitesinin uçlarındaki gerilim değeri arasındaki bağıntı UK çıkış geriliminin değişimini belirtmektedir.

Buna göre UK çıkış gerilimi,

$$V_{UK} = V_{C_1} - V_{R_s} - V_L \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 3.11'deki V_{R_s} ifadesi,

$$V_{R_s} = R_s \times (i - i_L) \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca V_L , Eşitlik 3.13 kullanılarak elde edilebilir;

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

Oluşturulan UK modelinde kullanılan kapasitörlere ait gerilim ifadeleri ise,

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

ve

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

biçimindedir. Eşitlik 3.12, 3.14 ve 3.15'te kullanılan akım ifadeleri,

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

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

ve

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

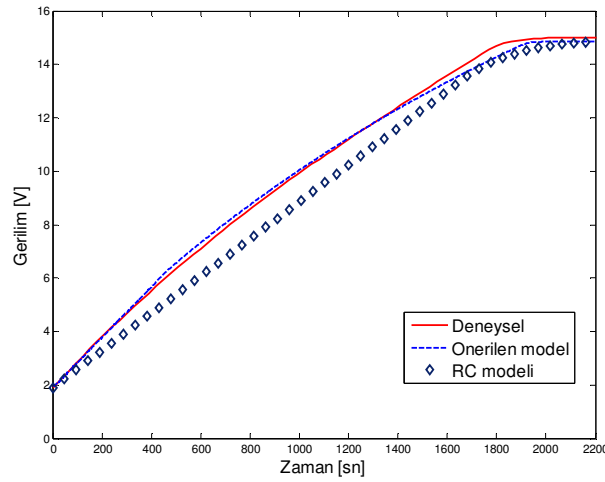
şeklinde belirtilebilir. Bunun yanı sıra UK'nın şarj seviyesi ise;

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

eşitliğinden hesaplanmaktadır.

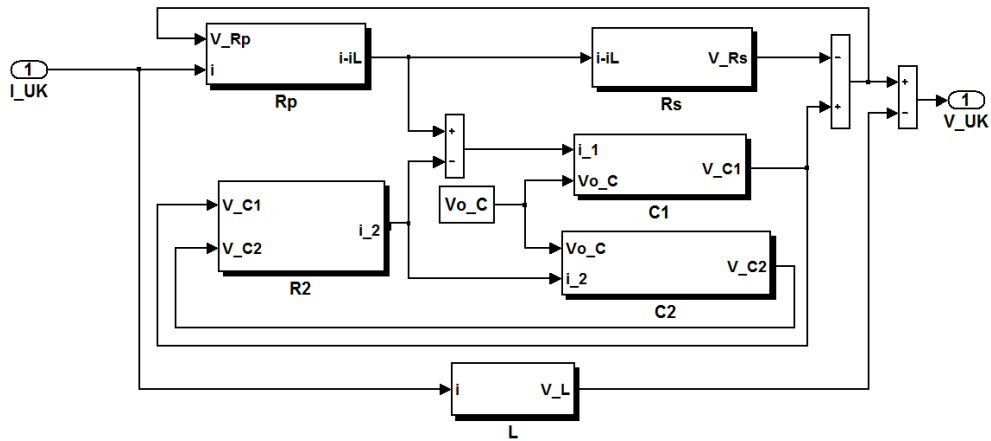
Şekil 3.5'te, önerilen modelin geçerliliği kanıtlamak açısından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda 23⁰C'de 3 A'lık şarj

durumu altında 430 F, 16 V'luk UK'nın gerilim değişimi incelenmiştir. Önerilen modelin benzetim sonuçları ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların oldukça benzerlik gösterdiği, ayrıca da önerilen modelin klasik RC modeliyle kıyaslandığında daha doğru sonuçlar verdiği Şekil 3.5'te açıkça görülmektedir.



Şekil 3.5 430 F ve 16.2 V parametrelerine sahip UK'nın 230C'de 3 A'lık akım için çıkış gerilimindeki değişim

Eşitlik 3.11 - 3.19'dan yararlanılarak oluşturulan UK benzetim modeli Şekil 3.6'da görülmektedir. Oluşturulan bu model sonra bütün sisteme kontrollü gerilim kaynağı olarak entegre edilmiştir.

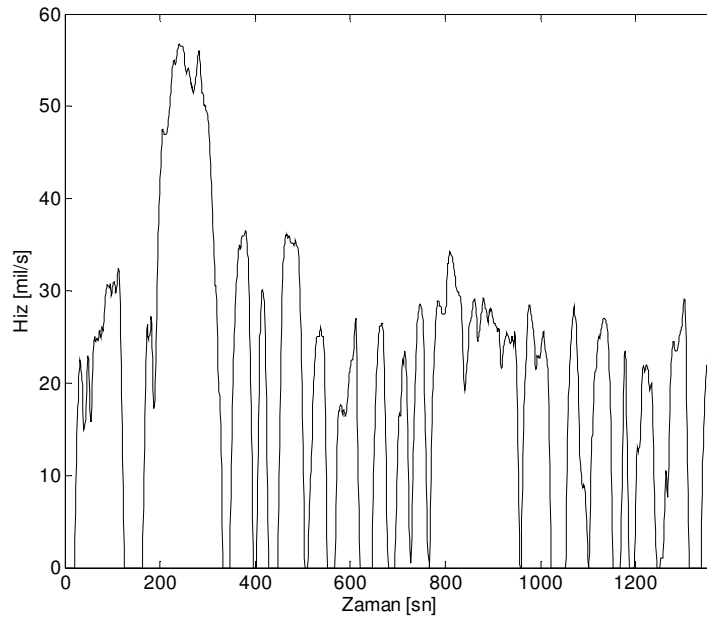


Şekil 3.6 UK sisteminin dinamik modeli

3.3 Sürüş Çevrimi

Sürüş çevrimi, geliştirilen bir sistemin dinamik cevabını değerlendirmek ve genel yapıda

iyileştirmeler yapabilmek için kullanılabilir. Bu çalışmada, taşıt sisteminin yük talebini modelleyebilmek amacıyla UDDS standart sürüş çevriminden faydalanılmıştır.



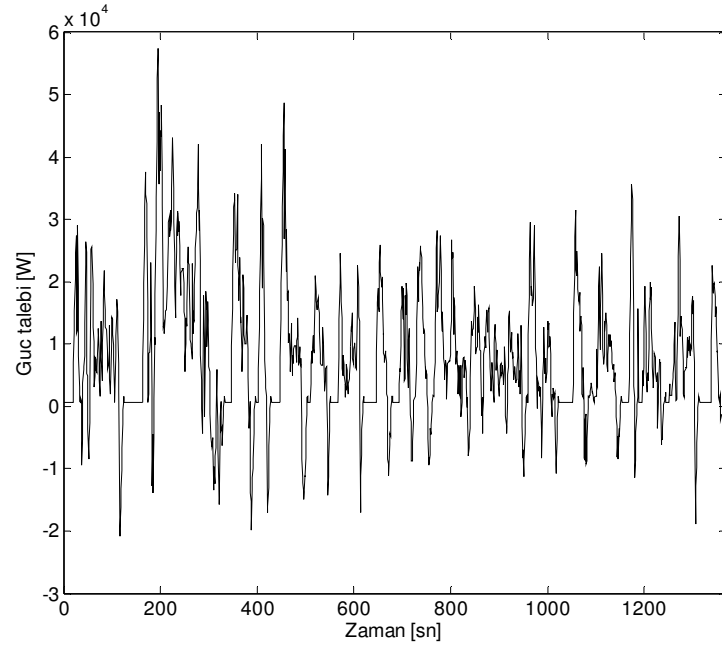
Şekil 3.7 UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.

UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın hız değişimi zamanın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.7'de gösterilmektedir. UDDS sürüş çevriminin karakteristikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3 UDDS sürüş çevriminin özellikleri

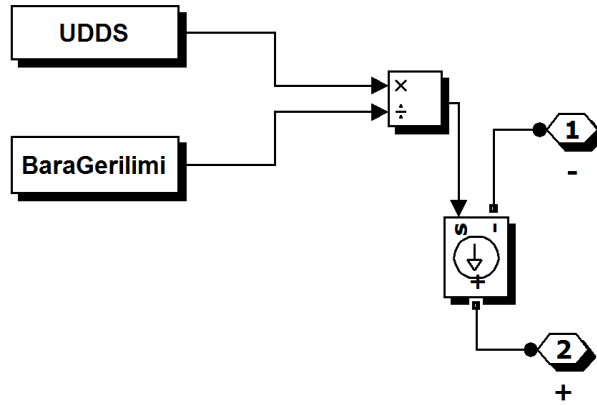
Zaman	1369 [sn]
Menzil	7.45 [mil]
Azami hız	56.7 [mil/s]
Ortalama hız	19.6 [mil/s]
Azami ivmelenme	1.48 [m (sn ²) ⁻¹]
Azami yavaşlama	-1.48 [m (sn ²) ⁻¹]
Ortalama ivmelenme	0.51 [m (sn ²) ⁻¹]
Ortalama yavaşlama	0.58 [m (sn ²) ⁻¹]
Boşta çalışma zamanı	259 [sn]

UDDS sürüş çevrimindeki hız değişimine bağlı olarak taşıtın güç talebi ise Şekil 3.8'de görülmektedir. Görüldüğü gibi birçok anlık yüklenmeleri içeren bu yük profili, hibrit bir taşıt sistemi için geliştirilen bir enerji yönetim stratejisinin performansını değerlendirmek açısından oldukça uygundur.



Şekil 3.8 UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.

UDDS yük profili kullanılarak MATLAB, Simulink ve SimPowerSystems ortamlarında oluşturulan yük modeli ise Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9 UDDS sürüş çevrimleri kullanılarak oluşturulan yük modeli

4. HİBRİT SİSTEM İÇİN OLUŞTURULAN YAPAY SİNİR AĞLARI TABANLI ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİ

4.1 Genel Tanım ve Tarihçe

YSA'lar ile ilgili çalışmalar 20. yüzyılın ilk yarısında başlamış ve günümüze kadar büyük bir hızla devam etmiştir. Bu çalışmaları 1970 öncesi ve sonrası diye iki kısma ayırmak mümkündür. Zira 1970 yılları YSA için bir dönüm noktasını teşkil etmiş, daha önce aşılması imkânsız gibi görünen pek çok problem bu dönemlerde aşılmıştır.

İlk YSA modeli 1943 yılında, bir sinir hekimi olan Warren McCulloch ile bir matematikçi olan Walter Pitts tarafından gerçekleştirilmiştir. McCulloch ve Pitts, insan beyninin hesaplama yeteneğinden esinlenerek, elektrik devreleriyle basit bir sinir ağı modellemişlerdir.

1948 yılında "Wiener Cybernetics" isimli kitabında, sinirlerin çalışması ve davranış özelliklerine değinmiş, 1949 yılında ise Hebb "Organization of Behavior" adlı eserinde öğrenme ile ilgili temel teoriyi ele almıştır.

1957 yılında Frank Rosenblatt'ın Perceptron'u geliştirmesinden sonra, YSA'lar ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Perceptron; beyin işlevlerini modelleyebilmek amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkan tek katmanlı eğitilebilen ve tek çıkışa sahip bir ağ modelidir (Elmas, 2003).

1959 yılında Bernard Widrow ve Marcian Hoff (Stanford Üniversitesi) ADALINE (Adaptive Linear Neuron) modelini geliştirmişlerdir. Bu model YSA'ların mühendislik alanlarında uygulamaları için bir başlangıç kabul edilmiştir. Geliştirilen model Rosenblatt'ın Perceptron'una benzemekle birlikte, öğrenme algoritması daha gelişmiştir. Daha sonra uzun mesafelerdeki telefon hatlarındaki yankıları ve gürültüleri yok eden bir adaptif filtre olarak kullanılmış ve gerçek dünya problemlerine uygulanan ilk YSA modeli olma özelliğini kazanmıştır. Bu yöntem günümüzde de aynı amaçla kullanılmaktadır.

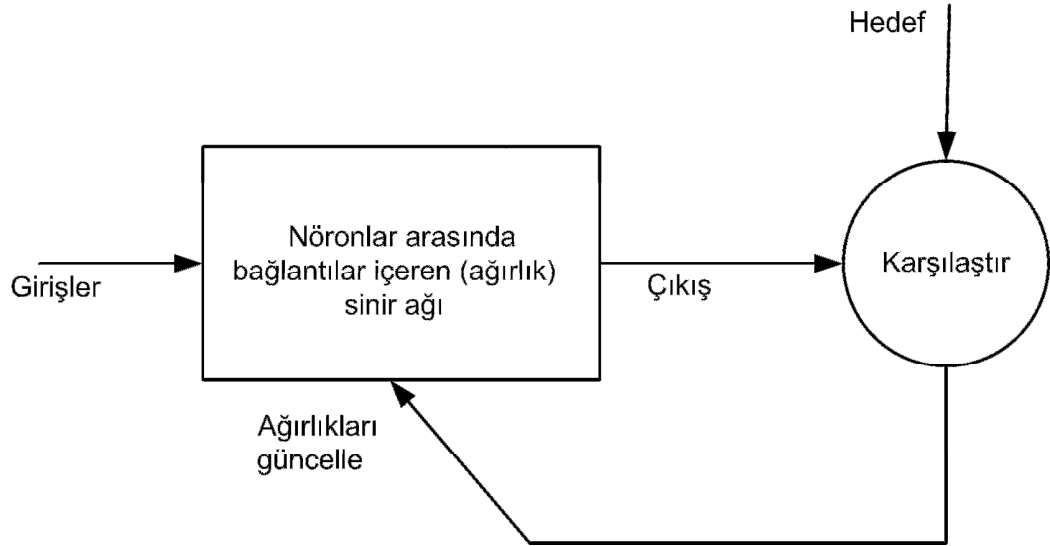
4.2 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

YSA'lar, uygulanan ağ modeline göre değişik karakteristik özellikler göstermelerine karşın temel birkaç ortak özelliğe sahiptirler.

Birinci özellik; YSA'larda sistemin paralelliği ve toplamsal işlevin yapısal olarak dağılımlılığıdır (Haykin, 1994). YSA'lar birçok nörondan meydana gelir ve bu nöronlar eş

zamanlı olarak çalışarak karmaşık işlevleri yerine getirir. Diğer bir deyişle karmaşık işlevler birçok nöronun eş zamanlı çalışması ile meydana getirilir. Süreç içerisinde bu nöronlardan herhangi biri işlevini yitirse dahi, sistem güven sınırları içerisinde çalışmasına devam edebilir.

İkinci özellik ise genelleme yeteneğidir. Bu özellik sayesinde eğitim sırasında kullanılmayan girdiler için de, anlamlı sonuçlar üretebilmesidir (Efe ve Kaynak, 2004). YSA'lara ait genel çalışma yapısı Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 YSA genel çalışma yapısı

Üçüncü olarak; ağ fonksiyonları non-lineer olabilmektedir. Yapı üzerinde dağılmış belli tipteki non-lineer alt birimler özellikle, istenen eşleştirmenin denetim ya da tanımlama işlemlerinde olduğu gibi non-lineer olması durumunda işlevin doğru biçimde yerine getirilebilmesini matematiksel olarak olası kılarlar.

Dördüncü özellik ise; sayısal ortamda tasarlanan YSA'ların, donanımsal gerçekleştirilebilir olmalarıdır. Bu özellik belki de YSA'ların günlük hayatta daha da fazla yaşamımızın içine gireceğinin (girebileceğinin) göstergesidir.

4.3 Yapay Sinir Ağlarının Avantaj ve Dezavantajları

YSA'lar birçok açıdan avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Bu avantajlar ve dezavantajlar detaylı olarak aşağıdaki bölümlerde ele alınmıştır.

4.3.1 Yapay Sinir Ağlarının Avantajları

YSA'lar makina öğrenmesi gerçekleştirebilirler. Yapay sinir ağlarının temel işlevi zaten bilgisayarın öğrenmesini sağlamaktır. Olayları öğrenerek benzer olaylar karşısında mantıklı kararlar verebilirler.

Bilgi işleme yöntemleri geleneksel programlamadan farklıdır. Bu nedenle geleneksel programlamanın getirdiği birçok olumsuzluk ortadan kaldırılabilir

Bilgiler ağın tamamında saklanır. Geleneksel programlamada olduğu gibi bilgiler veri tabanları ya da dosyalarda belli bir düzende tutulmaz, ağın tamamına yayılarak değerler ile ölçülen ağ bağlantılarında saklanmaktadır. Nöronlardan bazılarının işlevini yitirmesi, anlamlı bilginin kaybolmasına neden olmaz (Sisworahardjo vd., 2008; Taheri ve Mohebbi, 2008).

Örnekleri kullanarak öğrenirler. YSA'nın öğrenebilmesi için örneklerin belirlenmesi, bu örneklerin ağa gösterilerek istenen çıktılara göre ağın eğitilmesi gerekmektedir. Ağın başarısı, seçilen örnekler ile doğru orantılıdır.

Daha önce görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilirler. YSA'lar eğitimleri sırasında kendilerine verilen örneklerden genellemeler çıkarırlar ve bu genellemeler ile yeni örnekler hakkında bilgi üretebilirler.

Algılamaya yönelik olaylarda kullanılabilirler. YSA'ların en başarılı oldukları alanlar, algılamaya yönelik uygulamalardır. Bu alanlarda başarıları kanıtlanmıştır.

Örüntü (pattern) ilişkilendirme ve sınıflandırma yapabilirler. YSA'lar kendilerine örnekler halinde verilen örüntüleri kendisi veya diğerleri ile ilişkilendirebilir. Ayrıca kendisine verilen örneklerin kümelenmesi ile, bir sonraki verinin hangi kümeye dahil olacağının karar verilmesi konusunda kullanılabilirler.

Örüntü tamamlama yapabilirler. Ağa eksik bilgileri içeren örüntüler verildiğinde eksik bilgilerin tamamlanması konusunda başarılıdır.

Kendi kendine öğrenebilme ve organize etme yetenekleri vardır. YSA'lar online (sistemle bağlantılı) olarak öğrenebilirler ve kendi kendilerini eğitebilirler.

Eksik bilgi ile çalışabilmektedirler. Geleneksel sistemlerin aksine YSA'lar eğitildikten sonra veriler eksik bilgi içerse dahi, çıktı üretebilirler. Bu durum bir performans kaybı oluşturmaz,

performans kaybı eksik bilginin önemine bağlıdır. Burada bilgilerin önem dereceleri eğitim sırasında öğrenilir.

Hata toleransına sahiptirler. YSA'ların eksik bilgilerle ve bazı hücreleri bozulsa dahi çalışabilmeleri, onları hatalara karşı toleranslı yapar.

Dereceli bozulma (Graceful degradation) gösterirler. Bir ağ, zaman içerisinde yavaş ve göreceli bir bozulmaya uğrar. Ağlar problemin ortaya çıktığı anda hemen bozulmazlar.

Dağıtılmış belleğe sahiptirler. YSA'larda bilgi, ağa dağılmış bir şekilde tutulur. Hücrelerin bağlantı ve ağırlık dereceleri, ağın bilgisini gösterir. Bu nedenle tek bir bağlantının kendi başına anlamı yoktur.

Burada çok temel bazı avantajlardan bahsedilmekle beraber, YSA'ların daha pek çok avantajı vardır.

4.3.2 Yapay Sinir Ağlarının Dezavantajları

YSA'ların, pek çok avantajın yanında bazı dezavantajları da vardır. Belli başlı dezavantajları;

Donanım bağımlıdır. YSA'ların en önemli sorunu donanım bağımlı olmalarıdır. YSA'ların en önemli özellikleri ve var oluş nedenlerinden birisi olan paralel işlem yapabilme yeteneği, paralel çalışan işlemciler ile performans gösterir.

Uygun ağ yapısının belirlenmesinde belli bir kural yoktur. YSA'larda probleme uygun ağ yapısının belirlenmesi için geliştirilmiş bir kural yoktur. Uygun ağ yapısı, deneyim ve deneme yanılma yolu ile belirlenmektedir.

Ağın parametre değerlerinin belirlenmesinde belli bir kural yoktur. YSA'larda öğrenme katsayısı, hücre sayısı, katman sayısı gibi parametrelerin belirlenmesinde belirli bir kural yoktur. Bu değerlerin belirlenmesi için belirli bir standart olmamakla birlikte her problem için farklı bir yaklaşım söz konusu olabilmektedir.

Ağın eğitiminin ne zaman bitirilmesi gerektiğine ilişkin belli bir yöntem yoktur. Ağın örnekler üzerindeki hatasının belirli bir değerin altına indirilmesi eğitimin tamamlandığı anlamına gelmektedir. Burada optimum neticeler veren bir mekanizma henüz yoktur ve YSA ile ilgili araştırmaların önemli bir kolunu oluşturmaktadır.

Ağın davranışları açıklanamamaktadır. Bu sorun YSA'ların en önemli sorunlardan biridir. YSA bir probleme çözüm ürettiği zaman, bunun neden ve nasıl olduğuna ilişkin bir ipucu vermez.

Yakınsama problemlerinde rastgele sıfırlanırlar. Ayrıca tanımlanan hata fonksiyonunu minimize etmek üzere ağılar güncellenirler. Bu nedenle hedef global minimuma ulaşamayıp lokal minimumda kalabilir.

Detaylı bir şekilde açıklanan YSA'ların avantaj ve dezavantajları dikkate alınacak olursa YSA'ların birçok açıdan PI, vb. geleneksel kontrol algoritmalarından üstün olduğu görülmektedir. Çizelge 4.1'de bu özellikler karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Geleneksel algoritmalar ile YSA'lar

Geleneksel Algoritmalar	Yapay Sinir Ağları
Çıkışlar, belirlenen kurallara girişlerin uygulanması ile elde edilir.	Öğrenme esnasında giriş çıkış bilgileri verilerek, kurallar belirlenir.
Hesaplama; merkezi, eş zamanlı ve ardışıktır.	Hesaplama; toplu, eş zamansız ve öğrenmeden sonra paraleldir.
Bellek paketlenmiş ve hazır bilgi depolanmıştır.	Bellek ayrılmış ve ağa yayılmıştır.
Hata toleransı yoktur.	Hata toleransı vardır.
Nisbeten hızlıdır.	Donanım bağımlıdır.
Bilgiler ve algoritmalar kesindir.	Deneyimden yararlanır.

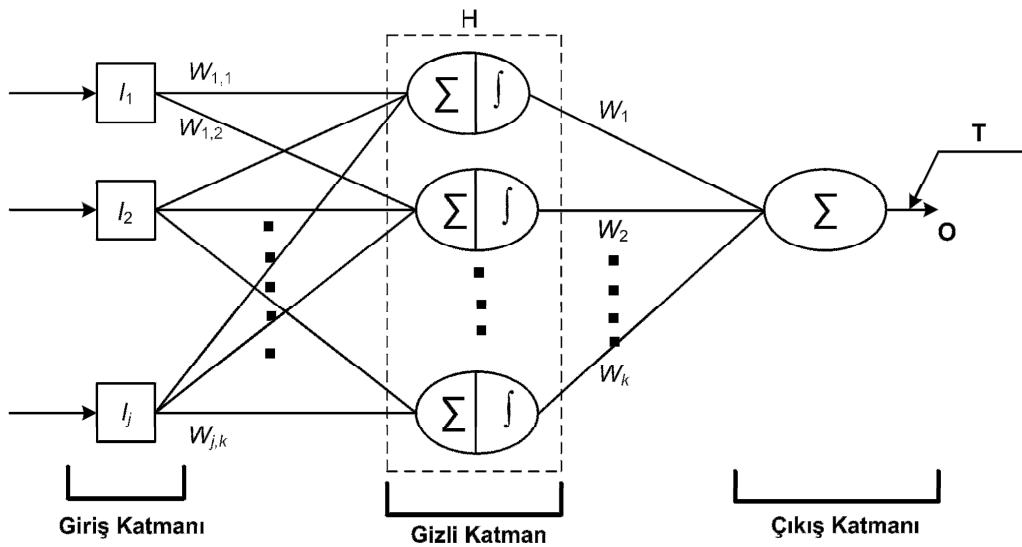
4.4 Yapay Sinir Ağlarının Kullanıldığı Alanlar

Yapay sinir ağları başlıca; sınıflandırma, modelleme ve tahmin uygulamaları olmak üzere, pek çok alanda kullanılmaktadır. Başarılı uygulamalar incelendiğinde, YSA'ların çok boyutlu, gürültülü, karmaşık, kesin olmayan, eksik, kusurlu, hata olasılığı yüksek sensör verilerinin olması gibi özellikleri bulunmaktadır. Bunun yanında problemi çözmek için matematiksel modelin ve algoritmaların bulunmadığı, sadece örneklerin var olduğu durumlarda yaygın olarak kullanıldıkları görülmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş ağlar genellikle şu fonksiyonları gerçekleştirmektedirler; muhtemel fonksiyon kestirimleri, sınıflandırma, ilişkilendirme veya örüntü eşleştirme, zaman serileri analizleri, sinyal filtreleme, veri sıkıştırma, örüntü tanıma, doğrusal olmayan sinyal işleme, doğrusal olmayan sistem modelleme, optimizasyon ve

kontrol (Öztemel, 2003). Görüldüğü gibi YSA'lar birçok alanda kullanılmakta ve gün geçtikçe uygulama alanları genişlemektedir.

4.5 Geri Yayılım Algoritması (Backpropagation)

Geri yayılım algoritması (GYA) karmaşık verilerin sınıflandırılmasında kullanılan etkin YSA modellerinden birisidir. İlk olarak Werbos tarafından düzenlenen daha sonra Parker, Rumelhart ve McClelland tarafından geliştirilen geri yayılım ağıdır (Back Propagation Network). İlk uygulamaları yazılı metinden söz sentezi, robot kollarının kontrolüdür. Sınırları ise denetimli eğitim giriş ve çıkış örneklerinin çok sayıda olmasıdır. “Backpropagation” günümüzde en yaygın kullanılan öğrenimi kolay ve sonuçları etkin bir YSA'dır. Yayınma ve uyum gösterme (Propagate - Adapt) olmak üzere iki aşamada işlemleri gerçekleştiren GYA, katmanlar arasında tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı (Multilayer) , İleri Beslemeli (Feed Forward) ve Denetimli (Supervised) olarak eğitilen bir YSA modelidir. GYA birçok uygulamalarda kullanılmış en yaygın öğrenme algoritmasıdır. Anlaşılması kolay ve tercih edilen öğretim algoritmasıdır. Bu algoritma; hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır. Geri yayımlı öğrenme kuralı ağ çıkışındaki mevcut hata düzeyine göre her bir tabakadaki ağırlıkları yeniden hesaplamak için kullanılmaktadır. Bir geri yayımlı ağ modelinde giriş, gizli (sıfır ya da daha çok) ve çıkış olmak üzere 3 tip katman bulunmakla birlikte, problemin özelliklerine göre gizli katman sayısını arttırmak ya da azaltmak mümkündür (hiç gizli katman yoksa lineer modelleme için kullanılır, gizli katman sayısı arttıkça beraberinde nonlineerlik de artmaktadır).



Şekil 4.2 Yapılan çalışmada kullanılan geri yayımlı yapay sinir ağının genel yapısı (k adet gizli nöronlu, j adet girişli, tek çıkışlı)

Bu bölümde uygulanan YSA modelinin genel matematiksel temeli verilmektedir. Sistemde uygulanan girişe göre H gizli katmanındaki h . nöronun aktivasyonu hiperbolik tanjant (sigmoid) fonksiyonuna göre belirlenmektedir:

$$H_h = \tanh(\sum_i w_{i,h} \cdot I_i) \quad (4.1)$$

burada I_i , giriş değişkeninin o andaki değerini belirtmektedir. Ayrıca $w_{i,h}$ ise i . giriş değişkeninin h nöronu ile olan bağlantısının ağırlığını temsil etmektedir:

$$O = \sum_h w_h \cdot H_h. \quad (4.2)$$

Bu bağıntıda w_h , h ile çıkış birimi arasındaki bağıntının ağırlık değeridir. Kullanılan sistemde hata sinyali δ :

$$\delta = T - O. \quad (4.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Geri yayılım algoritması, δ 'ın karesini minimize etmek için O (çıkış) değerini istenen T (hedeflenen değer) değerine yaklaştırmak amacıyla bağlantı ağırlıklarını (w) güncellemektedir (Rumelhart vd., 1986).

Gizli katman için δ değerinin geri yayılımı:

$$\delta_h = \delta \cdot w_h \cdot (1 - H_h^2). \quad (4.4)$$

olarak bulunmaktadır. Ağ bağlantılarının ağırlıkları :

$$\Delta w_{i,h} = \mu_i \cdot I_i \cdot \delta_h \quad \text{and} \quad \Delta w_h = \mu_h \cdot H_h \cdot \delta. \quad (4.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Sistemde bağlantı ağırlıklarını güncelleme işlemi ise :

$$w'_h \leftarrow w_h + \Delta w_h. \quad (4.6)$$

olarak gerçekleşmektedir. Burada μ_i ve μ_h parametreleri giriş ve gizli katman bağlantılarının öğrenme katsayılarıdır (Kursun, 2004). Bu katsayıları düşük tutmak öğrenmeyi yavaşlatır, çok yükseltmek ise yakınsamayı zorlaştırır.

4.6 Hibrit Sistemde Kullanılan YSA Tabanlı Kontrolör

Daha önceden de bahsedildiği gibi, YSA'nın kullanılması ile birlikte taşıtın talep gücü sistem bileşenlerinin doğal karakteristiklerine uygun bir şekilde paylaştırılmaktadır. Bu sayede

sistemin verimliliği ve performansının yanı sıra ömrü de önemli oranda arttırılabilmektedir. Yapmış olduğumuz çalışmada kullandığımız GYA 3 üniteli giriş katmanı, 30 üniteli gizli katman ve 1 üniteli çıkış katmanından oluşmaktadır. Bu yapının en önemli özelliklerinden birisi uygulanan her bir giriş için hedeflenen çıkış değerini optimum seviyeye getirmek amacıyla hata oranını hızlı bir şekilde minimize etmesidir. Ayrıca sistemdeki değişimleri tahmin etme yeteneği ve sağladığı hızlı ve doğru sonuçlar nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır, bu nedenle özellikle kontrol sistemlerinde istenilen minimum hata ile çalışmaya oldukça uygundur.

Çizelge 4.2 Çalışmada kullanılmış olan parametreler

δ	Tahmin edilen hata miktarı
β	Beta katsayısı (YH çıkış gücünün değişiminin kontrol edilmesinde kullanılan katsayı)
$\hat{F}$	Çıkış katmanında tahmin edilen YH çıkış gücü
F^-	Bir önceki anda elde edilen YH gücü
α	Alfa katsayısı (UK şarj seviyesini kontrol edilmesinde kullanılan katsayı)
D	Taşıt sisteminin toplam güç talebi
S	UK'nın şarj seviyesi
$\hat{U}$	UK çıkışından tahmin edilen güç değeri
ΔF	Çıkış katmanında hedeflenen YH çıkışı
$\Delta \hat{F}$	YH çıkışında tahmin edilen ΔF değeri
E	Sistemdeki hata miktarı

Hibrit taşıt sisteminde kullanılan YSA'ya ait parametreler Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Çizelge 4.2'deki parametreler kullanılarak, tez çalışması için oluşturulan genel YSA denklemi:

$$E = \beta \times \Delta \hat{F}^2 + \delta^2 + \alpha \times \hat{U} \times (0.7 - S) \quad (4.7)$$

şeklinde oluşturulmuştur. Denkleminde kullanılan 0.7 değeri, UK'nın hedeflenen şarj seviyesini ifade etmektedir. Bununla birlikte dikkat çekici en önemli unsur, oluşturulan denklemin YH'nin çıkış gücü değişiminin anlık yüklenmelere maruz kalmasını önleyecek biçimde tasarlanmasıdır.

(4.7) denkleminde kullanılan terimlerden;

$$\Delta \hat{F} = (\hat{F} - F^-) \quad , \quad \Delta F = F - F^- \quad (4.8)$$

terimi YH çıkışında tahmin edilen ΔF değeridir. Çıkış katmanında tahmin edilen YH çıkış gücü ile bir önceki anda elde edilen YH gücü arasındaki farkla elde edilmektedir.

4.8 denklemindeki çıkış katmanında tahmin edilen YH çıkış gücü değeri ($\hat{F}$) ise:

$$\hat{F} = F^- + \Delta\hat{F} \quad (4.10)$$

olarak elde edilmektedir. Ayrıca Denklem (4.7) genel YSA ifadesinde kullanılan UK için tahmin edilen güç değeri:

$$\hat{U} = D - \hat{F} = D - (F^- + \Delta\hat{F}) \quad (4.9)$$

şeklinde elde edilmektedir.

F'deki değişimin tahminindeki hata miktarı :

$$\delta = \Delta F - \Delta\hat{F} \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilmektedir. Çalışmada tasarlanan YSA hata ölçütü parametresi olan E , sistemdeki ağ bağlantıları güncelleştirilerek minimize edilmektedir. Diğer bir deyişle hata miktarının, sistemde bilinmeyenler olan ağırlıklara göre türevi alınarak minimize edilmesi sağlanmış ve optimum ağırlık değerleri elde edilmiş olmaktadır. Güncelleme işlemi:

$$W_{i,h} \leftarrow W_{i,h} + \Delta W_{i,h} \times \frac{\partial \Delta F}{\partial W_{i,h}} \quad (4.12)$$

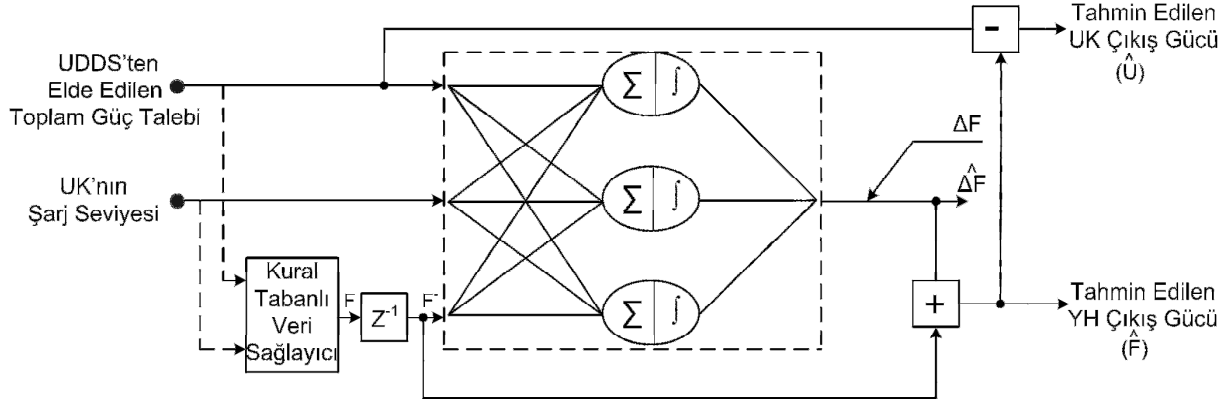
denkleminde görüldüğü gibi sistemdeki hata miktarının (E) türevi alınarak elde edilmiş olmaktadır. Sistemdeki hata miktarı tekrar yazılacak olursa:

$$E = \beta \times \Delta\hat{F}^2 + (\Delta F - \Delta\hat{F})^2 + \alpha \times (D - (F^- + \Delta\hat{F})) \times (0.7 - S) \quad (4.13)$$

şeklinde genişletilmiş haliyle elde edilmiştir. Hata miktarının ağırlıklara göre türevi alınacak olursa:

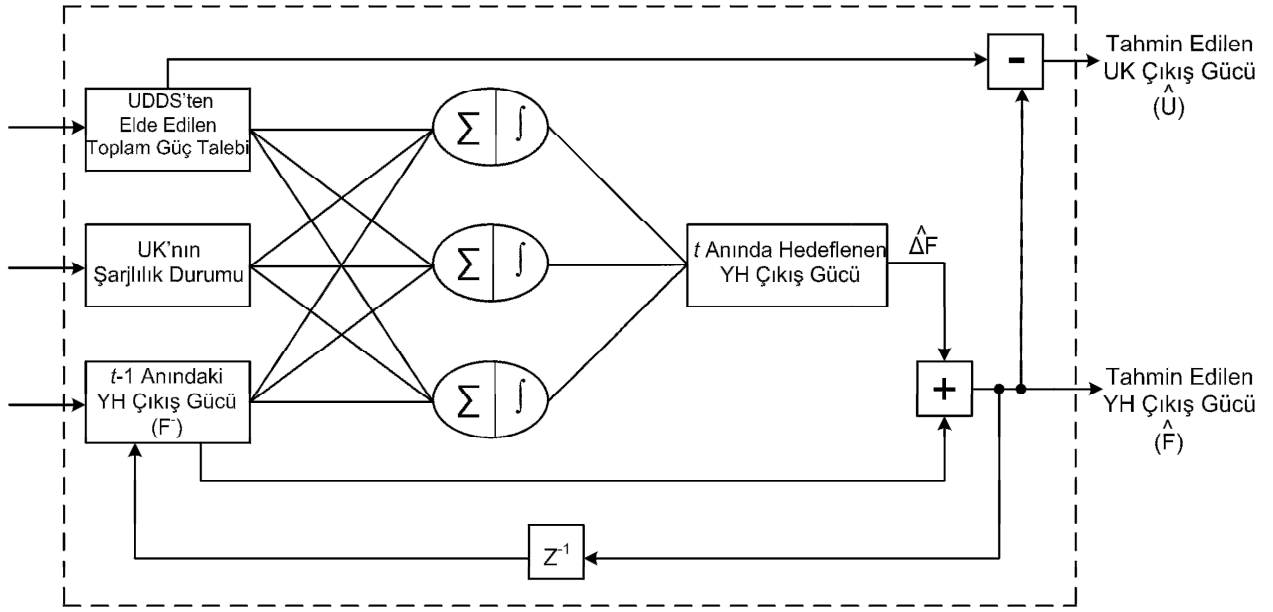
$$E' = 2 \times \beta \times \Delta\hat{F} - 2 \times (\Delta F - \Delta\hat{F}) - \alpha \times (0.7 - S) \quad (4.14)$$

ifadesi sayesinde tasarlanan YSA çıkışında hedeflenen değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.3 Yapılan çalışmada kullanılan YSA kontrolör eğitme çalışması şematiği

Yapılan çalışmada kullanılan YSA yapısı üç girişli olarak tasarlanmıştır. Bunlar UDDS sürüş çevriminden elde edilen toplam güç talebi (D), YH'nin bir önceki andaki güç sinyali (F) ve UK sisteminin şarj seviyesidir (S). Sistemin girişine uygulanan bu üç parametre ile UDDS toplam çalışma zamanı olan 1369 sn'lik sürenin ilk yarısı eğitime verisi, diğer yarısı da test verisi olarak kullanılmıştır. Şekil 4.3 ve 4.4'te sırasıyla sistemde uygulanan eğitme ve test çalışmalarının genel şematikleri görülmektedir. Bu kontrol algoritmasındaki amaç, istenilen yük talebini karşılarken hem YH sistemini en verimli olduğu bölgede çalıştırmak ve anlık yüklenmelere maruz kalmasını önlemek, hem de UK sisteminin şarj seviyesini uygun bir aralıkta tutabilmektir. Bu nedenle önerilen hibrit sistemde YSA kontrolör yardımıyla UK'nın şarj seviyesinin 0.7 civarlarında tutulması hedeflenmektedir. Bu değer, UK sisteminin talep edilen gücü sağlayabilmesi ve mevcut olan frenleme enerjisinin tamamını geri kazanabilmesi açısından oldukça uygundur. Eğer şarj seviyesi hedeflenen değerın altında ise, YH sistemi UK'nın şarj seviyesini arttırmak amacıyla bir önceki andaki güç değerinden daha fazla bir gücü sisteme iletir. Benzer şekilde, eğer şarj seviyesi hedeflenen seviyenin üzerinde ise YH'nin sisteme aktardığı güç, bir önceki andaki güç değerinin altında olmaktadır. Eğer şarj seviyesi hedeflenen değerde ise, YH hücresi sistemi bir önceki andaki güç miktarını yüke aktarmaktadır. Sistemde hedeflenen diğer parametre olan YH sistemi için en verimli çalışma bölgesi, hücre başına yaklaşık 0.55–0.8 V'luk gerilim aralığına karşılık gelen lineer çalışma bölgesidir (Barbir, 2005). Gerçekleştirilen kontrol stratejisi sayesinde YH sistemi en verimli bölgesi olan lineer bölgede çalıştırıldığında, genel sistem verimi de dikkat çekici bir oranda artırılabilir. Böylece UK sisteminin şarj seviyesi istenen aralıkta kontrol edilirken, YH sistemi uygun bir transfer hızında sisteme güç aktarmaktadır.



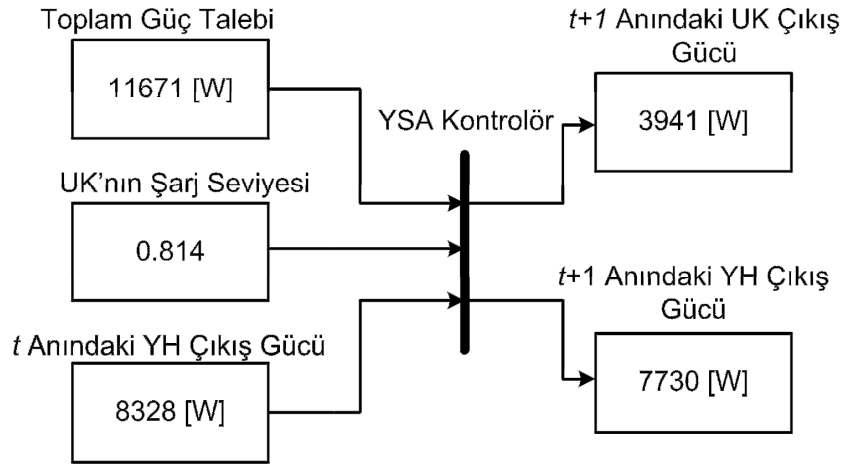
Şekil 4.4 Yapılan çalışmada kullanılan YSA kontrolör test çalışması şematığı

4.7 Doğrulama Analizi

Çalışmada uygulanan kontrol sisteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek özellikle elektrikli taşıt sistemleri gibi güç akışı lineer olmayan sistemlerde çok önemlidir. Bu nedenle çalışmada doğrulama analizi yapılarak hedeflenen çıkış değerleri test edilmiş ve çalışmanın başarısının hangi boyutlarda olduğu görülmüştür. Analizde 4 farklı senaryo düşünülmüştür.

Senaryo 1-

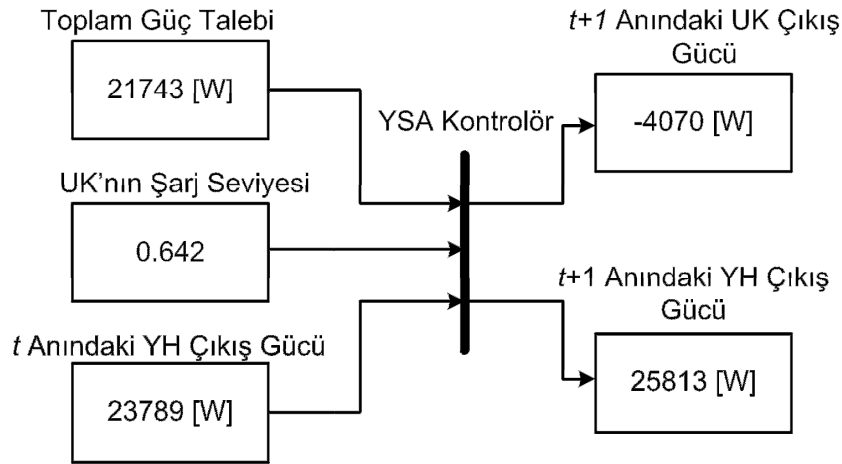
Hibrit taşıt sistemine ait örnek bir çalışma durumu Şekil 4.5'te görüldüğü gibi t anında UK'nın şarj seviyesini hedeflenen 0.7 değerinin biraz üzerine çıktığından bir sonraki anda UK, karakteristiğine uygun olarak artış göstermiştir. Bu değişim çalışmada uygulanan YSA kontrolör yardımıyla çok keskin olmadığından YH yığınının olumsuz etkilenmesi de önlenmektedir.



Şekil 4.5 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu-1

Senaryo 2-

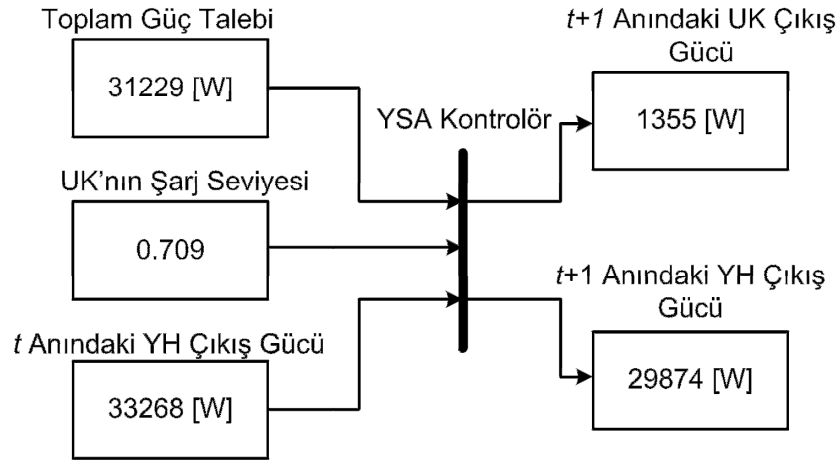
Diğer bir analizde UK'nın şarj seviyesinin biraz daha düşerek 0.7 nin altına olduğu görülmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi YH bu şartlar altında çalışan taşıt sisteminde devreye daha fazla güç akışı sağlayarak hem yüke gerekli olan gücü hemde UK'nın şarj seviyesini arttırmak için UK sistemine güç akışını sağlamış olmaktadır.



Şekil 4.6 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu-2

Senaryo 3-

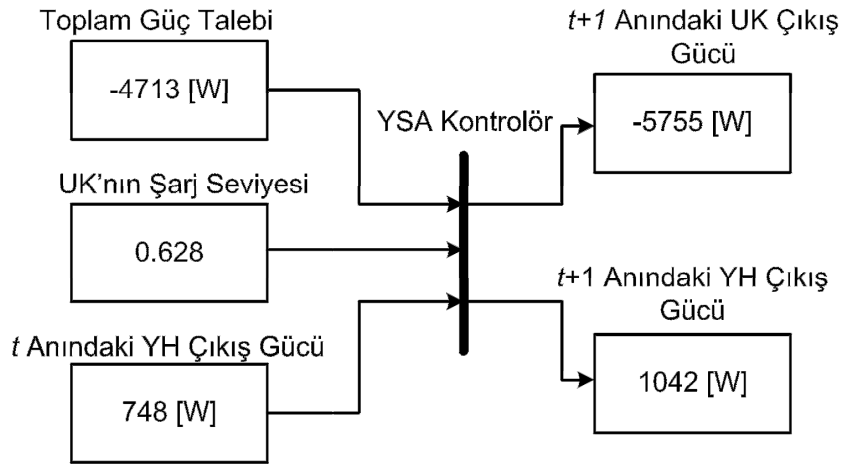
Farklı çalışma koşullarına sahip diğer bir örnek Şekil 4.7'de görülmektedir. Sistemin kararlı yani taşıtın aşırı hızlanma ve frenlemeye ihtiyaç duymadığı bir çalışma anında yük için gerekli olan güç akışının ağırlıklı olarak YH'den karşılanması hedeflenmektedir. Görüldüğü gibi bu karakteristiğe uygun bir çalışma gerçekleştirilerek uygulanan YSA kontrol algoritmasının doğruluğu birkez daha görülmektedir.



Şekil 4.7 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu-3

Senaryo 4-

Son olarak taşıtın frenleme anında görülen güç akışına ait bir örnek Şekil 4.8’de verilmektedir. Bu durumda taşıt sistemi yavaşlama pozisyonundadır. Bu yavaşlama esnasında oluşan frenleme enerjisi UK sistemi tarafından geri kazanılmaktadır. Bunun yanında hedeflenen şarj seviyesine ulaşmak için YH yığının UK sistemini bir miktar şarj ettiği de görülmektedir.



Şekil 4.8 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu-4

Hibrit taşıt sisteminde kullanılan kontrol algoritmasının doğruluğunu test etmek amacıyla uygulanan çalışma sonucunda 4 farklı örnek güç akışı durumu gösterilmiştir. Gösterilen durumlarda sistemde uygulanan YSA kontrolör yapısının hibrit taşıt sisteminin hedeflenen yük paylaşımını ve kontrol algoritmasını başarıyla gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu da taşıt sisteminin performansını ve yakıt ekonomisini önemli oranda arttırmaktadır.

5. BENZETİM SONUÇLARI VE YORUMLAR

Bu bölümde ele alınacak olan benzetim sonuçları, daha önceki bölümlerde açıklanan sistemin matematiksel ve elektriksel modellerinin MATLAB, Simulink ve SimPowerSystems yazılımlarında oluşturulması ile elde edilmiştir.

Hibrit bir taşıtta kullanılan PEMYH, temel yükü karşılayabilecek yeterlilikte olmalıdır. Bu çalışmada, UDDS sürüş çevrimi için 30 kW'luk YH sisteminden yararlanılmaktadır. Seçilen YH gücü değeri, daha önce Erdinc vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada UDDS sürüş çevrimi için kullanılan PEMYH parametreleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 PEMYH parametreleri

Aktivasyon gerilimi sabiti (B)	0.04777 [A^{-1}]
Aktivasyon gerilimi sabiti (C)	0.0136 [V]
Faraday sabiti (F)	96484600 [C/ kmol]
Hidrojen zaman sabiti (τ_{H_2})	3.37 [s]
Hidrojen valf sabiti (K_{H_2})	4.22×10^{-5} [kmol / (sn atm)]
Hidrojen-oksijen akış oranı (r_{H-O})	1.168
K_r sabiti = $N_0/4F$	8.3951×10^{-7} [kmol/ (sn A)]
Yüksüz haldeki bir hücrenin gerilim (E_o)	0.8 [V]
Hücre sayısı (N_o)	176
Yığın sayısı (N_s)	3
Oksijen zaman sabiti (τ_{O_2})	6.74 [s]
Oksijen valf sabiti (K_{O_2})	2.1×10^{-5} [kmol / (sn atm)]
YH iç direnci (R_{int})	$N_0 \times 0.00303 / N_s$ [Ω]
YH mutlak sıcaklığı (T)	343 [K]
Evrensel gaz sabiti (R)	8314.47 [J/(kmol K)]
Kullanma faktörü (U)	0.8
Su zaman sabiti (τ_{H_2O})	18.418 [s]
Su valf sabiti (K_{H_2O})	7.716×10^{-6} [kmol / (s atm)]

Farklı uygulamalar için düşük veya yüksek kapasite değerlerine sahip farklı UK sistemi tasarımları gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Çizelge 5.2'de özellikleri gösterilen Maxwell

Boostcap® BMOD0430 UK ünitesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada Maxwell Boostcap® BMOD0430 UK ünitesinin seçilmesinin nedeni, bu UK ünitesi için elimizde deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiş bir UK benzetim modelinin mevcut olmasından dolayıdır. Her UK ünitesi 16 V nominal gerilime ve 430 F kapasiteye sahiptir. UDDS sürüş çevrimi için oluşturulan UK sistemi, 4 seri 3 paralel UK ünitesinden meydana gelmektedir. UDDS sürüş çevrimi için oluşturulan UK sistemi 30 kW'lık bir yük talebini 15 saniye boyunca karşılayabilecek potansiyele sahip olması gereklidir. 30 kW'lık ani bir güç talebini 15 saniye boyunca karşılayabilecek bir UK ünitesi $(30000/0.75) \times (15/3600) = 166.68$ Wh'lık bir enerjiyi sağlayabilmelidir. Oluşturduğumuz UK ünitesi ise $430 \times (3/4) = 322.5$ F'lık bir kapasite değerine ve $16 \times 4 = 64$ V'luk bir gerilime, dolayısıyla da 183.46 Wh'luk bir enerji kapasitesine sahiptir. Görüldüğü üzere oluşturulan UK sistemi, UDDS sürüş çevrimi için anlık güç taleplerini karşılayabilecek yeterlidir.

Çizelge 5.2 Maxwell Boostcap® BMOD0430 UK ünitesinin özellikleri (Maxwell, 2008).

Kapasite	430 F
Gerilim	16.2 V
DC Direnç	2.5 mΩ
AC Direnç (@ 1kHz)	2.0 mΩ
Ağırlık	5.5 kg
Hacim	4.7 L

Hibrit sistem için geliştirilen kontrol algoritmasının başarısını test etmek amacıyla farklı kontrol teknikleri denenerek sistemin cevabı karşılaştırılmıştır. Farklı kontrol teknikleri uygulanan sistemde UDDS sürüş çevrimi altında; YH sistemi çıkış gücü, UK sistemi gücü ve UK sisteminin şarj seviyesi değişimleri karşılaştırılmıştır.

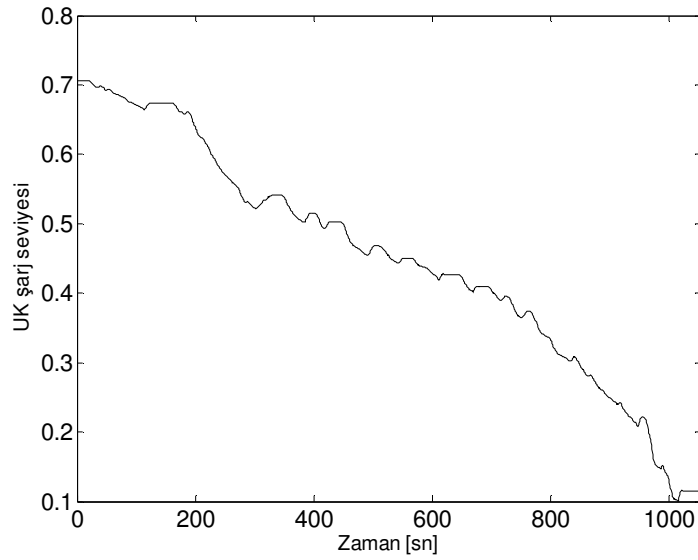
5.1 Hibrit sistem için geliştirilen farklı kontrol teknikleri

Hibrit taşıt sistemi için geliştirilen YSA tabanlı kontrol algoritmasının başarısını test amacıyla 5 farklı kontrol tekniği uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1.1 Kontrolsüz (frenleme enerjisinin kazanılabildiği) çalışma

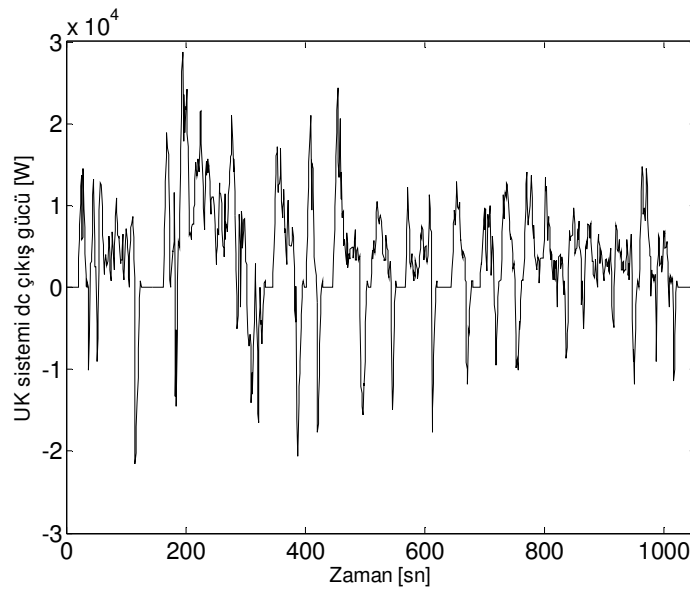
Sistem için geliştirilen kontrolsüz çalışma için belirlenen referans aralıklarında çalışması sağlanmış ve sistem için gerekli olan toplam güç talebi 2 kısma ayrıştırılarak yük paylaşımı yapılmıştır. Geliştirilen bu teknikle frenleme enerjisinin geri kazanımı da dikkate alınmıştır. Şekil 5.1'de UK sisteminin şarj seviyesi gösterilmektedir. Açıkça görüldüğü gibi tasarlanan

kontrol çalışması UK sisteminin şarj seviyesini hedeflenen aralıklarda tutamamıştır. Böylece ihtiyaç duyulan yük talebi karşılanamamış ve hedeflenen enerji tasarrufu sağlanamamıştır.

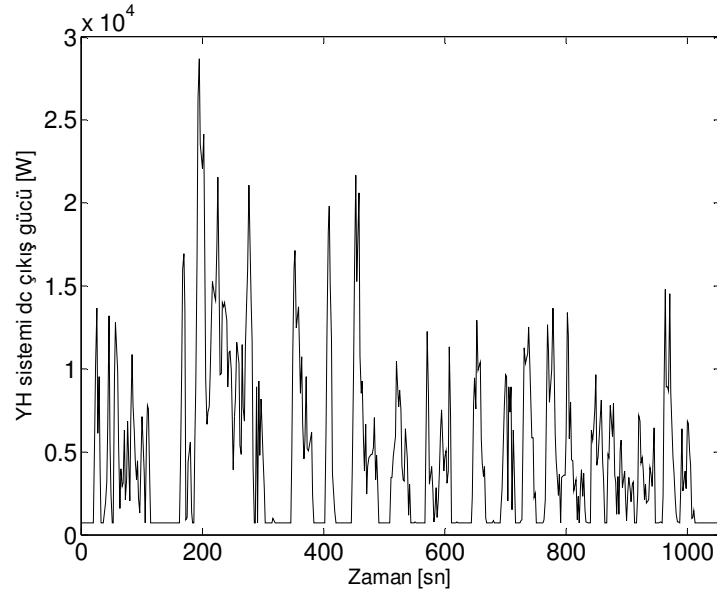


Şekil 5.1 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi-1.

UK sisteminin şarj seviyesinin uygun aralıklarda değişimi sağlanamadığından Şekil 5.2' de görüldüğü gibi UK çıkış gücü değişimi de hedeflenen güç değerlerine ulaşamamıştır. Bu nedenle hedeflenen frenleme enerjisi kazanımı ve yakıt tasarrufu sağlanamamış ve şekil 5.3'teki YH çıkış gücü değişiminde de görüldüğü gibi ihtiyaç duyulan güç akışı sağlanamamıştır.



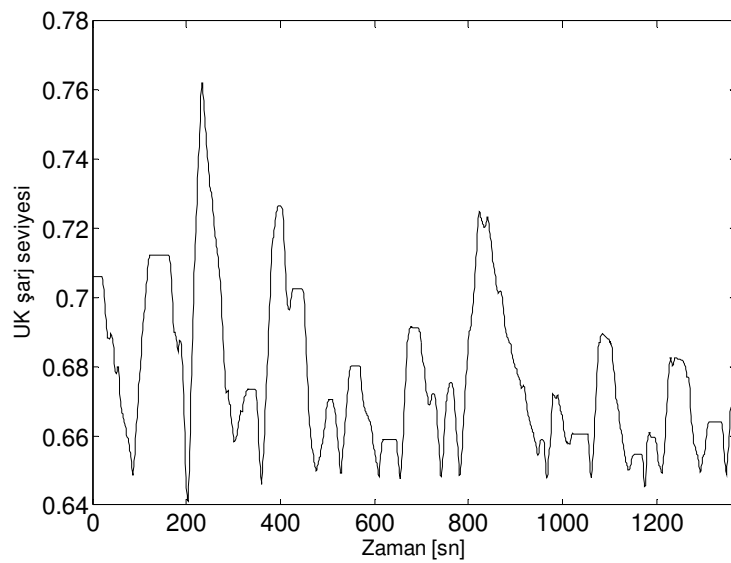
Şekil 5.2 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi-1.



Şekil 5.3 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi-1.

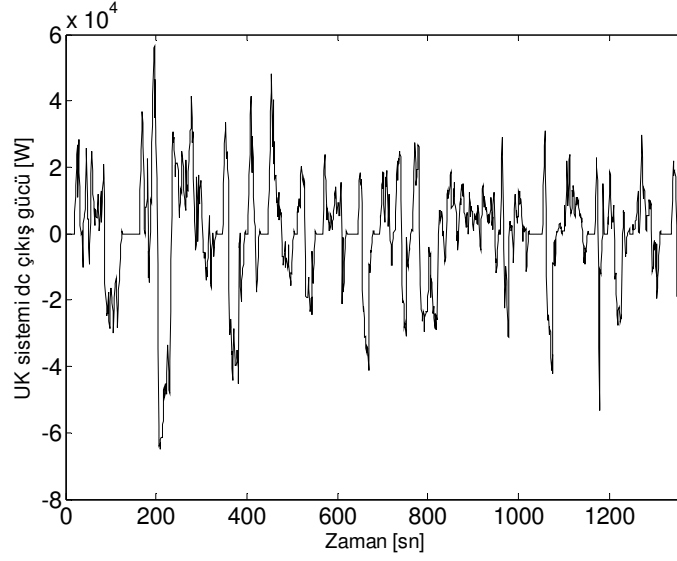
5.1.2 Basit bir kontrol stratejisiyle yapılan çalışma

Uygulanan basit bir kontrol tekniği ile sistemin cevabı gözlemlenmektedir. Uygulanan kontrol tekniğinde sadece UK sisteminin şarj seviyesi dikkate alınmıştır. Bu değerin 0.65-0.75 arasında değişmesi hedeflenerek tasarlanan algoritma ile gerçekleştirilen benzetim sonuçları gözlemlenerek YSA tabanlı kontrol algoritması ile karşılaştırılmaktadır. İlk olarak UK sisteminin şarj seviyesi Şekil 5.4’te verilmektedir. Görüldüğü gibi tasarlanan kontrol tekniğiyle şarj seviyesi hedeflenen aralıkta tutulabilmektedir.

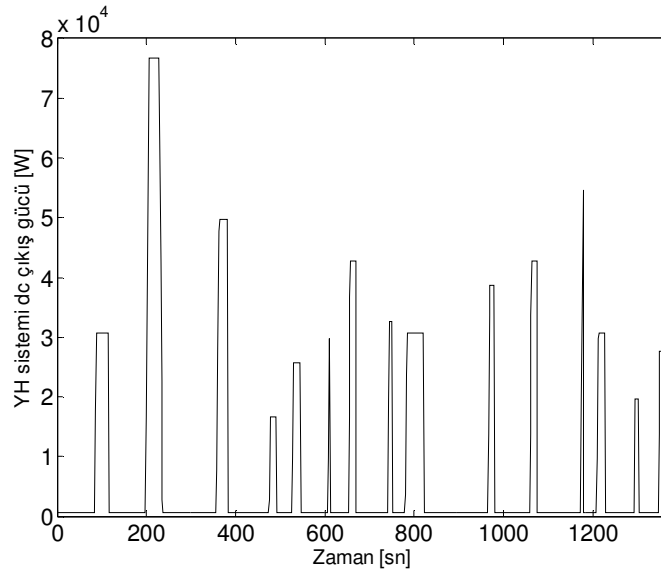


Şekil 5.4 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi-2.

Uygulanan kontrol tekniği ile UK sisteminin şarj seviyesini hedeflenen aralıkta tutmasına rağmen Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görülen UK ve YH sistemlerinin DC çıkış gücü değişimlerinde hedeflenen güç değişim aralıklarına ulaşamamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre frenleme enerjisinin geri kazanımı hedeflenen şekilde sağlanamamış dolayısı ile yakıt tasarrufu istenildiği gibi gerçekleşmemiştir. Bu nedenle uygulanan kontrol tekniğinin geliştirilerek bütün sistem parametrelerine uygun bir şekilde yük paylaşımı ve güç akışı sağlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.



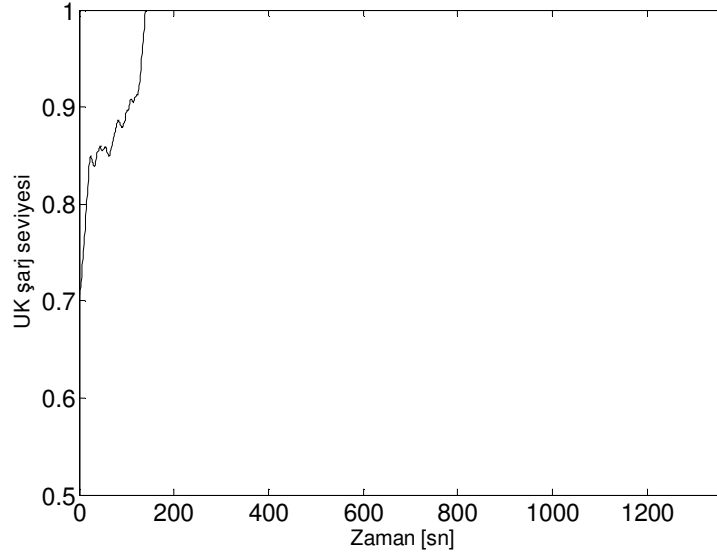
Şekil 5.5 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi–2.



Şekil 5.6 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi–2.

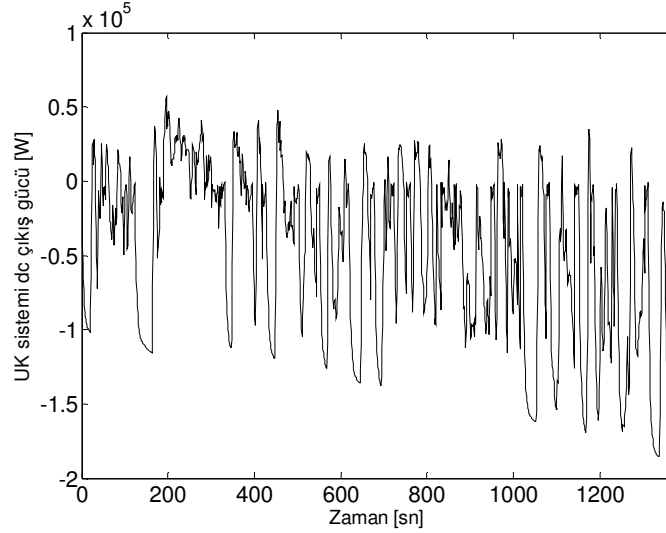
5.1.3 Lineer kontrol (0 üniteli gizli katman) tekniği ile yapılan çalışma

Uygulanan geri yayımlı (backpropagation) YSA kontrolörün başarısını test etmek için geliştirilen lineer kontrol tekniği ile karşılaştırma yapmak amacıyla benzetim sonuçları elde edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi hibrit taşıt sistemleri sürekli değişen güç akışına sahip olmaları nedeniyle lineer kontrol ile çalışmaya uygun sistemler değildirler. Bu nedenle uygulanan lineer kontrol ile elde edilen sonuçlar bir sonraki çalışma olan Kernel metotlu 2. Dereceden Polinom lineer kontrol stratejisiyle yapılan çalışmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Elde edilen benzetim sonuçlarından ilki Şekil 5.7’de görüldüğü gibi UK şarj seviyesidir. Değişim aralığından da net bir şekilde ortaya çıktığı gibi lineer kontrol yöntemi hibrit sistem için uygun bir yöntem olmamakta ve hedeflenen çıkış değerlerine ulaşamamaktadır.

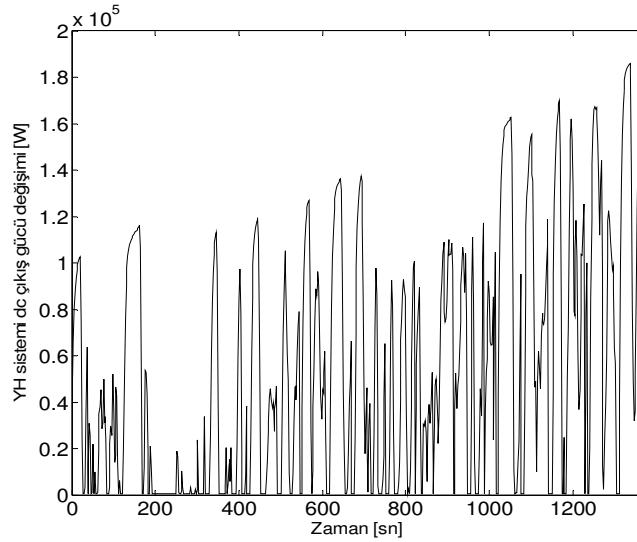


Şekil 5.7 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi–3.

Elde edilen diğer benzetim sonuçları sırasıyla Şekil 5.8 ve 5.9’da görülen UK ve YH sisteminin DC çıkış gücü değişimleridir. Ortaya çıkan sonuçlara göre her iki sistem, sürüş çevrimi ile elde edilen toplam güç talebi değişimine ve karakteristiklerine uygun olmayan bir değişim göstermektedir.



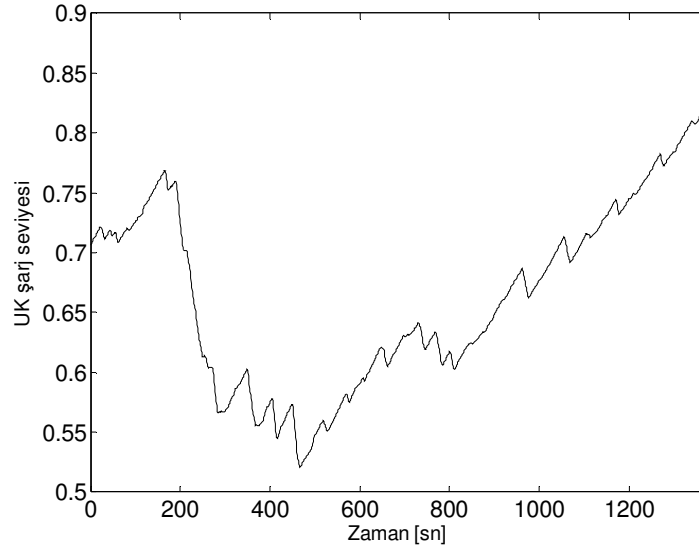
Şekil 5.8 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi–3.



Şekil 5.9 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi–3.

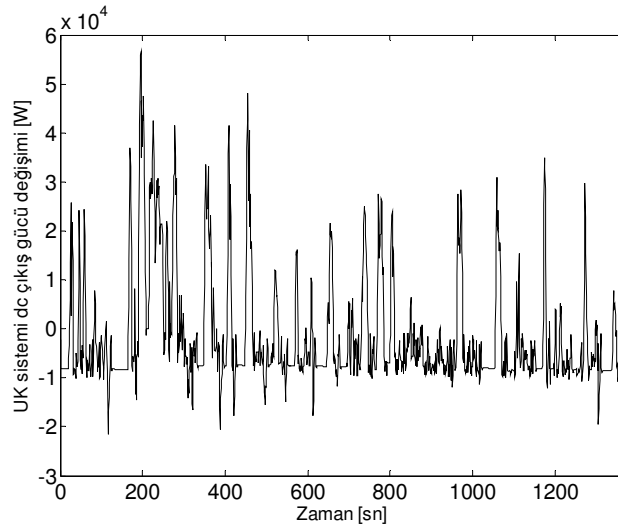
5.1.4 Kernel metotlu 2. Dereceden Polinom lineer kontrol stratejisiyle yapılan çalışma

Bir önceki çalışmada uygulanan lineer kontrol yönteminin sistem için uygun olmadığı görülmüştür. Bu nedenle lineer yapının yerine sisteme, nonlineer yapıya daha uygun olan Kernel metotlu 2. Dereceden Polinom kontrol tekniğinin adapte edilmesi sonucuna varılmıştır. Uygulanan kontrol tekniği ile elde edilen benzetim sonuçlarından ilki Şekil 5.10’da görülen UK sisteminin şarj seviyesidir. Uygulanan kontrol tekniğinin nonlineerliğe yaklaştırılması sonucu UK sistemi şarj seviyesinin nispeten daha uygun aralıklarda kontrol edildiği görülmektedir.

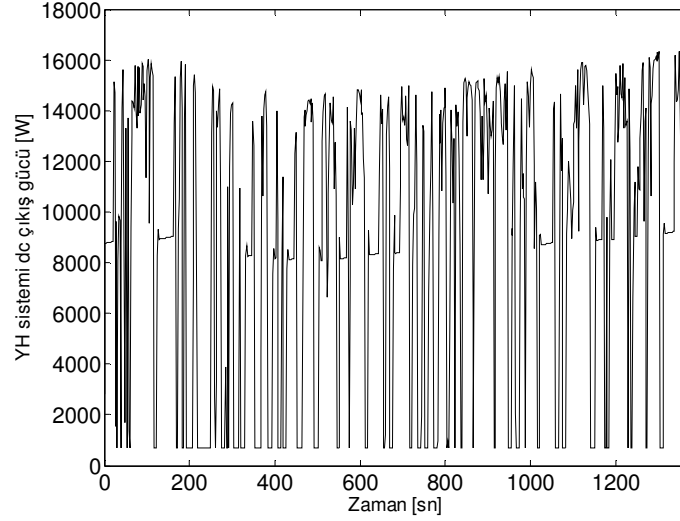


Şekil 5.10 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi-4.

UK ve YH sistemleri çıkış gücü sonuçları da Şekil 5.11 ve 5.12’de görülmektedir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre her iki sistem, karakteristiklerine uygun ve hedeflenen değerlere yakın bir güç akışı değişimi göstermiştir. Böylece diğer kontrol teknikleriyle karşılaştırıldığında frenleme enerjisinin geri kazanımı daha uygun bir şekilde gerçekleştirilmiş ve yakıt tasarrufu önemli oranda sağlanmıştır.



Şekil 5.11 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi-4.



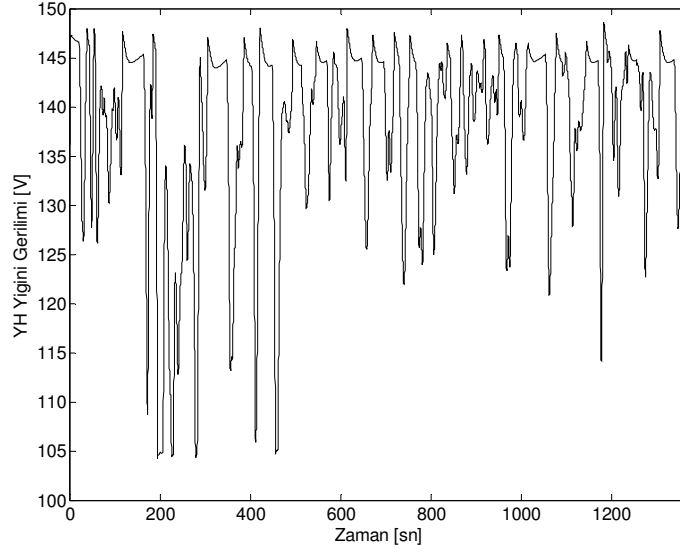
Şekil 5.12 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi-4.

Uygulanan kontrol tekniği, sistem için en önemli kriterlerden biri olan YH güç değişiminin artma ve azalma anındaki ani değişimleri önleyememesi olumsuz sonuçlara neden olmaktadır. YH sisteminin ömründe nispeten azalmaya neden olması hibrit sistem kontrol algoritmasının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

5.1.5 Lineer olmayan kontrol (Geri yayımlı, 100 uniteli 1 gizli katmanlı YSA) ile yapılan çalışma

Sistem için 4 farklı kontrol tekniği geliştirilmiş, bu kontrol teknikleri ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve karşılaştırmalar yapılarak yeni bir kontrol algoritması tasarlanmıştır. Backpropagation (geri yayımlı) YSA kontrol algoritması ile hibrit sistem kontrolörü geliştirilerek sistemin performansı artırılmış ve optimum yük paylaşımı ve güç akışı sağlanmıştır.

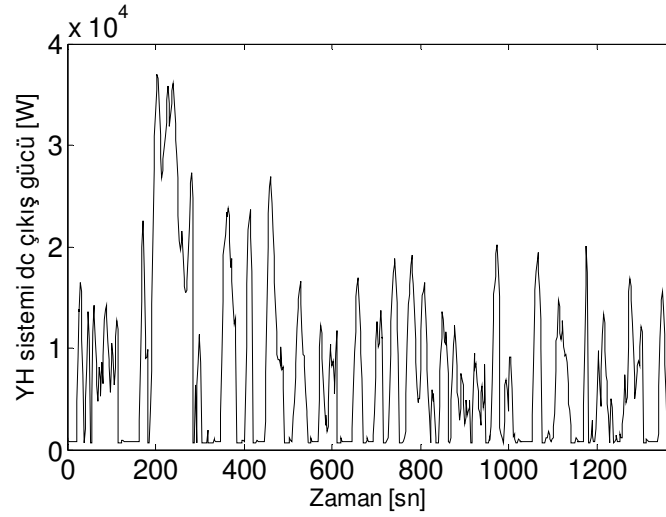
UDDS sürüş çevrimi için elde edilen ve Şekil 5.13-5.18’de verilen benzetim sonuçları zamana bağlı olarak sırasıyla; YH yığını gerilimi, YH sistemi çıkış gücü, UK sistemi gücü, UK sisteminin şarj seviyesi, DC bara gerilimi ve yük değişimleri altında ihtiyaç duyulan hidrojen akış miktarını göstermektedir.



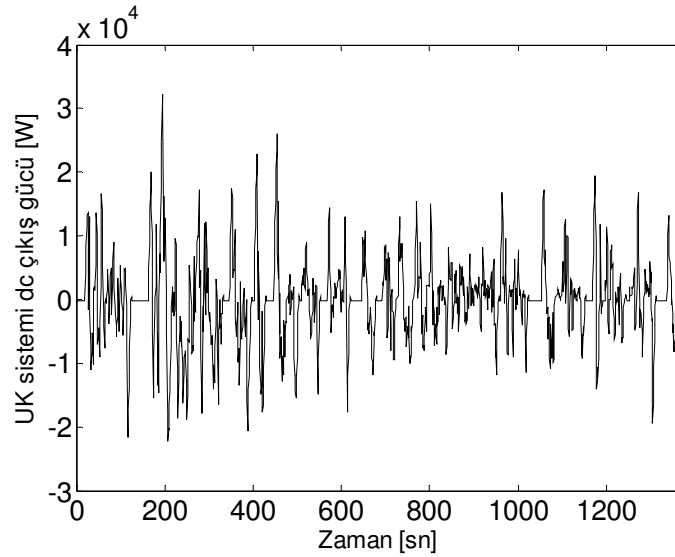
Şekil 5.13 YH yığınının geriliminin zamana göre değişimi.

Şekil 5.13'te YH yığınının geriliminin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, standart şehir içi sürüş çevrimi UDDS koşulları altında YH gerilimi 103.7 V'tan 147.4 V'a kadar olan uygun bir aralıkta değişmektedir, dolayısıyla da 188 hücrenin bulunduğu YH yığını hücre başına 0.56-0.78 V'luk lineer çalışma bölgesine karşılık gelen bir gerilim aralığında en verimli şekilde işletilmektedir. YH tarafından sisteme aktarılan gücün değişimi ise Şekil 5.14'te görülmektedir. Yükün güç talebinin en yüksek olduğu esnada YH sisteminden yüke aktarılan azami güç değeri 37983 W'tır. YH sisteminden transfer edilen güç değeri ve gücün değişim hızı YH sisteminin yapısı için oldukça uygundur. Şekil 5.14'ten görülebileceği gibi YH ve UK'nın hibrit bir şekilde kullanılması ve YSA tabanlı enerji yönetimi stratejisinin sisteme adapte edilmesi ile birlikte, YH sistemi Şekil 3.8'de görülen UDDS güç talebi ile kıyaslandığında daha az bir yükü karşılamakta ve anlık yüklenmelere maruz kalmamaktadır.

UK'nın çıkış gücündeki değişim ise Şekil 5.15'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, UK sistemi yük talebindeki ani değişimleri hızlı bir şekilde karşılayabilmektedir. UK'nın sistem dinamiklerine hızlı cevap verebilme yeteneği, sistemin toplam güç yoğunluğunu arttırmakta, dolayısıyla da hibrit sistemin performansını iyileştirmektedir.

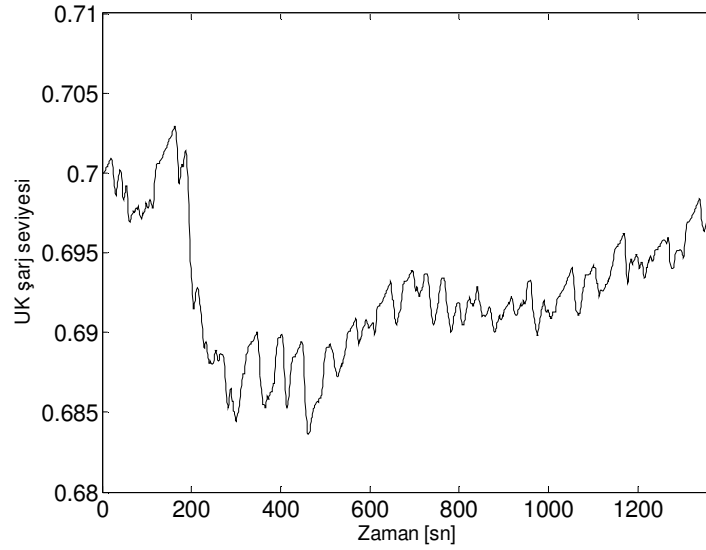


Şekil 5.14 Yük talebine göre YH sisteminin DC çıkış gücünün değişimi-5.



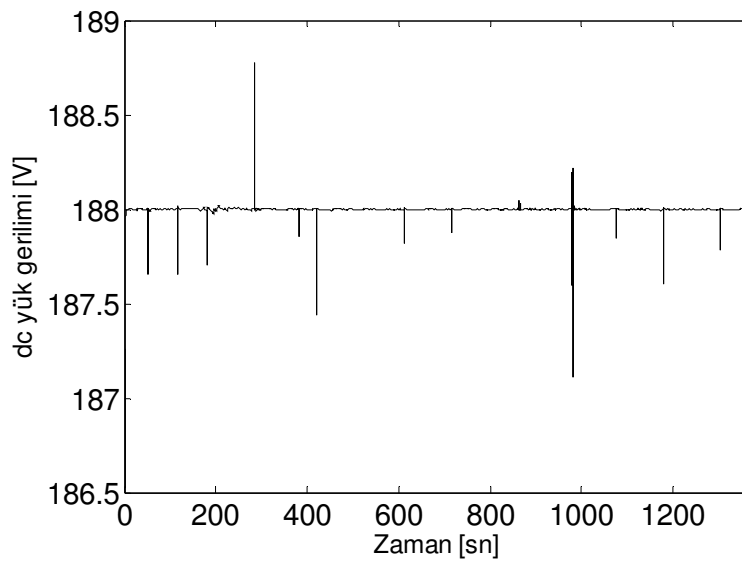
Şekil 5.15 Yük değişimine göre UK sisteminin şarj ve deşarj gücünün değişimi-5.

UDDS çevrimi boyunca UK'lar tarafından kazanılan toplam frenleme enerjisi 3320 kWsn olarak hesaplanmıştır. UDDS sürüş çevrimi için kazanılan toplam frenleme enerjisi değeri, Uzunoglu ve Alam'ın (2008) gerçekleştirdiği çalışmadaki enerji tasarrufu değerine göre önemli oranda fazladır. Bu durum, uygulanan kontrol yönteminin başarısını göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.16'da görüldüğü gibi, sistemde kullanılan YSA yük paylaşım algoritması ile UK'nın şarj seviyesi uygun sınırlar arasında tutabilmektedir. Bu sayede, UK sistemi mevcut frenleme enerjisini verimli bir şekilde kazanabilmekte ve ihtiyaç duyulan yük talebini karşılayabilmektedir. Enerji tasarrufunda elde edilen önemli orandaki artış, UK'nın şarj seviyesinin uygun aralıkta tutulabilmesinin bir sonucudur.

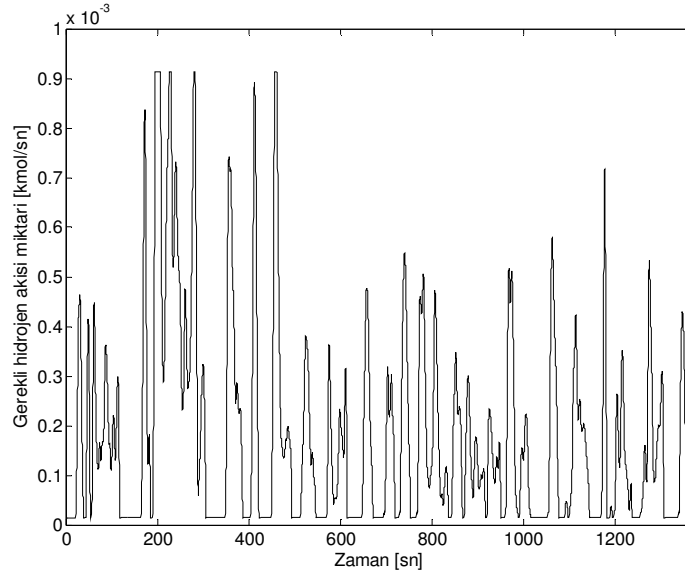


Şekil 5.16 Güç talebine göre UK sistemi şarj seviyesinin değişimi-5.

Güç akışına bağlı olarak DC yük barası gerilimindeki değişim Şekil 5.17’de görülmektedir. Bara geriliminin, UK’nın çıkışındaki dönüştürücü için uygun iletim sinyallerinin üretilmesi ile kabul edilebilir bir aralıkta tutulabildiği açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra, YH için ihtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarı Şekil 5.18’de görüldüğü gibi değişmektedir. Burada en fazla dikkat edilecek noktalardan biri 220. ve 270. saniyeler arasındaki hidrojen tüketimi değerleridir. Bu aralıkta çok fazla güç talebi olmamasına rağmen UK sisteminin şarj seviyesi en düşük seviyelerde olduğundan YH sistemi, UK modülünü şarj etmek amacıyla ihtiyaç duyulan güç seviyesinin üzerinde bir hidrojen tüketimi gerçekleştirmektedir.



Şekil 5.17 DC yük barası gerilimindeki değişim.



Şekil 5.18 Yük talebine göre ihtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarının değişimi.

Elde edilen benzetim sonuçlarından da görülebildiği üzere, UDDS sürüş çevrimi ile test edilen hibrit YH/UK sistem bileşenlerinden en verimli şekilde yararlanılmıştır. Buna bağlı olarak da genel sistem performansı ve enerji tasarrufu azami hale getirilmeye çalışılmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapay sinir ağları tabanlı bir enerji yönetim stratejisinin, taşıt uygulamaları için geliştirilen hibrit bir PEMYH/UK sistemine uygulanmasını içeren bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında 5 farklı kontrol tekniği denenmiş ve karşılaştırmalar yapılarak geliştirilen YSA tabanlı kontrol algoritmasının üstünlükleri ortaya konmuştur. Bu çalışmada, UK modeli olarak klasik eşdeğer RC modelinden daha geçerli bir modelden yararlanılmıştır. Kullanılan UK benzetim modelinin geçerliliği deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Yapılan çalışmada taşıt uygulamaları için tasarlanan hibrit bir PEMYH/UK sisteminde, uygulanan kontrol yöntemi ile YH sistemi temel yük talebini karşılamak amacıyla kullanılırken UK sistemi anlık yük değişimlerine cevap vermek ve frenleme enerjisini kazanmak amacıyla kullanılmıştır. Sistemde tek başına bir YH yığını kullanılması durumunda YH bütün güç değişimlerine maruz kalacağından, YH gerilimindeki değişim daha büyük bir aralıkta gerçekleşecektir. Dolayısıyla da YH verimliliği azalacaktır. Bu durum YH sisteminin UK ile birlikte hibrit bir şekilde kullanılmasının sağladığı avantajı ortaya koymaktadır.

Tavsiye edilen PEMYH/UK hibrit güç sisteminin benzetim ve analizinde, geliştirilen kontrol stratejisi sürüş çevrimi esnasında oldukça başarılı bir performans göstermektedir. Çalışmada kullanılan YSA kontrolör hibrit taşıt sisteminin bütün yönleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Sistemde kullanılan elemanların karakteristiklerine uygun çalışması ve güç akışı sağlaması dikkate alınan en önemli unsurların başında gelmektedir. Bu faktörler dikkate alınarak hibrit taşıt sistemi için en uygun denklem geliştirilerek başarılı bir biçimde uygulanmıştır. UK'nın şarj seviyesinin uygun bir değerde tutulması hedeflenmiştir. Ayrıca oluşturulan denklem sayesinde YH'nin çıkış gücü değişiminin anlık yüklenmelere maruz kalmasının önlenmesi dikkate alınmıştır. Uygulanan YSA tabanlı kontrol yöntemi sayesinde UK'nın şarj seviyesi uygun değerler arasında tutulabilmektedir. Bu sayede UK kapasitesinde frenleme enerjisini tamamen kazanmak amacıyla bırakılan boş kısım önemli bir oranda yakıt tasarrufu artışı elde edilmesini sağlamıştır. Önerilen kontrol stratejisi YH sisteminin en verimli çalıştığı durum olan lineer çalışma bölgesinde çalışmasını ve YH sisteminin anlık yük değişimlerine maruz kalmamasını sağlamaktadır. Böylece anlık yüklenmelerin YH sisteminde meydana getirebileceği gaz açlığı ve aşırı nemlenme veya membran kuruması gibi problemlerin önlenmesi beklenmektedir. Bu sayede YH ömrü ve verimliliği, buna bağlı olarak da genel sistem verimliliği önemli bir oranda arttırılabileceği öngörülmektedir.

Gerçekleştirilen enerji yönetim algoritması, dSPACE, vb. gerçek zamanlı kontrol ünitelerine aktarılmaya uygun yapıdadır. Dolayısı ile oluşturulan kontrol algoritmasının gerçek taşıt sistemlerine adapte edilerek kullanılabilmesi mümkündür.

Gelecek çalışmalarda, geliştirilen enerji yönetim stratejisinin uygun bir optimizasyon çalışmasıyla geliştirilmesi ve farklı alanlardaki hibrit sistemlere uygulanabilirliği üzerine araştırmalar yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, oluşturulan enerji yönetim sisteminin deneysel çalışmalar ile gerçek zamanlı uygulamalarda test edilmesi ve elde edilecek sonuçlara göre daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Barbir F., (2005), “PEM fuel cells: theory and practice”, UK: Elsevier Academic Press, London.
- Bowers B. J., Zhao J. L., Ruffo M., Khan R., Dattatraya D., Dushman N., Beziat J. C., Boudjemaa F., (2007), “Onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(10-11):1437-1442.
- Burke A., (2000), “Ultracapacitor: why, how and where is the technology”, *Journal of Power Sources*, 91: 37-50.
- Chau K. T., Wong Y. S., Chan C.C., (1999), “An overview of energy sources for electric vehicles”, *Energy Conversion and Management*, 40(10):1021-1039.
- Chau K. T., Wong Y. S., (2002), “Overview of power management in hybrid electric vehicles”, *Energy Conversion and Management*, 43(15):1953-1968.
- Corbo P, Migliardini F, Veneri O., (2007), “Performance investigation of 2.4 kW PEM fuel cell stack in vehicles”, *Int J Hydrogen Energy*; 32(18):4340-4349.
- Corbo P, Migliardini F, Veneri O., (2008), “PEFC stacks as power sources for hybrid propulsion systems”, *Int J Hydrogen Energy*, Article in Press.
- Demuth H., Beale M., Hagan M., (1993) *Neural Network Toolbox for use with MATLAB*, The Mathworks Inc.
- Efe M. Ö., Kaynak O., (2004) *Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları*, sf 1, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Elmas Ç., (2003) *Yapay Sinir Ağları Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama*, sf 27-28, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Emadi A, Ehsani M, Miller JM., (2004), “Vehicular electric power systems”, New York: Marcel Dekker Inc.
- Emadi A, Rajashekara K, Williamson SS, Lukic SM., (2005) “Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations”, *IEEE Trans Veh Technology*; 54(3):763-770.
- Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M., Ates, Y., (2008), “Modeling and Analysis of an FC/UC Hybrid Vehicular Power System Using a Wavelet-Fuzzy Logic Based Load Sharing and Control Algorithm”, *International Journal of Hydrogen Energy*, accepted for publication, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.10.039
- Farsi H., Gobal F., “(2007), “Artificial neural network simulator for supercapacitor performance prediction”, *Computational Materials Science*, 39:678–683.
- Fekrazad N., (2007), “The Effect of Comprehensive Load on PEM Fuel Cell Stack Performance and Behavior”, Ph. D. Thesis, University of Connecticut.
- Granovskii M, Dincer I, Marc AR., (2006), “Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles”, *Int J Hydrogen Energy*; 31(3):337-352.
- Gualous H, Bouquain D, Berthon A, Kauffmann JM., (2003) “Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature”. *J Power Sources*; 123(1):86-93.

- Harmon F. G., Frank A. A., Joshi S. S., (2008) "The control of a parallel hybrid-electric propulsion system for a small unmanned aerial vehicle using a CMAC neural network", *Neural Networks*, 18:772–780.
- Hauer K.-H., (2001) , “Analysis tool for fuel cell vehicle hardware and software (controls) with an application to fuel economy comparisons of alternative system design”, Phd thesis, University of California.
- Haykin S., *Neural Networks*, (1994) sf 41, Macmillan Collage Printing Company, New Jersey.
- Helmolt R. V., Eberle U., (2007), "Fuel cell vehicles: Status 2007", *Journal of Power Sources*, 165, pp.833-843.
- Honda fuel cell power FCX (2004) [Online]. Available: <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/FCXPK.pdf>, Press Information.
- Honda FCX Clarity, (2008), [Online] Available: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/>, Press Information
- Hou Y., Zhuang M., Wan G., (2007), “A transient semi-empirical voltage model of a fuel cell stack”, *International Journal of Hydrogen Energy*; 32(7):857-862.
- Hussain M. M., Dincer I., Li X., (2007) "A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles", *Applied Thermal Engineering*, 27, pp.2294-2299
- Joshi R. P., Deshmukh A. P., (2006), “Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution” *IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles*, p:1-6.
- Jung D. Y., Young H. Kim, Kim S. W., Lee S. H., (2003), "Development of ultracapacitor modules for 42-V automotive electrical systems", *Journal of Power Sources*, 114:366-373.
- Kavak, A., Yigit, H., Ertunc, H.M., (2005) "Using adaline neural network for performance improvement of smart antennas in TDD wireless communications", *IEEE Trans. On Neural Networks*, 16:1616 – 1625.
- Khan M. J., Iqbal M. T., (2005), “Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system”, *Renewable Energy*, 30(3):421-439.
- Kim, M., Sohn, Y. J., Lee, W. Y., ve Kim, C. S., (2008), “Fuzzy control based engine sizing optimization for a fuel cell/battery hybrid mini-bus”, *Journal of Power Sources* 178(2):706–710.
- Kötz R., Carlen M., (2000) “Principles and applications of electrochemical capacitors”, *Electrochimica Acta*, 45(15-16): 2483-2498.
- Kursun, O. (2004) “SINBAD Automation of Scientific Discovery: From Factor Analysis to Theory Synthesis”, PhD Dissertation, University of Central Florida.
- Lajnef W., Vinassa J. M., Briat O., Azzopardi S., Woirgard E., (2007), “Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources”, *Journal of Power Sources*; 168(2):553-560.
- Larminie J., Lowry J., (2003), “Electric Vehicle Tecnology Explained”, John Wiley&Sons Ltd., West Sussex, England.
- Mann R.F., Amphlett J.C., Hooper M. A. I., Jensen H.M., Peppley B.A., Roberge P. R.,

(2000), "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 86(1-2):173-180.

Maxwell Electric Double Layer Capacitor: BOOSTCAP® Ultracapacitor. (2008), Available: (http://www.maxwell.com/pdf/uc/datasheets/eol/mc_power_series_16v_1009363_rev2.pdf) [Online].

Maxwell Technologies, UltraCapacitor Product Guide, (2006), Available online: http://www.maxwell.com/ultracapacitors/manuals/ultracap_product_guide.pdf

Mierlo J. V., Maggetto G., Lataire P., (2006), "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles", *Energy Conversion and Management*, 47, pp. 2748-2760.

Monai T, Takano I, Nishikawa H, Sawada Y., (2004), "A collaborative operation method between new energy-type dispersed power supply and EDLC", *IEEE Trans Energy Conversion*; 19(3):590-598.

Negarestani A., Setayeshi S., Ghannadi-Maragheh M., Akashe B., (2003) "Estimation of the radon concentration in soil related to the environmental parameters by a modified Adaline neural network", *Appl. Radiation and Isotopes*, 58(2):269-273.

Ouyang M, Xu L, Li J, Lu L, Gao D, Xie Q., (2006) "Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies", *J Power Sources*; 163(1):467-479.

Öztemel E., (2003) *Yapay Sinir Ağları*, sf 29, Papatya Yayıncılık, İstanbul.

Pagano M, Piegari L., (2007), "Hybrid Electrochemical Power Sources for Onboard Applications", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2):450-456.

Paladini V, Donato T, Risi AD, Laforgia D., (2007), "Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development", *Energy Conversion and Management*; 48(11):3001-3008.

Park S. K., Choe S. Y., (2008), "Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects", *Journal of Power Sources*, 179(2):660-672.

Pasquier AD, Plitz I, Menocal S, Amatucci, G, (2003), "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications", *J Power Sources*; 115(1):171-178.

Pathapati P. R., Xue X., Tang J., (2005), "A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system", *Renewable Energy*, 30(1):1-22.

Peter A. L., Richard P. D., (2007) "An artificial neural network approach to multiphase continua constitutive modeling", *Composites part B:Engineering*, 38:817-823.

Prokhorov V. D., (2008) "Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics", *Neural Networks*, 21:458-465.

Rafik F, Gualous H, Gallay R, Crausaz A, Berthon A., (2007), "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling", *Journal of Power Sources*, 165(2):928-934.

Rahman MH, Yamashiro S., (2007), "Novel distributed power generating system of PV-

ECaSS using solar energy estimation”, IEEE Trans Energy Conversion; 22(2):358-367.

Richard S. P., Whale M., Djilali N., (2005), “A techno-economic analysis of decentralized electrolytic hydrogen production for fuel cell vehicles”, International Journal of Hydrogen Energy; 30(11):1159-1179.

Rodatz P., Paganelli G., Sciarretta A., Guzzella L., (2005), “Optimal Power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle”, Control Engineering Practice, 13(1):41-53.

Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ (1986) Learning internal representations by error propagation. In: Rumelhart DE, McClelland JL, PDP Research Group (eds) Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure Of Cognition, MIT Press, Cambridge, Mass, 1: 318-362.

Schindall J., “The charge of the ultracapacitors-Nanotechnology takes energy storage beyond batteries”, IEEE Spectrum, pp.38-42, November 2007.

Schlecht L., (2003), “Competition and alliances in fuel cell power train development”, International Journal of Hydrogen Energy, 28(7):717-723.

Scrosati B., Armand M., Henderson W., Lian K., (2007), Capacitive Storage Science, Basic Research for Energy Storage, meeting of the American Chemical Society, ACS.

Semelsberger AT, Rodney LB., (2005), “Fuel effects on start-up energy and efficiency for automotive PEM fuel cell systems”, Int J Hydrogen Energy; 30(4):425-435.

Sisworahardjo N.S., El-Sharkh M.Y., Alam M.S., (2008) "Neural network controller for microturbine power plants", Electric Power Systems, 78:1378–1384.

Taheri M., Mohebbi A., (2008) "Design of artificial neural networks using a genetic algorithm to predict collection efficiency in venturi scrubbers", Journal of Hazardous Materials, 157:122-129.

Thounthong P, Rael S, Davat B., (2006) “Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle” J Power Sources;158(1):806-814.

Uzunoglu M., Alam M. S., (2007), “Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications”, Energy Conversion and Management, 48(5):1544-1553.

Uzunoglu M., Alam M. S., (2008), “Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a novel wavelet based load sharing algorithm”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 23(1):263-272.

Vasu G., Tangirala A. K., (2008), “Control-orientated thermal model for proton-exchange membrane fuel cell systems”, Journal of Power Sources, 183:98–108.

Widrow B., Hoff M.E., (1960) "Adaptive switching circuits", WESTCON Convention, Record Part IV, 96-104.

Windrow B., Lehr M.A., (1990) "30 years of adaptive neural Networks: perceptrons, adaline and backpropagation", IEEE Proc., 78 (9) 1415-1442.

Xue X., Tang J., Smirnova A., England R., Sammes N., (2004), “System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell”, Journal of Power Sources, 133(2):188-204.

Xue X., K.W.E. Cheng and D. Sutanto, (2006) “Unified Mathematical Modelling of Steady-State and Dynamic Voltage–Current Characteristics for PEM Fuel Cells”, *Electrochimica Acta*, pp.1135–1144

Young W. R., (1994), “Electric vehicles of yesterday carry us into tomorrow”, *IEEE Conference Record, Southcon*, p:14-16.

Zhang Z., Huang X., Jiang J., Wu B., (2006), “An improved dynamic model considering effects of temperature and equivalent internal resistance for PEM fuel cell power models”, *Journal of Power Sources*, 161(2):1062-1068.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 15.11.1983

Doğum yeri Divriği

Lise 1997–2001 K.d.z Ereğli (Y.D.A) Lisesi

Lisans 2002–2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü