

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ/BULANIK MANTIK TABANLI
ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİ KULLANILARAK
YAKIT HÜCRESİ/ULTRA-KAPASİTÖRLÜ HİBRİT TAŞIT
SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Elektrik Müh. Ozan ERDİNÇ

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ TAŞIT TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ ve YAKIT HÜCRESİ/ULTRA-KAPASİTÖR SİSTEMLERİNE GENEL BİR BAKIŞ	4
2.1 Elektrikli Taşıt Teknolojisinin Gelişimi	4
2.2 Yakıt Hücresi Sistemleri	9
2.2.1 Yakıt Hücresi Teknolojisine Genel Bir Bakış	9
2.2.2 Yakıt Hücresi Çeşitleri	10
2.3 Ultra-kapasitör Sistemleri	11
2.3.1 Ultra-kapasitör Teknolojisine Genel Bir Bakış	11
2.3.2 Enerji Depolama Sistemi olarak Ultra-kapasitörler ile Bataryaların Karşılaştırılması	13
3. SİSTEM TANIMLAMASI ve METODOLOJİ	15
3.1 PEM Yakıt Hücresi Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı	15
3.2 Ultra-kapasitör Sisteminin Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı	20
3.3 Sürüş Çevrimi	24
3.4 Hibrit Sistem İçin Oluşturulan Enerji Yönetim Stratejisi	27
3.4.1 Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Sistemi	28
3.4.2 Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Yük Paylaşımı Algoritması	34
3.5 Güç Biçimlendirme Ünitesi	38
4. BENZETİM SONUÇLARI ve YORUMLAR	41
5. SONUÇLAR	58
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGE LİSTESİ

A	Aktivasyon alanı [$\text{cm}^2 (\text{hücre}^{-1})$]
B	Konsantrasyon kayıplarının modellenmesinde kullanılan sabit [V]
C	Kapasite [F]
C_{O_2}	Çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu
E_{Nernst}	Nernst anlık gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [C (kmol)^{-1}]
I	Akım [A];
J	Akım yoğunluğu [A (cm)^{-2}]
L	Endüktans [H];
N_s	Yakıt hücresi yığınındaki seri hücre sayısı
N_p	Yakıt hücresi yığınındaki paralel hücre sayısı
P_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
P_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı [atm]
q_{H_2}	Yük değişimini karşılamak için gerekli olan hidrojen akış miktarı [kmol (sn)^{-1}]
r_m	Nafion proton değişimli membranın öz direnci [$\Omega (\text{cm})^2 \text{m}^{-1}$]
R	Direnç [Ω];
T	Sıcaklık [$^{\circ}\text{K}$]
V	Gerilim [V]
λ	Yakıt hücresi membranındaki su içeriği
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	Aktivasyon gerilim düşümünün modellenmesinde kullanılan sabitler

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım (Alternative Current)
ADVISOR	Gelişmiş taşıt simülatörü (Advanced Vehicle Simulator)
DC	Doğru akım (Direct Current)
ECE-15	Avrupa standart şehir içi sürüş çevrimi
PEMYH	Proton değişim (exchange) membranlı yakıt hücresi
P-YH-ref	Yakıt hücresi referans güç sinyali
P-YH-talep	Yakıt hücresinden talep edilen güç değeri
SOC	Ultra-kapasitörün şarj seviyesi
UDDS	Standart şehir içi sürüş çevrimi (Urban Dynamometer Driving Schedule)
UK	Ultra-kapasitör
YH	Yakıt hücresi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 1901 yılında New York'ta geliştirilen ve elektrik motoru ile tahrik edilen bir taksinin görünümü (Larminie ve Lowry, 2003).....	4
Şekil 2.2 Seri hibrit konfigürasyonu.....	6
Şekil 2.3 Paralel hibrit konfigürasyonu	7
Şekil 2.4 Honda FCX Clarity isimli YH'lı hibrit elektrikli taşıtın Los Angeles'ta bulunan bir hidrojen istasyonunda çekilmiş bir fotoğrafı (Honda, 2008)	8
Şekil 2.5 YH sisteminin yapısının basitçe gösterilmesi.	9
Şekil 2.6 UK'nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı (Maxwell, 2006).	12
Şekil 2.7 UK'nın yapısında yer alan nano boyutlardaki yüzeysel elektrotlar (Scrosati vd., 2007).	13
Şekil 3.1 Geliştirilen sisteme ait genel blok diyagramı	15
Şekil 3.2 Örnek YH kutuplanma eğrisi (Barbir, 2005).....	17
Şekil 3.3 YH elektriksel eşdeğer devresi.....	19
Şekil 3.4 YH sisteminin dinamik modeli	20
Şekil 3.5 UK benzetim modelinin geliştirilmesinde yararlanılan eşdeğer devre.	22
Şekil 3.6 430 F ve 16.2 V parametrelerine sahip UK'nın 23 ⁰ C'de 3 A'lık akım için çıkış gerilimindeki değişim	23
Şekil 3.7 UK sisteminin dinamik modeli	24
Şekil 3.8 UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.....	24
Şekil 3.9 UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.	25
Şekil 3.10 ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.....	26
Şekil 3.11 ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.	26
Şekil 3.12 Sürüş çevrimleri kullanılarak oluşturulan yük modelleri: a) UDDS sürüş çevrimi, b) ECE-15 sürüş çevrimi	27
Şekil 3.13 Oluşturulan enerji yönetim stratejisine ait şematik gösterim	27
Şekil 3.14 Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim	28
Şekil 3.15 Örnek bulanık mantık diyagramının genel yapısı	29
Şekil 3.16 Örnek bulanık mantık yapısının çalışma prensibi	30
Şekil 3.17 Oluşturulan bulanık mantık kontrolör yapısı.	31
Şekil 3.18 Oluşturulan bulanık mantık kontrolörün girişlerine ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.	31
Şekil 3.19 Sürüş çevrimleri için oluşturulan bulanık mantık kontrolöre ait çıkış yüzeyleri: a) UDDS sürüş çevrimi, b) ECE-15 sürüş çevrimi.....	32

Şekil 3.20 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu (Senaryo 1)	33
Şekil 3.21 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu (Senaryo 2)	33
Şekil 3.22 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu (Senaryo 3)	34
Şekil 3.23 Dalgacık dönüşümünün tek seviyeli filtreleme uygulaması.....	34
Şekil 3.24 Dalgacık dönüşümü ile gerçekleştirilen üç seviyeli bir ayrıştırma-yeniden elde etme işlemi.....	37
Şekil 3.25 Dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen UDDS güç profili ayrışımı.....	37
Şekil 3.26 Dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen ECE-15 güç profili ayrışımı.....	38
Şekil 3.27 Kullanılan dönüştürücü topolojileri: a) YH çıkışında kullanılan yükseltici tip DC/DC dönüştürücü, b) UK çıkışında kullanılan çift yönlü tip DC/DC dönüştürücü	39
Şekil 3.28 Kullanılan DC/DC dönüştürücüler için anahtarlama sinyallerinin üretilmesinde kullanılan yöntemin şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.1 Hibrit sistem konfigürasyonu.	42
Şekil 4.2 YH yığını geriliminin değişimleri (YH/UK hibrit sisteminde): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.....	44
Şekil 4.3 YH yığını geriliminin değişimleri (tek başına YH sistemi kullanılması durumunda): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.	45
Şekil 4.4 YH sistemine ait dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimleri (YH/UK hibrit sisteminde): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.....	46
Şekil 4.5 YH sistemine ait dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimleri (tek başına YH sistemi kullanılması durumunda): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.	47
Şekil 4.6 UK sistemine ait dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.....	49
Şekil 4.7 UK sistemi şarj seviyesinin değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.	50
Şekil 4.8 Tek başına dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşım algoritması kullanılması durumunda UK sistemi şarj seviyesinin değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için	51
Şekil 4.9 UDDS sürüş çevrimi altında UK şarj seviyesinin düşük olduğu bir durumda bulanık mantık kontrolörün sağladığı enerji yönetimi: a) UK sistemi şarj seviyesinin değişimi, b) YH referans gücü ve çıkış gücünün değişimi, c) UK referans gücü ve çıkış gücünün değişimi.....	52
Şekil 4.10 UDDS sürüş çevrimi altında UK şarj seviyesinin hedeflenen düzeyden yüksek olduğu	

bir durumda bulanık mantık kontrolörün sağladığı enerji yönetimi: a) UK sistemi şarj seviyesinin değişimi, b) YH referans gücü ve çıkış gücünün değişimi, c) UK referans gücü ve çıkış gücünün değişimi.....	53
Şekil 4.11 DC yük barası gerilimindeki değişimler: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.	55
Şekil 4.12 İhtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarının değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.....	56

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 YH çeşitleri ve özellikleri (Fekrazad, 2007)	11
Çizelge 3.1 PEMYH modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler	16
Çizelge 3.2 UK sisteminin modellenmesinde kullanılan parametreler	21
Çizelge 3.3 UDDS sürüş çevriminin özellikleri	25
Çizelge 3.4 ECE-15 sürüş çevriminin özellikleri	26
Çizelge 3.5 Bulanık mantık kontrolörün kural tabanı	32
Çizelge 3.6 Dalgacık dönüşümü için kullanılan parametreler	35
Çizelge 4.1 PEMYH parametreleri	41
Çizelge 4.2 Maxwell Boostcap [®] BMOD0430 UK ünitesinin özellikleri (Maxwell, 2008).	43
Çizelge 4.3 Bulanık mantık kontrolöre ait kuralların sürüş çevrimleri boyunca aktiflik analizi	54
Çizelge 4.4 UK sisteminin şarj seviyesinin kontrol edildiği ve edilmediği durumlardaki hidrojen tüketiminin karşılaştırılması	57

ÖNSÖZ

Günümüzde dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan bir tanesi de, küresel ısınmanın ve çevresel kirliliğin her geçen gün artmasıdır. Küresel ısınmanın ve çevresel kirliliğin başlıca sorumlularından biri olan fosil yakıtların çok yakın bir gelecekte tükeneceği öngörülmektedir. Özellikle fosil yakıtların kullanıldığı konvansiyonel taşıt sistemleri, enerji tüketiminde ve emisyon salınımında büyük bir paya sahiptir. Bu durumlar göz önüne alınarak, taşıt sistemleri için konvansiyonel sistemler yerine alternatif ve çevre dostu çözümler üretmek üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün hız kazanmaktadır. Özellikle yakıt hücreleri, taşıtın tahrik edilmesinde kullanılan konvansiyonel yapılara kıyasla birçok avantaja sahiptir. Ancak taşıt uygulamalarında tek başına bir yakıt hücresi sistemini kullanmak, bazı dezavantajları beraberinde getirmektedir. 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, hiçbir zaman değerli yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Bülent VURAL'a, dostluğu ve sonsuz desteği için Yavuz ATEŞ'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

Günümüzde gittikçe artan çevresel kirlilik ve fosil yakıtların hızla tükenmesi, bütün dünyanın alternatif enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yapmasına neden olmuştur. Özellikle, artan çevresel kirliliğe yol açan zararlı gaz salınımında taşıtların etkisi oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Bunun yanı sıra, mevcut taşıt sistemlerinde kullanılan konvansiyonel içten yanmalı motorların verimleri özellikle düşük devirlerde önemli oranda azalmaktadır. Taşıtlarda, alternatif olarak elektrik motorlarının kullanılması hem çevresel faktörler hem de düşük devirlerde yüksek verimlere sahip olmalarından dolayı dikkat çekici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Elektrik motorlarının kullanıldığı taşıt sistemlerinin tahrik edilmesi için de, yakın bir gelecekte, yakıt hücresi teknolojilerinin verimli, sürdürülebilir, alternatif ve çevre dostu bir çözüm olması beklenmektedir. Ancak, tek başına bir yakıt hücresi sistemi ilk çalışma anında, özellikle de taşıtların şehir içi trafiğinde sıklıkla karşılaştığı geçici ve çok yüksek güç taleplerini tam olarak karşılamada yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, 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 gibi problemler de ortaya çıkabilmektedir. 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. Böylelikle 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. Bu nedenle, taşıt uygulamalarında yakıt hücresi sistemlerinin uygun bir enerji depolama ünitesi ile birlikte kullanılması, genel sistem performansını ve verimliliğini önemli oranda arttırmaktadır. Enerji depolama sistemlerinden biri olan ultra-kapasitör sistemlerinin, çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme ve frenleme enerjisini de verimli 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. Bunun yanı sıra, uygun bir yük paylaşımı algoritması ve iyi tasarlanmış bir kontrol stratejisinin yakıt hücresi ve ultra-kapasitör hibrit yapısına uygulanması ile birlikte genel sistem verimliliği ve yakıt tasarrufu da artırılabilir.

Bu çalışmada, dalgacık dönüşümü tabanlı bir yük paylaşımı algoritması ve bulanık mantık tabanlı bir kontrol algoritması kullanılarak, hibrit bir yakıt hücresi/ultra-kapasitör taşıt sisteminin enerji yönetimi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen yük paylaşımı algoritması ile birlikte taşıtın güç talebindeki anlık değişimlerin temel yük talebinden ayrıştırılması sağlanmaktadır. Bu sayede de yakıt hücresinin yapısı için uygun bir sürekli hal yüklenmesinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen kontrol algoritması ile birlikte ultra-kapasitörün şarj seviyesinin kontrolünün sağlanması, bu sayede de taşıt performansının ve enerji tasarrufunun artırılması hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Bulanık mantık; dalgacık dönüşümü; hibrit elektrikli taşıtlar; ultra-kapasitör; yakıt hücresi

ABSTRACT

Growing environmental pollution and depleting fossil fuels have accelerated the studies realized for alternative energy sources in all over the world. Particularly, the effect of vehicles plays a major role in harmful gas emissions causing environmental pollution that increases every passing day. Besides, the efficiency of conventional internal combustion engines used in existing vehicle systems significantly decreases especially at lower rpms. Alternatively, the usage of electric motors has become prominent as an attractive solution 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 the propulsion of vehicles using electric motors. However, using a fuel cell alone may not be sufficient for start-up, and especially for instantaneous peak power demands which vehicle systems face typically in urban traffic conditions. Moreover, such transient changes (rapid acceleration or hard breaking) may cause insufficient humidification with gas starvation or flooding problems in fuel cell membrane, which is the most important component of a fuel cell system. Gas starvation has an impact in cell performance and safe operation of a fuel cell system. Thus, operating fuel cell in steady state conditions and preventing the effects of sudden load changes on fuel cell will provide a safe operation for fuel cell, and accordingly increase its lifetime and decrease hydrogen consumption. Also, commercially available fuel cells are not reversible and they do not have capability of capturing the braking energy. Therefore, using fuel cell with a proper energy storage unit in vehicular applications promotes the performance and efficiency of the overall system significantly. Ultra-capacitors, one of the energy storage systems, have the capability of supplying or capturing high amounts of power swiftly. Considering the aforementioned issues, utilizing fuel cell and ultra-capacitor systems together will be efficient to meet all the load demands of a vehicle. Besides, a proper load sharing algorithm and well-designed control strategy applied to fuel cell and ultra-capacitor hybrid system will increase the overall system efficiency and fuel economy.

In this study, the energy management of a hybrid fuel cell/ultra-capacitor vehicular system is realized utilizing a wavelet transform based load sharing and a fuzzy logic based control algorithm. With the usage of the performed load sharing algorithm, the separation of the base load demand of a vehicle from its transients is provided. Thus, the objective is to acquire a steady state load profile which is suitable for the structure of fuel cell. Besides, the aim of the developed control algorithm is to control the state-of-charge of the ultra-capacitor, thus promoting the vehicle performance and energy savings.

Keywords: Fuel cell; fuzzy logic; hybrid electric vehicle; ultra-capacitor; wavelet transform.

1. GİRİŞ

Her geçen gün artan çevresel kaygılar ve azalan petrol rezervleri, temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalara büyük bir ivme kazandırmıştır. Özellikle çevresel kirlilik üzerinde büyük etkisi bulunan ulaşım sistemlerinin yüksek enerji ihtiyacının alternatif enerji sistemleri ile karşılanabilmesi amacı ile yapılan araştırma çalışmaları günümüzde oldukça yoğunlaşmıştır. Yakıt hücresi (YH) teknolojisi, YH'nın alternatif bir enerji dönüştürücüsü ve çevre dostu olması nedeniyle taşıt uygulamalarında konvansiyonel içten yanmalı motor içeren sistemlerin yerine kullanılabilecek, gelecek vaat eden sistemlerden birisidir (Hauer, 2001; Schlecht, 2003; Richard vd., 2005; Semelsberger vd. 2005; Granovskii vd., 2006). YH çeşitlerinden proton değişim membranlı YH (PEMYH), yüksek ömrü, hızlı cevap verebilme yeteneği, yüksek güç yoğunluğu ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi gibi özellikleri nedeniyle taşıt uygulamaları için en elverişli YH sistemidir (Barbir, 2005; Bowers vd., 2007; Corbo vd., 2007; Hou vd., 2007).

Taşıtın tahrik edilmesinde bütün yük talebinin karşılanması için tek başına bir YH sistemini kullanmak, özellikle taşıt uygulamalarında sıkça karşılaşılan anlık yüklenmelerde kullanışlı olmamaktadır (Emadi vd., 2005). Bunun yanı sıra, bütün güç talebinin YH tarafından karşılanması istenirse, hem sistemin boyutunda hem de maliyetinde artış meydana gelmektedir. Ayrıca, mevcut YH sistemleri frenleme enerjisini kazanma yeteneğine sahip değildirler. Bütün bu nedenlerden dolayı YH sisteminin bir enerji depolama ünitesiyle hibrit bir şekilde kullanılmasıyla toplam maliyette düşüş ve taşıt performansında önemli bir artış elde edilebileceği gibi, frenleme enerjisinin geri kazanılabilmesi sayesinde enerji tasarrufu da arttırılabilecektir. Birçok hibrit uygulamada batarya, enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır (Jeong vd., 2005; Ouyang vd., 2006; Corbo vd., 2007). Fakat, günümüzde ticari olarak mevcut olan bataryaların düşük çevrim ömrü, uzun tekrar şarj etme süresi ve düşük güç yoğunluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır. Süper-kapasitör ve çift katmanlı kapasitör olarak da bilinen ultra-kapasitörler (UK) taşıt uygulamalarında enerji depolama ünitesi olarak bataryaların yerini alabilecek sistemler olarak araştırılmaktadırlar (Gualous vd., 2003).

UK'ların geleneksel kapasitörlere ve bataryalara kıyasla birçok üstün özellikleri mevcuttur. UK'lar bataryalara göre daha fazla güç yoğunluğuna ve geleneksel kapasitörlere göre daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptirler (Rodatz vd., 2005). UK'lar uzun bir çevrim ömrüne sahip olmakla birlikte geniş sıcaklık aralıklarında da sorunsuz çalışabilmektedirler (Rodatz vd., 2005; Lajnef vd., 2007). UK'ların yüksek değerli güç ve akımları iletmede yapısal olarak

bataryalardan daha etkili olmaları da önemli avantajlarındandır (Pasquier vd., 2003). Yukarıda bahsettiğimiz avantajlarından dolayı UK'lar elektrikli taşıtlar (Rodatz vd., 2005; Thounthong vd., 2006; Uzunoglu ve Alam, 2007), dağılmış üretim sistemleri (Monai vd., 2004; Rahman ve Yamashiro, 2007), vs. gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar.

YH sistemleri ile UK'ların hibridize edilerek kullanılması, hibrit elektrikli taşıtlarda güç talebinin verimli bir şekilde karşılanmasına ve YH sisteminin boyutunun azaltılabilmesine olanak sağlamaktadır (Emadi vd., 2004; Rodatz vd., 2005). UK'lar YH sistemleri ile birlikte kullanıldığında hızlanma için ihtiyaç duyulan ekstra güç talebini karşılamakla birlikte, frenleme enerjisinin de kazanılmasını sağlamaktadırlar (Rodatz vd., 2005; Paladini vd., 2007). YH ve UK'nın paralel kullanılması, YH'nin kısmi yükte çalışma durumundaki yüksek verimini ve UK'nın ani yük talebini karşılamadaki etkinliğini birleştirmektedir (Thounthong vd., 2006, Ahluwalia vd., 2008). YH'deki nem azlığının sebep olduğu gaz açlığı ve aşırı nemlenme gibi problemler YH'ye zarar verebilir (Uzunoglu ve Alam, 2008). Bundan dolayı YH ile UK'nın hibrit bir şekilde kullanılması taşıt sistemlerinin yük talebini karşılamada başarı sağlarken, YH sisteminin de ömrünü arttırmaktadır.

Hibrit bir taşıt sistemindeki yakıt tasarrufunu ve sistem performansını arttırmak açısından, her iki kaynağında yük karakteristiklerini göz önünde bulunduran bir güç yönetimi ve kontrol stratejisinden yararlanılması, istenen sonuçları da beraberinde getirmektedir. İyi bir yük paylaşımı ve kontrol algoritması ile birlikte hibrit elektrikli taşıtlarda uygun bir güç akışı sağlanabilir. Hibrit bir elektrikli taşıtın güç talebinin modellenmesi, Avrupa standart şehir içi sürüş çevrimi (ECE-15) ve gelişmiş bir taşıt simulator programı olan ADVISOR'dan elde edilen şehir içi sürüş çevrimi (UDDS) baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Anlık yüklenmeleri ve çeşitli düzeylerdeki ivmelenmeleri ve yavaşlamaları içeren bu iki yük profili, hibrit bir sistemin performansını değerlendirmek açısından oldukça uygundur. Oluşturulan hibrit sistemdeki güç akışının kontrolünde, literatürde de birçok uygulaması olan (Jeong vd., 2005; Schouten vd., 2003; Poursamad ve Montazeri, 2008) ve hibrit enerji sistemlerinin kontrolü açısından oldukça elverişli olan bulanık mantık kontrolör kullanılmaktadır. Taşıt sisteminin güç değişimindeki anlık yüklenmeleri YH sistemine hissettirmemek açısından da bir yük paylaşımı algoritması sistem yapısına eklenmiştir. Hibrit sistemde yük paylaşımı algoritması olarak, güç talebindeki anlık değişimlerin analizinde oldukça iyi bir performans gösteren dalgacık dönüşümünden faydalanılmıştır (Zhang vd., 2008).

Yapmış olduğumuz bu çalışmada, dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık 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 dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı yük paylaşım ve 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 TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ ve YAKIT HÜCRESİ/ULTRA-KAPASİTÖR SİSTEMLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

2.1 Elektrikli Taşıt Teknolojisinin Gelişimi

Günümüzde çevresel kaygıların da etkisiyle cazip bir konuma gelen elektrikli taşıtların tarihi, aslında içten yanmalı motorlar kadar eskiye dayanmaktadır. İlk elektrikli taşıt prototipi, 1830'lu yıllarda tekrar şarj edilemeyen bataryalar kullanılarak oluşturulmuştur. Ancak bataryaların ticari olarak üretilen taşıtlarda kullanılması, batarya teknolojisindeki gelişmeye bağlı olarak neredeyse yarım asırlık bir zaman dilimi sonrasında gerçekleştirilebilmiştir. 19. yüzyılın sonlarına doğru, tekrar şarj edilebilir bataryaların geliştirilmesi ile birlikte hususi taşıtlarda, taksilerde, vb. alanlarda elektrikli taşıt sistemleri büyük bir kullanım alanına sahip olmuşlardır (Young, 1994). Şekil 2.1'de, 1901 New York'ta geliştirilen ve elektrik motoru ile tahrik edilen bir taksinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.1 1901 yılında New York'ta geliştirilen ve elektrik motoru ile tahrik edilen bir taksinin görünümü (Larminie ve Lowry, 2003)

Bahsi geçen dönemlerde, elektrikli taşıt sistemleri, içten yanmalı motorlarla ya da buhar sistemleriyle tahrik edilen taşıtlarla kıyaslandığında performans, güvenilirlik ve verimlilik açısından oldukça ileri bir konumda bulunmaktaydı. 1920'li yıllara gelindiğinde otobüs, taksi, hususi taşıt, yük taşıtı, vb. olarak kullanılmak üzere yüz binlerce elektrikli taşıt ticari olarak üretilmişti (Larminie ve Lowry, 2003). Ancak bahsi geçen dönemde petrolün oldukça ucuz olması ve buna bağlı olarak da, yeni geliştirilen içten yanmalı motorların taşıtların tahrik

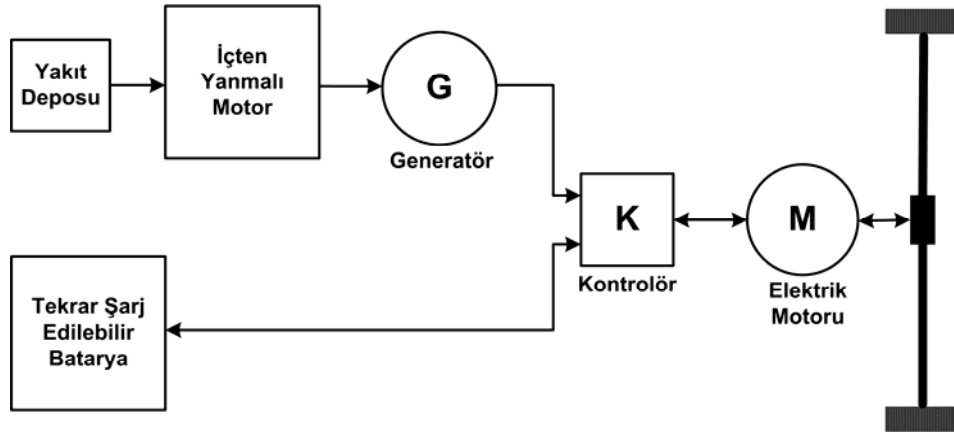
edilmesinde daha cazip ve ekonomik bir çözüm sunması, içten yanmalı motorlu taşıtlara olan ilgiyi önemli oranda artırmıştır. Ayrıca üretilen elektrikli taşıtların menzilinın ihtiyaç duyulandan az olması da içten yanmalı motorlu taşıtlara yönelik araştırmalara ivme kazandırmıştır.

İçten yanmalı motorlu taşıtlara olan ilginin artmasının başlıca sebeplerinden birisi petrolün kullanıldığı içten yanmalı motorların özgül enerjisinin bataryaların özgül enerjisine kıyasla oldukça yüksek olmasıdır. Burada bahsi geçen özgül enerji, kilogram başına depolanabilen enerji miktarıdır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtın özgül enerjisi 9000 Wh/kg civarlarında iken, örneğin bir kurşun asit bataryanın özgül enerjisi 30 Wh/kg civarında bir değere sahiptir. İçten yanmalı motorun ve kullanılan vites kutusunun verimi göz önüne alındığında içten yanmalı motor sisteminin verimi %20 civarında olmaktadır. Buna göre, girişteki yakıtın kullanılması ile birlikte içten yanmalı motor sistemine sahip bir taşıtın yaklaşık 1800 Wh/kg'lık bir özgül enerjiye sahip olmaktadır. Yaklaşık %90 verime sahip olan elektrik motorunun kullanılması ile birlikte ise girişindeki bataryaların özgül enerjisi göz önüne alınarak 27 Wh/kg civarında kullanılabilir enerjiye sahip olacaktır. Yani içten yanmalı motora sahip bir taşıtla aynı menzile sahip olabilmek için, içten yanmalı motorun yaklaşık 70 katı ağırlığa sahip bir batarya sistemi kullanılması gerekmektedir. Ayrıca bir batarya sistemini tamamen şarj edebilmek için saatler gerekirken, içten yanmalı motor için gereken yakıtın taşıta yüklenmesi birkaç dakika içerisinde gerçekleştirilebilmektedir (Larminie ve Lowry, 2003). Örnek değerler ile gerçekleştirilen bu hesaplama bile bahsi geçen zamanlarda içten yanmalı motorlara olan ilginin oldukça artmasının nedenini açıkça göstermektedir. Buna bağlı olarak, 1920'li yılların ortasından itibaren 1960'lı yıllara kadar içten yanmalı motora sahip taşıtlar, taşıt piyasasına tamamen hakim konumda kalmışlardır.

Ancak 1960'lı yıllardan sonra artan petrol fiyatları ve içten yanmalı motorların olumsuz çevresel etkilerinin önemli boyutlara ulaşmaya başlaması, elektrikli taşıtlar üzerine yapılan çalışmalara yeniden önem kazandırmıştır. Özellikle 1970'li yılların ortalarına doğru meydana gelen ve bütün dünyayı etkileyen petrol krizi, taşıt üreticilerini yeniden elektrikli taşıt teknolojilerine yatırım yapmaya yönlendirmiştir (Chau ve Wong, 2002). Büyük taşıt üreticileri, 1990'lı yıllara kadar çeşitli elektrikli taşıt prototipleri geliştirmişlerdir. Ancak bu prototipler, performans ve özellikle de menzil açısından içten yanmalı motorlu taşıtlarla rekabet edebilecek düzeyde değillerdi (Joshi ve Deshmukh, 2006). Bu durum, içten yanmalı motor ve batarya sistemi tarafından tahrik edilen elektrik motorunun beraberinde kullanıldığı hibrit elektrikli taşıt sistemlerinin geliştirilmesi fikrini ortaya çıkarmıştır.

Hibrit bir taşıt, birden fazla güç kaynağının farklı konfigürasyonlar kullanılarak beraberce taşıtın güç ihtiyacını karşılaması ile oluşmaktadır. Hibrit elektrikli taşıt düşüncesinin temelleri ilk olarak 1916 yılında geliştirilen bir prototip üzerinde ortaya konulmuştur (Ünlü vd., 2003). Bu tarihten itibaren yapılan çalışmalar ardından günümüzde geline nokta, Toyota, Honda, Ford ve Nissan gibi büyük otomotiv üreticileri 1990'lı yıllardan itibaren ticari olarak hibrit elektrikli taşıt üretimine başlamışlardır. Toyota Prius, Honda Civic Hybrid ve Honda Insight modelleri bu yıllarda geliştirilen ve günümüzde de hala üretilmekte olan hibrit elektrikli taşıtlara örnek olarak gösterilebilir. Hibrit elektrikli taşıt sistemleri, taşıtın tahrik edilmesinde içten yanmalı motorun yanında bir elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte yakıt tüketimini, buna bağlı olarak da içten yanmalı motorun olumsuz çevresel etkilerini önemli bir oranda azaltmaktadır. Ayrıca, elektrik motoru ve bataryanın kullanılması ile birlikte frenleme anlarında ortaya çıkan enerji geri kazanılabilmekte, bu sayede de yakıt tasarrufu artırılabilir.

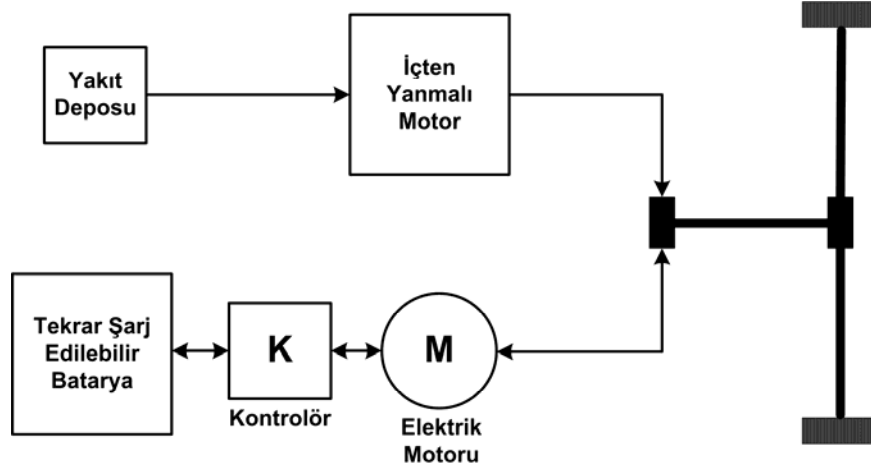
Hibrit taşıt sistemlerinde, taşıt performansını etkileyen en önemli unsurlardan birisi kullanılan hibritleştirme konfigürasyonudur. Hibrit bir taşıtın oluşturulması üzerine yapılan farklı çalışmalarda farklı konfigürasyonlardan yararlanılmıştır. Bu konfigürasyonlardan en önemlileri seri hibrit, paralel hibrit ve seri-paralel (karma) hibrit olarak ortaya konulmaktadır.



Şekil 2.2 Seri hibrit konfigürasyonu

Şekil 2.2’de görülen seri hibrit konfigürasyonunda taşıtın tahrik edilmesi, bir elektrik motoru kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Burada elektrik motoru, girişindeki elektriksel gücü taşıtın tahrik edilmesinde kullanılmak üzere mekanik güce çevirmektedir. İçten yanmalı motorun çıkışındaki generatör, içten yanmalı motordan gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. Böylece üretilen elektrik enerjisi, batarya sisteminin elektrik enerjisiyle birlikte elektronik kontrolörde birleşir. Taşıtın o anki güç talebine göre elektronik kontrolör, hangi

kaynaktan ne kadarlık bir enerjinin talep edileceğini belirler. Frenleme durumunda, taşıtın tahrik edilmesinde kullanılan elektrik motoru generatör olarak çalışır ve enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek faydalı hale getirilmesini sağlar. Kontrolör aynı zamanda frenleme durumlarında içten yanmalı motor ve çıkışındaki generatörden oluşan sistemi devre dışı bırakır ve gücü, bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Bu sayede frenleme durumunda ortaya çıkan enerjinin geri kazanılması sağlanmış olmaktadır (Larminie ve Lowry, 2003; Mierlo vd., 2006).



Şekil 2.3 Paralel hibrit konfigürasyonu

Şekil 2.3'te görülen paralel hibrit konfigürasyonunda ise içten yanmalı motor ve elektrik motoru aynı mil üzerinden doğrudan mekanik bağlantı ile tekerlekleri paralel bir şekilde tahrik etmektedir. Paralel hibrit taşıtlarda iki kaynak da tahrik işlemini birlikte gerçekleştirdiğinden, seri hibrit yapıdaki taşıtlara göre daha küçük boyutta bir içten yanmalı motor kullanılmaktadır. Kontrolör, taşıtın yük talebine göre hangi kaynaktan ne kadar güç çekileceğini belirlemektedir. Kontrolör bu işlemi gerçekleştirirken içten yanmalı motoru en verimli şekilde işleterek yakıt tasarrufunu azami hale getirmeyi hedeflemektedir. Paralel hibrit konfigürasyonda genellikle düşük hızlarda yalnızca elektrik motoru devrede iken, içten yanmalı motor, güç talebinin arttığı yüksek hızlarda devreye girmektedir. Bu sayede içten yanmalı motoru verimli çalıştığı yüksek devirlerde işletmek ve düşük hızlarda sadece elektrik motorunu kullanarak emisyon salınımını azaltmak mümkün olmaktadır (Larminie ve Lowry, 2003; Emadi vd., 2005).

Bir diğer taşıt konfigürasyonu ise, seri ve paralel hibrit konfigürasyonlarının çeşitli özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşturulan karma hibrit taşıt konfigürasyonudur. Bu konfigürasyonun yapısı paralel hibrite benzemekle birlikte, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasında seri hibrit yapısında olduğu gibi bir generatör üzerinden ayrı bir bağlantı da

söz konusudur. Karma hibrit yapı, düşük hızlarda seri hibrit yapısındaki gibi çalışmaktadır. Yüksek hızlarda ise içten yanmalı motor paralel hibrit yapısındaki gibi doğrudan tekerlere güç aktarmaktadır, bu sayede de yüksek güçlerde seri hibritteki dönüşüm kayıpları ile kaybedilen enerji asgari hale getirilmiş olur (Ünlü vd., 2003; Emadi vd., 2005). Bu hibrit konfigürasyon, Toyota tarafından Prius modelinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 2.4 Honda FCX Clarity isimli YH'lı hibrit elektrikli taşıtın Los Angeles'ta bulunan bir hidrojen istasyonunda çekilmiş bir fotoğrafı (Honda, 2008)

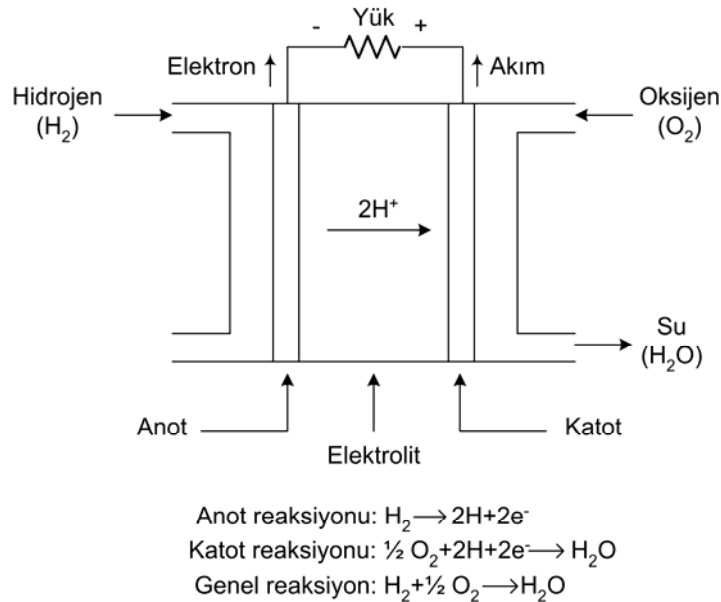
İçten yanmalı motor içeren hibrit elektrikli taşıtlar, yakıt tüketiminde ve olumsuz çevresel etkilerde belli oranda bir azalma sağlamışlardır. Ancak bu sistemler taşıt uygulamaları için tamamen bir çözüm oluşturmamaktadır. Günümüzde taşıt uygulamalarında, fosil yakıtlar tüketen içten yanmalı motorların yerine kullanılabilecek alternatif tahrik sistemleri arasında, özellikle YH'lı hibrit sistemler ön plana çıkmış durumdadır (Mierlo vd., 2006). YH sistemleri için yakıt olarak kullanılan hidrojenin doğada en fazla bulunan element olması ve doğrudan hidrojenin kullanılması ile birlikte YH'lı taşıtların sıfır emisyon sağlama potansiyeli, büyük otomotiv firmalarını YH'lı elektrikli taşıt sistemleri üzerine önemli çalışmalar ve yatırımlar yapmaya yönlendirmiştir. Özellikle Honda, prototip olarak Honda FCX isimli YH'lı hibrit bir elektrikli taşıt modeli geliştirmiştir (Honda, 2004). Honda, bu modelin gelişmiş bir versiyonu olarak Şekil 2.4'te görülen FCX Clarity isimli bir taşıtı 2008 yılında piyasaya sürmüş ve Amerika'nın bazı eyaletlerinde ticari olarak satışa sunmuş durumdadır. Özellikle 3 yıl içerisinde, 200 adet FCX Clarity taşıtının satışının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir (Honda, 2008). Ancak özellikle geleceğin teknolojisi olarak düşünülen YH'lı taşıtlar için

günümüzde hala çeşitli sorunlar mevcuttur. Bunlardan en önemlisi YH teknolojisinin nispeten pahalı bir konumda olmasıdır. Ayrıca yakıt olarak kullanılan hidrojenin taşıta yüklenebileceği hidrojen istasyonlarının sayısı oldukça sınırlıdır. Bunun yanı sıra, hidrojenin depolanması ve taşıt içerisinde hidrojen tüplerinin yerleştirileceği alanın belirlenmesi de araştırmacıların üzerine çalıştığı önemli konular arasındadır (Helmolt ve Eberle, 2007). Ancak gerçekleştirilen yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları ile birlikte bahsi geçen bütün bu sorunlara çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle hidrojen istasyonu sayısının artması ile birlikte YH'lı hibrit elektrikli taşıtların kısa bir zaman içerisinde otomotiv pazarında oldukça önemli bir yere sahip olması beklenmektedir.

2.2 Yakıt Hücresi Sistemleri

2.2.1 Yakıt Hücresi Teknolojisine Genel Bir Bakış

YH sistemleri, kullanılan yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren enerji dönüştürücüleridir (Vasu ve Tangirala, 2008). Ayrıca YH sistemleri, başka bir yakıt dönüştürücü sistem olmadan doğrudan hidrojen kullanıldığında emisyon salınımını tamamen ortadan kaldırmaktadırlar (Hussain vd., 2007). Şekil 2.5'te, yakıt olarak doğrudan hidrojen kullanıldığı bir YH sisteminin yapısı basitçe gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonları sonucunda yan ürün olarak sadece saf su açığa çıkmaktadır.



Şekil 2.5 YH sisteminin yapısının basitçe gösterilmesi.

Günümüzde gittikçe artan çevresel kaygılar ve azalan petrol rezervleri gözönüne alındığında

YH sistemleri, taşıt uygulamalarında konvansiyonel içten yanmalı motorlu sistemlerin yerini alabilecek en öncelikli aday konumundadırlar (Hussain vd., 2007). Özellikle kısmi yük durumlarındaki yüksek verimi, YH sistemlerini taşıt uygulamalarında konvansiyonel sistemlere göre daha avantajlı bir konuma getirmektedir (Ahluwalia vd., 2005). Ancak YH sistemleri hala konvansiyonel sistemlerden daha ağır ve hantal durumdadırlar (Helmolt ve Eberle, 2007). Ayrıca bir taşıt sisteminin tahrik edilmesinde tek başına bir YH sistemi kullanmak YH ömrü ve maliyeti açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Taşıt sistemlerinin güç taleplerindeki ani ve geçici değişimler (ani hızlanma veya frenleme), YH sisteminin en önemli alt elemanı olan membranda yeterince nemlenememe veya aşırı nemlenme ve gaz açlığı (starvation) gibi problemlere yol açabilmektedir (Liu vd., 2006). Bu problemlerin temeli, yük talebinin aniden artarken veya azalırken, gazların (hidrojen ve oksijen) akışının bu talebi karşılayacak şekilde artamaması veya azalamamasıdır. YH 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 sağlayacak, böylelikle hem yakıt hücresinin ömrü uzayacak hem de hidrojen tüketimi azaltılmış olacaktır. Bu nedenle günümüzde YH sistemleri üzerine yapılan araştırmalar hacim azaltımı ve performans artırımı ile YH sistemlerinin bir enerji depolama ünitesi ile hibridize edilerek kullanılması üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca YH sisteminin maliyetinin azaltılması da başlıca hedefler arasında bulunmaktadır. Bahsi geçen bu geliştirmeler sağlandığında, YH sistemi içeren taşıtların, taşıt piyasasında başlıca rolü üstleneceği öngörülmektedir.

2.2.2 Yakıt Hücresi Çeşitleri

Günümüzde YH sistemlerinin kullanıldığı birçok farklı alan bulunmaktadır. Gerçekleştirilen uygulamanın gereksinimlerine göre de kullanılabilecek farklı özelliklere sahip YH çeşitleri günümüzde ticari olarak üretilmektedirler. En sık kullanılan YH çeşitleri ve özellikleri Çizelge 2.1’de belirtilmektedir.

Çizelge 2.1 YH çeşitleri ve özellikleri (Fekrazad, 2007)

YH Çeşidi	İşletim Sıcaklığı [°C]	Kullanılan Elektrolit	Kullanılan Yakıt	Kullanılan Oksitleyici	Verimlilik (%)
Alkalın YH	70-100	Potasyum hidroksit	Doğrudan Hidrojen	Saf oksijen	50-70
Erimiş Karbonlu YH	650	Erimiş karbon çözeltisi	Doğal gazın ya da havagazının dönüştürülmesiyle elde edilen hidrojen ve karbon monoksit	Havadan elde edilen oksijen	40-55
Fosforik Asit YH	160-210	Dengelenmiş fosforik asit	Doğal gazdan elde edilen hidrojen	Havadan elde edilen oksijen	35-50
Katı Oksit YH	800-1000	Seramik katı oksit elektrolit	Doğal gazın ya da havagazının dönüştürülmesiyle elde edilen hidrojen ve karbon monoksit	Havadan elde edilen oksijen	45-60
PEMYH	50-100	Geçirgen polimer elektrolit	Doğrudan ya da dönüştürülmüş hidrojen	Saf ya da havadan elde edilen oksijen	35-60

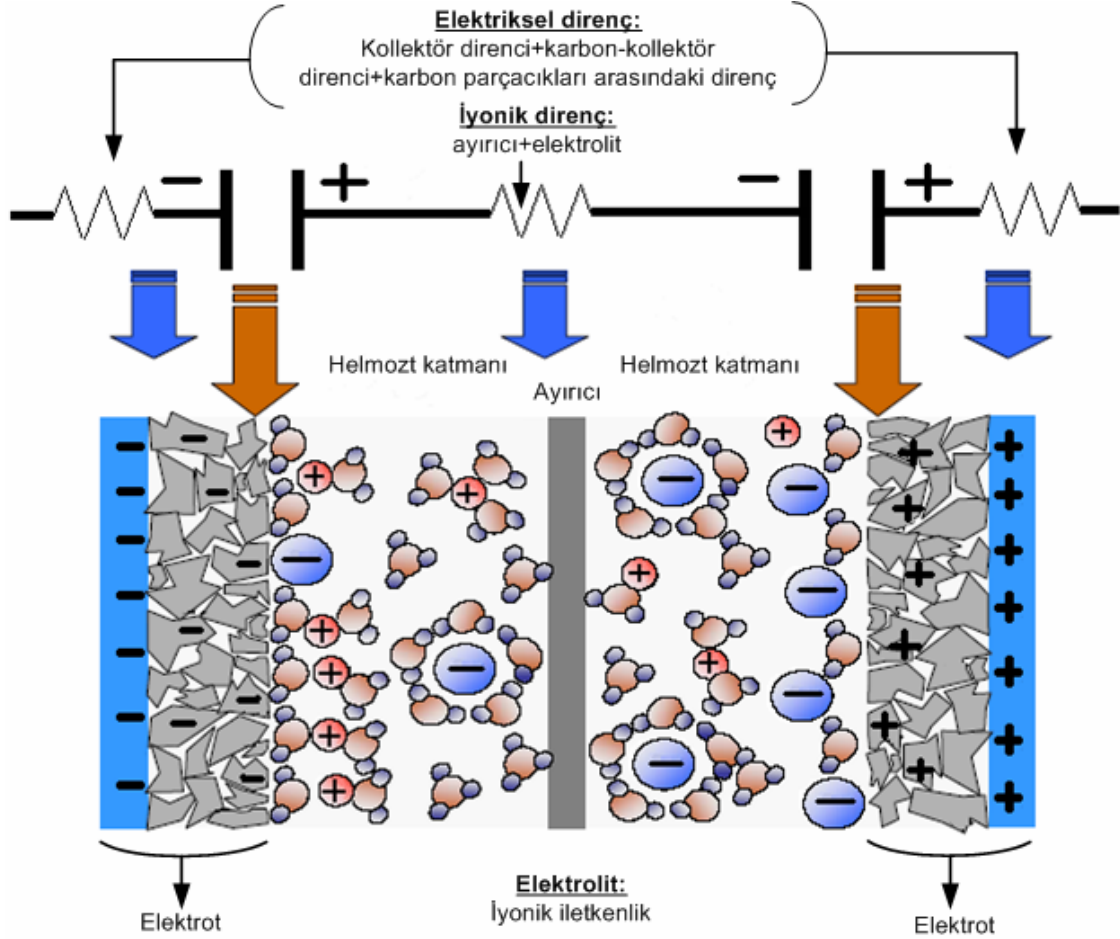
Çizelge 2.1’de özellikleri verilen YH sistemleri arasında, yüksek verimliliğinin yanı sıra, hacim ve ağırlık açısından sahip olduğu avantajları nedeniyle PEMYH sistemleri, günümüzde taşıt uygulamaları için en uygun yakıt hücresi sistemleridir. PEMYH sistemine sahip bir taşıtın kullanılması ile konvansiyonel 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.

2.3 Ultra-kapasitör Sistemleri

2.3.1 Ultra-kapasitör Teknolojisine Genel Bir Bakış

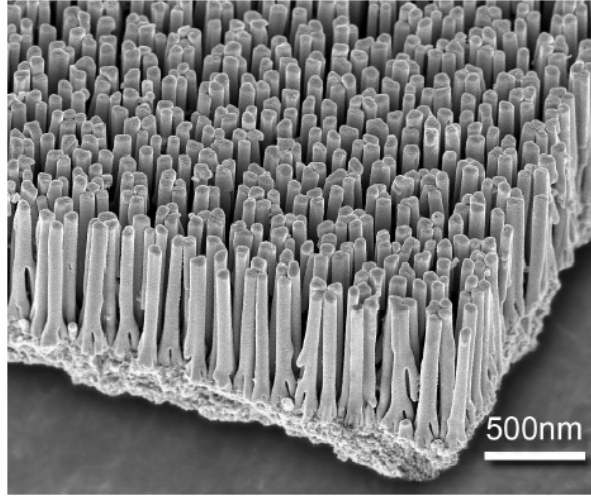
UK’ların gelişim sürecinin başlangıcı kabul edilen elektro-kimsayal kapasitörler, 1957 yılında Becker tarafından yapılan patent başvurusu ile literatüre girmiştir. Elektro-kimsayal

kapasitörlerin ticarileştirme süreci ise 1969'un sonlarına doğru "Standart Oil" (SOHIO) tarafından başlatılmıştır. Zamanla elektro-kimyasal kapasitörlerde daha yüksek kapasiteye ulaşma çabaları, ultra-kapasitörlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. İlk UK prototipleri ise 1982 yılında "Pinnacle Araştırma Enstitüsü"nde askeri amaçlar için geliştirilmiştir (Burke, 2000).



Şekil 2.6 UK'nın elektrokimyasal çift katmanlı yapısı (Maxwell, 2006).

UK'lar, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi temel olarak, elektrik enerjisinin depolandığı elektro-kimyasal çift katmanlı bir yapı üzerinde çok sayıda yüzeyel elektrotlardan ve bir ayırıcı yüzeyden oluşmaktadırlar. Ayırıcı yüzey elektrotlar arasında teması fiziksel olarak engellemekte, fakat iyon geçişine izin vermektedir (Kötz ve Kalen, 2000; Gualous vd., 2003).



Şekil 2.7 UK'nın yapısında yer alan nano boyutlardaki yüzeysel elektrotlar (Scrosati vd., 2007).

UK'lar sahip oldukları yüksek gözenekli karbon yapı ve buna bağlı olarak yüksek yüzey alanı sayesinde sıradan kapasitörlerden çok daha yüksek kapasite değerlerine sahiptirler. UK'nın yapısındaki yüzeysel elektrotlar, Şekil 2.7'de de görüldüğü gibi nano boyutlarda olup yüzey alanını ve buna bağlı olarak kapasite değerini çok yüksek değerlere çıkarmaktadır (Kötz ve Kalen, 2000). Sahip olduğu yüksek kapasite değeri ile birlikte UK'lar, birçok açıdan konvansiyonel kapasitörlerden daha avantajlı konuma gelmiş, birçok kullanım alanında da bataryaların yerini almaya başlamıştır.

2.3.2 Enerji Depolama Sistemi olarak Ultra-kapasitörler ile Bataryaların Karşılaştırılması

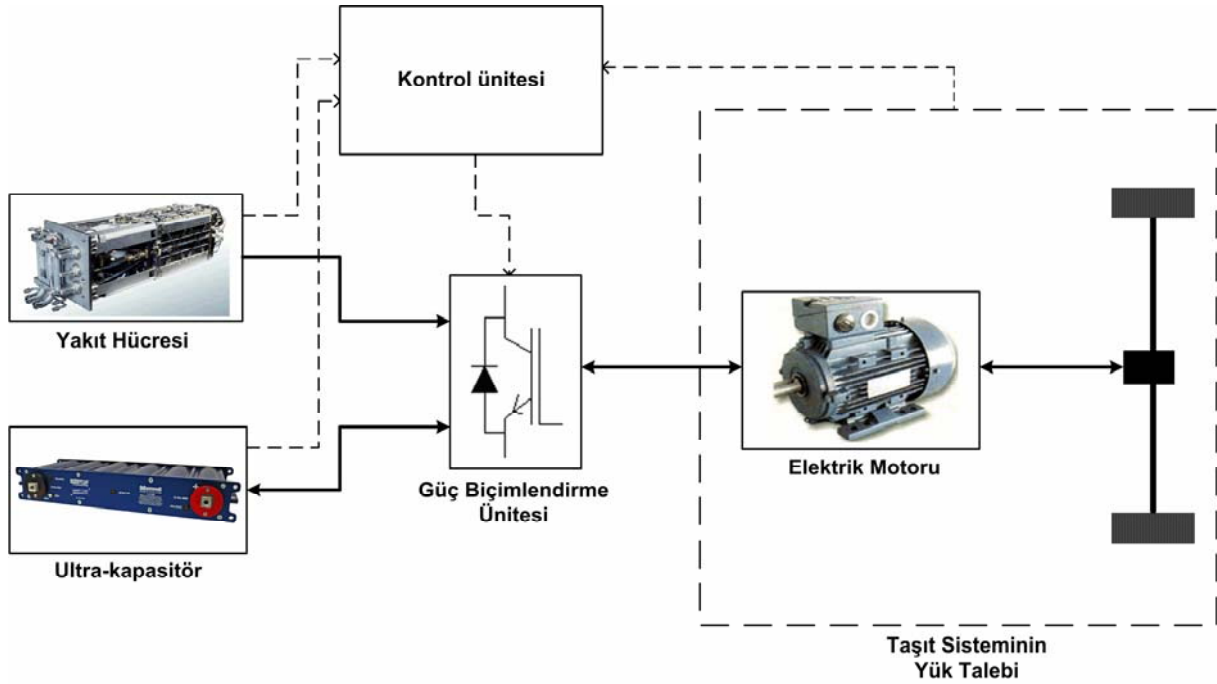
Hibrit yakıt hücresi sistemlerinde kullanılacak enerji depolama sisteminin belirlenmesi, sistem performansı açısından oldukça önemlidir. Enerji depolama fikri ortaya çıktığından beri enerji sistemlerinde genellikle bataryalar kullanılmaktaydı. Ancak bataryanın yapısından kaynaklanan çeşitli kısıtlamaların da etkisiyle alternatif enerji depolama sistemleri elde etmek için yapılan çalışmalar, günümüzde özellikle bataryalara karşı birçok avantajı olan UK'ların eksik yanlarının giderilmesi üzerine odaklanmış durumdadır. UK'lar, birçok küçük sistemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak UK'ların avantajları, özellikle elektrikli taşıt sistemleri gibi yapılar ele alındığında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Jung, 2003). 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 etkindirler (Lajnef vd., 2007). Bataryaların hızlı değişen yüklere yeterince hızlı cevap verememesi, UK'ların nispeten daha önemli bir

konuma gelmesine yol açmaktadır (Ferreira, 2008). Üstelik tekrar şarj edilebilen bataryalar, içerisindeki kimyasal reaksiyonların etkisiyle genellikle birkaç bin çevrimlik bir ömre sahipken, UK'lar bir milyon çevrime kadar varan çok yüksek bir ömre sahiptirler (Maxwell, 2006; Farsi ve Gobal, 2007). Ayrıca bataryalar yüksek akım darbelerine ve hızlı şarj-deşarj durumuna maruz kaldıklarında ömürleri daha da azalmaktadır (Bentley vd., 2005). Bunların da ötesinde belki de UK'ların en önemli avantajlarından biri, çalışmasının sıcaklık değişimlerinden neredeyse hiç etkilenmemesidir. UK'lar, bataryalar için en kötü çalışma şartlarından biri olan -40°C 'lik sıcaklıklarda bile başarıyla çalışabilmektedirler (Schindall, 2007).

Ticari olarak günümüzde üretilen UK'lar, aynı boyut veya ağırlıktaki bir batarya ile kıyaslandığında oldukça fazla bir güç yoğunluğuna sahiptir (Burke, 2000). Ancak enerji yoğunlukları göz önüne alındığında, UK'lar bataryalara göre dezavantajlıdır (Bentley vd., 2005). Aynı boyut veya ağırlıktaki bir batarya ile karşılaştırıldığında UK'nın depolayabildiği enerji miktarı, bataryanın depolayabildiği enerji miktarının ancak %5'i kadardır. UK'ların düşük enerji yoğunluklarının artırılmasını hedefleyen çalışmalar günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir. UK'ların yapısına farklı bileşenler ekleyerek enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla, konusunda uzman kişiler tarafından gelişmiş laboratuvarlarda detaylı çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle UK yapısındaki karbon yerine nanotüpler yerleştirildiğinde bir UK'nın, aynı boyut veya ağırlıktaki bir bataryanın depolayabildiği enerji miktarının en az %25'ine, hatta belki de %50'sine varan oranlarda enerji depolayabilmesinin sağlanabileceği öngörülmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar için birçok ülke büyük miktarda araştırma fonları ayırmaktadır (Schindall, 2007). Yapılan yoğun geliştirme çalışmalarının sonucunda, UK'ların yakın bir gelecekte enerji depolama sistemi olarak birçok alanda olduğu gibi YH sistemine sahip taşıtlarda da çok yaygın bir biçimde kullanılabileceği öngörülmektedir.

3. SİSTEM TANIMLAMASI ve METODOLOJİ

Bu bölümde, oluşturulan hibrit taşıt sistemi için geliştirilen PEMYH ve UK modelleri, sistem için tasarlanan enerji yönetim stratejisi ve güç biçimlendirme ünitesi tanıtılmaktadır. Geliştirilen sistem, bir YH yığınınından, UK modülünden, taşıt sisteminin farklı sürüş çevrimleri altındaki yük talebini temsil eden yük modelinden, kontrol ve güç biçimlendirme ünitelerinden oluşmaktadır. Geliştirilen sisteme ait genel blok diyagramı, Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Geliştirilen sisteme ait genel blok diyagramı

3.1 PEM Yakıt Hücresi Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı

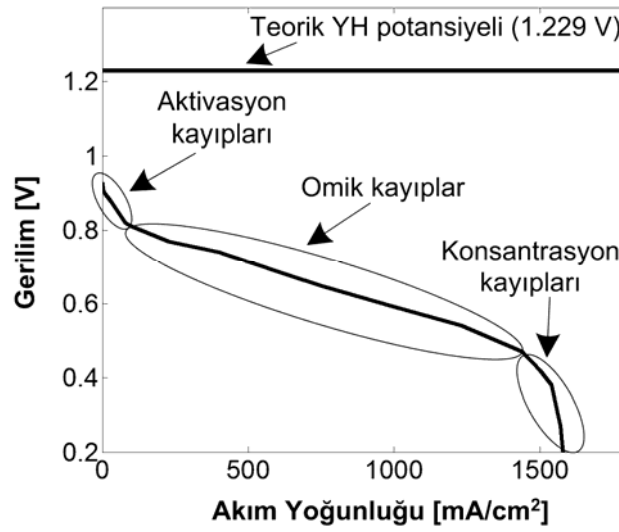
Oluşturulan hibrit YH/UK taşıt sisteminde PEMYH ana güç kaynağıdır ve temel yük talebini karşılamada kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen PEMYH dinamik benzetim modeli, YH potansiyelinde tersinemez kayıpların etkisiyle oluşan değişimin sıcaklık, akım ve basınç gibi parametrelere bağlı matematiksel ifadelerle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

Çizelge 3.1 PEMYH modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler

A	Aktivasyon alanı [cm^2 (hücre $^{-1}$)]
B	Konsantrasyon kayıplarının modellenmesinde kullanılan sabit [V]
C	YH çift katmanlı kapasitesi [F]
C_{O_2}	Çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu
E_{Nernst}	Nernst anlık gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [C (kmol) $^{-1}$]
I_{YH}	YH akımı [A]
J	Akım yoğunluğu [A (cm)^{-2}]
J_{maks}	Azami akım yoğunluğu [A (cm)^{-2}]
ℓ	Membran kalınlığı [μm]
N_s	Yığındaki seri YH sayısı
N_p	YH yığını sayısı
P_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
P_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı [atm]
q_{H_2}	Yük değişimini karşılamak için gerekli olan hidrojen akış miktarı [kmol (sn)^{-1}]
r_m	Nafion proton değişimli membranın öz direnci [$\Omega (\text{cm})^2 \text{m}^{-1}$]
R_a	Aktivasyon ve konsantrasyon dirençlerinin toplamını ifade eden eşdeğer direnç [Ω]
R_c	Membran ve elektrotlar arasındaki kontak direnci [Ω]
R_m	Eşdeğer membran direnci [Ω]
R_{omik}	YH iç direnci [Ω]
T	YH yığını sıcaklığı [$^{\circ}\text{K}$]
$T_0, T_{rb}, T_{ic}, T_{it}$	YH yığını sıcaklığı için modelleme sabitleri
V_{akt}	Aktivasyon gerilim düşümü [V]
V_d	R_a üzerindeki gerilim düşümü [V]
V_{kons}	Konsantrasyon gerilim düşümü [V]
V_{omik}	Omik gerilim düşümü [V]
V_{YH}	YH gerilimi [V]
$V_{Yığın}$	YH yığını gerilimi [V]
λ	Membrandaki su içeriği
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	Aktivasyon gerilim düşümünün modellenmesinde kullanılan sabitler

Normal koşullar altında (25°C ve 1 atm) hidrojen ve oksijen ile beslenen ve kimyasal denklemler sonucunda çıkışında ürün olarak sadece su oluşan bir YH'nın ideal standart gerilimi 1.229 V'tur. Fakat gerçek YH gerilimi, oluşan tersinemez kayıplardan dolayı bu referans değerden daha düşük seviyelere inmektedir. YH'lar için; aktivasyon kayıpları, omik kayıplar ve konsantrasyon kayıpları olmak üzere üç çeşit tersinemez kayıp söz konusudur.

Düşük akım yoğunluklarında, oksijenin indirgenmesine ait kimyasal reaksiyonda meydana gelen aktivasyon kayıpları, YH geriliminin azalmasında önemli rol oynamaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında ise konsantrasyon kayıpları YH geriliminin azalmasında büyük rol oynamaktadır. YH'deki kayıplar ve buna göre YH geriliminin 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 az bir eğimle değiştiği bölgeye karşılık gelen lineer çalışma bölgesidir (Barbir, 2005; Kisacikoglu vd., 2008). YH sistemini en verimli olduğu bu lineer bölgede çalıştırmak, genel sistem verimliliği açısından oldukça önemlidir.



Şekil 3.2 Örnek YH kutuplanma eğrisi (Barbir, 2005)

Buna göre, YH'deki bu kayıplar göz önünde bulundurularak YH'nin çıkış gerilimi temel olarak (Andujar vd., 2008; Park ve Choe, 2008),

$$V_{YH} = E_{Nernst} - V_{akt} - V_{kons} - V_{omik} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada Nernst anlık geriliminin ifadesi (Mann vd, 2000, Xue vd., 2004),

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T \times \ln(P_{H_2} + \frac{1}{2} P_{O_2}) \quad (3.2)$$

biçimindedir. Eşitlik 3.2'de yer alan hidrojen ve oksijenin kısmi basınçları, akımla ters orantılı biçimde doğrusal olarak bir alt ve bir üst sınır arasında değişecek şekilde ele alınmıştır. Eşitlik 3.2'deki sıcaklık ifadesinin YH akımına bağlı olarak değişimi ise Eşitlik 3.3'teki gibi ifade edilebilmektedir (Zhang vd., 2006):

$$T = 273 + T_0 + (T_0 - T_{rt} + T_{ic} \times I_{YH})(1 - \exp(-\frac{t \times I_{YH}}{T_{it}})) \quad (3.3)$$

YH’de gerçekleşen aktivasyon kayıpları ise (Pathapati vd., 2005; Adzakpa vd., 2008),

$$V_{akt} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(I_{YH}) + \xi_4 \ln(C_{O_2}) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir

Burada çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu (Khan ve Iqbal, 2005; Pathapati vd., 2005),

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)} \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

YH’deki omik kayıplar, katı polimer elektrodun proton iletkenliği ve YH’nin elektronik iç direnci ile bağlantılı olan $I \times R$ gerilim düşümünün bir ölçüsüdür. Buna göre YH’nin omik kayıpları (Andujar vd., 2008),

$$V_{omik} = I_{YH} \times R_{omik} = I_{YH} \times (R_m + R_c) \quad (3.6)$$

biçiminde ifade edilmektedir Burada eşdeğer membran direnci, Ohm kanunu kullanılarak,

$$R_m = \frac{r_m \times \ell}{A} \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir.

YH’nin akım yoğunluğu,

$$J = \frac{I_{YH}}{A} \quad (3.8)$$

şeklinde belirtilmek üzere, Eşitlik 3.7’deki Nafion proton değişimli membranın öz direncinin ifadesi (Mann vd., 2000; Andujar vd., 2008),

$$r_m = \frac{181.6[1 + 0.03 \times J + 0.062 \times (\frac{T}{303})^2 \times J^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3 \times J] \exp[4.18 \times (\frac{T - 303}{T})]} \quad (3.9)$$

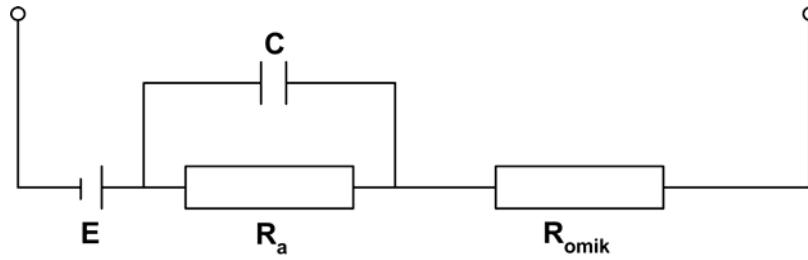
biçimindedir.

YH sisteminin yüksek akım yoğunluklarında çalışacağı durumlarda göz önüne alınması

gereken konsantrasyon kayıplarının değişimi ise Eşitlik 3.10'daki gibi hesaplanmaktadır (Park ve Choe, 2008).

$$V_{kons} = B \times \ln\left(1 - \frac{J}{J_{maks}}\right) \quad (3.10)$$

YH içerisinde gerçekleşen reaksiyonlarda yük akımı ile YH çıkış gerilimini ilişkilendiren en önemli kimyasal olaylardan bir tanesi de çift katmanlı kapasitör etkisidir (Adzakpa vd., 2008). Çift katmanlı kapasitörün de hesaba katıldığı YH elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3.3'te görülmektedir (Pathapati vd., 2005).



Şekil 3.3 YH elektriksel eşdeğer devresi

Burada aktivasyon ve konsantrasyon dirençlerinin toplamını ifade eden eşdeğer R_a direncinin değişimi Eşitlik 3.11'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır (Adzakpa vd., 2008).

$$R_a = \frac{V_{akt} + V_{kons}}{I_{YH}} \quad (3.11)$$

Buna göre aktivasyon ve konsantrasyon gerilim düşümlerinin ve çift katmanlı kapasitör etkisinin de göz önüne alındığı R_a üzerindeki gerilim düşümünü belirten diferansiyel eşitlik (Khan ve Iqbal, 2005; Pathapati vd., 2005);

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_{YH}}{C} - \frac{V_d}{R_a \times C} \quad (3.12)$$

şeklinde elde edilmektedir.

Buna göre, YH'nın termal ve momentum karakteristiği ile kütle transferi de göz önüne alınarak, YH'nın çıkış geriliminin değişimi Eşitlik 3.13'teki şekilde elde edilmektedir (Khan ve Iqbal, 2005; Adzakpa vd., 2008).

$$V_{YH} = E_{Nernst} - V_d - V_{omik} \quad (3.13)$$

Eğer YH yığını N_s sayıdaki seri olarak bağlı YH hücresinden oluşmuş ise YH yığına ait çıkış gerilimi

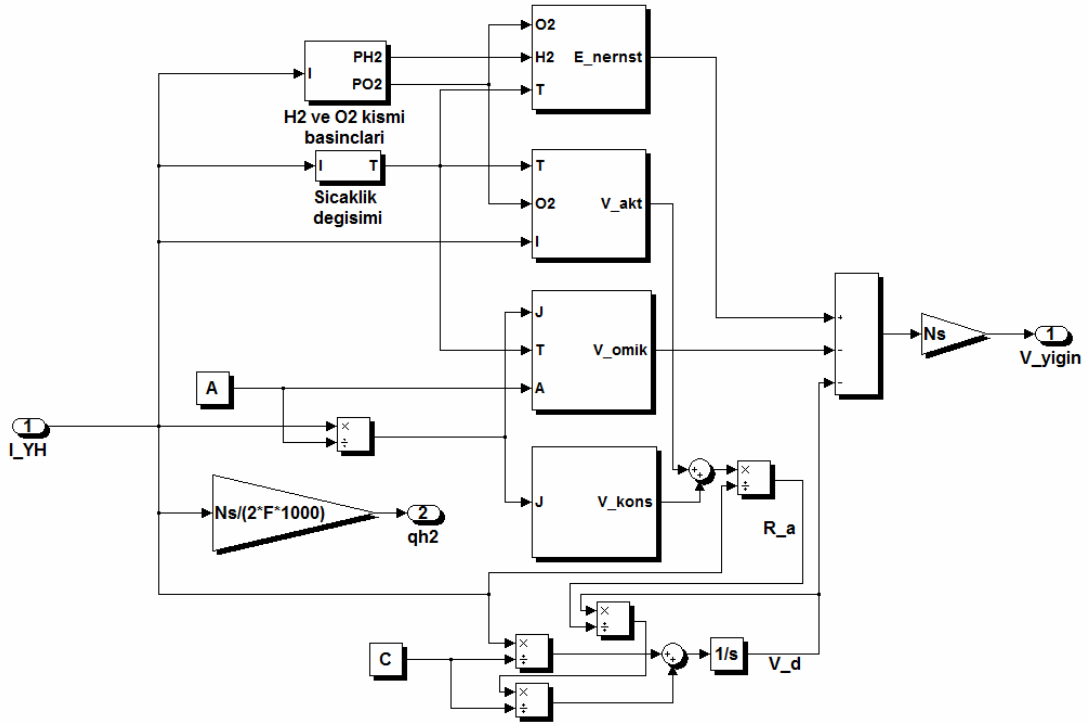
$$V_{Yigin} = N_s \times V_{omik} \quad (3.14)$$

biçiminde ifade edilmektedir.

Son olarak, YH sisteminin hidrojen tüketimi (Xue vd., 2004),

$$q_{H_2} = \frac{I_{YH} \times N_s}{2F} \times 10^{-3} \quad (3.15)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 3.4 YH sisteminin dinamik modeli

Eşitlik 3.1-3.15 kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan PEMYH modeli Şekil 3.4'te görülmektedir. Bu model daha sonra genel sisteme, kontrollü gerilim kaynağı olarak adapte edilmiştir.

3.2 Ultra-kapasitör Sisteminin Dinamik Modellenmesi ve Tasarımı

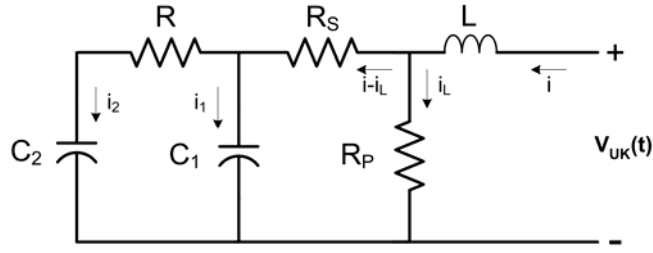
UK'ların doğal yapısı kısa süreli ani güç taleplerini karşılamak için oldukça uygundur. UK modülü, yük talebi ve YH sistemi çıkış gücü arasındaki farkı karşılamak için tasarlanmıştır. Bu bölümde benzetimde kullanılan UK sisteminin matematiksel modeli açıklanmaktadır. UK modelinin oluşturulmasında kullanılan 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 [F]
E_{UK}	UK sisteminden sağlanan enerjinin miktarı [Wh]
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 durumu
V_B	UK’nındeşarjı esnasındaki başlangıç gerilimi [V]
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_S	UK’nındeşarjı bitimindeki son gerilimi [V]
V_{UK}	UK çıkış gerilimi [V]

Literatürde en çok kullanılan UK modeli bir kapasitör, bir eşdeğer iç direnç ve boştaki kayıpları gösteren bir eşdeğer paralel dirençten oluşan klasik RC eşdeğer devresidir (Hauer, 2001; Miller, 2006; Pagano ve Piegari, 2007). Klasik RC devresi bir çok uygulama için kullanışlıdır, ancak son zamanlarda daha etkili UK modelleri geliştirilmiştir.

UK modelinin oluşturulmasında yararlanılan eşdeğer devre Şekil 3.5’te gösterilmektedir. Eşdeğer devrede R_s ve C_1 ’den oluşan RC kolu, “hızlı kol” olarak adlandırılmakta ve UK’nın saniyeler mertebesindeki anlık cevabını temsil etmektedir. R ve C_2 ’den oluşan RC kolu ise “yavaş kol” olarak adlandırılmakta ve şarj vedeşarj sonrasında UK’nın içerisindeki enerji dağılımını temsil etmektedir (Gualous vd., 2003). UK seri endüktansı, L , oldukça küçük bir değere sahiptir ve hızlı değişen yük durumlarında etkisini göstermektedir. Ayrıca R_p paralel direnci, depolanan enerjinin açık devre durumunda ne kadar süre mevcut kalabileceğini değerlendirebilmek açısından önemli bir etken olan boştaki kayıpları temsil etmektedir (Rafik vd., 2007).



Şekil 3.5 UK benzetim modelinin geliştirilmesinde yararlanılan eşdeğer devre.

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

$$V_{UK} = V_{C_1} - V_{R_S} - V_L \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eşitlik 3.16'daki V_{R_S} ifadesi,

$$V_{R_S} = R_S \times (i - i_L) \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca V_L , Eşitlik 3.18 kullanılarak elde edilebilir;

$$V_L = L \times \frac{di}{dt} \quad (3.18)$$

Oluşturulan UK modelinde kullanılan kapasitörlere ait gerilim ifadeleri ise,

$$V_{C_1} = V_C^0 - \frac{1}{C_1} \times \int i_1 dt \quad (3.19)$$

ve

$$V_{C_2} = V_C^0 - \frac{1}{C_2} \times \int i_2 dt \quad (3.20)$$

biçimindedir. Eşitlik 3.17, 3.19 ve 3.20'de kullanılan akım ifadeleri,

$$i_L = \frac{V_{R_p}}{R_p}, \quad (3.21)$$

$$i_1 = i - i_L - i_2 \quad (3.22)$$

ve

$$i_2 = \frac{V_{C_1} - V_{C_2}}{R} \quad (3.23)$$

şeklinde belirtilebilir.

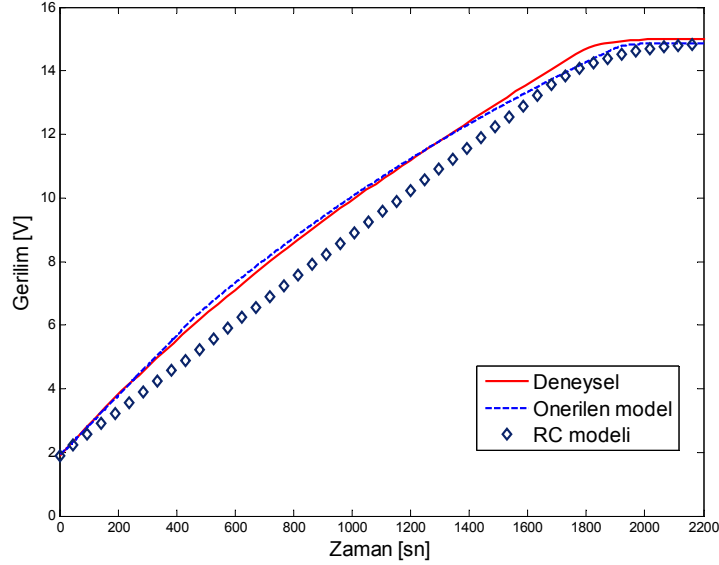
UK performansını değerlendirmede önemli bir faktör olan UK'nın şarj durumu;

$$i_2 = \frac{V_{UK}}{V_{maks}} \quad (3.24)$$

olarak gösterilebilir. Son olarak, UK sisteminden sağlanan enerjinin miktarı;

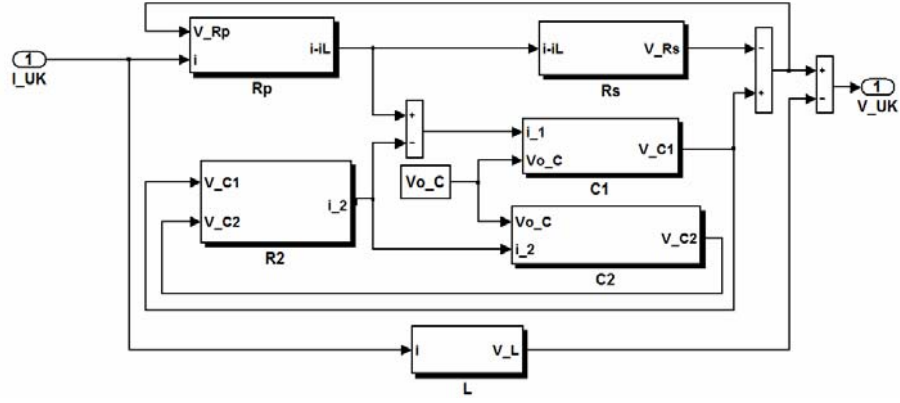
$$E_{UK} = \frac{I}{2} C_I (V_B^2 - V_S^2) \quad (3.25)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 3.6 430 F ve 16.2 V parametrelerine sahip UK'nın 23°C'de 3 A'lık akım için çıkış gerilimindeki değişim

Önerilen modelin geçerliliğini kanıtlamak amacıyla bir deney seti kurulmuş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, bir şarj profili altında Maxwell® 430F, 16 V UK'nın dinamik gerilim cevabı incelenmiştir. Şekil 3.6'da, 23°C'de 3 A'lık şarj durumu altında 430 F, 16 V'luk UK için deneysel çalışmalar ile birlikte, önerilen UK modelinin ve klasik RC modelinin benzetim sonuçları gösterilmektedir. Önerilen modelin benzetim sonuçlarının ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların oldukça benzerlik gösterdiği Şekil 3.6'da açıkça görülmektedir. Önerilen modelin klasik RC modeliyle kıyaslandığında daha doğru sonuçlar verdiği de Şekil 3.6'da görülebilmektedir.

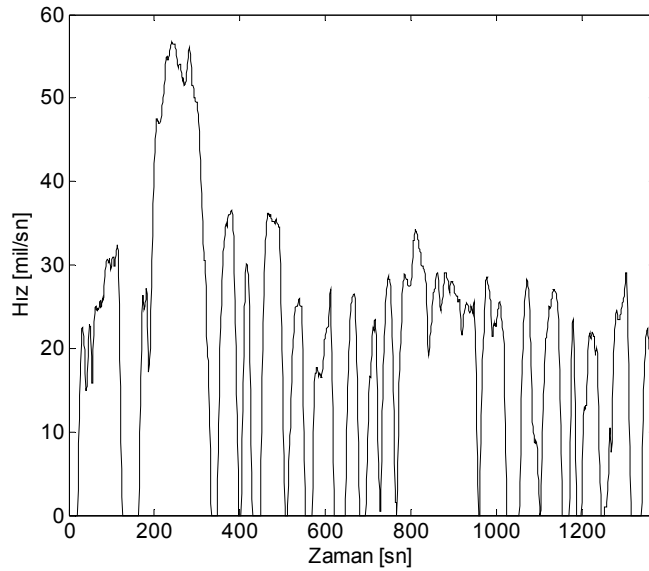


Şekil 3.7 UK sisteminin dinamik modeli

Eşitlik 3.16 - 3.25'ten yararlanılarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan UK modeli Şekil 3.7'da görülmektedir. Oluşturulan bu model sonra bütün sisteme kontrollü gerilim kaynağı olarak entegre edilmiştir.

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 ve Avrupa şehir içi sürüş çevriminden (ECE-15) yararlanılmıştır.



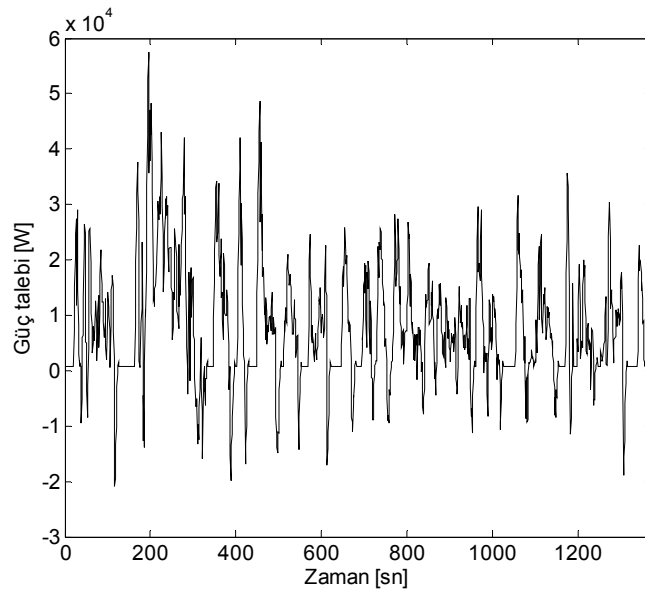
Şekil 3.8 UDDS sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.

UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın hız değişimi zamanın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.8'de gösterilmektedir. UDDS sürüş çevriminin karakteristikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3 UDDS sürüş çevriminin özellikleri

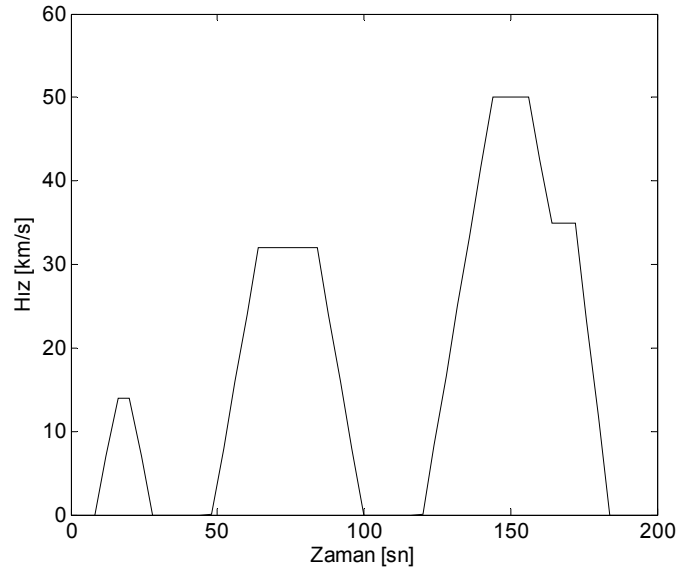
Zaman	1369 [sn]
Menzil	7.45 [mil]
Azami hız	56.7 [mil/s]
Ortalama hız	19.6 [mil/s]
Azami ivmelenme	1.48 [$\text{m (sn}^2\text{)}^{-1}$]
Azami yavaşlama	-1.48 [$\text{m (sn}^2\text{)}^{-1}$]
Ortalama ivmelenme	0.51 [$\text{m (sn}^2\text{)}^{-1}$]
Ortalama yavaşlama	0.58 [$\text{m (sn}^2\text{)}^{-1}$]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

UDDS sürüş çevrimindeki hız değişimine bağlı olarak taşıtın güç talebi ise Şekil 3.9’da 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 3.9 UDDS sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.

ECE-15 şehir içi sürüş çevriminin zamana bağlı olarak hızlanma eğrisi Şekil 3.10’da görülmektedir. Sürüş çevrimi içerisindeki maksimum hız 50 km/s’tir. Ayrıca ECE-15 sürüş çevrimi 200 saniye boyunca çeşitli ivmelenmeler ve yavaşlamaları içermektedir. Bu güç talebine ait özellikler Çizelge 3.4’te belirtilmektedir.

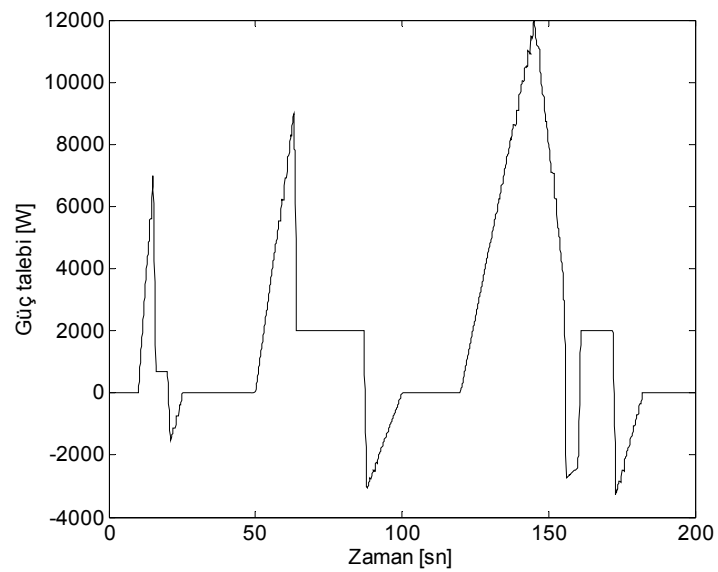


Şekil 3.10 ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıt hızının zamana bağlı olarak değişimi.

Çizelge 3.4 ECE-15 sürüş çevriminin özellikleri

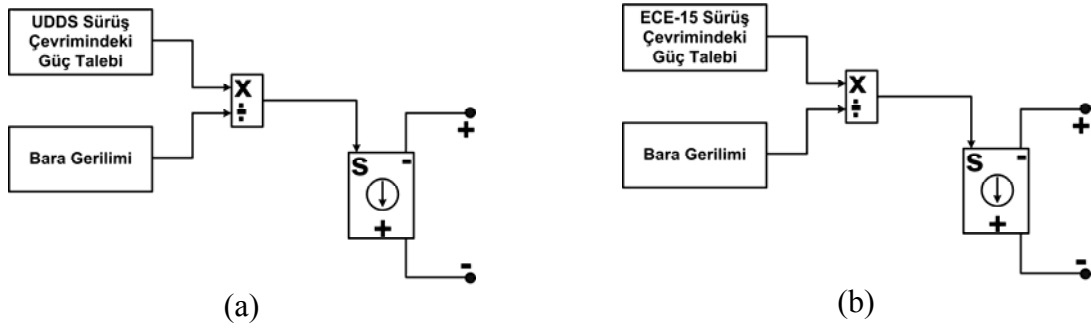
Zaman	200 [sn]
Menzil	1.05 [km]
Azami hız	50 [km/sn]
Ortalama hız	18.9 [km/s]
Azami ivmelenme	5 [km/sn/s]
Boşta çalışma zamanı	%29.2

ECE-15 sürüş çevrimini tamamlayacak bir taşıt için güç-zaman verisi ise Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11 ECE-15 sürüş çevrimine göre taşıtın güç talebi.

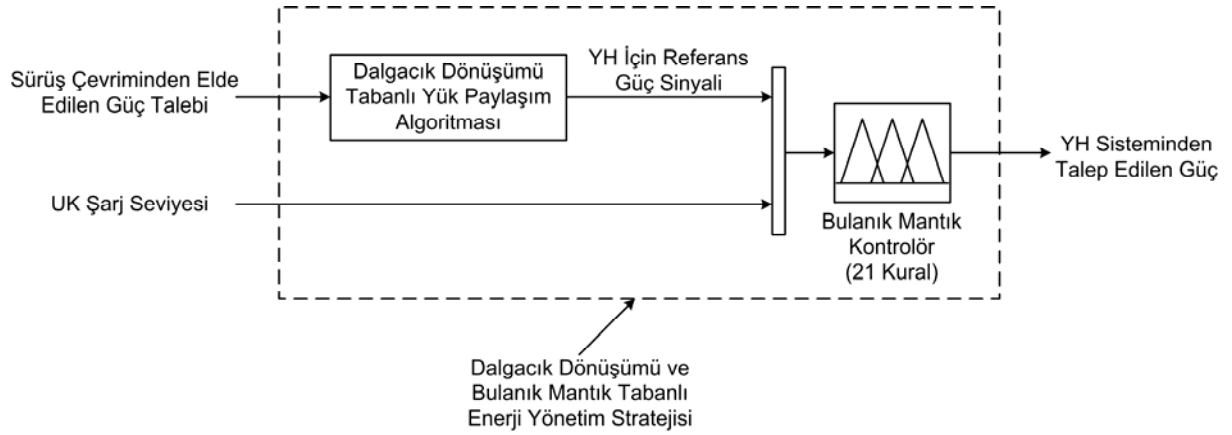
UDDS ve ECE-15 yük profilleri kullanılarak MATLAB, Simulink ve SimPowerSystems ortamlarında oluşturulan yük modelleri ise sırasıyla Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Sürüş çevrimleri kullanılarak oluşturulan yük modelleri: a) UDDS sürüş çevrimi, b) ECE-15 sürüş çevrimi

3.4 Hibrit Sistem İçin Oluşturulan Enerji Yönetim Stratejisi

Bu alt bölümde, dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi stratejisi tanıtılmaktadır. Oluşturulan enerji yönetim stratejisine ait şematik gösterim Şekil 3.13’te yer almaktadır.

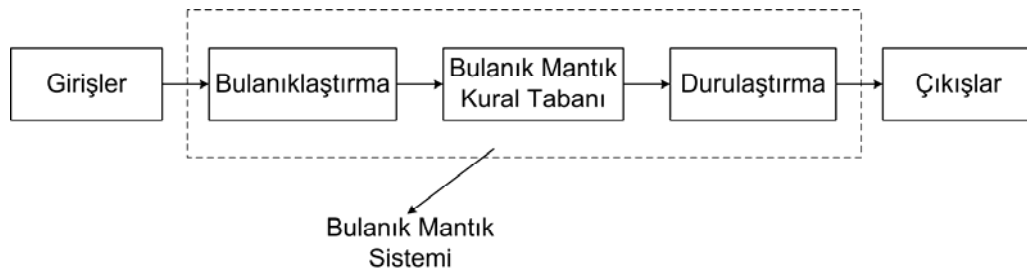


Şekil 3.13 Oluşturulan enerji yönetim stratejisine ait şematik gösterim

Geliştirilen enerji yönetimi yapısında bulanık mantık kontrolör, YH sisteminin güç değişimini ve UK sisteminin şarj seviyesini kontrol ederek genel sistemdeki güç akışını düzenlemektedir. Dalgacık dönüşümü algoritmasının kullanılmasının sebebi ise, taşıt sisteminin güç talebindeki anlık değişimleri YH sistemine hissettirmemek ve bu sayede de YH ömrünü ve performansını arttırmaktır. Hibrit sistem için oluşturulan enerji yönetim stratejisinin detaylı açıklaması, Bölüm 3.4.1 ve 3.4.2’de yer almaktadır.

3.4.1 Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Sistemi

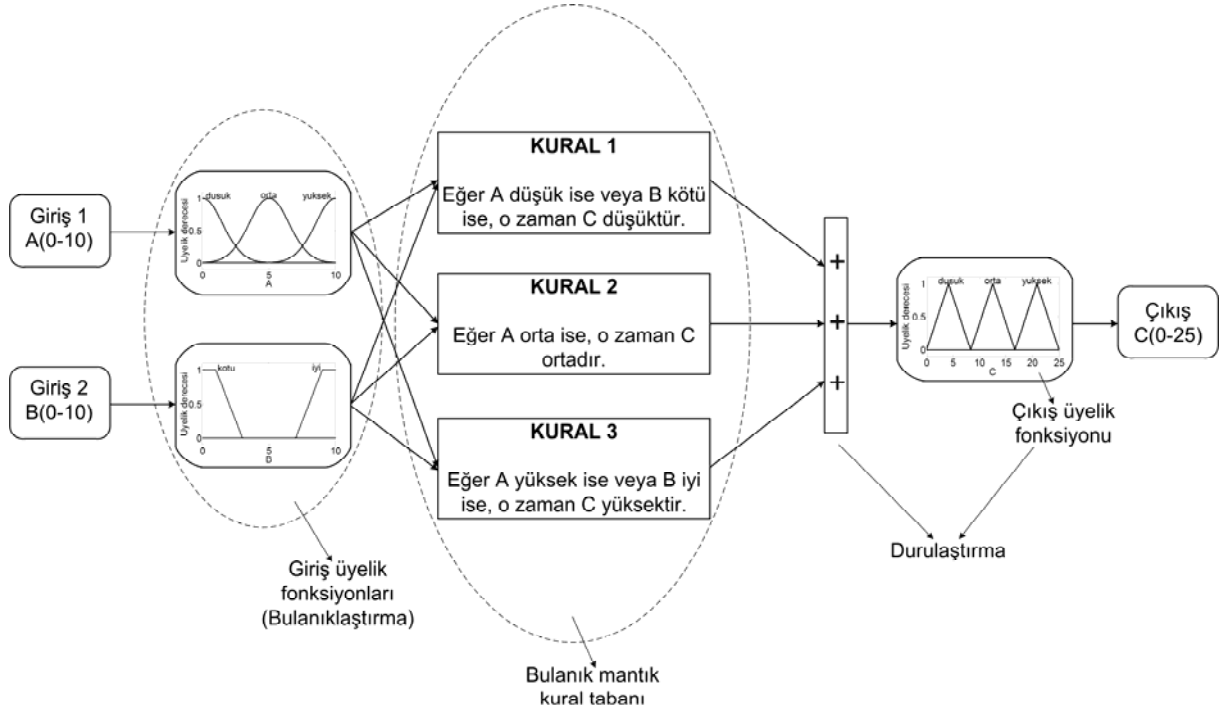
Oluşturulan hibrit sistemin güç akışının kontrolünde, hibrit enerji sistemlerinin kontrolü açısından oldukça uygun bir yapıya sahip olan bulanık mantık kontrolörden yararlanılmıştır (Wang, 1997; Leondes, 1998; Kisacikoglu, 2007). İlk defa Zadeh tarafından ortaya konulan ve günümüzde endüstriyel uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanı bulunan bulanık mantık sistemleri, klasik kontrol yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir (Zadeh, 2008). Bu kontrol yönteminin sağladığı en büyük fayda insana özgü tecrübe ile öğrenme olayının kolayca modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine imkân sağlamasıdır. Böylece bulanık mantık sistemleri, günlük hayatta sıkça karşılaşılan belirsizlik durumlarında kullanılmaya oldukça uygun bir yapıdadır. Bu avantajları sayesinde birçok farklı alanda kullanım açısından oldukça ilgi çekici bir konuma gelmiştir (Chen ve Huang, 2008). Ancak bulanık mantık ile ilgili en önemli uygulamalar kontrol alanında yoğunlaşmaktadır (Wang, 1997; Leondes, 1998). Bulanık mantık kontrolör özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan modellerdeki süreçleri değerlendirmek için oldukça uygundur (Wang, 1997). Uygulanacağı sisteme ait komple bir matematiksel modelin geliştirilmesini gerektirmeyen bulanık mantık kontrolörler, “EĞER-O ZAMAN” ifadelerini içeren bir kurallar bütününden oluşmaktadır. Kuralların ‘EĞER’ kısımları girişlerin bölgelerini nitelemektedir. Bir giriş, üyelik fonksiyonunun derecesine göre bu bölgelere aittir. Kuralların ‘O ZAMAN’ kısımları ise çıkış değişkeninin değerini belirlemektedir. Kontrolörün çıkışını elde etmek için bütün kuralların ‘EĞER’ kısımlarına ait üyelik fonksiyonlarının derecelerinin ortalaması alınır ve üyelik dereceleri ile ağırlıklandırılır (Schouten vd., 2003; Jeong vd., 2005). Oluşturulan kurallar, çıkışlar ve girişler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi modellemekte ve kontrol işlemi, kuralların içeriğine göre bulanıklaştırma ve durulaştırma operatörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Jeong vd., 2005; Chu vd., 2008). Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim Şekil 3.14’te görülmektedir.



Şekil 3.14 Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim

Bulanık mantık kontrolörün işleyişini daha iyi kavramak açısından, örnek bir kontrol işlemini ele alabiliriz. Oluşturduğumuz örnek bulanık mantık kontrolör yapısı, A ve B ismi verilen iki

adet girişe ve C ismi verilen bir çıkışa sahiptir. A ve B girişlerinin 0 ile 10 arasında, C çıkışının ise 0 ile 25 arasında değiştiği farz edilmektedir. Basitçe oluşturulan örnek sistem için ise üç adet kural tanımlanmıştır. Örnek bulanık mantık diyagramının genel yapısı Şekil 3.15’te görülmektedir.

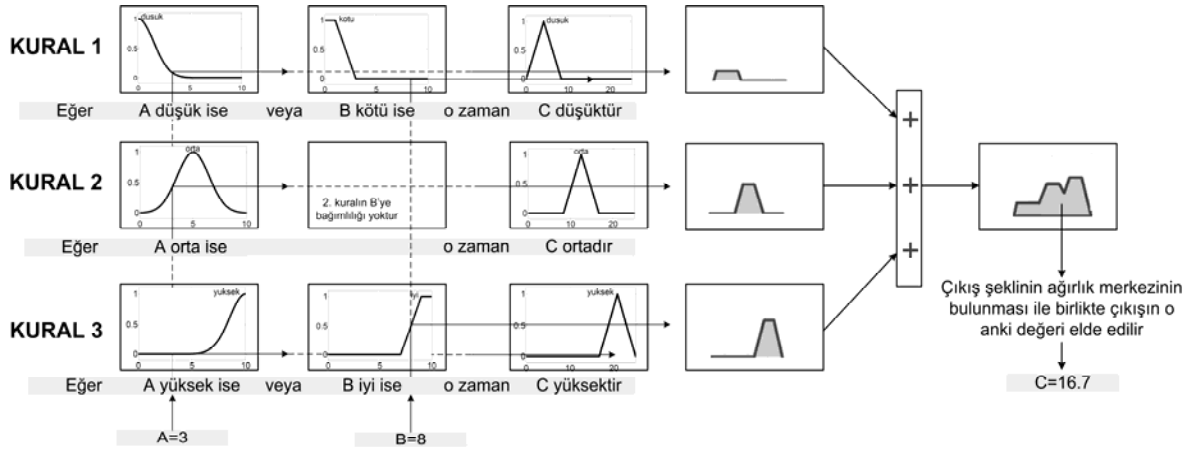


Şekil 3.15 Örnek bulanık mantık diyagramının genel yapısı

Örneğin A girişinin 3, B girişinin ise 8 olduğu bir durumda çıkış değerinin ne olacağını ele alalım. Bu durumda A=3 için A girişinin üyelik fonksiyonlarına karşılık gelen noktalar ile B=8 için B girişinin üyelik fonksiyonlarına karşılık gelen noktalar, Şekil 3.16’da da görüldüğü gibi kurallar göz önüne alınarak birleştirilir. Her kural için, çıkışın üyelik fonksiyonu için bir sonuç şekli oluşur. Her kural için oluşan bu şekiller durulaştırma işleminde birleştirilir ve o girişlere ait çıkış şekli ortaya çıkmış olur. Ortaya çıkan bu şeklin ağırlık merkezi;

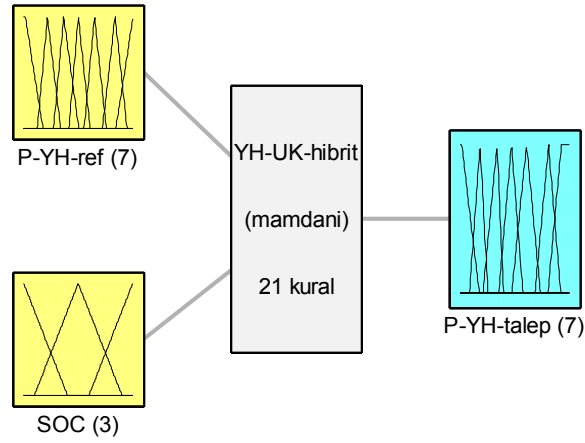
$$u((k+1)T) = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{U_i}(u_i(kT)) \times u(kT)}{\sum_{i=1}^N \mu_{U_i}(u_i(kT))} \quad (3.27)$$

ifadesine göre bulunarak da durulaştırma işlemi tamamlanır ve çıkışın o anki değeri elde edilmiş olur (Chen ve Pham, 2001). Burada “u” çıkışın değerini, “μ” ise üyelik derecesini temsil etmektedir. Örnek bulanık mantık yapımızda A=3 ve B=8 girişleri için çıkışın değeri Şekil 3.16’dan da görüldüğü gibi 16.7’dir.



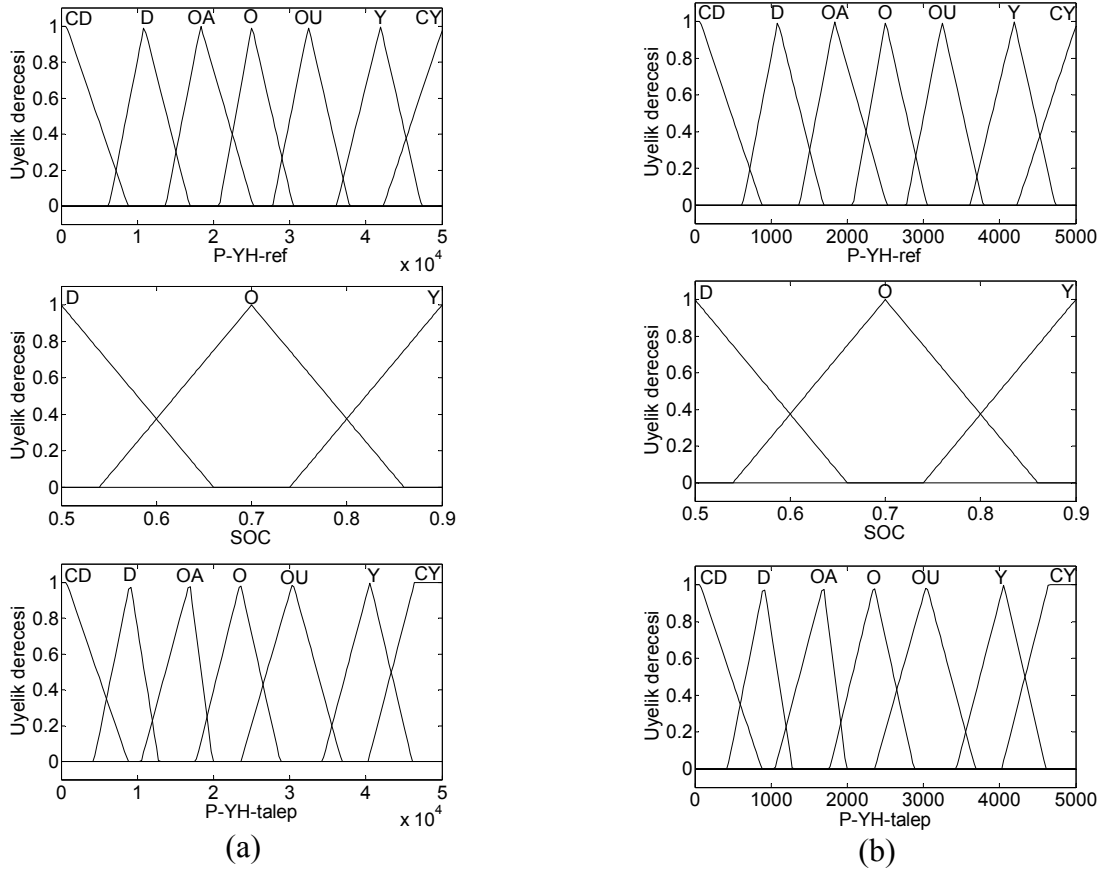
Şekil 3.16 Örnek bulanık mantık yapısının çalışma prensibi

Bu çalışmada kullanılan bulanık mantık kontrolör, Şekil 3.13 ve 3.17’te de görüldüğü üzere 2 giriş ve 1 çıkışa sahiptir. Bulanık mantık kontrolörün girişleri dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşım algoritması tarafından üretilen YH referans güç sinyali ve UK sisteminin şarj seviyesidir. YH referans güç sinyalinin üretilmesini sağlayan dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşım algoritması, daha sonra Bölüm 3.4.2’de detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Bulanık mantık kontrolör, bu iki girişten elde edilen bilgiyi kullanarak YH sisteminden talep edilecek güç değerini belirlemektedir. YH sistemi de, bulanık mantık kontrolörün belirlediği güç değerini yüke aktarmaktadır. Daha önceden de belirtildiği üzere UK sisteminin şarj seviyesi uygun bir seviyede tutulmalıdır. Bu nedenle önerilen hibrit sistemde bulanık mantık kontrolör yardımıyla UK’nın şarj seviyesinin 0.7 civarlarında tutulması hedeflenmektedir. Bu seviye, UK sisteminin talep edilen gücü sağlayabilmesi ve mevcut olan frenleme enerjisini verimli bir biçimde geri kazanabilmesi açısından oldukça uygundur ve literatürde de çalışmalarda kullanılmaktadır (Amrhein ve Krein, 2005). Eğer şarj seviyesi hedeflenen değerde ise, YH sistemi referans güç sinyalindeki güç değerini yüke aktarmaktadır. Eğer şarj seviyesi hedeflenen değer altındadır ise, YH sistemi UK’nın şarj seviyesini arttırmak amacıyla referans güç değerinden daha fazla bir gücü sisteme iletir. Benzer şekilde, eğer şarj seviyesi hedeflenen seviyenin üzerinde ise YH’nin sisteme aktardığı güç, referans güç değerinin altında olmaktadır. Böylece UK sisteminin şarj seviyesi istenen aralıkta kontrol edilirken, YH sistemi dalgacık dönüşümü tarafından sağlanan uygun bir transfer hızında sisteme güç aktarmaktadır. Ayrıca hem UK sisteminin şarj seviyesini uygun bir aralıkta tutabilmek, hem de YH sistemini en verimli olduğu bölgede çalıştırmak, genel sistem verimliliği açısından oldukça önemlidir. Gerçekleştirilen kontrol işlemi sayesinde YH sisteminin en verimli olduğu lineer bölgede çalışmasının sağlanması da hedeflenmektedir. Kısacası oluşturulan kontrol stratejisi sayesinde sistemin verimliliği artırılırken, YH sisteminin anlık güç taleplerine maruz kalması önlenilecektir.



Şekil 3.17 Oluşturulan bulanık mantık kontrolör yapısı.

Şekil 3.18’de ise UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimleri için oluşturulan bulanık mantık kontrolörün girişlerine ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları gösterilmektedir.



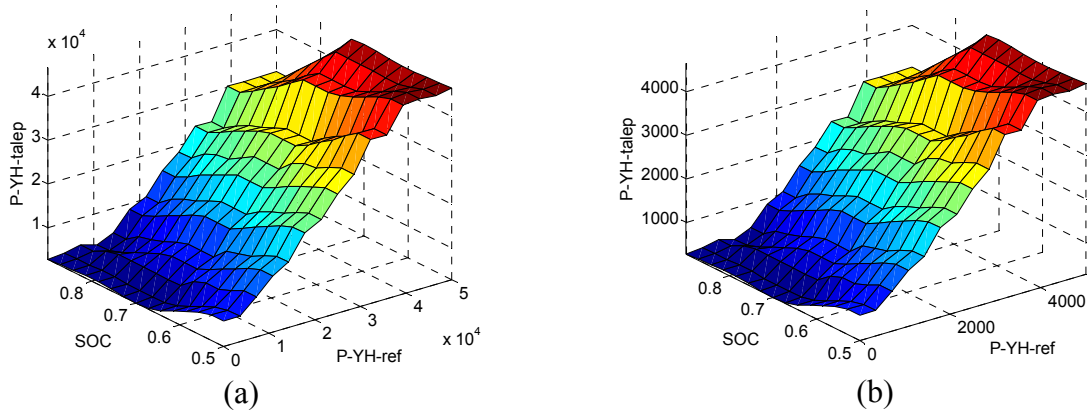
Şekil 3.18 Oluşturulan bulanık mantık kontrolörün girişlerine ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

Şekil 3.18’de görülen üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan bulanık mantık kontrolöre ait kural tabanı ise Çizelge 3.5’te sırasıyla verilmiştir. Burada kullanılan kısaltmalar; “CD:Çok Düşük, D:Düşük, OA: Orta Altı, O:Orta, OU:Orta Üstü, Y:Yüksek ve CY:Çok Yüksek” şeklindedir.

Çizelge 3.5 Bulanık mantık kontrolörün kural tabanı

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

UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimleri için oluşturulan bulanık mantık kontrolöre ait çıkış yüzeyleri ise Şekil 3.19'da gösterilmektedir.

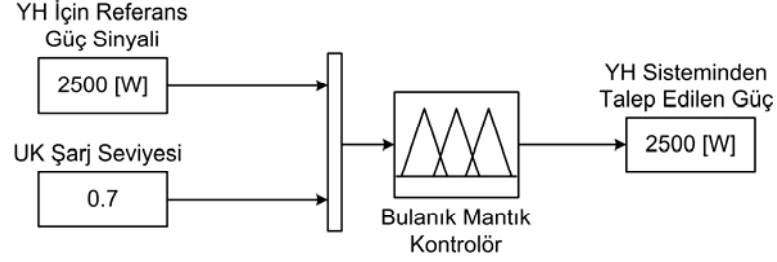


Şekil 3.19 Sürüş çevrimleri için oluşturulan bulanık mantık kontrolöre ait çıkış yüzeyleri:
a) UDDS sürüş çevrimi, b) ECE-15 sürüş çevrimi

Oluşturulan kontrol algoritmasının doğruluğunu test etmek açısından farklı senaryolar altında bulanık mantık kontrolörün sistem dinamiklerine cevabı incelenmiştir. Analizde örnek olarak ECE-15 sürüş çevrimi için oluşturulan bulanık mantık kontrolör 3 farklı senaryo altında test edilmiştir.

Senaryo 1:

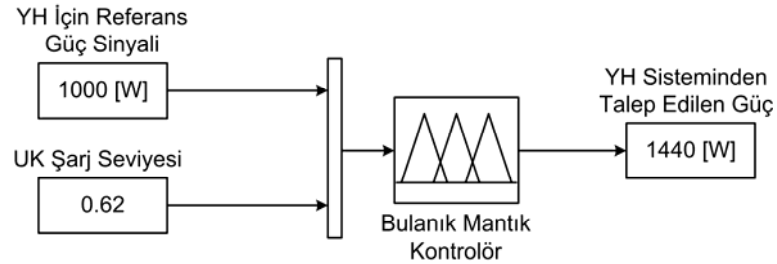
Hibrit taşıt sistemine ait örnek bir çalışma durumunda UK sisteminin şarj seviyesinin 0.7, YH referans gücünün ise 2500 olduğunu farzedilmiştir. Bu durumda, Şekil 3.20'den de görüldüğü gibi bulanık mantık kontrolör YH referans gücünün YH sisteminden talep edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.20 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu (Senaryo 1)

Senaryo 2:

Diğer bir senaryoda UK sisteminin şarj seviyesinin hedeflenen düzeyden daha aşağıda olduğu bir durum göz önüne alınmıştır. Şekil 3.21'den de görüldüğü gibi bulanık mantık kontrolör, UK sisteminin şarj seviyesinin hedeflenen düzeye getirebilmek açısından girişteki YH referans gücünden daha büyük değerde bir gücü YH sisteminden talep etmektedir. Bu sayede de UK sisteminin şarj seviyesi herhangi bir yük talebini her an karşılayabilecek düzeyde tutulabilmektedir.

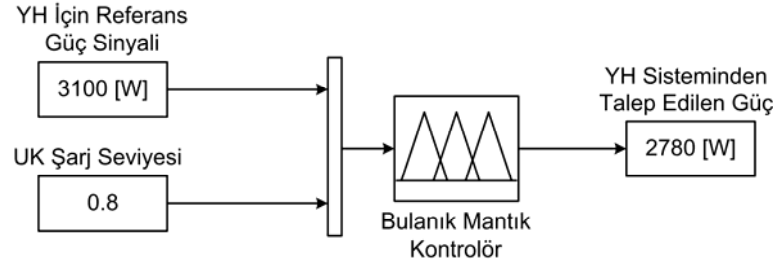


Şekil 3.21 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu (Senaryo 2)

Senaryo 3:

Son olarak da UK sisteminin şarj seviyesinin hedeflenen düzeyden yukarıda olduğu bir çalışma durumunda kontrolörün cevabı incelenmiştir. Bu çalışma durumunda bulanık mantık kontrolör, Şekil 3.22'den de görülebildiği gibi girişteki YH referans gücünden daha düşük bir gücü YH sisteminden talep etmektedir. Bu sayede UK sisteminin şarj seviyesi, muhtemel frenleme durumlarında ortaya çıkabilecek enerjiyi tamamen geri kazanabilecek düzeyde

tutulabilmektedir. Ayrıca YH sisteminden talep edilen güç azaldığından, hidrojen tüketiminde de azalma meydana getirilebilecektir.



Şekil 3.22 Hibrit taşıt sistemine ait örnek çalışma durumu (Senaryo 3)

Hibrit taşıt sisteminde kullanılan kontrol algoritmasının doğruluğunu test etmek amacıyla uygulanan çalışma sonucunda 3 farklı örnek güç akışı durumu gösterilmiştir. Gösterilen durumlarda sistemde uygulanan bulanık mantık kontrolör yapısının sistem dinamiklerine karşı arzu edilen davranışı sergilediği görülebilmektedir.

Yukarıda ayrıntıları verilen bulanık mantık kontrolör yapıları, MATLAB/Simulink içerisinde bulunan “Fuzzy Logic Controller (Bulanık Mantık Kontrolör)” bloğundan yararlanılarak genel sisteme entegre edilmiştir.

3.4.2 Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Yük Paylaşımı Algoritması

Daha önceden de bahsedildiği üzere, bir taşıt sisteminin güç talebi birçok ani yük değişiminden oluşmaktadır. Hibrit güç sistemlerinde kullanılacak bir yük paylaşım algoritması, temel yük talebini anlık değişimlerden izole edebilmelidir. Önerilen hibrit sistemde dalgacık dönüşümü, bir güç sisteminin anlık değişimlerini analiz edebilme yeteneği nedeniyle yük paylaşım algoritması olarak oldukça başarılı bir performans göstermektedir (Erdinc vd., 2008; Uzunoglu ve Alam, 2008; Zhang vd., 2008). Anlık değişimleri temel yük talebinden ayırabilecek yeteneğe sahip böyle bir yük paylaşım algoritmasının sisteme eklenmesi ile birlikte YH sisteminin anlık yük değişimlere maruz kalmaması sağlanabilecektir. Bu sayede de YH verimliliğinde ve işletim ömründe artış elde edilmesi öngörülmektedir.



Şekil 3.23 Dalgacık dönüşümünün tek seviyeli filtreleme uygulaması.

Dalgacık dönüşümleri, birçok çeşit sinyalin analizinde kullanılabilirliğini kanıtlamış ve birçok uygulamada yararlanılmış yeni bir sinyal işleme yöntemidir (Ahmeda ve Zaddah, 2001; Hu vd., 2007). Dalgacık dönüşümü kullanılarak ana sinyal, bir şekil parametresi ile farklı frekanstaki bileşenlere ayrılabilir (Poisson vd., 2000; Ahmeda ve Zaddah, 2001). Böylece, Şekil 3.23'te de görüldüğü gibi bir filtreleme uygulamasıyla istenen frekanslarda alt bileşenler elde edilebilir. Dalgacık dönüşümleri bir yük profilindeki anlık sinyalleri ve keskin değişimleri ayırabilecek filtrelemeyi gerçekleştirebilecek yeteneğe sahiptir (Uzunoglu ve Alam, 2008). Dalgacık dönüşümünün yük paylaşım algoritması olarak kullanılması ile yük profilinin yüksek ve düşük frekanslı bileşenleri elde ayrıştırılabilmektedir (Zhang vd., 2008). Bu sayede de, YH ve UK'nın doğal yapılarına uygun referans güç sinyalleri elde edilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada dalgacık dönüşümü için kullanılan parametreler Çizelge 3.6'da yer almaktadır.

Çizelge 3.6 Dalgacık dönüşümü için kullanılan parametreler

a	Ölçek
b	Konum
H_0, l_0	Ayrıştırma işlemi için yüksek geçiren ve alçak geçiren filtre
H_1, l_1	Yeniden birleştirme işlemi için yüksek geçiren ve alçak geçiren filtre
j, k	Ayrık zaman
K_ψ	ψ 'ya bağlı bir sabit
x	Ana sinyal
t	Zaman
W	Dalgacık dönüşümü katsayıları
ψ	Ana dalgacık dönüşümü fonksiyonu

Sürekli dalgacık dönüşümü, ana sinyalin ana dalgacık dönüşümü fonksiyonunun ölçeklenmiş ve ötelenmiş hali ile çarpılması ile elde edilen değerlerin bütün zamanlar süresince toplamı şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre sürekli dalgacık dönüşümü

$$W(\text{ölçek}, \text{konum}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi(\text{ölçek}, \text{konum}, t) dt \quad (3.25)$$

şeklinde belirtilmektedir (Uzunoglu ve Alam, 2008; Zhang vd., 2008).

Sürekli dalgacık dönüşümünde W , ölçek ve konumun bir fonksiyonu olarak elde edilmektedir (Joseph ve Nghi, 2005). Dalgacık dönüşümünün temelini oluşturan dalgacıklar, kısa sürelidirler ve sinyaldeki yerel değişimlere karşı oldukça hassastırlar. Bu nedenle dalgacık dönüşümü, kararlı olmayan ve/veya anlık değişimler içeren sinyallerin karakteristiklerini elde etmek için bir filtreleme işleminin gerçekleştirilmesine oldukça uygundur (Kang ve

Birtwhistle, 2003; Capilla, 2006).

Kararlı olmayan ve/veya anlık değişimleri içeren farklı yapıdaki sinyallerin elde edilmesi, sinyalin işlenmesinde kullanılan dalgacık fonksiyonunun seçimine son derece bağlıdır. Başka bir deyişle, dalgacık fonksiyonunun seçimi, farklı yapıdaki anlık değişimlerin algılanması ve sınırlandırılmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır (Mao ve Aggarwal, 2001). Ana dalgacık ismi verilen temel fonksiyonun açılmış ve dönüştürülmüş halinin seriyeye açılımı ile uygun katsayıların çarpılması, dalgacıklar kullanılarak ayrıştırma işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Capilla, 2006). Bir ana dalgacık,

$$W_{a,b}(t) = \int_R x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a \in R^+ - \{0\}, b \in R \quad (3.26)$$

şeklinde belirtilebilmektedir (Uzunoglu ve Alam, 2008). Burada şekil parametresi olan “a”, frekans bandının genişliğini kontrol etmektedir. Konum parametresi olan “b” ise zaman penceresinin kontrolünü gerçekleştirmektedir. Bu sayede dalgacık dönüşümü, ana sinyal olan $x(t)$ ’nin farklı zaman aralıklarında ve frekans bantlarında çeşitli bileşenlere ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Dalgacık dönüşümünde uzun pencereler düşük frekanslar için, kısa pencereler ise yüksek frekanslar için kullanılmaktadırlar (Joseph ve Nghi, 2005).

Farklı dalgacık dönüşümü çeşitleri arasında Haar dalgacık dönüşümü, nispeten basit yapısı, anlık değişimleri analiz edebilmedeki yeteneği ve ana sinyali tekrar elde edebilmedeki başarısı nedeni ile en popüler dalgacık dönüşümü çeşididir (Zhang vd., 2008). Sahip olduğu bu avantajlar nedeniyle Haar dalgacık dönüşümü, hibrit bir elektrikli taşıtın güç talebindeki anlık değişimlerin analizi ve ayrıştırılması açısından en uygun dalgacık dönüşümü çeşididir. Haar dalgacık dönüşümü,

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{1}{2} \text{ ise} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq t < 1 \text{ ise} \\ 0, & t < 0 \text{ veya } t \geq 1 \text{ ise} \end{cases} \quad (3.27)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Aboufadel ve Schlicker, 1999; Capilla, 2006).

Ayrık dalgacık dönüşümü, ölçekleme parametresinin artmasına bağlı olarak kullanılan katsayıların sayısının azalması nedeniyle bir sinyalin ayrıştırılmasında sürekli dalgacık dönüşümüne kıyasla daha etkindir (Gaouda vd., 1999). Ayrık dalgacık dönüşümü,

$$W_{a,b}(t) = \int_R x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a = 2^j, b = k2^j, (j, k) \in Z^2 \quad (3.28)$$

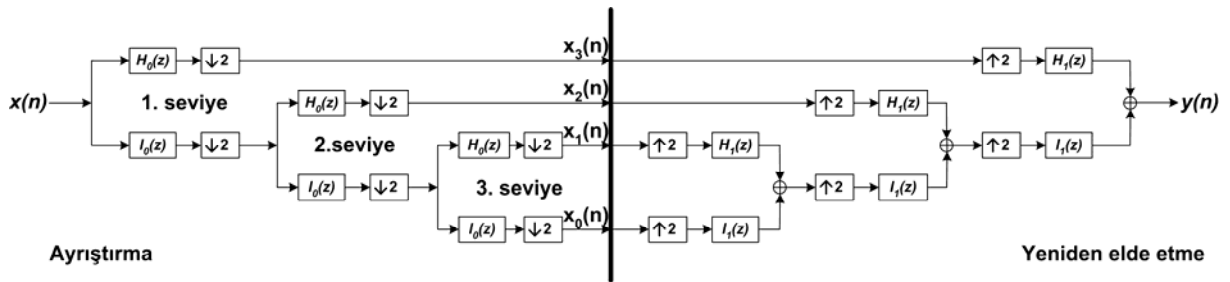
şeklinde ifade edilebilmektedir (Zhang vd., 2008). Burada ana sinyal olan $x(t)$, $W(a,b)$ katsayılarını elde etmek için ayrıştırılmaktadır. Elde edilen bu $W(a,b)$ katsayıları kullanılarak $x(t)$ sinyali, dalgacık dönüşümü sentezi adı verilen bir işlem ile yeniden elde edilebilir. Sürekli ve ayrık ters dalgacık dönüşümü,

$$x(t) = \frac{1}{K_\psi} \iint_{R^+ R} W(a,b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2} \quad (3.29)$$

ve

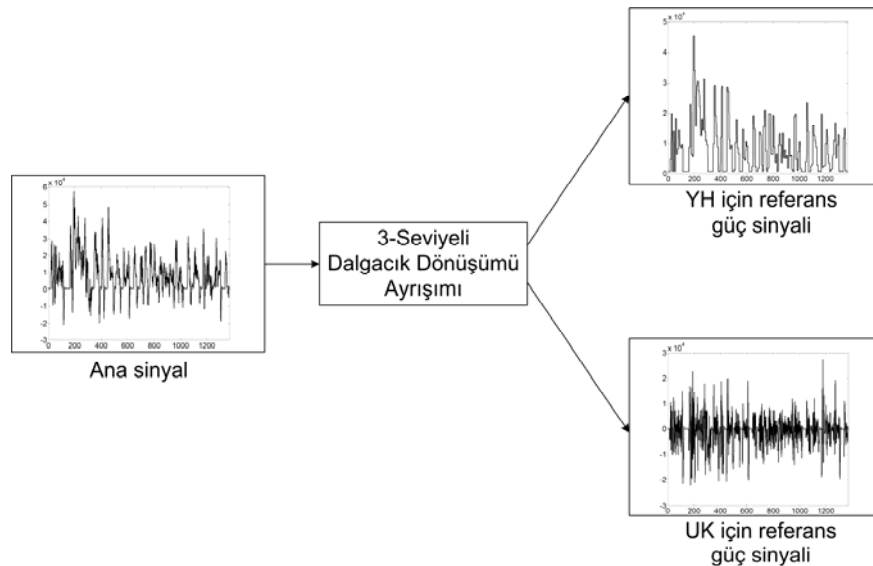
$$x(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} W(j,k) \psi_{j,k}(t) \quad (3.30)$$

biçiminde ifade edilmektedir (Uzunoglu ve Alam, 2008; Zhang vd., 2008).



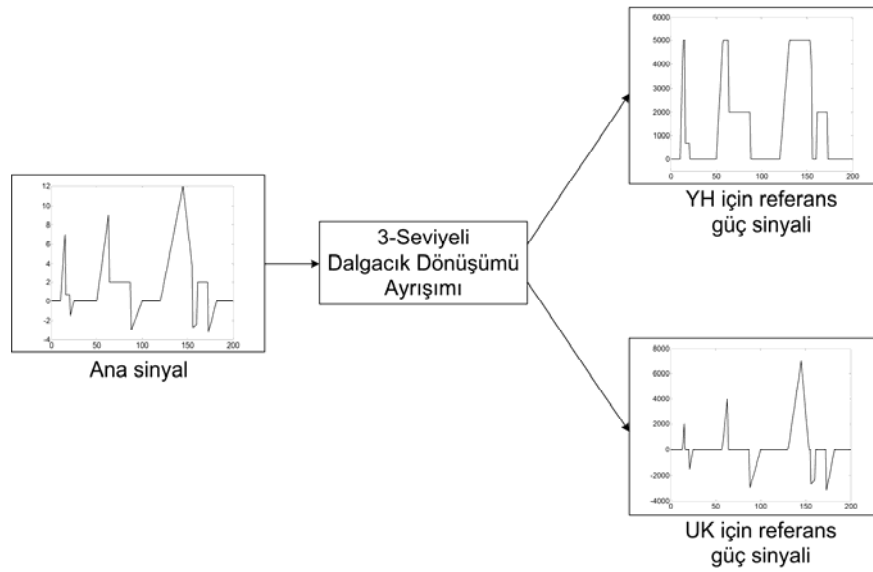
Şekil 3.24 Dalgacık dönüşümü ile gerçekleştirilen üç seviyeli bir ayrıştırma-yeniden elde etme işlemi

Dalgacık dönüşümü ile gerçekleştirilen üç seviyeli bir ayrıştırma-yeniden birleştirme işlemine ait diyagram Şekil 3.24'te görülmektedir. Görüldüğü üzere, dalgacık dönüşümü algoritması, ayrıştırma ve yeniden elde etme işlemlerini gerçekleştirmek için düşük geçiren ve yüksek geçiren filtreden yararlanmaktadır. Bu sayede, uygun şekil ve frekans parametresinin kullanılması ile birlikte ana sinyalin istenilen frekanstaki bileşenlerine ayrılması ve başarılı bir şekilde yeniden elde edilmesi gerçekleştirilmiş olmaktadır.



Şekil 3.25 Dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen UDDS güç profili ayrışımı.

Gerçekleştirilen çalışmada, yük paylaşım algoritması olarak üç seviyeli bir Haar ayrık dalgacık dönüşümünden yararlanılmaktadır. Dalgacık dönüşümünün hibrit sistemde yük paylaşımında kullanılabilmesi amacıyla MATLAB ortamında bir algoritma geliştirilmiş ve bu algoritma sisteme gömülü bir şekilde entegre edilmiştir. Dalgacık dönüşümü ile gerçekleştirilen yük paylaşımı işlemi ile birlikte ana sinyal olan UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimlerinin güç talepleri, üç seviyede yüksek ve düşük frekanslı bileşenlerine ayrılmaktadır. Böylece de Şekil 3.25 ve 3.26’da görüldüğü gibi, YH ve UK için referans güç sinyalleri elde edilmektedir.



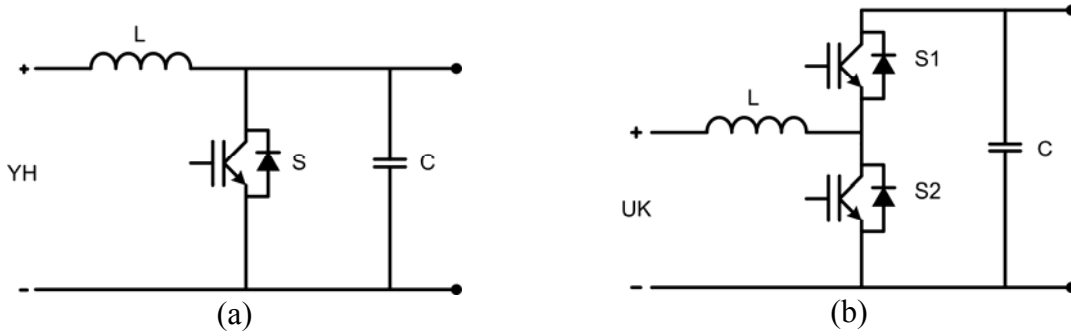
Şekil 3.26 Dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen ECE-15 güç profili ayrışımı.

Ayrışım işlemlerinin ardından sinyaller için tekrar birleştirme işlemi gerçekleştirilip ana sinyal ile karşılaştırıldığında, UDDS güç talebi için azami hata $1.0914e-011$ olarak bulunurken, ECE-15 güç talebi için ise bu hata değeri $3.5527e-015$ olarak hesaplanmaktadır. Bu hata değerleri, yararlanılan yük paylaşımı algoritmasının güvenilirliğini ve geçerliliğini açıkça göstermektedir. Şekil 3.25 ve 3.26’daki YH referans güç sinyalleri UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimlerindeki güç taleplerinin anlık yüklenmelerden arındırılmış halidir ve YH sistemi tarafından kolaylıkla karşılanabilir. Bu sayede, bir önceki bölümde ayrıntısıyla anlatılan bulanık mantık kontrolörün girişlerinden biri olan YH referans güç sinyalleri elde edilmiştir. Oluşturulan yük paylaşımı ve kontrol algoritması, Gao vd. (2008) ve Zhang vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmaya uygun bir yapıdadır.

3.5 Güç Biçimlendirme Ünitesi

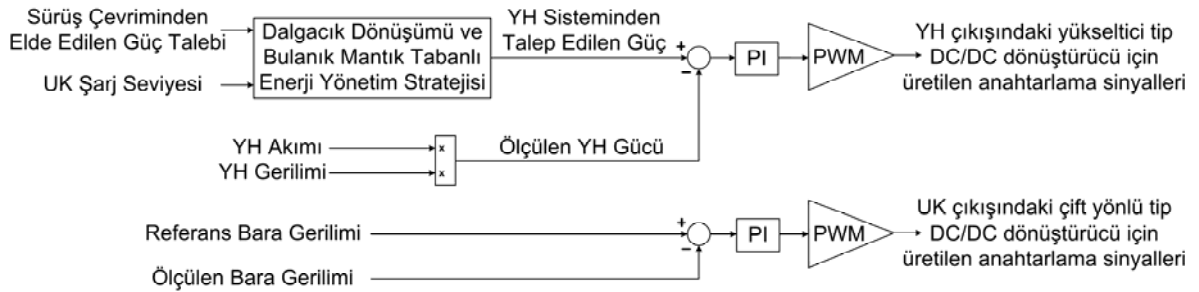
Bu bölümde, hibrit YH/UK sistemi için oluşturulan güç biçimlendirme ünitesi tanıtılmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada, UK modülünün PEMYH sistemi ile entegrasyonunda güç takibi ve gerilim düzenlemesini sağlayan iki adet DC/DC dönüştürücüden yararlanılmaktadır. Kullanılan DC/DC dönüştürücü topolojileri Şekil 3.27’de gösterilmektedir.



Şekil 3.27 Kullanılan dönüştürücü topolojileri: a) YH çıkışında kullanılan yükseltici tip DC/DC dönüştürücü, b) UK çıkışında kullanılan çift yönlü tip DC/DC dönüştürücü

Şekil 3.27’de gösterilen DC/DC dönüştürücülerden YH sistemi çıkışındaki yükseltici tip DC/DC dönüştürücü, bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen güç değerinin YH sisteminden transfer edilmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. UK sistemi çıkışındaki çift yönlü DC/DC dönüştürücüden ise bara gerilimini düzenlemek amacıyla yararlanılmaktadır.



Şekil 3.28 Kullanılan DC/DC dönüştürücüler için anahtarlama sinyallerinin üretilmesinde kullanılan yöntemin şematik gösterimi

Hibrit sistemin yük dinamiklerine cevabı, yukarıda bahsi geçen DC/DC dönüştürücüler için uygun anahtarlama sinyallerinin üretilmesi ile sağlanabilmektedir. Kullanılan dönüştürücüler için anahtarlama sinyallerinin üretilmesinde, Ferrara vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki yapı göz önüne alınarak oluşturulan ve işleyişi Şekil 3.28’de görülen bir yöntemden yararlanılmış ve iki adet PI kontrolör kullanılmıştır. YH sistemi çıkışındaki dönüştürücünün kontrolünde YH sisteminin çıkış gücü, referans olarak enerji yönetim stratejisi tarafından belirlenen YH talep gücü ile karşılaştırılmakta ve elde edilen hata sinyali bir PI kontrolöre girilmektedir. Uygulanan bu PI kontrol sayesinde YH sisteminden talep edilen gücün yüke aktarılması sağlanmaktadır. UK çıkışındaki dönüştürücü sayesinde bara

geriliminin düzenlenmesinde de YH sistemindeki güç takibinde uygulanan PI kontrolör mantığı kullanılmaktadır. Ölçülen bara gerilimi bir referans bara gerilimi değeri ile karşılaştırılmakta ve elde edilen hata sinyali bir PI kontrolöre girilmektedir. Bu sayede de bara gerilimi referans gerilim değeri civarında tutulabilmektedir. Böylece, önerilen hibrit sistem topolojisi, bara gerilimini istenilen değerde tutarken, YH sisteminden istenilen gücün transfer edilebilmesine imkân sağlamaktadır.

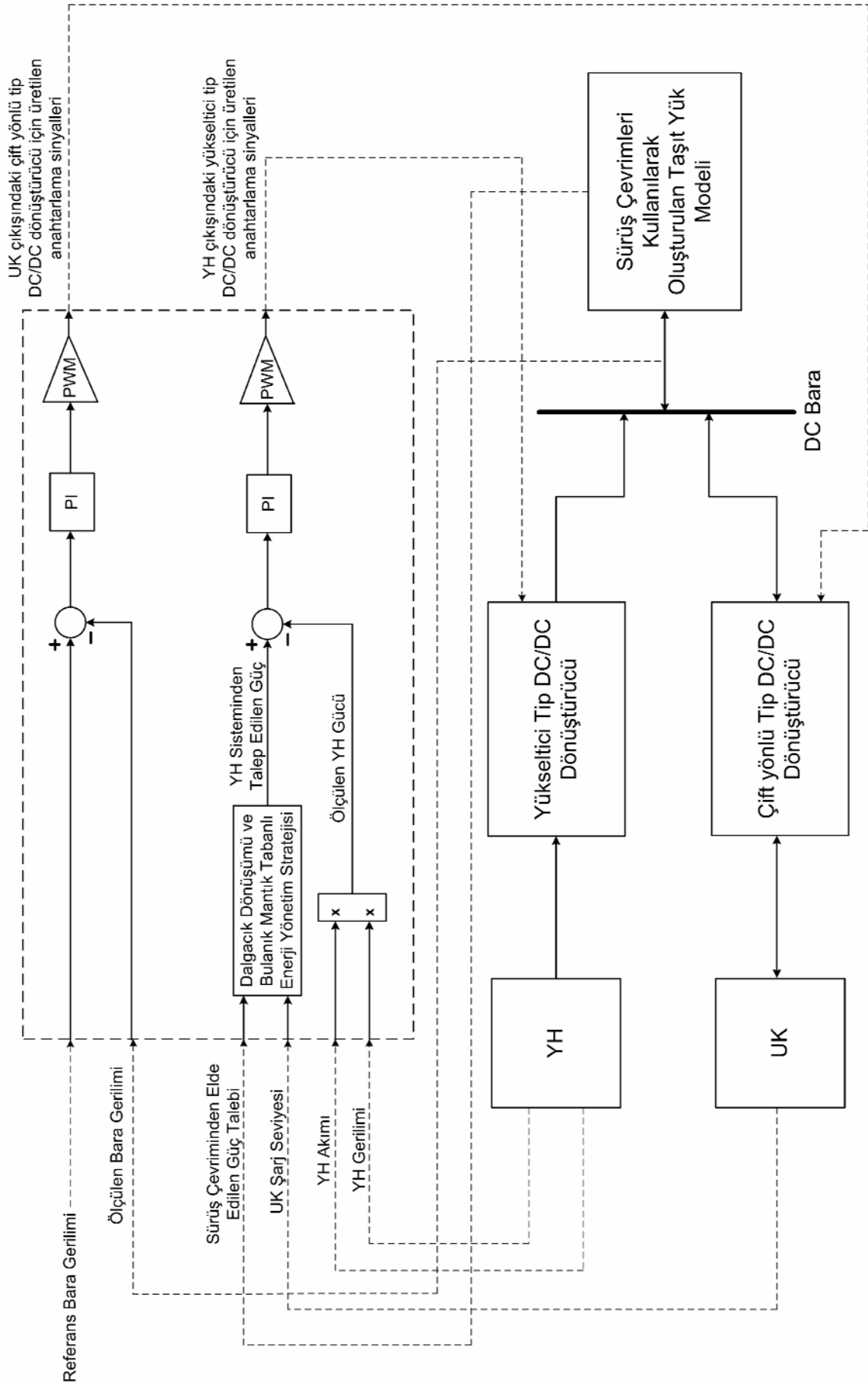
4. BENZETİM SONUÇLARI ve YORUMLAR

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. Oluşturulan hibrit sistem benzetim modeline ait şematik gösterim Şekil 4.1’de görülmektedir.

Hibrit bir taşıtta kullanılan PEMYH, temel yükü karşılayabilecek yeterlilikte olmalıdır. Bu çalışmada, UDDS sürüş çevrimi için 40 kW, ECE-15 sürüş çevrimi için ise 5 kW nominal güce sahip YH sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bu güç seviyeleri, dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşım algoritması kullanılarak elde edilen YH referans gücü göz önüne alınarak belirlenmiştir. Ayrıca, Kim vd. (2008) tarafından UDDS sürüş çevrimi için optimum YH boyutunun belirlenmesi üzerine yapılan çalışmada da, en verimli sonucu veren YH boyutu 40 kW olarak bulunmuştur. YH sisteminin boyutlandırılmasında bu çalışma da dikkate alınmıştır. Kullanılan PEMYH modeline ait parametreler Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 PEMYH parametreleri

A	6.25 [cm ² (hücre ⁻¹)]
B	0.016 [V]
C	2.5 [F]
F	96486.7 [C (kmol) ⁻¹]
J_{maks}	1.5 [A (cm) ²]
N_s	UDDS çevrimi için :176 ECE-15 çevrimi için :88
N_p	UDDS çevrimi için :4 ECE-15 çevrimi için :1
R_c	4.8 x 10 ⁻⁴ [Ω]
T_0	28 [°C]
T_{rt}	20
T_{ic}	0.7
T_{it}	4000
λ	12
ζ_1	-0.9514
ζ_2	0.00312
ζ_3	7.4 x 10 ⁻⁵
ζ_4	-1.87 x 10 ⁻⁴



Şekil 4.1 Hibrit sistem konfigürasyonu.

Gerçekleştirilen çalışmada, Çizelge 4.2’de özellikleri gösterilen Maxwell Boostcap BMOD0430 UK ünitesi referans alınmıştır. Bu çalışmada Maxwell Boostcap BMOD0430 UK ünitesinin seçilmesinin nedeni, bu UK ünitesi için elimizde deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiş bir UK benzetim modelinin mevcut olmasıdır. Her UK ünitesi 16 V gerilime ve 430 F kapasiteye sahiptir. UDDS sürüş çevrimi için oluşturulan UK sistemi, 5 seri 2 paralel UK ünitesinden meydana gelmektedir. ECE-15 sürüş çevriminde kullanılan UK sistemi ise 3 adet seri bağlı UK ünitesinden oluşmaktadır. UK sistemleri, YH sisteminin nominal güç seviyesi ile sürüş çevrimindeki azami güç talebi arasındaki farkı belirli bir süre karşılayabilecek yeterlikte olmalıdır. Buna göre UDDS sürüş çevrimi için oluşturulan UK sistemi 20 kW’lık bir yük talebini 15 saniye boyunca karşılayabilecek potansiyele sahip olması gereklidir. 20 kW’lık ani bir güç talebini 15 saniye boyunca karşılayabilecek bir UK ünitesi $(20000/0.75) \times (15/3600) = 111.12$ Wh’lık bir enerjiyi sağlayabilmelidir. UDDS çevrimi için oluşturduğumuz UK ünitesi ise $430 \times (2/5) = 172$ F’lık bir kapasite değerine ve $16 \times 5 = 80$ V’luk bir gerilime, dolayısıyla da 152.88 Wh’lık bir enerji kapasitesine sahiptir. ECE-15 sürüş çevrimi için oluşturulan UK sistemi ise 7 kW’lık bir güç talebini 15 saniye boyunca karşılayabilmeli, buna göre de $(7000/0.75) \times (15/3600) = 38.89$ Wh’lık bir enerji potansiyeline sahip olmalıdır. ECE-15 çevriminde kullanılmak üzere oluşturduğumuz UK sistemi ise $430 \times (1/3) = 143.34$ F’lık bir kapasiteye ve 48 V’luk bir çıkış gerilimine sahiptir, dolayısıyla da 45.86 Wh’lık bir enerji potansiyeli sağlamaktadır. Görüldüğü üzere oluşturulan UK sistemleri, her iki sürüş çevrimi için de anlık güç taleplerini karşılayabilecek yeterliktedir.

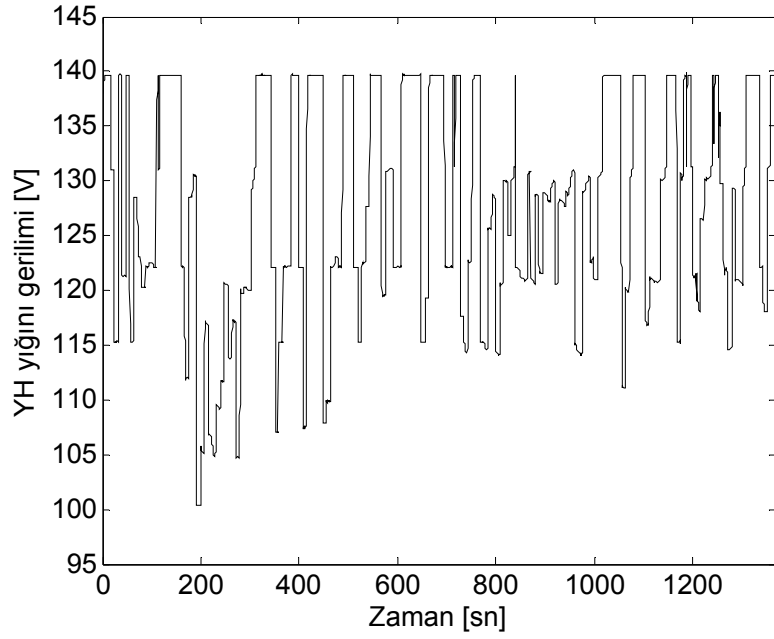
Çizelge 4.2 Maxwell Boostcap® BMOD0430 UK ünitesinin özellikleri (Maxwell, 2008).

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

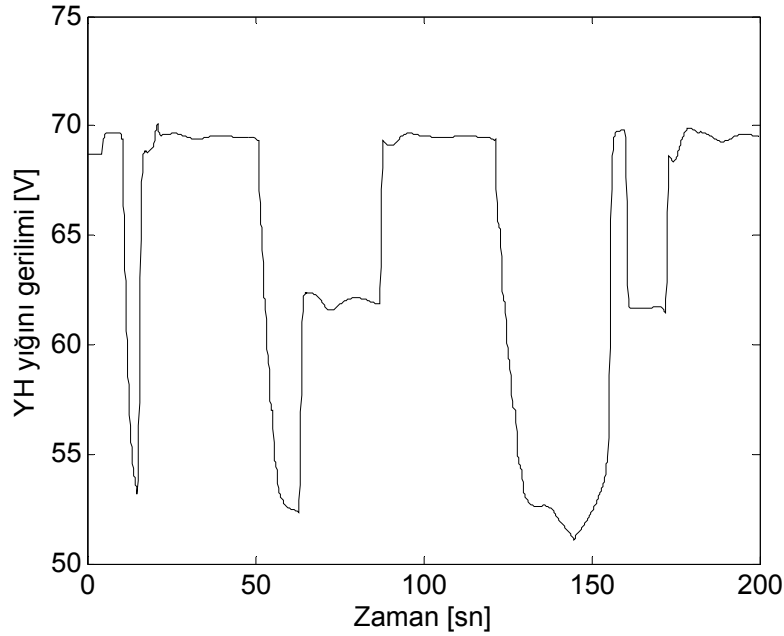
Oluşturulan hibrit YH/UK taşıt sisteminde, UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimleri için elde edilen ve Şekil 4.2-4.9’da verilen benzetim sonuçları zamana bağlı olarak sırasıyla; YH yığını gerilimi, YH sistemi çıkış gücü, UK sistemi gücü, UK sisteminin şarj durumu, DC bara gerilimi ve yük değişimleri altında ihtiyaç duyulan hidrojen akış miktarını göstermektedir.

Şekil 4.2’de, UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimlerinin uygulandığı hibrit bir taşıt sisteminde YH yığını geriliminin değişimi görülmektedir. UDDS sürüş çevrimi sırasında YH geriliminin

100.3 V'tan 139.7 V'a kadar olan bir aralıkta değişmekte olduğu Şekil 4.2(a) 'da görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 4.2(b)'den de görüldüğü üzere, ECE-15 sürüş çevrimi sırasında ise YH geriliminin 51.1 V'tan 70.1 V'a kadar olan bir aralıkta değişmektedir. Bu gerilim değişimi aralıkları, YH yığını için hücre başına yaklaşık 0.58-0.79 V'luk bir gerilim aralığına karşılık gelmektedir. Görüldüğü üzere YH yığınının en verimli olduğu lineer çalışma bölgesinde işletilmesi sağlanmıştır.

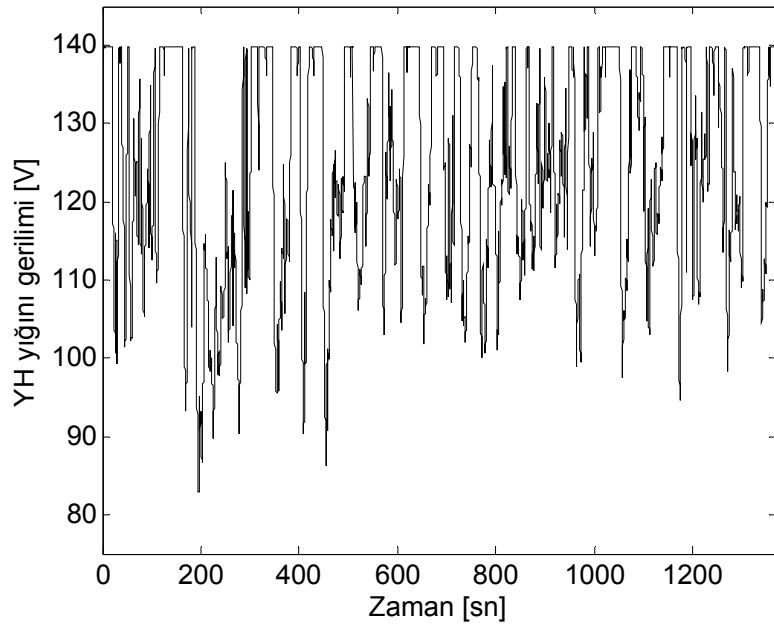


(a)

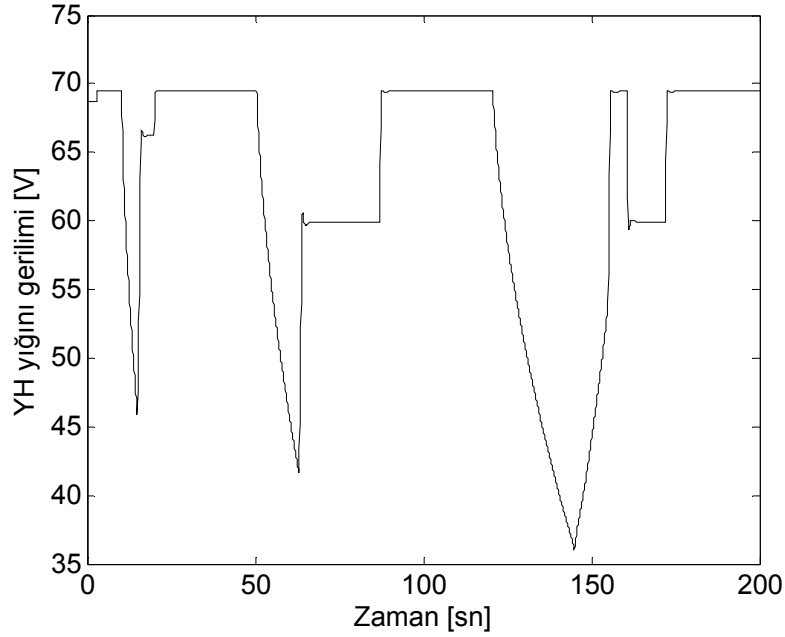


(b)

Şekil 4.2 YH yığını geriliminin değişimleri (YH/UK hibrit sisteminde): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.



(a)

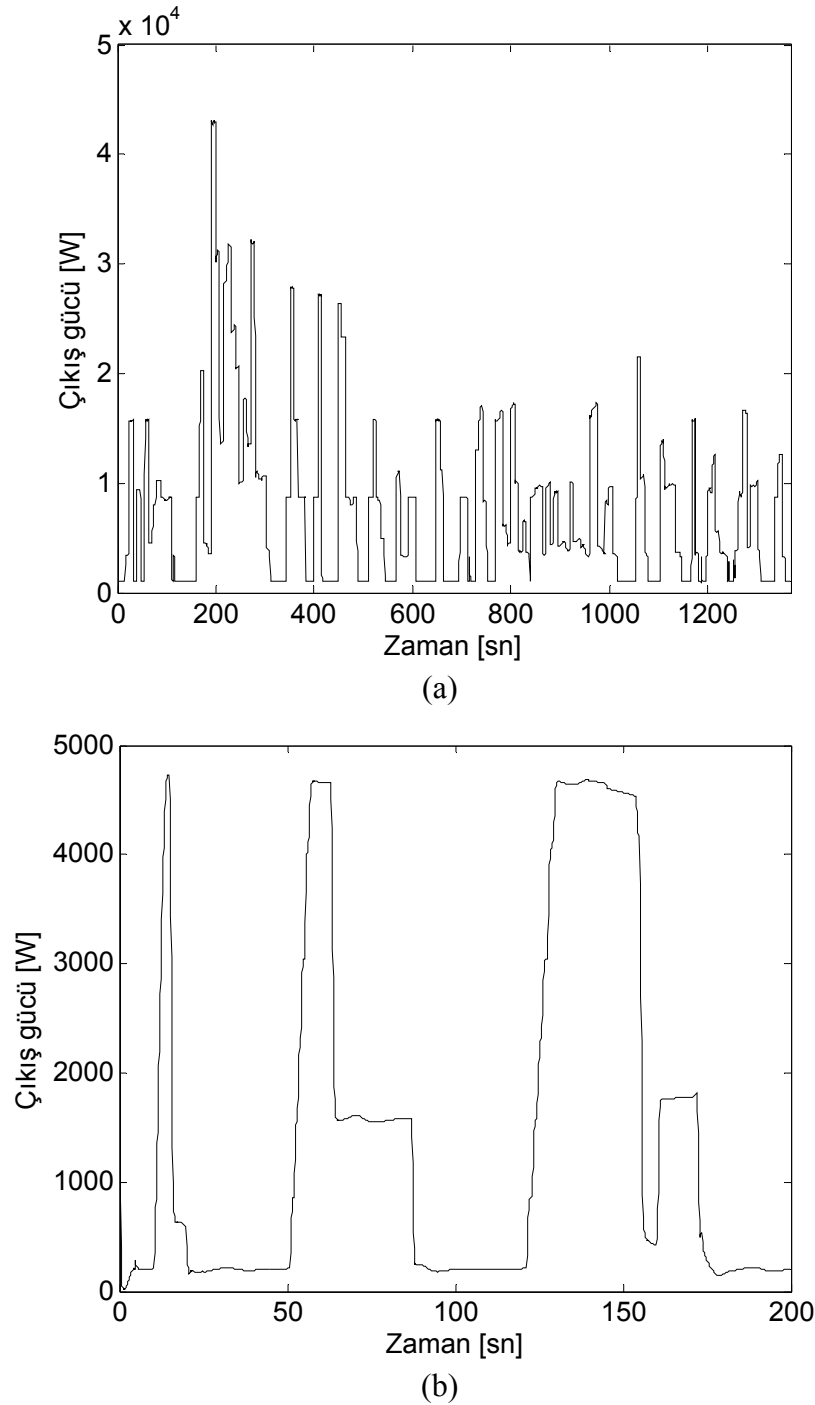


(b)

Şekil 4.3 YH yığıcı geriliminin değişimleri (tek başına YH sistemi kullanılması durumunda):
a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

Eğer taşıtın tahrik edilmesinde tek başına bir YH sistemi kullanılırsa, Şekil 4.3’de de görüldüğü gibi bu gerilim değişimi Şekil 4.2’de görülen değişimlere kıyasla çok daha büyük bir aralıkta gerçekleşecektir. Bu durum, YH sisteminin verimliliğinin önemli ölçüde azalmasına yol açabilecektir. Ayrıca tek başına YH sisteminin kullanıldığı bir durumda Şekil 4.3’de görülebildiği gibi YH gerilimindeki değişimler daha anlık bir şekilde gerçekleşecek ve bu durum YH sisteminin ömrü açısından olumsuz sonuçları da beraberinde getirecektir (Liu vd., 2006). Buradan da görülebileceği gibi YH ve UK’nın hibrit bir şekilde kullanılması ve

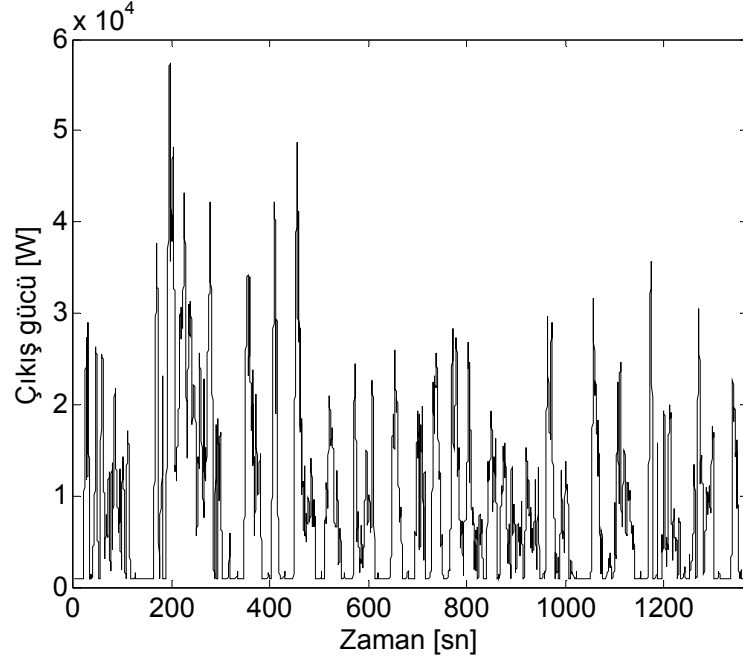
uygun bir yük paylaşımı algoritmasının sisteme adapte edilmesi ile birlikte YH verimliliğinde, dolayısı ile de genel sistem verimliliğinde artış elde edilmekte ve YH sisteminin ömrüne de ciddi bir katkı yapacağı öngörülmektedir.



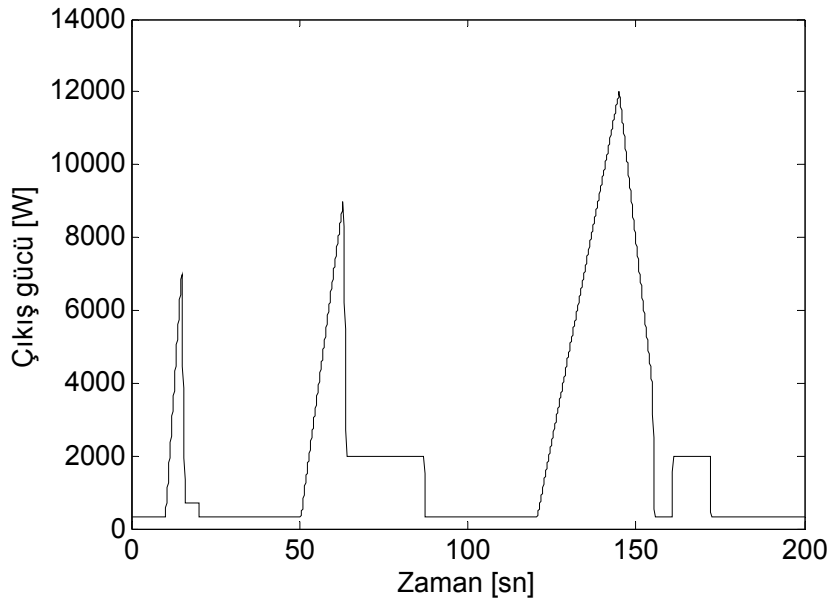
Şekil 4.4 YH sistemine ait dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimleri (YH/UK hibrit sisteminde): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

Şekil 4.4'te sürüş çevrimlerindeki toplam güç taleplerinin anlık değişimlerden arındırılmış halinin YH sistemi tarafından karşılandığı görülmektedir. YH sistemleri, kapalı durumdan güç üretebileceği duruma gelene kadar uzun bir sürenin geçmesine ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca

taşıt sistemlerinde bulunan yardımcı ekipmanlar için de bir miktar güç gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, YH sistemi her iki sürüş çevriminde de belli bir boşta çalışma gücünde işletilmektedir. Ayrıca Bu sayede, YH sisteminin daha büyük miktarlardaki gücü üretebilmek üzere hazır durumda olmasını ve yardımcı ekipmanlar için ihtiyaç duyulan gücün karşılanmasını sağlamak hedeflenmektedir. YH sisteminden yüke aktarılan azami güç değeri UDDS çevrimi sırasında 43430 W, ECE-15 çevrimi sırasında ise 4730 W'tır. YH sisteminden transfer edilen güç değeri ve bu gücün değişim hızı YH sisteminin yapısı için oldukça uygundur.



(a)

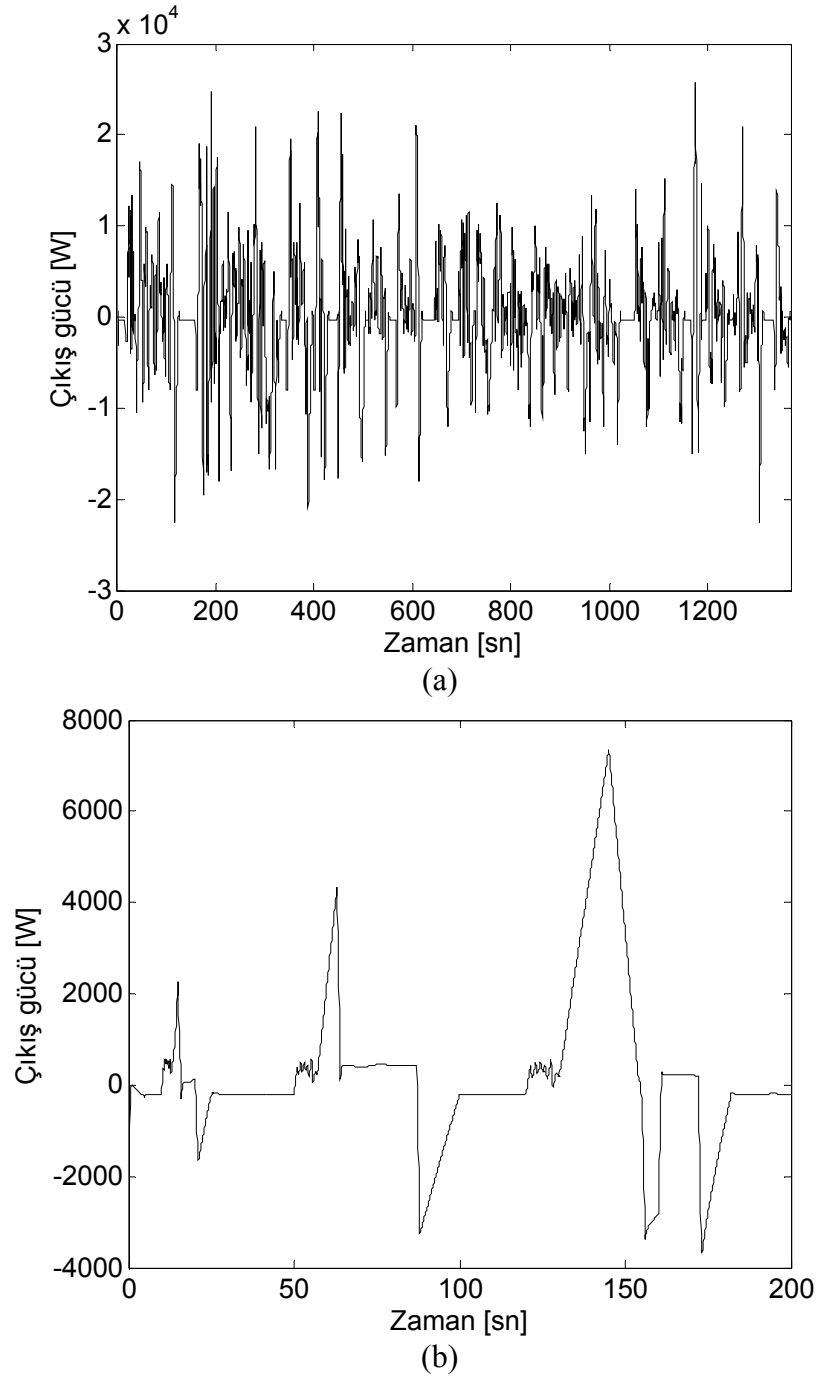


(b)

Şekil 4.5 YH sistemine ait dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimleri (tek başına YH sistemi kullanılması durumunda): a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

Eğer oluşturulan taşıt sisteminde hibrit bir yapı yerine tek başına bir YH sistemi kullanılırsa, YH sisteminin yüke aktardığı güç Şekil 4.5'teki gibi olacaktır. Şekil 4.5'ten açıkça görüldüğü gibi tek başına bir YH sistemi kullanılması durumunda YH sistemi daha yüksek güç değerlerini karşılamak zorunda kalacaktır. Dolayısıyla da bu durum sistemdeki hidrojen tüketiminde ve YH sistemi boyutlarında önemli bir artışa neden olacaktır. Ayrıca YH sistemi daha hızlı güç değişimlerine maruz kalacak ve bu durum da YH ömrü üzerinde oldukça önemli olumsuz etkileri de beraberinde getirecektir (Corbo vd., 2008). Bunların yanı sıra belki de en önemli durumlardan biri de mevcut YH sistemleri şarj edilebilir olmadığından frenleme enerjisini geri kazanmak mümkün olmayacak, dolayısıyla da sistem verimli çalışma durumundan tamamen uzaklaşacaktır. Oluşturulan hibrit yapının ve önerilen enerji yönetim sisteminin kullanılması ile birlikte YH'nın çıkış gücünün değişim hızı sınırlandırılmakta, YH sisteminin boyutları azaltılabilmekte ve frenleme durumlarında ortaya çıkan enerjinin geri kazanılabilmesi ile birlikte enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Ayrıca YH membranında, anlık yüklenmelerden ötürü meydana gelebilecek yeterince nemlenememe veya aşırı nemlenme ve gaz açlığı (starvation) gibi problemler önlenmiş olacaktır. Bu sayede genel sistem verimliliğinin ve YH sisteminin ömrünün önemli oranda artırılması beklenmektedir.

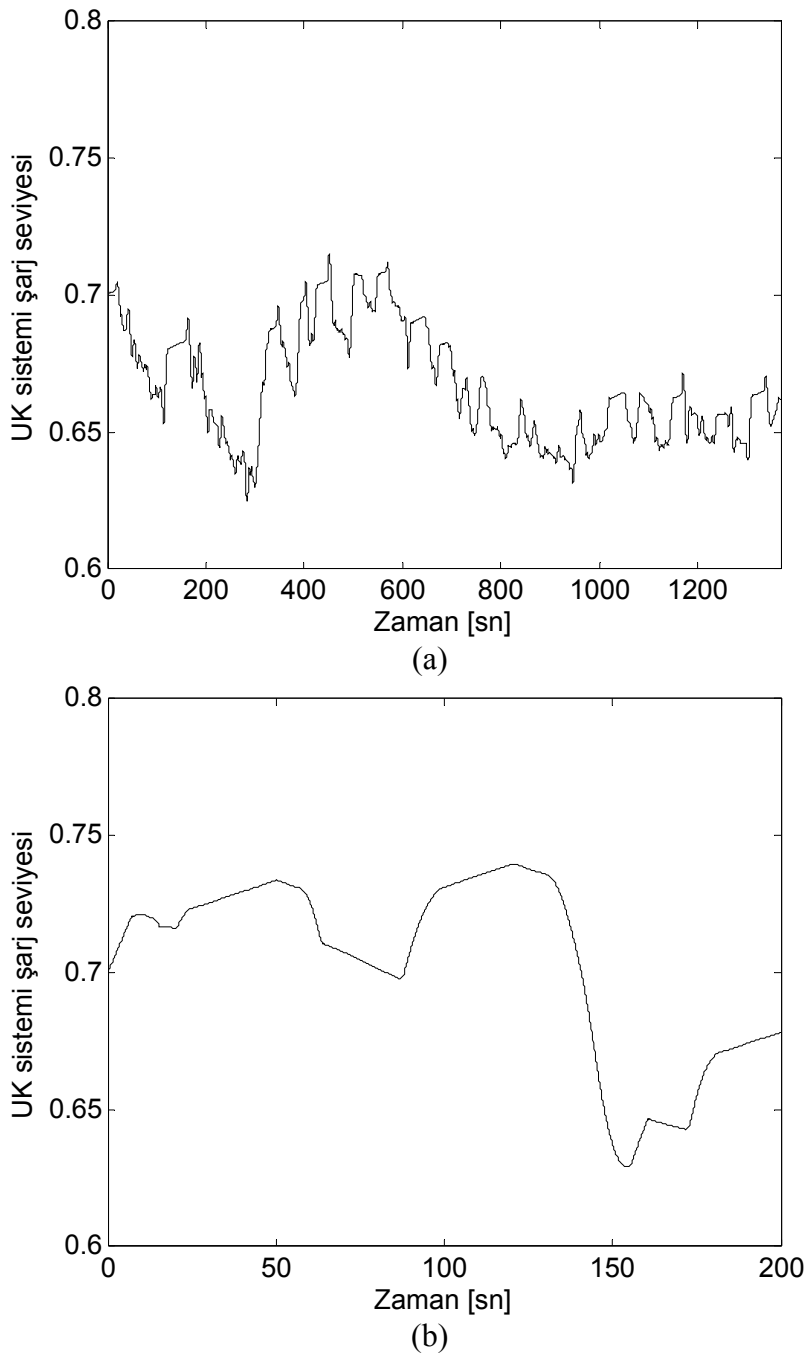
Yük değişimlerine bağlı olarak UK sistemine ait çift yönlü dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimi Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi UK sistemi, yük talebi ve YH sisteminin gücünün değişimine göre şarj ya da deşarj olmakta ve yük talebindeki ani değişimleri başarıyla karşılayabilmektedir. Hibrit sistemde enerji depolama ünitesi olarak UK yerine batarya kullanılması durumunda bu anlık yüklenmeler bataryanın kimyasal yapısına zarar verecek ve buna bağlı olarak da ömrünü büyük oranda azaltacaktır (Bentley vd., 2005). UK'nın sistem dinamiklerine hızlı cevap verebilme yeteneği, sistemin toplam güç yoğunluğunu arttırmakta, dolayısıyla da hibrit sistemin performansını iyileştirmektedir. Bu durum hibrit YH taşıt uygulamalarında enerji depolama sistemi olarak UK'nın kullanılmasının beraberinde getirdiği avantajı açıkça ortaya koymaktadır. UDDS çevrimi boyunca UK sistemi tarafından kazanılan toplam frenleme enerjisi 3098 kWsn, ECE-15 çevrimi boyunca UK sistemi tarafından kazanılan frenleme enerjisi ise 80.45 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. İlerleyen kısımlarda da bahsedileceği üzere bu durum, kazanılan frenleme enerjisinin ihtiyaç duyulan periyotlarda kullanılması ile birlikte hidrojen tasarrufunda da artış meydana getirecektir.



Şekil 4.6 UK sistemine ait dönüştürücünün çıkışındaki gücün değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

Şekil 4.7’de ise UK’nın şarj seviyesinin değişimi görülebilmektedir. UK şarj seviyesinin UDDS çevrimi boyunca sahip olduğu asgari ve azami değerler Şekil 4.7(a)’da görüldüğü üzere sırasıyla 0.625 ve 0.715’tir. ECE- 15 sürüş çevrimi sırasında da UK sisteminin şarj seviyesi 0.631 ve 0.739 değerleri arasında değiştiği Şekil 4.7(b)’de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere UK sisteminin şarj seviyesi her iki sürüş çevrimi esnasında da uygun bir aralıkta tutulabilmiştir. Bu sayede, UK sistemi mevcut frenleme anlarında ortaya çıkan enerjiyi verimli bir şekilde kazanabilmekte ve ihtiyaç duyulan yük talebini de

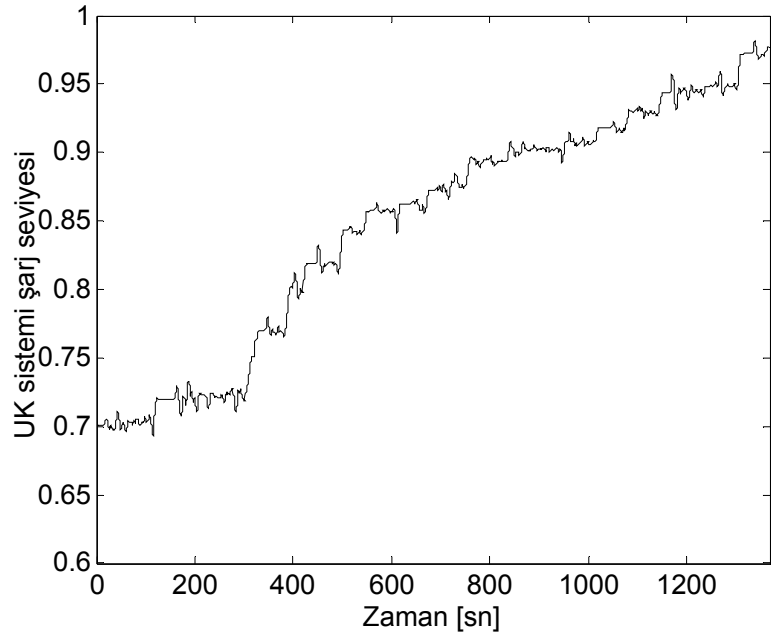
karşılayabilmektedir.



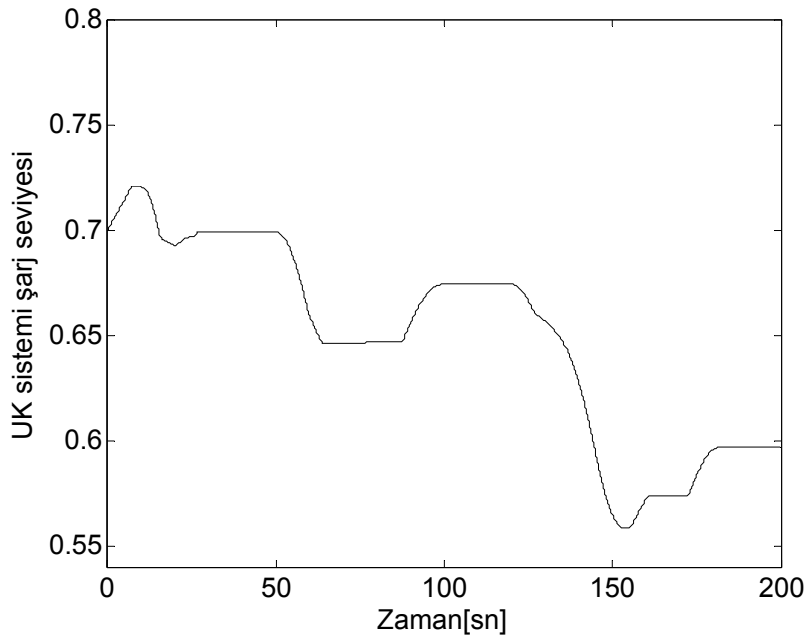
Şekil 4.7 UK sistemi şarj seviyesinin değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

Oluşturulan hibrit sistemin enerji yönetimi için tek başına dalgacık dönüşümü tabanlı bir yük paylaşımı algoritması kullanılması durumunda, UK sisteminin şarj seviyesi değişimi Şekil 4.8’de görüldüğü gibi gerçekleşecektir. Şekil 4.8(a)’da açıkça görülebildiği gibi, UDDS sürüş çevrimi altında UK sisteminin şarj seviyesi kontrolsüz durumda yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu durum, UK sisteminin frenleme anlarında ortaya çıkan enerjiyi verimli bir şekilde geri kazanabilmesini önlemektedir. Ayrıca UK sisteminden daha fazla yararlanılabilecek ve dolayısıyla da YH gücü ve hidrojen tüketimi azaltılabilecek iken

kontROLSÜZ durumda, kazanılan frenleme enerjisi kullanılarak hidrojen tasarrufu yapma imkânı da azalmaktadır. ECE-15 sürüş çevrimi için Şekil 4.8(b)'de verilen UK şarj seviyesi değişiminde ise kontROLSÜZ durumda UK şarj seviyesinin gitgide azaldığı görülmektedir. Bu durum, UK sistemi için ihtiyaç duyulabilecek herhangi yüksek bir güç talebini karşılayamama riskini ortaya çıkarmaktadır. Şekil 4.8'deki bu değişimler UK sisteminin şarj seviyesinin de kontrolü açısından bulanık mantık kontrolörün hibrit sistemdeki önemini bir kere daha ortaya koymaktadır.

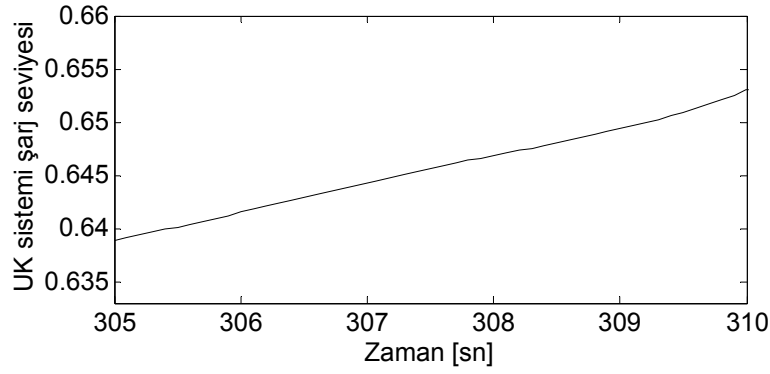


(a)

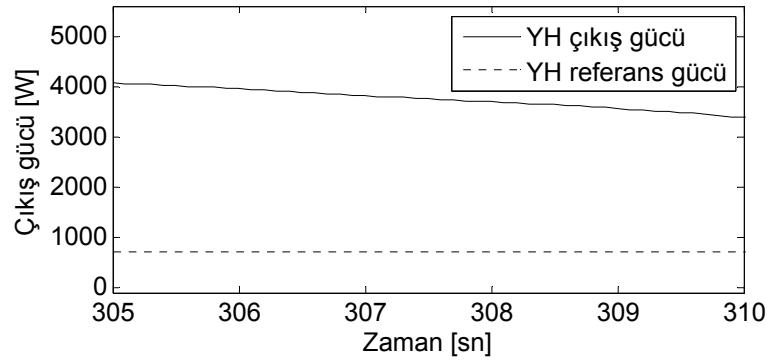


(b)

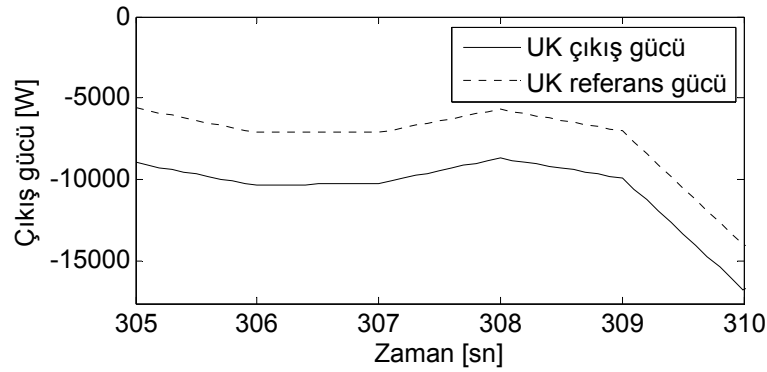
Şekil 4.8 Tek başına dalgacık dönüşümü tabanlı yük paylaşım algoritması kullanılması durumunda UK sistemi şarj seviyesinin değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için



(a)



(b)

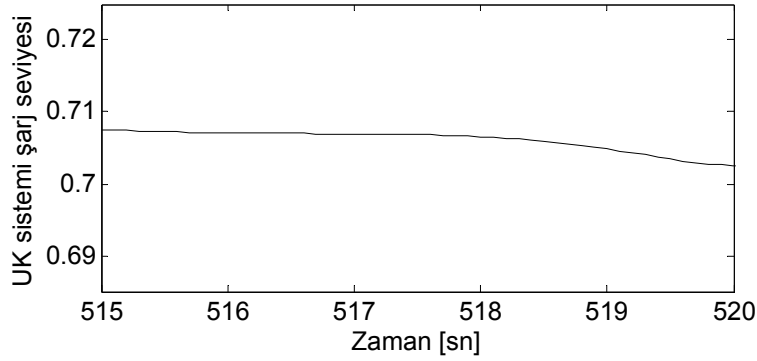


(c)

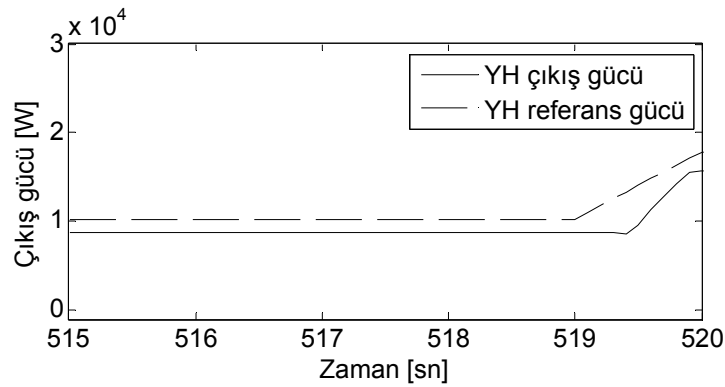
Şekil 4.9 UDDS sürüş çevrimi altında UK şarj seviyesinin düşük olduğu bir durumda bulanık mantık kontrolörün sağladığı enerji yönetimi: a) UK sistemi şarj seviyesinin değişimi, b) YH referans gücü ve çıkış gücünün değişimi, c) UK referans gücü ve çıkış gücünün değişimi

Bulanık mantık kontrolörün sistem dinamiklerine verdiği cevabı bir kere de sistemde elde edilen sonuçlar üzerinde incelemek açısından, Şekil 4.9 ve 4.10'da örnek olarak UDDS sürüş çevrimindeki bazı periyotların yakınlştırılmış halleri verilmiştir. Şekil 4.9'da UK şarj seviyesinin düşük olduğu bir durumda bulanık mantık kontrolörün sağladığı enerji yönetimi görülmektedir. Açıkça görüldüğü gibi bu aralıkta bulanık mantık kontrolör UK sisteminin şarj seviyesini arttırmak açısından YH referans gücünden daha yüksek seviyedeki bir gücün YH tarafından sisteme aktarılmasını sağlamaktadır. Bu sayede UK sistemi şarj edilmekte ve böylece de şarj seviyesi hedeflenen değer civarına getirilmektedir. Şekil 4.10'da ise UK şarj seviyesinin hedeflenen düzeyden az da olsa yukarıda olduğu bir durumdaki bulanık mantık

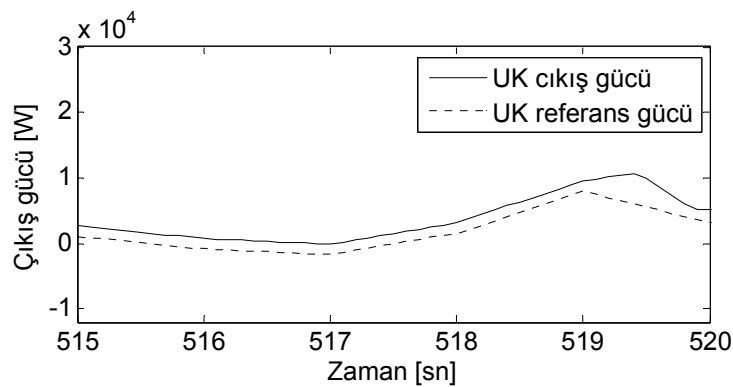
kontrolör davranışı görülmektedir. UK şarj seviyesinin hedeflenen değerden yüksek olduğu böyle bir durumda bulanık mantık kontrolör, YH referans gücünden daha az bir gücü YH sisteminden talep etmektedir. Bu sayede de UK sisteminin daha fazla yüklenmesi sağlanmakta ve YH sisteminin gücü azaldığından hidrojen tasarrufu elde edilebilmektedir.



(a)



(b)



(c)

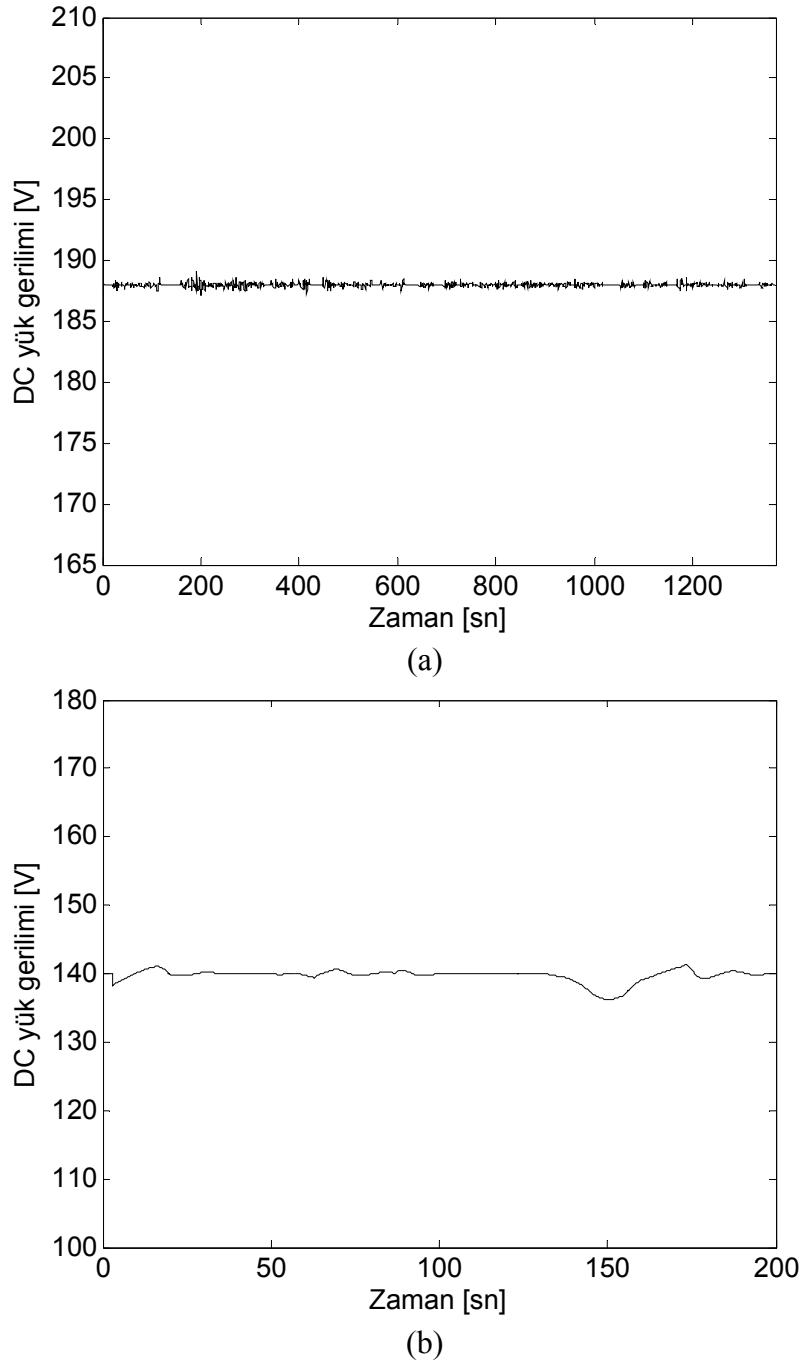
Şekil 4.10 UDDS sürüş çevrimi altında UK şarj seviyesinin hedeflenen düzeyden yüksek olduğu bir durumda bulanık mantık kontrolörün sağladığı enerji yönetimi: a) UK sistemi şarj seviyesinin değişimi, b) YH referans gücü ve çıkış gücünün değişimi, c) UK referans gücü ve çıkış gücünün değişimi

Bahsi geçen ve çalışması önceki kısımlarda ayrıntılarıyla anlatılan bulanık mantık kontrolörün çalışması, bir de sürüş çevrimleri boyunca oluşturulan kural tabanının aktifliği açısından değerlendirilmiştir. Çizelge 4.3'te, bulanık mantık kontrolör için oluşturulan ve daha önce

Çizelge 3.5’te verilen her bir kuralın her iki sürüş çevrimi altında ne kadarlık bir süre için aktif olduğu gösterilmektedir. Görüldüğü gibi her iki sürüş çevriminde de en aktif olan kural,”KURAL 2”dir. Ayrıca açıkça görüldüğü gibi, bazı kurallar her iki sürüş çevriminde de hiçbir zaman aktif olmamaktadır. Bu husus, her iki sürüş çevriminde de bahsi geçen kurallarda belirtilen durumların hiçbir zaman diliminde oluşmadığını göstermektedir. Örneğin “KURAL 6”da belirtilen YH referans gücünün düşük seviyede ve UK şarj seviyesinin yüksek düzeyde olması durumu her iki sürüş çevriminde de gerçekleşmemiştir. Ancak böyle bir durum ile gerçek zamanlı uygulamalarda karşılaşılma olasılığı elbette ki vardır. Bu nedenle, sürüş çevrimlerinde etkin olmayan kuralların da bulanık mantık kontrolör yapısında bulunması, sistemin her durumda başarı ile çalışabilmesi açısından önemlidir. Ayrıca, gerçekleştirilen bu kural analizi sürüş çevrimleri boyunca hangi durumlarla ne sıklıkla karşılaşıldığının değerlendirilebilmesi açısından önem arz etmektedir.

Çizelge 4.3 Bulanık mantık kontrolöre ait kuralların sürüş çevrimleri boyunca aktiflik analizi

	1369 sn’lik UDDS Sürüş Çevrimindeki Toplam Kullanılma Süresi [sn]	200 sn’lik ECE-15 Sürüş Çevrimindeki Toplam Kullanılma Süresi [sn]
KURAL 1	323.2	9.2
KURAL 2	824.1	112.8
KURAL 3	0	0
KURAL 4	254.9	1.6
KURAL 5	487.4	11.4
KURAL 6	0	0
KURAL 7	131.7	12.4
KURAL 8	206.2	41.4
KURAL 9	0	0
KURAL 10	40.9	0.4
KURAL 11	80.2	5.4
KURAL 12	0	0
KURAL 13	30.1	0.3
KURAL 14	53.4	5.6
KURAL15	0	0
KURAL 16	0	1.4
KURAL 17	8.1	5.4
KURAL 18	0	0
KURAL 19	0	8.7
KURAL 20	7.3	35
KURAL 21	0	0

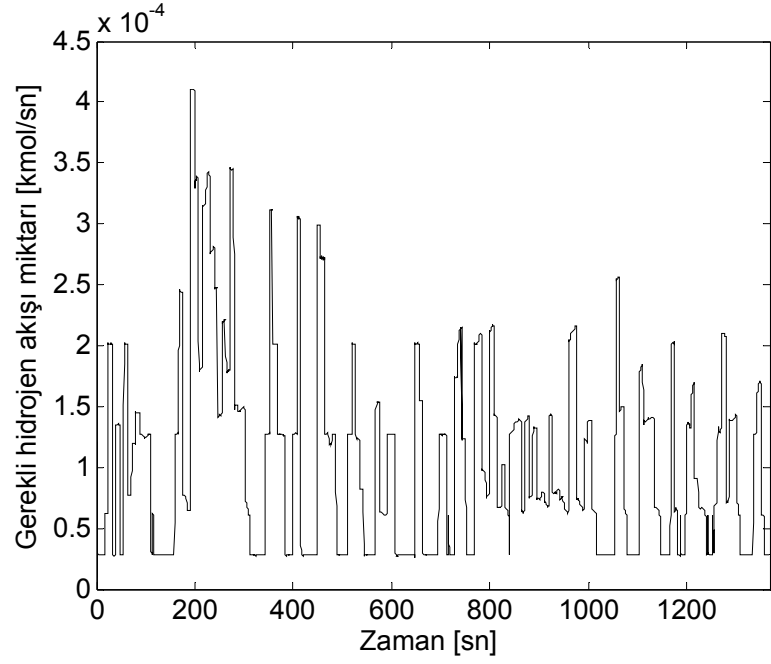


Şekil 4.11 DC yük barası gerilimindeki değişimler: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

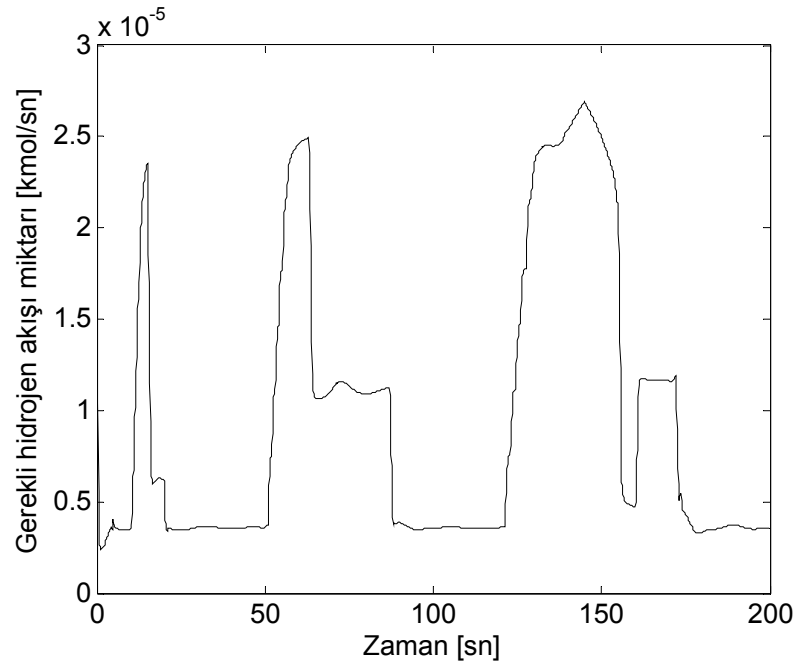
Tüm sisteme ait DC yük barası gerilimindeki değişim Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Bara geriliminin, UK çıkışındaki çift yönlü DC/DC dönüştürücü için uygun kontrol sinyallerinin üretilmesi ile birlikte her iki sürüş çevriminde de uygun bir aralıktta tutulabildiği görülmektedir.

YH için ihtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarı ise Şekil 4.12’de görüldüğü gibi değişmektedir. Şekil 4.12(a)’da görüldüğü üzere, UDDS sürüş çevriminde 230. ve 280. saniyeler UK sisteminin şarj seviyesi düşük bir seviyede olduğundan YH sistemi, UK modülünü şarj etmek

amacıyla ihtiyaç duyulan güç seviyesinin daha üzerinde bir hidrojen tüketimi gerçekleştirmektedir. Benzer hidrojen tüketimi artışları, UK sisteminin şarj seviyesinin azaldığı yerlerde gözlemlenebilmektedir. Benzer şekilde UK sisteminin şarj seviyesinin arttığı durumlarda hidrojen tüketimi azalmaktadır. Bu sayede UK modülünün şarj seviyesi kontrol altında tutulabilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.12 İhtiyaç duyulan hidrojen akışı miktarının değişimleri: a) UDDS sürüş çevrimi için, b) ECE-15 sürüş çevrimi için.

UK şarj seviyesinin kontrol edilmesinin hidrojen tüketimi üzerindeki etkisini incelemek açısından oluşturulan enerji yönetim stratejisi sonucunda elde edilen toplam hidrojen tüketimi değerleri, tek başına yük paylaşım algoritmasının kullanıldığı ve UK şarj seviyesinin kontrol edilmediği durum ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.4'ten de görüldüğü gibi, özellikle bir çok anlık yüklenmeyi içeren UDDS sürüş çevrimi altında sistemin hidrojen tüketimi önemli bir oranda (yaklaşık %7.7) azaltılabilmektedir. UDDS sürüş çevrimi, taşıt sistemlerinin günlük olarak karşılaştığı yol durumunu başarı ile yansıtan bir çevrimdir. Bu durum, UK sisteminin şarj seviyesinin kontrolünün sistem verimliliği açısından önemini bir başka açıdan da ortaya koymaktadır. Çizelge 4.4'te görülen bir başka husus da ECE-15 sürüş çevrimi altında UK şarj seviyesinin kontrol edildiği durumdaki hidrojen tüketimi, kontrolsüz durumdaki hidrojen tüketimine kıyasla oldukça düşük bir oranda da olsa (yaklaşık %0.6) yüksek olmasıdır. Ancak bu düşük hidrojen tüketimi artışı ve sistemdeki genel güç akışının kontrolü ile birlikte daha önce de bahsedilen UK sistemi için ihtiyaç duyulabilecek herhangi yüksek bir güç talebini karşılayamama riski ortadan kaldırılmaktadır. Bu husus da sistem performansı açısından önemli bir durumdur. Ayrıca Çizelge 4.4'teki hidrojen tüketimi değerleri incelendiğinde, UDDS ve ECE-15 sürüş çevrimlerinin beraberce ele alındığı olası bir yol durumunda taşıt sisteminin hidrojen tasarrufunda önemli bir artış elde edilebileceği açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 4.4 UK sisteminin şarj seviyesinin kontrol edildiği ve edilmediği durumlardaki hidrojen tüketiminin karşılaştırılması

	Tek başına yük paylaşım algoritmasının kullanıldığı durumdaki hidrojen tüketimi [kmol]	Bulanık mantık kontrolör ile UK şarj seviyesinin de kontrol edildiği durumdaki hidrojen tüketimi [kmol]
UDDS sürüş çevrimi için	0.1565	0.1444
ECE-15 sürüş çevrimi için	0.001895	0.001907

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

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dalgacık dönüşümü ve bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetim stratejisinin, hibrit bir PEMYH/UK taşıt sistemine adapte edilmesini içeren bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan hibrit PEMYH/UK sisteminde, YH sistemi temel yükü karşılamak amacıyla kullanılırken UK sisteminden anlık yük değişimlerini karşılamak ve frenleme enerjisini kazanmak amacıyla yararlanılmıştır. Bu çalışmada, UK modeli olarak klasik eşdeğer RC modelinden daha geçerli bir modelden yararlanılmıştır. Kullanılan UK benzetim modelinin geçerliliği deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Önerilen PEMYH/UK hibrit güç sisteminin benzetim ve analizinde, geliştirilen yük paylaşımı ve kontrol algoritması, kullanılan her iki sürüş çevrimi esnasında da oldukça başarılı bir performans göstermektedir. Yük paylaşımı YH ve UK'nın doğal özelliklerine uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra, uygulanan kontrol yöntemi sayesinde UK'nın şarj seviyesi uygun değerler arasında tutulabilmektedir. Bu sayede, özellikle UDDS sürüş çevriminde önemli bir oranda yakıt tasarrufu artışı elde edilebilmektedir. Ayrıca uygulanan kontrol stratejisinin sonucu olarak UK sisteminin şarj seviyesinin her zaman belli bir seviyede olması sayesinde UK sistemi güç taleplerini karşılamaya her an hazır bir halde tutulabilmektedir. Önerilen yük paylaşımı ve kontrol algoritması YH sisteminin en verimli çalışma bölgesi olan lineer bölgede ve kısmi yük durumlarında işletilebilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, oluşturulan enerji yönetim stratejisi sayesinde YH sisteminin anlık yük değişimlerine maruz kalmaması sağlanmaktadır. 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 artırılabilir. Öngörülmektedir. Gerçekleştirilen enerji yönetim algoritması, dSPACE, vb. gömülü kontrol üniteleri kullanılarak gerçek taşıt sistemlerine aktarılmaya uygun yapıdadır.

Taşıt uygulamaları için geliştirilen YH/UK hibrit sisteminin ve uygulanan enerji yönetim stratejisinin, uygun düzenlemelerin ve boyutlandırmaların gerçekleştirilmesiyle dağılmış üretim sistemleri (distributed generation) ve evsel uygulamalar gibi birçok alanda da kullanılabilecek bir yapıya ve potansiyele sahip olduğu öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen enerji yönetim stratejisinin 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

- Aboufadel, A. ve Schlicker S., (1999), *Discovering Wavelets*, John Wiley & Sons, New York.
- Adzakpa, K. P., Agbossou, K., Dube, Y., Dostie, M., Fournier, M. ve Poulin, A., (2008), "PEM Fuel Cells Modeling and Analysis Through Current and Voltage Transient Behaviors", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 23(2):581-591.
- Ahluwalia, R. K. , Wang, X. ve Rousseau, A., (2005), "Fuel economy of hybrid fuel-cell vehicles", *Journal of Power Sources*, 152(1):233-244.
- Ahmeda, S. M. ve Zahhad M. A., (2001), "A new hybrid algorithm for ECG signal compression based on the wavelet transformation of the linearly predicted error" *Medical Engineering and Physics*, 23(2):117-126.
- Amrhein, M. ve Krein, P. T., (2005), "Dynamic Simulation for Analysis of Hybrid Electric Vehicle System and Subsystem Interactions, Including Power Electronics", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 54(3):825-836.
- Andujar, J. M., Segura, F. ve Vasallo, M. J., (2008), "A suitable model plant for control of the set fuel cell-DC/DC converter", *Renewable Energy*, 33(4):813-826.
- Barbir, F., (2005), *PEM fuel cells: theory and practice*, Elsevier Academic Press, London.
- Bowers, B. J., Zhao, J. L., Ruffo, M., Khan, R., Dattatraya, D., Dushman, N., Beziat, J. C. ve Boudjemaa, F., (2007), "Onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles", *Int. 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(1):37-50.
- Capilla, C., (2006), "Application of the Haar wavelet transform to detect microseismic signal arrivals," *Journal of Applied Geophysics*, 59(1):36-46.
- Chau, K. T., Wong, Y. S. ve Chan, C.C., (1999), "An overview of energy sources for electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, 40(10):1021-1039.
- Chau, K. T. ve Wong, Y. S., (2002), "Overview of power management in hybrid electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, 43(15):1953-1968.
- Chen, G. ve Pham, T. T., (2001), *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, Boca Raton.
- Chen, S. M. ve Huang, C. M., (2008), "A new approach to generate weighted fuzzy rules using genetic algorithms for estimating null values", *Expert Systems with Applications*, 35:905–917.
- Chu, B., Kim, D., Hong, D., Park, J., Chung, J. T., Chung, J. H. ve Kim T. H., (2008), "GA-based fuzzy controller design for tunnel ventilation systems", *Automation in Construction*, 17:130–136.
- Corbo, P., Migliardini, F. ve Veneri, O., (2007), "Performance investigation of 2.4 kW PEM fuel cell stack in vehicles", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 32(18):4340-4349.
- Corbo, P., Migliardini, F. ve Veneri, O., (2008), "PEFC stacks as power sources for hybrid propulsion systems", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Article in Press.

Emadi, A., Ehsani, M. ve Miller, J. M., (2004), Vehicular electric power systems, Marcel Dekker, New York.

Emadi, A., Rajashekara, K., Williamson, S. S. ve Lukic, S. M., (2005) "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations", IEEE Trans. Vehicular Technology, 54(3):763-770.

Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M. ve 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", Int. Journal of Hydrogen Energy, Article in Press, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.10.039.

Farsi, H. ve Gobal, F., (2007), "Artificial neural network simulator for supercapacitor performance prediction", Computational Materials Science, 39(3):678-683.

Fekrazad, N., (2007), "The Effect of Comprehensive Load on PEM Fuel Cell Stack Performance and Behavior", Ph. D. Thesis, University of Connecticut.

Ferreira, A. A., Pomilio, J. A., Spiazzi, G. ve Silva, L. A., (2008), "Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System", IEEE Trans. Power Electronics, 23(1):107-115.

Gao, D., Jin, Z. Ve Lu., Q., (2008), "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus", Journal of Power Sources, 185(1):311-317.

Gaouda, A. M., Salam, M. M. A., Sultan, M. R. ve Chikhani, A. Y., (1999), "Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition", IEEE Trans. Power Delivery, 14(4):1469 – 1476.

Granovskii, M., Dincer, I. ve Marc, A. R., (2006), "Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles", Int. Journal of Hydrogen Energy, 31(3):337-352.

Gualous, H., Bouquain, D., Berthon, A. ve Kauffmann, J. M., (2003), "Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature", Journal of Power Sources; 123(1):86-93.

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.

Helmolt, R. V. ve Eberle U., (2007), "Fuel cell vehicles: Status 2007", Journal of Power Sources, 165(2):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. ve Wan, G., (2007), "A transient semi-empirical voltage model of a fuel cell stack", Int. Journal of Hydrogen Energy; 32(7):857-862.

Hu, Y., Jiang, T., Shen, A., Li, W., Wang, X. ve Hu, J., (2007), "A background elimination method based on wavelet transform for Raman spectra", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 85(1):94-101.

Hussain, M. M., Dincer, I. ve Li X., (2007) "A preliminary life cycle assessment of PEM fuel

cell powered automobiles'', *Applied Thermal Engineering*, 27(13):2294-2299

Jeong, K. S., Lee, W. Y. ve Kim C. S., (2005), "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", *Journal of Power Sources*; 145(2):319-326.

Joseph, L. ve Nghi, T. M., (2005), "A wavelet-based approach for the identification of damping in non-linear oscillators" *Int. Journal of Mechanical Sciences*, 47(8):1262-1281.

Joshi, R. P. ve Deshmukh A. P., (2006), "Hybrid Electric Vehicles: The Next Generation Automobile Revolution" *IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles*, 18-20 Dec., 1-6.

Jung, D. Y., Young, H., Kim, S. W. ve Lee S. H., (2003), "Development of ultracapacitor modules for 42-V automotive electrical systems", *Journal of Power Sources*, 114(2):366-373.

Kang, P., ve Birtwhistle, D., (2003), "Characterisation of vibration signals using continuous wavelet transform for condition assessment of on-load tap-changers," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(3):561-577.

Khan, M. J. ve 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.

Kisacikoglu, M. C., (2007), "Fuzzy Logic Control of a Fuel Cell/Ultracapacitor Hybrid Vehicular Power System", M. Sc. Thesis, University of South Alabama.

Kisacikoglu, M. C., Uzunoglu, M. ve Alam, M. S., (2008), "Load Sharing using Fuzzy Logic Control in a Fuel Cell/Ultra-capacitor Hybrid Vehicle", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Article in Press, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.11.035.

Kötz, R. ve Carlen M., (2000) "Principles and applications of electrochemical capacitors", *Electrochimica Acta*, 45(15-16): 2483-2498.

Lajnef, W., Vinassa, J. M., Briat, O., Azzopardi, S. ve Woïrgard E., (2007), "Characterization methods and modelling of ultracapacitors for use as peak power sources", *Journal of Power Sources*; 168(2):553-560.

Larminie, J. ve Lowry, J., (2003), *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley&Sons, West Sussex, England.

Leondes, C. T., (1998), *Fuzzy logic and expert systems application*, Academic Press, California, USA.

Liu, Z., Yang, L., Mao, Z., Zhuge, W., Zhang Y. ve Wang, L., (2006), "Behavior of PEMFC in starvation", *Journal of Power Sources*, 157(1): 166-176.

Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A. I., Jensen, H. M., Peppley, B. A. ve 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.

Mao, P. L. ve Aggarwal R. K., (2001), "A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network", *IEEE Trans. Power Delivery*, 16(4):654-660.

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

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

Mierlo, J. V., Maggetto, G. ve 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(17):2748-2760.

Miller, J. R., (2006), "Electrochemical capacitor thermal management issues at high-rate cycling", *Electrochimica Acta*, 52(4):1703-1708.

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

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

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

Paladini, V., Donato, T., Risi, A. D. ve 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. ve 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, A. D., Plitz, I., Menocal, S. ve Amatucci, G., (2003), "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications", *Journal of Power Sources*; 115(1):171-178.

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

Poisson, O., Rioual, P. ve Meunier, M., (2000), "Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform". *IEEE Trans. Power Delivery*, 15(3):1039-1044.

Poursamad, A. ve Montazeri, M., (2008), "Design of genetic fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles", *Control Engineering Practice*, 16(7):861-873.

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

Rahman, M. H. ve 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. ve Djilali, N., (2005), "A techno-economic analysis of decentralized electrolytic hydrogen production for fuel cell vehicles", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 30(11):1159-1179.

Rodatz, P., Paganelli, G., Sciarretta, A. ve Guzzella, L., (2005), "Optimal Power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle", *Control Engineering*

Practice, 13(1):41-53.

Schindall, J., (2007), "The charge of the ultracapacitors-Nanotechnology takes energy storage beyond batteries", IEEE Spectrum, Nov., 38-42.

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

Schouten, N. J., Salman M. A. ve Kheir N. A., (2003), "Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic", Control Engineering Practice, 11(2):171-177.

Scrosati, B., Armand, M., Henderson, W. ve Lian, K., (2007), Capacitive Storage Science, Basic Research for Energy Storage, Meeting of the American Chemical Society (ACS), April 2-4.

Semelsberger, A. T. ve Rodney, L. B., (2005), "Fuel effects on start-up energy and efficiency for automotive PEM fuel cell systems", Int. Journal of Hydrogen Energy, 30(4):425-435.

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

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

Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F. ve Tırıs M., (2003), "Elektrikli Araçlar", TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.

Vasu, G. ve Tangirala A. K., (2008), "Control-orientated thermal model for proton-exchange membrane fuel cell systems", Journal of Power Sources, 183(1):98-108.

Wang, L. X., (1997), A course in fuzzy systems and control", Prentice-Hall International, USA.

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

Young, W. R., (1994), "Electric vehicles of yesterday carry us into tomorrow", IEEE Conference Record, Southcon, 14-16.

Zadeh, L. A., (2008), "Is there a need for fuzzy logic?", Information Sciences, 178(13):2751-2779.

Zhang, X., Mi, C. C., Masrur, A. ve Daniszewski D., (2008), "Wavelet-Transform-Based Power Management of Hybrid Vehicles with Multiple On-board Energy Sources Including Fuel Cell, Battery and Ultracapacitor", Journal of Power Sources, 185(2):1533-1543.

Zhang, Z., Huang, X., Jiang, J. ve 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 12.05.1985

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996-2003 Zeytinburnu Adile Mermerci Anadolu Lisesi

Lisans 2003-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü