

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ**



**YAKIT PİLİ İÇEREN HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM  
SİSTEMİ**

**LİSANS BİTİRME ÇALIŞMASI**

**Öğrenci Adı SOYADI**

**Osman ALTAY**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Haziran - 2024**

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ**



**YAKIT PİLİ İÇEREN HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ENERJİ  
YÖNETİM SİSTEMİ**

**LİSANS BİTİRME ÇALIŞMASI**

**Osman ALTAY**  
**20332629079**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Danışman: Doç. Dr. Gökay BAYRAK**

**Haziran - 2024**

BTÜ, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün 20332629079 numaralı öğrencisi Osman ALTAY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YAKIT PİLİ İÇEREN HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ” başlıklı bitirme çalışmasını aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Danışmanı :** **Doç. Dr. Gökay BAYRAK** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Necati AKSOY** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Arş. Gör. Selim Can DEMİRTAŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Savunma Tarihi: 12.06.2024**

**EE Bölüm Başkanı:** Prof. Dr. Hakan GÜRKAN ...../...../.....  
Bursa Teknik Üniversitesi

## **İNTİHAL BEYANI**

Bu bitirme çalışmasında görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, bitirme çalışması içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri bitirme çalışmasında kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Osman Altay

İmzası:

## ÖNSÖZ

Bu tez, "Yakıt Pili İçeren Hibrit Elektrikli Taşıtlar İçin Enerji Yönetim Sistemi" başlığı altında sunulmaktadır.

Tez çalışmamın konusu olan yakıt pilleri, son yıllarda alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak, yakıt pilleri gelecekteki taşımacılık sistemlerinde önemli bir rol oynayacaktır. Ancak, yakıt pillerini daha yaygın hale getirmenin bir yolu, bunların etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamaktır.

Bu tez çalışması, yakıt pilleri için enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi alanındaki literatürü incelemekte ve MATLAB kullanarak bir enerji yönetim sistemi (EYS) oluşturmayı hedeflemektedir. Bu çalışmanın temel amacı, yakıt pillerinin enerji verimliliğini artırmak ve günlük kullanımda pratik bir şekilde uygulanabilir enerji yönetimi stratejileri geliştirmektir.

Çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen herkese teşekkür etmek isterim. Özellikle, danışmanım Doç. Dr. Gökay BAYRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sabrı, rehberliği ve değerli önerileri olmadan bu çalışma gerçekleştirilemezdi. Ayrıca aileme, beni destekleyen arkadaşlarıma ve bugünüme ulaşmamı sağlayan değerli öğretmenlerime minnettarım.

Umarım bu tez çalışması, yakıt pilleri için enerji yönetimi alanında ilgi çekici ve faydalı bir katkı sağlar. Bu çalışmanın, gelecekteki karbon sıfır enerji sistemlerinin geliştirilmesine bir adım daha yaklaşılmasına yardımcı olacağını umuyorum.

Haziran 2024

Osman Altay

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	2
<b>2. YAKIT PİLLİ HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞIT TOPOLOJİLERİ</b>	<b>3</b>
2.1 Yakıt Pili ve Bataryadan Oluşan Hibrit Elektrikli Taşıt .....	3
2.1.1 Yakıt pili ve bataryanın doğrudan bağlantısı .....	4
2.1.2 Yakıt pilinin dolaylı bağlantısı ve bataryanın dolaylı bağlantısı .....	4
2.1.3 Bataryanın dolaylı yakıt pilinin doğrudan bağlantısı .....	4
2.1.4 Bataryanın ve yakıt pilinin dolaylı bağlantısı .....	5
2.2 Yakıt Pili, Süper Kapasitör ve Batarya Hibrit Yapısı .....	7
2.3 Yakıt pili süper kapasitör hibriti.....	7
<b>3. ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİ</b>	<b>8</b>
3.1 Yakıt Pili ve Batarya Entegrasyonu .....	8
3.1.1 Paralel Entegrasyon: .....	8
3.1.2 Seri Entegrasyon: .....	9
3.2 Kural Tabanlı Kontrol .....	9
3.3 Optimizasyon Tabanlı Kontrol.....	9
3.4 Dinamik Programlama ve Model Öngörülü Kontrol (MÖK) .....	9
3.4.1 Dinamik Programlama .....	9
3.4.2 Model Öngörülü Kontrol (MÖK).....	10
3.5 Enerji Yönetiminde Karşılaşılan Zorluklar.....	10
<b>4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ HEDEFLERİ</b>	<b>10</b>
4.1 Yakıt Tüketimini Azaltma .....	10
4.2 Emisyonları Azaltma .....	11
4.3 Performansı Artırma .....	11
4.4 Batarya Ömrünü Uzatma .....	11
4.5 Sürüş Konforunu Artırma .....	11
4.6 Yenilenebilir Enerji Kullanımını Teşvik Etme .....	11
4.7 Maliyetleri Azaltma.....	12
<b>5. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ</b>	<b>12</b>
5.1 Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri .....	13
5.2 Yakıt Pili Türleri .....	14
5.2.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PDMYP) .....	14
5.2.2 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) .....	14
5.2.3 Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP) .....	15
5.2.4 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP) .....	15
5.2.5 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP) .....	15
5.3 Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	15
5.3.1 Avantajları.....	15
5.3.2 Dezavantajları .....	15
<b>6. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN SİMÜLİNK'TE MODELLENMESİ</b>	<b>16</b>

6.1 Yakıt Pilinin Simulink Modeli ve Kontrolü.....	17
6.2 Doğru Akım Yükselten Dönüştürücünün Tasarımı .....	19
6.3 Batarya Modeli.....	23
6.4 Güç Talebi.....	23
6.5 Enerji Yönetim Sisteminin Kontrolü.....	25
6.6 Simülasyon Sonuçları.....	25
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>29</b>
7.1 Talep Tepkisi.....	29
7.2 Enerji Depolama ve Dağıtım.....	30
7.3 Yük Dengeleme:.....	30
7.4 Verimlilik.....	30

## KISALTMALAR

<b>B</b>	: Batarya
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>DMYP</b>	: Doğrudan Metanol Yakıt Pili
<b>ETA</b>	: Elektrikli Taşıt
<b>EKYP</b>	: Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili
<b>EYS</b>	: Enerji Yönetim Sistemi
<b>FAYP</b>	: Fosforik Asit Yakıt Pili
<b>HETA</b>	: Hibrit Elektrikli Taşıt
<b>KOYP</b>	: Katı Oksit Yakıt Pili
<b>MÖK</b>	: Model Öngörülü kontrol
<b>PDMYP</b>	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili
<b>SK</b>	: Süper Kapasitör
<b>T</b>	: Topoloji
<b>YP</b>	: Yakıt Pili
<b>YPHETA</b>	: Yakıt Pilli Hibrit Elektrikli Taşıt



## **SEMBOLLER**

<b>V</b>	: Gerilim (Volt)
<b>A</b>	: Akım (Amper)
<b>L</b>	: Endüktans
<b>H</b>	: İndüktör Birimi Henry
<b>C</b>	: Kapasitör

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.2.1: Hibrit elektrikli taşıtlar için enerji yönetim topolojileri (a) Topoloji 1 T1, (b) Topoloji 2 T2, (c) Topoloji3 T3, (d) Topoloji 4 T4 [6]. ....	6
Şekil 2.2.2: Yakıt pili, batarya ve süper kapasitörden oluşan hibrit modeli [6]. ....	7
Şekil 4.1 Enerji yönetim sistemi hedefleri [12]. ....	12
Şekil 6.1:Geliştirilen enerji yönetim sistemi modeli ....	16
Şekil 6.2:Yakıt pili modelinin detaylı modeli. ....	17
Şekil 6.3 :Yakıt pili yığını parametreleri ve Gerilim-akım, Güç-Akım grafiği. ....	17
Şekil 6.4: Yakıt pili ve kontrol bloğu. ....	19
Şekil 6.5: Tepe akım kontrollü DA dönüştürücü devre şeması[20]. ....	20
Şekil 6.6: Açık çevrim da yükselten dönüştürücü şeması. ....	20
Şekil 6.7: İndüktör akımının durumu ve alt harmonikler[19]. ....	21
Şekil 6.8: Doğru akım yükselten dönüştürücünün Simulink modellemesi. ....	22
Şekil 6.9: Oluşturulan batarya modeli ve parametreleri. ....	23
Şekil 6.10: Sabit mıknatıslı senkron motor için güç talebi. ....	23
Şekil 6.11: Enerji yönetim sisteminin akış diyagramı. ....	24
Şekil 6.12: Lojik kontrollü enerji yönetim stratejisi. ....	25
Şekil 6.13: Bataryanın gerilim akım ve doluluk oranı grafiği. ....	26
Şekil 6.14: Yakıt pilinin akım ve gerilim grafiği. ....	26
Şekil 6.15: Yakıt pili verimliliğini ve yakıt tüketimlerini gösteren grafik. ....	27
Şekil 6.16: Da yükselten devresinin çıkış gerimi ve akımı. ....	27
Şekil 6.17: Güç talebinin ve torkun grafiği. ....	28
Şekil 6.18: Motor hızı ve faz akımlarının grafiği ....	28
Şekil 6.19: Bataryanın gerilim akım ve doluluk oranı grafiği. ....	29

# YAKIT PİLİ İÇEREN HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİ

## ÖZET

Bu çalışma, yakıt pilli taşıtlar için günlük hayatın gerçek koşullarında uygulanabilir ve anlık olarak çalışabilen bir enerji yönetim sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Yakıt hücresi teknolojisinin öneminin giderek artması ve taşıtların enerji verimliliği üzerindeki etkisi, bu sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, Matlab Simulink ortamında geliştirilen enerji yönetim sistemi, taşıtların enerji kaynakları olan batarya ve yakıt pili arasındaki enerji akışını yönetmektedir. Bu projede, batarya birincil enerji kaynağı, yakıt pili ise ikincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Literatürde, yakıt pilinin birincil enerji kaynağı olarak kullanıldığı modeller de mevcuttur. Bu çalışma, son yıllarda yapılan araştırmalar ve elde edilen bilgiler ışığında şekillendirilmiştir.

Araştırmada, yakıt pilli taşıtların günlük kullanım senaryolarına uygun bir model geliştirilmiştir. Bu model, güç tüketim ihtiyaçlarını ve çeşitli çevresel faktörleri dikkate alarak, sürücü davranışlarını da göz önünde bulundurur. Bu sayede, yakıt pili ve batarya için uygun enerji yönetim stratejileri belirlenmiştir. Gerçek zamanlı uygulanabilirlik için sağlam bir altyapı oluşturulmuş ve sistem, normal sürüş koşullarında etkin bir şekilde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durum, sistemin gerçek dünya koşullarında da verimli çalışabileceğini göstermektedir.

Öncelikle, elektrikli ve hibrit elektrikli taşıtlar arasındaki farklar, avantajlar ve dezavantajlar tartışılmıştır. Ardından, yakıt pilinin yapısı ve Simulink modeli hakkında bilgi verilmiştir. Simülasyon süreci detaylı olarak açıklanmış ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Sonuçlar, geliştirilen enerji yönetim sisteminin, yakıt pilli taşıtların batarya performansını artırmada ve yakıt pilini daha verimli kullanmada etkili olduğunu göstermektedir. Bu sistem, enerji verimliliğini artırarak yakıt tüketimini azaltmakta ve taşıtların genel kullanılabilirliğini ve çevresel sürdürülebilirliğini iyileştirmektedir.

Bu çalışma, yakıt pilli taşıtların günlük kullanım senaryolarında etkin bir şekilde kullanılacak gerçek zamanlı enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamak amacıyla yapılmıştır. Elde edilen bulgular, yakıt hücresi teknolojisinin gelecekteki uygulamaları için prototip bir model oluşturabilir. Ayrıca, bu çalışma, enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılan yöntemlerin etkinliğini ve pratik uygulanabilirliğini de tartışmaktadır. Bu bağlamda, çalışma, mevcut teknolojilerin optimize edilmesine ve gelecekteki yenilikçi enerji yönetim çözümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

**Anahtar kelimeler:** Yakıt pili, batarya, elektrikli taşıtlar, güç aktarımı, enerji yönetimi.

# ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES WITH FUEL CELLS

## SUMMARY

This study aims to develop an energy management system for fuel cell vehicles that can be applied in real conditions of daily life and can operate instantaneously. The increasing importance of fuel cell technology and its impact on the energy efficiency of vehicles necessitates the development of these systems. In this study, the energy management system developed in Matlab Simulink environment manages the energy flow between the battery and fuel cell, which are the energy sources of vehicles. In this project, the battery is used as the primary energy source and the fuel cell as the secondary energy source. In the literature, there are also models where the fuel cell is used as the primary energy source. This study has been shaped in the light of recent researches and information obtained.

In this study, a model suitable for daily use scenarios of fuel cell vehicles has been developed. This model takes into account the power consumption needs and various environmental factors, as well as driver behaviour. In this way, suitable energy management strategies for fuel cell and battery are identified. A robust infrastructure for real-time applicability is established and the system is designed to operate effectively under normal driving conditions. This shows that the system can also operate efficiently in real world conditions.

Firstly, the differences, advantages and disadvantages between electric and hybrid electric vehicles are discussed. Then, the structure of the fuel cell and the Simulink model are explained. The simulation process is explained in detail and the results obtained are discussed in detail.

The results show that the developed energy management system is effective in improving the battery performance of fuel cell vehicles and using the fuel cell more efficiently. This system reduces fuel consumption by increasing energy efficiency and improves the overall availability and environmental sustainability of vehicles.

The aim of this study is to contribute to the development of real-time energy management systems that can be used effectively in daily use scenarios of fuel cell vehicles. The findings can serve as a prototype model for future applications of fuel cell technology. Furthermore, this study also discusses the effectiveness and practical applicability of the methods used in the development of energy management systems. In this context, the study aims to contribute to the optimisation of existing technologies and the development of future innovative energy management solutions.

**Key words:** Fuel cell, battery, electric vehicles, power transmission, energy management.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda, içten yanmalı motorlarla çalışan taşıtlardan elektrik motoruyla çalışan taşıtlara geçiş hız kazanmıştır. Bu değişimin temelinde birçok faktör bulunmaktadır. Elektrikli taşıtların (ETA) motorlarının daha verimli ve sessiz çalışması, yakıt maliyetlerinin daha düşük olması ve daha çevreci olması gibi nedenler sayılabilir. “İçten yanmalı motorların gelişimi otomobil sektörüne çok şey kattı ancak büyük miktarlarda zehirli karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), karbon monoksit (CO) şeklinde, azot oksitler ( $\text{NO}_x$ ), yanmamış hidrokarbonlar (HC'ler) ve benzeri kirlilik sorunlarına, küresel ısınmaya ve ozon tabakasının tahribatına neden olmaktadır [1]. ETA’lar fosil yakıt kullanımını azalttığı düşüncesi ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. ETA’lar günümüzde çoğunlukla şebeke elektriği ile şarj edilmektedir ve bu şebeke enerjisinin ne kadarının fosil yakıtlardan üretildiği değişkenlik arz etmektedir. Fosil yakıtlarla elektrik üretiminin yaygın olduğu ülkelerde, ETA’ların çevreye daha az zararlı olduğu görüşü tartışmalıdır. Winyuchakrit’in Tayland üzerinden yaptığı çalışmada ETA’ların içten yanmalı motorlardan kaynaklı karbon emisyonunu azaltsa da elektrik üretim santrallerinden kaynaklanan karbon emisyonlarında artışa sebep olabileceği ortaya konmuştur [2].

Bu nedenle, ETA’ların çevreci olup olmadığı, o ülkenin elektrik enerjisinin ne kadarının fosil yakıtlardan üretildiğine bağlı olarak değerlendirilebilir. ETA’ların şarj edilmesinin uzun sürmesi gibi dezavantajlarına karşın, yakıt pilli hibrit elektrikli taşıtlar (YPHETA) alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bir yakıt pili basitçe kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye çeviren bir bileşendir en iyi tarafı sıfır karbon emisyonuna sahip olmasıdır bu sıfır karbon emisyonunun yanında çevreye sadece ısı ve su atığı salar bu avantajının yanında, YPHETA’ların da kendine özgü zorlukları vardır. En önemlisi zorluğu iki farklı elektriksel güç kaynağı içermeleridir. Bu iki güç kaynağı arasındaki enerji yönetim ilişkisini tanımlamak, YPHETA’ların karşılaştığı temel zorluklardan biridir. Ancak, hidrojen tanklarının kolayca değiştirilebilmesi, yakıt pilinde kullanılan hidrojenin çevreci yöntemlerle üretilebilmesi ve taşıt bataryalarını harici olarak şarj etmek zorunda olmamak gibi önemli avantajları da bulunmaktadır.

Tüm bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda, YPHETA'ların önemi daha da belirgin hale gelmektedir. Ama hala aşılması gereken zorluk enerji yönetim sisteminin tasarımı bu tasarım motorun dinamik davranışını ve yakıt tüketimini belirleyecek unsurdur ve en iyi şekilde tasarlanmalıdır bu nedenle, yakıt pili ve batarya arasındaki enerji akışı ilişkisini tanımlayan enerji yönetim sisteminin tasarlanması büyük bir önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, YPHETA'lar için enerji yönetim sisteminin geliştirilmesi üzerine odaklanılacaktır. İkinci bölümde hibrit elektrikli taşıtlar (HETA) için genel topolojileri avantajları ve dezavantajları tartışılırken, üçüncü bölümle birlikte enerji yönetim stratejileri avantajları ve dezavantajları verilmiştir. Dördüncü bölümde enerji yönetim stratejileri, 5. Bölümde hidrojen teknolojileri ve anlatılan modellerden yola çıkarak son bölümde simulink'te oluşturulan kural tabanlı bir enerji yönetim sistemi anlatılmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tezde, YPHETA için enerji yönetim sisteminin dinamik bir Simulink modeli oluşturulması ve bu modelin performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında, oluşturulan Simulink modelinin YPHETA'nın verimliliğini nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Modelin sonuçları detaylı bir şekilde tartışılmış, elde edilen veriler ışığında enerji yönetim sisteminin etkinliği değerlendirilmiştir. Tezin amacı ve kapsamı şu şekilde özetlenebilir:

**Simulink Modeli Oluşturulması:** YPHETA'lar için bir enerji yönetim sisteminin Simulink ortamında modellenmesi. Bu model, yakıt pili, batarya, elektrik motoru ve diğer bileşenlerin dinamiklerini ve etkileşimlerini içerecektir.

**Model Performansının Değerlendirilmesi:** Oluşturulan modelin farklı senaryolar altında test edilerek performansının değerlendirilmesi. Verimlilik değerlendirmesi yapılacaktır.

**Sonuçların Tartışılması:** Modelleme sonuçlarının detaylı bir şekilde tartışılması. Enerji yönetim sisteminin YPHETA verimliliğine katkıları, tespit edilen avantajlar ve dezavantajlar, modelin doğruluğu ve güvenilirliği üzerinde durulacaktır.

**Uygulanabilirlik Analizi:** Geliştirilen enerji yönetim sisteminin gerçek hayatta uygulanabilirliğinin incelenmesi. Potansiyel zorluklar ve kısıtlamalar, özellikle

teknolojik sınırlamalar, maliyet faktörleri ve altyapı gereksinimleri gibi konular ele alınacaktır.

**Teknolojik ve Çevresel Değerlendirme:** Yakıt pillerinin mevcut teknolojik sınırlamaları, maliyet faktörleri ve çevresel etkilerinin tartışılması. Bu teknolojinin sürdürülebilirlik ve çevre dostu ulaşım çözümleri bağlamında rolü değerlendirilecektir. Sonuç olarak bu tez YPHETA için enerji yönetim sistemi yönünde teorik ve pratik katkılar sağlamayı hedeflemektedir.

## **2. YAKIT PİLLİ HİBRİT ELEKTRİKLİ TAŞIT TOPOLOJİLERİ**

YPHETA için birkaç farklı hibrit model vardır. Batarya (B) ve yakıt pilinden oluşan YP+B hibrit yapı, Süper kapasitör (SK) ve yakıt pilinden (YP) oluşan YP+SK hibrit yapısı ve son olarak bu üç enerji kaynağı olan YP+B+SK hibrit yapılar sırasıyla tezde incelenecektir. Hibrit modeller dışında saf yakıt pili ile çalışan modeller de vardır bu model basit yapısının yanında kontrol edilmesi kolay ama enerji geri kazanımı olmadığından tercih edilmez. Tüm ETA'lar tahrik kaynağı olarak elektrik gücü depolayan kaynaklar kullanır ama YPHETA'lar depolama kaynağının yanında ikinci bir elektrik kaynağı olan yakıt piline sahiptirler, bu iki elektrik gücü kaynağı arasındaki ilişkiyi kurmak çok önemlidir. Bu ilişkiyi kuran farklı topolojiler vardır. Bu topolojiler yakıt pili, batarya ve bazılarında doğru akım-doğru akım dönüştürücülerle birlikte kurulan topolojiler ve üçüncül bir enerji kaynağı olan süper kapasitör hibrit modeli içeren topolojiler de vardır enerji yönetim sisteminin ilişkilerini kurmak için öncelikle bir topoloji seçilmeli ve bu topolojinin çalışma karakteristikleri çok iyi anlaşılmalı gerektirdiği şekilde algoritmalar kurulmalıdır.

### **2.1 Yakıt Pili ve Bataryadan Oluşan Hibrit Elektrikli Taşıt**

Bataryaların enerji yoğunluğunun yüksek olması ve enerji geri kazanım etkisinin olması nedeniyle en yaygın hibrit modelidir [3]. Şekil 2.1' de YPHETA için farklı topolojiler verilmektedir bu topolojilerde bazıları doğru akım barasına doğrudan bağlı iken bazıları doğru akım-doğru akım dönüştürücüler aracılığı ile doğru akım barasına bağlanmıştır. Şekil 2.1'deki T1 topolojisinde görülen topolojide doğrudan bağlantı

yapılmıştır. Yakıt pili ve bataryayı doğrudan doğru akım barasına bağlamanın bazı engelleri vardır, batarya ve yakıt pilinin gerilimleri aynı olmayabilir eğer böyle bir topoloji kullanılacaksa gerilimleri aynı olabilecek bileşenler seçilmelidir ve bunun yanında. Şekil 2.1'deki T3 topolojisinde yakıt pili DA-DA dönüştürücü yolu ile DA baraya bağlanmıştır. T3'te gösterilen topolojide YP doğrudan doğru akım barasına bağlı iken batarya doğru akım dönüştürücüsü üzerinde dolaylı şekilde bağlanmıştır. Şekil 2.1'deki gösterilen T4 topolojide ise YP ve B her ikisi de doğru akım barasında dolaylı bağlanmıştır.

### **2.1.1 Yakıt pili ve bataryanın doğrudan bağlantısı**

T1 topolojisinde görüldüğü üzere yakıt pili ve batarya doğrudan akım barasına bağlanmıştır bu topolojinin daha az maliyetli olduğu açıktır Bölüm 2.1'de bahsedilen tasarım kısıtını aştıktan sonra geriye hala bazı sorunlar kalmakta batarya ve yakıt pili tüketim isteklerini hangi oranlarda karşılayacağı sorunu ortaya çıkmaktadır maliyeti düşük olsa da kontrolü zor olan bir topolojidir.

### **2.1.2 Yakıt pilinin dolaylı bağlantısı ve bataryanın dolaylı bağlantısı**

Bu tez boyunca ilgileneceğimiz topolojidir. Şekil 2.1.b'de yer alan topoloji 2 yakıt pilinin bağlantısının yalnızca bir yükselten doğrultucu üzerinden dolaylı şekilde bağlanmıştır. Bu topolojinin önemli bir avantajı yakıt pilinin çıkış geriliminin bataryanın gerilimine zorlanmasıdır bu da doğru akım yükselten dönüştürücü için kontrol kolaylığı sağlar. Bu topolojide yakıt pilinin çıkışa aktardığı güç oranında azalma olur bu durum yakıt pilinin kullanım ömrünü ve verimliliğini yüksek tutar bu topolojinin faydalarındandır [4]. Ancak yakıt pili ile kullanılan bataryanın kapasitesi oldukça büyük olmalıdır derin deşarjlarda gerilim düşmesi doğru akım yükseltecinin gerilimini domine edeceğinden çıkışa aktarılan güçte ve verimlilikte önemli düşüşler ortaya çıkaracaktır bundan dolayı batarya seçimi bu topolojinin en önemli parametresidir derin deşarjlarda çok yüksek gerilim düşüşleri olmayacak yeterlilikte olması gerekir.

### **2.1.3 Bataryanın dolaylı yakıt pilinin doğrudan bağlantısı**

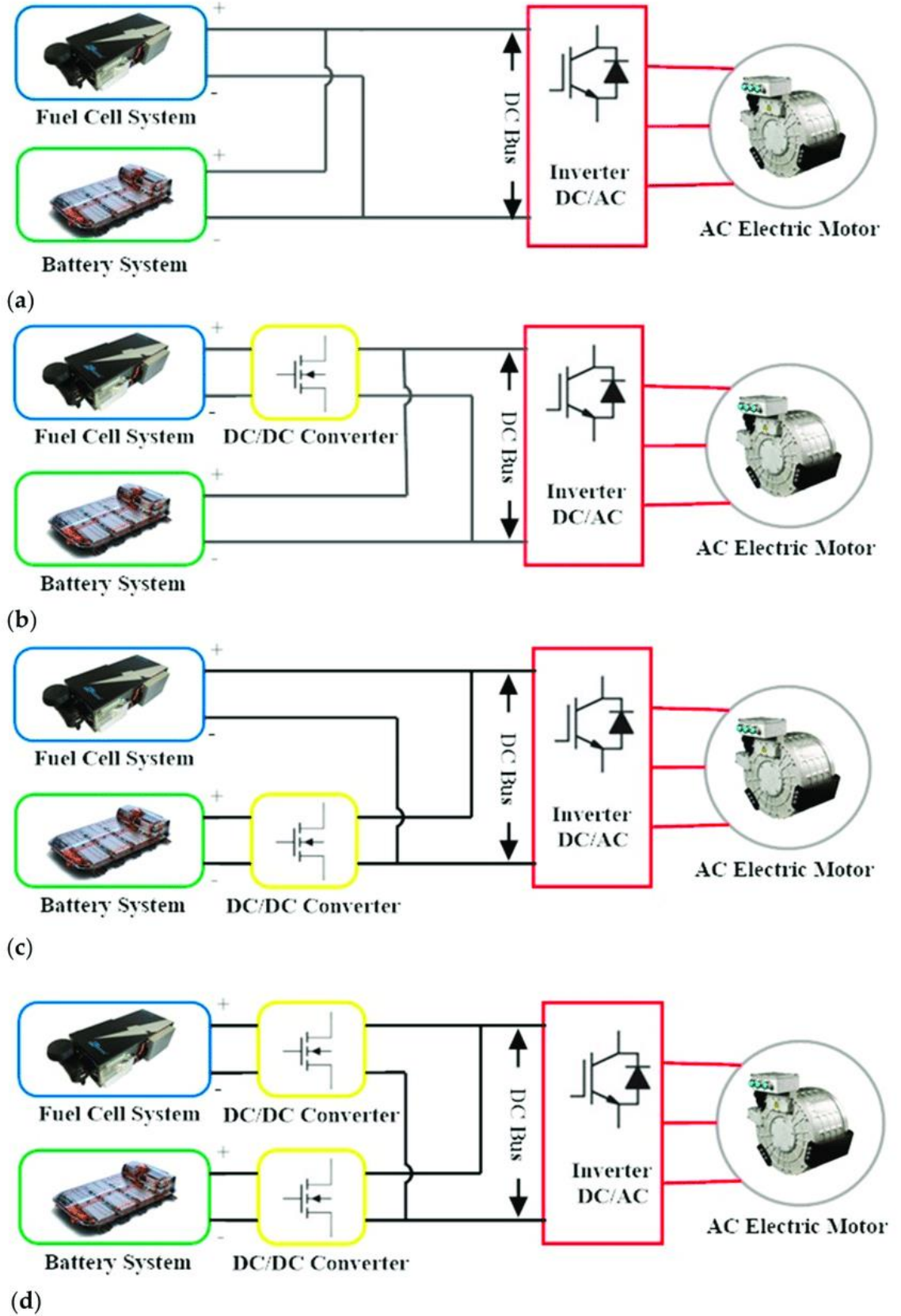
Bataryanın dolaylı bağlantısında yakıt pili doğrudan doğru akım barasına bağlanmıştır Şekil 2.1'deki T3 görülen topolojidir batarya gerilimi doğru akım dönüştürücü ile baranın gerilimine ayarlanır bu topolojinin dezavantajı yakıt pilinin çıkış



karakteristiğini bastırması olabilir yakıt batarya bağlı iken yakıt pilinin çıkış gücü azalacaktır yakıt pilinin daha az kullanılması yakıt pilinin ömrünü uzatabilir.

#### **2.1.4 Bataryanın ve yakıt pilinin dolaylı bağlantısı**

Şekil 2.1 T4 topolojisinde yakıt pili ve batarya dolaylı bağlanmıştır bu topolojide yakıt pilinin ve bataryanın güç aktarımında esnek olacağı açıktır ama doğru akım dönüştürücülerinin birden küçük bir verimlilikte çalıştığı düşünülürse en verimsiz topoloji bu olacaktır ayrıca iki adet doğru akım dönüştürücüsü maliyeti epey arttıracaktır bunun yanında çıkıştaki akım dalgalanması artar ve büyük bir filtre kondansatörüne ihtiyaç duyar [5]. Her ne kadar bara gerilimi kontrolü daha kolay olaksa da maliyet ve verimlilik yönünden ilk tercih olmayabilir.

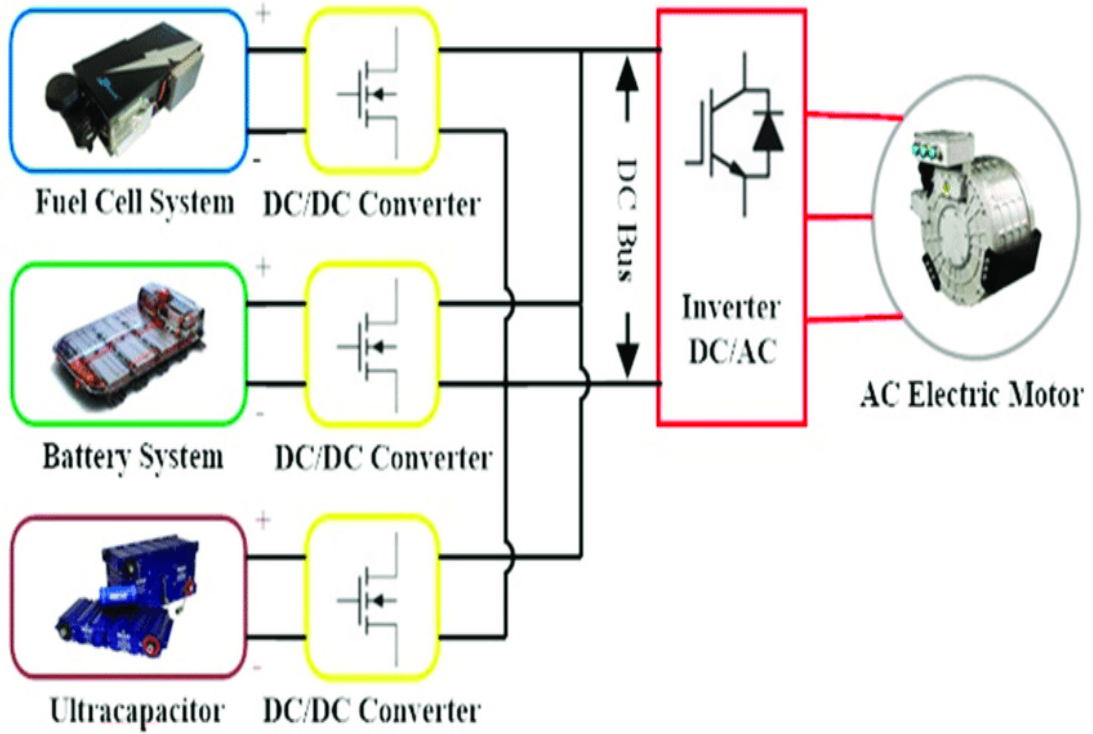


**Şekil 2.2.1:** Hibrit elektrikli taşıtlar için enerji yönetim topolojileri (a) Topoloji 1 T1, (b) Topoloji 2 T2, (c) Topoloji3 T3, (d) Topoloji 4 T4 [6].

## 2.2 Yakıt Pili, Süper Kapasitör ve Batarya Hibrit Yapısı

Dinamik tepkileri çok yavaş olan lityum iyon batarya ve yakıt piline nazaran süper kapasitörlerin dinamik tepkileri oldukça iyidir, çok hızlı şarj ve deşarj olurlar önemli bir eksikliği enerji yoğunluğunun lityum iyon bataryalara göre çok çok düşük olması [7]. Bu hibrit modeli süper kapasitör bileşeninin bu dinamik tepkisinden yararlanma üstüne kurulmuştur.

Çıkış tarafından talep edilen ani güç isteklerini karşılamak için mükemmel bir yapıdır ama bu cazip avantajına rağmen üç adet elektriksel güç kaynağını uygun bir biçimde kontrol etmek o kadar da kolay değildir çok fazla durumu ele alan çok gelişmiş bir kontrol stratejilerine ihtiyaç duyarlar. Şekil 2.2’de yakıt pili, süper kapasitör ve batarya hibriti görülmektedir.



Şekil 2.2.2: Yakıt pili, batarya ve süper kapasitörden oluşan hibrit modeli [6].

## 2.3 Yakıt pili süper kapasitör hibriti

Bu hibrit modelinin dinamik tepkileri çok iyidir bunun yanında elektriksel geri kazanımı da mevcuttur ama enerji yoğunluğu çok çok düşük olan süper kapasitörler yüksek güç isteklerinde büyük gerilim dalgalanmalarına yol açarlar ayrıca giriş tarafından çekilen akımda sıçramalara neden olabilirler.

### **3. ENERJİ YÖNETİM STRATEJİLERİ**

Enerji yönetim sistemi oluşturan elektriksel güç aktarım organları arasındaki ilişkiyi tanımlayan sistemdir.

Yakıt pilinden, elektrik depolama aracından ve enerji tüketiminden en yüksek verimliliği almak için enerji yönetim sistemi şarttır. Genel verimliliği arttırmak için güç aktarma organlarının maksimum verimde çalıştırılması çok önemlidir.

Yakıt pili hibrit elektrikli taşıtlar (YPHETA'lar), enerji yönetim stratejileri açısından büyük bir öneme sahiptir. Etkili enerji yönetimi, yakıt pili ve batarya sistemlerinin optimum performansla çalışmasını sağlar ve taşıtların verimliliğini artırır. Bu bölümde, YPHETA'lerde kullanılan enerji yönetim stratejilerini, bu stratejilerin avantajlarını ve zorluklarını ele alacağız.

Enerji yönetim sistemi (EYS), YPHETA'larda yakıt pili, batarya ve elektrik motoru arasındaki enerji akışını düzenler. Temel prensipler şunlardır:

Enerji talebi karşılanması, Taşıt sürüş sırasında gerekli olan enerji, en verimli şekilde yakıt pili ve bataryadan sağlanır [8].

Geri kazanım ve depolama, Frenleme veya yavaşlama anlarında oluşan enerji, bataryada depolanarak yeniden kullanılır [9].

Sistem sağlığı ve ömrü, Yakıt pili ve batarya ömrünün uzatılması için uygun çalışma koşulları sağlanır [10].

Optimum verimlilik; enerji yönetimi, minimum yakıt tüketimi ve maksimum menzil sağlamak amacıyla optimize edilir [11].

#### **3.1 Yakıt Pili ve Batarya Entegrasyonu**

YPHETA'larda, yakıt pili ve batarya arasındaki sinerji, enerji yönetiminin temelini oluşturur. İki ana entegrasyon stratejisi bulunmaktadır:

##### **3.1.1 Paralel Entegrasyon:**

Yakıt pili ve batarya, aynı anda enerji sağlamak için paralel olarak bağlanır. Bu strateji, yüksek güç taleplerinde her iki kaynaktan da enerji çekilmesini sağlar [8].

### **3.1.2 Seri Entegrasyon:**

Batarya, yalnızca yakıt pili tarafından şarj edilir ve enerji doğrudan elektrik motoruna aktarılır. Bu durumda, yakıt pili sürekli olarak optimum verimlilikte çalışır ve batarya enerji depolama görevi görür [9].

Enerji yönetim stratejileri, genellikle iki ana kontrol yaklaşımına dayanır: kural tabanlı kontrol ve optimizasyon tabanlı kontrol.

### **3.2 Kural Tabanlı Kontrol**

Bu strateji, belirli kurallar ve eşikler kullanarak enerji akışını düzenler. Örneğin, batarya doluluk seviyesi belirli bir eşik altına düştüğünde yakıt pili devreye girer. Basit ve hızlı uygulamalar için uygundur ancak her zaman için optimum verimlilik sağlamaz [8].

### **3.3 Optimizasyon Tabanlı Kontrol**

Matematiksel modeller ve algoritmalar kullanarak, sistemin anlık durumu ve sürüş koşullarına göre en uygun enerji yönetimi sağlanır. Genetik algoritmalar, bulanık mantık ve dinamik programlama gibi teknikler kullanılarak, enerji akışı optimize edilir. Bu strateji, daha karmaşık ve hesaplama yoğun olmakla birlikte, genellikle daha yüksek verimlilik sağlar [10].

### **3.4 Dinamik Programlama ve Model Öngörülü Kontrol (MÖK)**

Dinamik programlama ve Model öngörülü kontrol (MÖK) gibi ileri seviye kontrol stratejileri, enerji yönetiminde sıklıkla kullanılır. Bu yöntemler, sistemin gelecekteki durumu ve sürüş profillerini tahmin ederek, anlık kararlar verir.

#### **3.4.1 Dinamik Programlama**

Sistem durumlarının ve kontrol değişkenlerinin tüm olası kombinasyonlarını değerlendirerek, en uygun enerji yönetim stratejisini belirler. Bu yöntem, hesaplama maliyeti yüksek olmasına rağmen, uzun vadede en verimli sonucu sağlar [8].

### 3.4.2 Model Öngörülü Kontrol (MÖK)

Gelecekteki sürüş koşullarını ve enerji taleplerini tahmin ederek, sürekli güncellenen kontrol kararları alır. MÖK, özellikle değişken sürüş koşullarında etkin bir kontrol sağlar ve sistem performansını artırır [11].

### 3.5 Enerji Yönetiminde Karşılaşılan Zorluklar

YPHETA’larda enerji yönetimi, birçok zorlukla karşı karşıyadır:

- Gerçek Zamanlı Kontrol, anlık enerji taleplerine ve sürüş koşullarına hızlı yanıt verebilmek, karmaşık algoritmalar gerektirir [9].
- Sistem bileşenlerinin uyumu, yakıt pili, batarya ve elektrik motorunun uyumlu çalışması, enerji yönetiminin etkinliğini belirler [10].
- Optimum verimlilik ve maliyet, En yüksek verimliliği sağlamak için gerekli olan hesaplama gücü ve sensör sistemleri, maliyetleri artırabilir [11].
- Çevresel ve sürücü davranışları, dış etkenler ve sürücü davranışları, enerji yönetim stratejilerinin performansını etkileyebilir [8].

## 4. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ HEDEFLERİ

HETA’lar enerji yönetim sisteminin (EYS) temel hedefi, yakıt tüketimini ve emisyonları minimize ederken, aracın performansını ve batarya ömrünü maksimize etmektir. Bu hedeflere ulaşmak için EYS, aracın çeşitli enerji kaynakları ve depolama bileşenleri arasında enerjinin etkin bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Aşağıda, enerji yönetim sisteminin spesifik hedefleri detaylandırılmıştır.

### 4.1 Yakıt Tüketimini Azaltma

Yakıt tüketimini azaltmak, enerji yönetim sisteminin başlıca hedeflerinden biridir. Bu hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemlidir. EYS, yakıt pili ve batarya arasındaki enerji akışını optimize ederek, motorun en verimli çalışma noktasında çalışmasını sağlar. Böylece, gereksiz yakıt tüketiminin önüne geçilir ve aracın genel verimliliği artırılır [12].

#### **4.2 Emisyonları Azaltma**

EYS, hibrit taşıtların çevresel etkilerini azaltmak için de önemli bir rol oynar. EYS, motor ve yakıt pilinin optimum koşullarda çalışmasını sağlayarak emisyonların minimize edilmesine katkıda bulunur. Özellikle şehir içi sürüş koşullarında, bataryanın daha fazla kullanılması ve yakıt pilinin düşük yük altında çalıştırılması, zararlı gaz emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir [13].

#### **4.3 Performansı Artırma**

Aracın performansını artırmak, EYS'nin diğer bir önemli hedefidir. EYS, aracın hızlanma ve tork gereksinimlerine anında cevap verecek şekilde enerji kaynaklarını yönetir. Batarya ve yakıt pilinin dengeli bir şekilde kullanımı, aracın ani hızlanma ve yüksek performans gerektiren durumlarda maksimum verimlilikle çalışmasını sağlar.

#### **4.4 Batarya Ömrünü Uzatma**

Batarya ömrünü uzatmak, EYS'nin bir diğer kritik hedefidir. Bataryaların derin deşarj ve aşırı şarjdan korunması, ömürlerini önemli ölçüde artırabilir. EYS, bataryanın optimum şarj seviyelerinde tutulmasını ve aşırı yüklenme durumlarından kaçınılmasını sağlar. Bu hem bataryanın ömrünü uzatır hem de aracın genel güvenilirliğini artırır [12].

#### **4.5 Sürüş Konforunu Artırma**

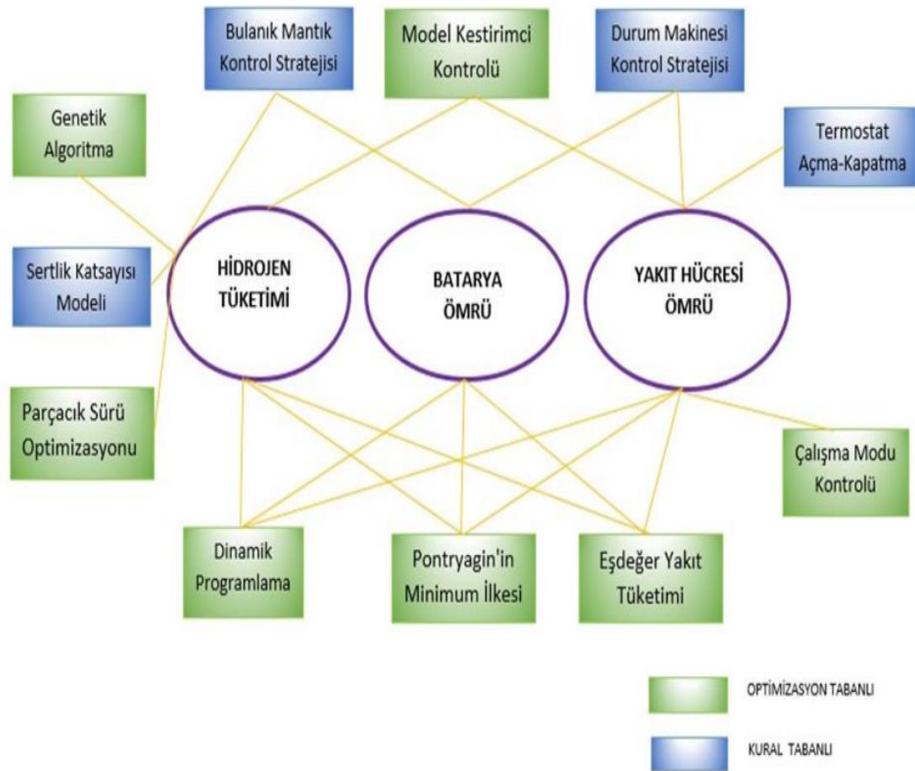
EYS, aracın sürüş konforunu da artırmayı hedefler. Enerji yönetimi, motor ve batarya arasında geçişlerin pürüzsüz olmasını ve sürücünün bu geçişleri hissetmemesini sağlamalıdır. Ayrıca, EYS, aracın genel performansını artırarak daha rahat ve keyifli bir sürüş deneyimi sunar.

#### **4.6 Yenilenebilir Enerji Kullanımını Teşvik Etme**

EYS, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek, aracın genel çevresel etkisini azaltmayı amaçlar. Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin bataryalarda depolanması ve kullanılması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve sürdürülebilir enerji kullanımını artırır

#### 4.7 Maliyetleri Azaltma

Yakıt ve bakım maliyetlerini azaltmak, EYS'nin hedeflerinden biridir. Yakıt verimliliğini artırarak ve batarya ömrünü uzatarak, toplam sahip olma maliyetleri düşürülür. Bu hem bireysel kullanıcılar hem de filolar için ekonomik avantajlar sağlar. Şekil 4.1'de enerji yönetim sisteminin hedefleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Enerji yönetim sistemi hedefleri [12].

#### 5. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve özellikle temiz enerji üretimi için büyük potansiyel sunan elektrokimyasal cihazlardır. Bu bölümde, yakıt pillerinin temel çalışma prensipleri, türleri, avantajları ve dezavantajları incelenecektir.



## 5.1 Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri

Yakıt pilleri, genellikle hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonu ile çalışır. Temel çalışma prensibi, bir yakıt (genellikle hidrojen) ve bir oksitleyici (genellikle oksijen) arasında gerçekleşen redoks reaksiyonuna dayanır. Bu süreç aşağıdaki adımlarla özetlenebilir:

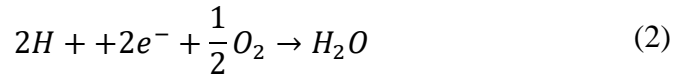
Hidrojen Anoda Girer denklem 1'deki gibi hidrojen gazı, anotta protonlara ve elektronlara ayrışır. Bu süreçte, hidrojen molekülleri ( $H_2$ ) platin katalizör yardımıyla iki protona ( $H^+$ ) ve iki elektrona ( $e^-$ ) ayrışır.



Protonlar membrandan geçer protonlar, proton değişim membranı (PEM) aracılığıyla katoda geçer. Membran sadece protonların geçişine izin verir, elektronların geçişine izin vermez.

Elektronlar dış devreden geçer, elektronlar dış devre üzerinden katoda ulaşırken elektrik akımı oluşturur. Bu elektrik akımı, cihazları çalıştırmak için kullanılabilir.

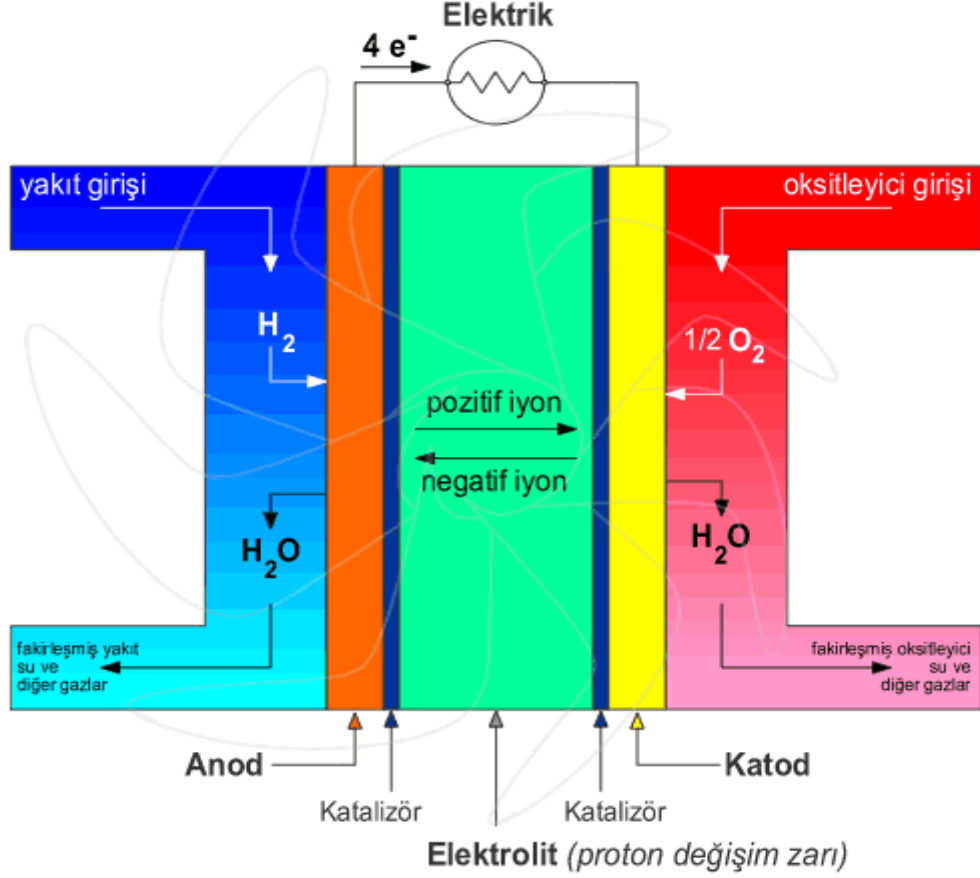
Reaksiyon katotta tamamlanır Denklem 2'de görüldüğü gibi katoda ulaşan protonlar ve elektronlar, oksijenle birleşerek su oluşturur.



Bu süreç, hidrojen ve oksijenin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür, bu da yakıt pillerini oldukça verimli kılar.

Yakıt pilinin güzelliği çalışması sonucunda hiç karbon emisyonu üretmemesidir ayrıca verimlilik görece yüksek sayılabilir[14].

Basit bir yakıt pili hücresinin görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Yakıt pili hücresinin görünümü.

## 5.2 Yakıt Pili Türleri

Yakıt pilleri, farklı türlere ayrılır ve her biri farklı uygulamalara uygun özellikler sunar. Yaygın yakıt pili türleri şunlardır:

### 5.2.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PDMYP)

Düşük sıcaklıkta (genellikle 60-80°C) çalışır ve hızlı başlatma özelliğine sahiptir. PDMYP'ler, yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapıları nedeniyle otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılır [14].

### 5.2.2 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

Yüksek sıcaklıkta (genellikle 800-1000°C) çalışır ve çeşitli yakıtlarla uyumludur. SOFC'ler, sabit güç kaynakları ve endüstriyel uygulamalar için uygundur. Yüksek verimlilik sunar ancak uzun ısınma süresi ve malzeme dayanıklılığı gibi zorlukları vardır [15]

### **5.2.3 Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP)**

Metanol kullanarak doğrudan elektrik üretir. DMFC'ler, düşük sıcaklıkta çalışır ve taşınabilir elektronik cihazlar için uygundur. Ancak enerji yoğunlukları düşük olduğu için otomotiv uygulamalarında sınırlı kullanım alanına sahiptir [16].

### **5.2.4 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)**

Orta sıcaklıkta (150-200°C) çalışır ve genellikle sabit güç üretiminde kullanılır. FAYP'ler, iyi bir termal ve elektriksel verimlilik sunar, ancak daha düşük güç yoğunluğu ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir [17].

### **5.2.5 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)**

Yüksek sıcaklıkta (650°C) çalışır ve genellikle büyük ölçekli enerji santrallerinde kullanılır. EKYP'ler, yüksek verimlilik ve çeşitli yakıt türlerini kullanabilme yeteneği ile dikkat çeker. Ancak, yüksek işletme sıcaklıkları nedeniyle malzeme dayanıklılığı ve sistem karmaşıklığı gibi zorluklarla karşılaşır [18].

## **5.3 Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları**

### **5.3.1 Avantajları**

- Yüksek Verimlilik, Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek yüksek verimlilik sağlar.
- Çevre Dostu, Yakıt pilleri, hidrojen ve oksijen kullanarak sadece su buharı üretir, bu da sıfır emisyon anlamına gelir.
- Sessiz Çalışma, Elektrokimyasal reaksiyonlar mekanik hareket gerektirmediğinden, yakıt pilleri sessiz çalışır.
- Çeşitli Yakıt Seçenekleri, Bazı yakıt pili türleri (örneğin KOYP ve EKYP) çeşitli yakıtlarla çalışabilir, bu da esneklik sağlar.

### **5.3.2 Dezavantajları**

- Yüksek Maliyet, Yakıt pili üretiminde kullanılan malzemeler, özellikle platin gibi katalizörler, yüksek maliyetlidir.
- Hidrojen Üretimi ve Depolama, Hidrojenin güvenli ve ekonomik olarak üretilmesi, depolanması ve taşınması zorluklar taşır.

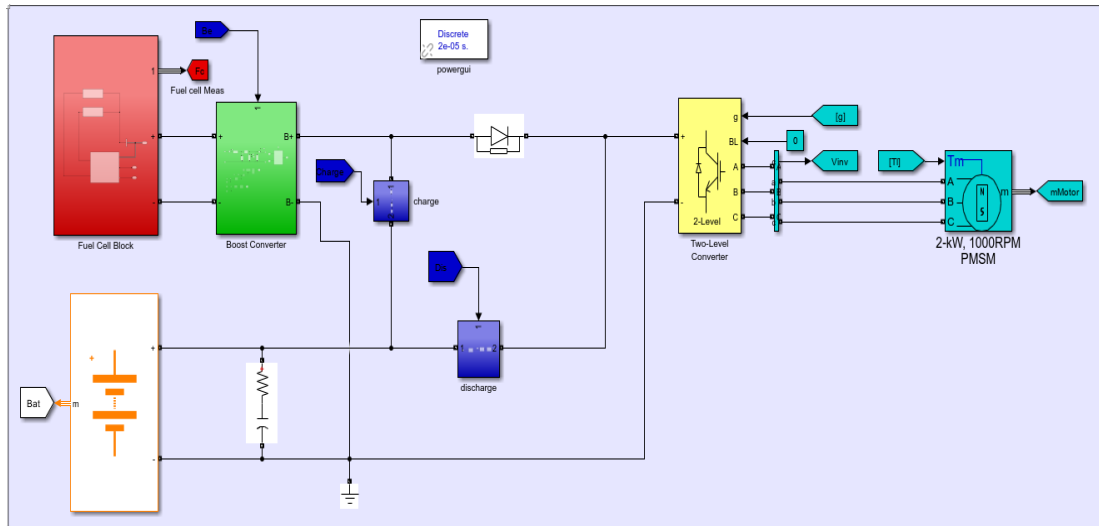
- Dayanıklılık, Yakıt pilleri, uzun süreli kullanımda performans kaybı yaşayabilir ve bakım gerektirebilir.
- Isınma Süresi, Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (örneğin KOYP ve EKYP) uzun ısınma sürelerine ihtiyaç duyar, bu da anında güç gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı olabilir.

## 6. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİNİN SİMULİNK'TE MODELLENMESİ

Bu bölümle birlikte bir yakıt hücreli hibrit elektrikli taşıt (YPHETA) modellenmesine giriş yapılacaktır. Modelde kullanılan yakıt pili PDM (Proton Değişim Membran) yakıt pili olacaktır.

Bu model paralel entegrasyonlu, deterministik (kural tabanlı) ve yük takibi stratejisi ile T2 topolojisi kullanılarak oluşturulmuştur.

Şekil 6.1’de geliştirilen enerji yönetim sistemi modeli gösterilmiştir. Burada yakıt pili doğru akım dönüştürücüsüne bağlı iken batarya deşarj rölesi aracılığı ile doğru akım barasına bağlanmıştır, güç talebi için alan yönlendirmeli bir SMSM kullanılmaktadır.

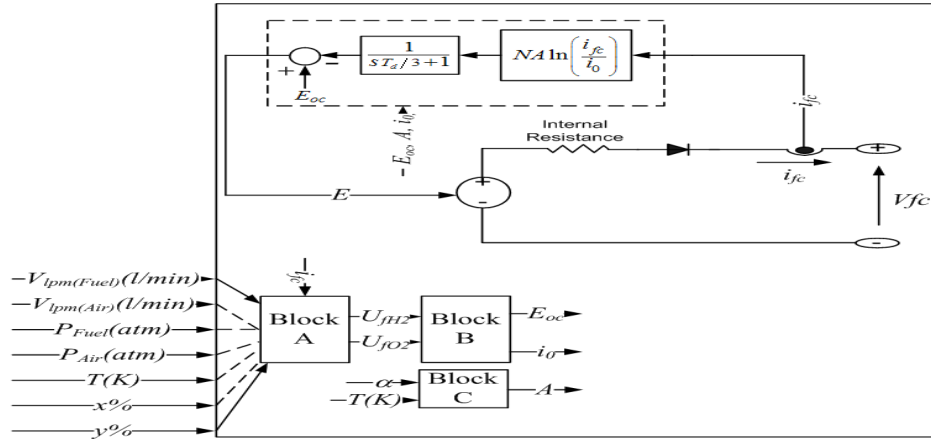


Şekil 6.1: Geliştirilen enerji yönetim sistemi modeli

## 6.1 Yakıt Pili Simulink Modeli ve Kontrolü

Fuel Cell Stack (Yakıt pili yığını) bu blok içerisinde tanımlanacak parametrelerle bir yakıt pilini simüle etmek mümkündür.

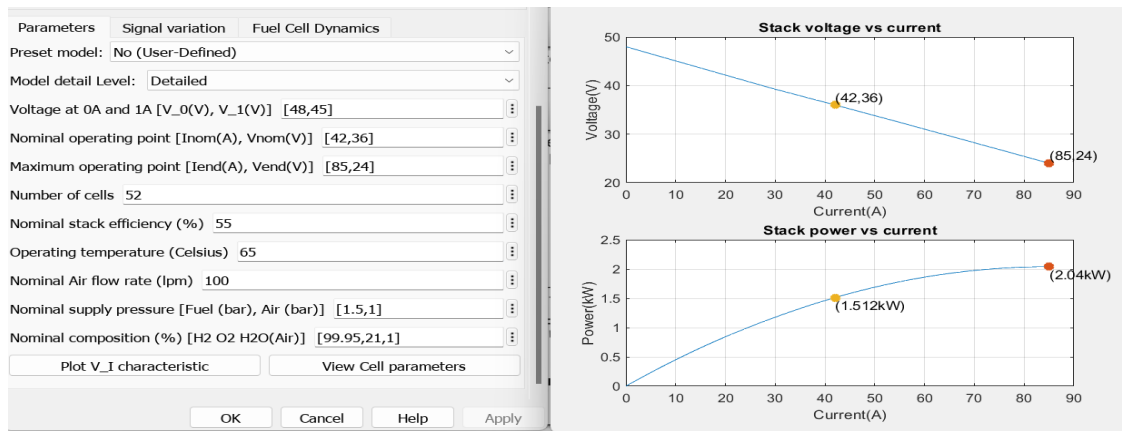
Şekil 6.2’de yakıt pilinin detaylı modeli verilmiştir bu model yakıt, hava, basınlar ve yakıt, hava derişimlerini giriş olarak alıyor ve çıkışta yakıt pili için benzer bir model oluşturuyor.



Şekil 6.2:Yakıt pili modelinin detaylı modeli.

Şekil 6.3’te tasarlanan yakıt pili ve gerilim akım karakteristiği görülmektedir bu model Yakıt pili 2 kW güce ulaşabilecek şekilde modellenmiştir ama enerji yönetim sisteminde yakıt pilini maksimum 1500-1700W güç sağlayacak parametre girişi yapılmıştır. Nominal olarak 36V gerilim ve 42A akım ile çalışması hedeflenmiştir.

Düşük güç istekleri bataryadan ortalama ve yüksek güç istekleri yakıt pilinden sağlanacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 6.3 :Yakıt pili yığını parametreleri ve Gerilim-akım, Güç-Akım grafiği.

Yakıt pili kontrol modeli oluştururken bazı kabuller yapılmıştır bunlar:

- Her zaman yeterince oksijen ve hidrojen yakıtı vardır.
- Yakıt ve havanın derişimleri her zaman sabittir.
- Yakıt ve Oksijenin basınçları her zaman sabittir.
- Yakıt pilinin sıcaklık etkileri göz ardı edilir (Uygun soğutucu ile soğutulduğu varsayılacaktır)

$$U_{fH_2} = \frac{6000RTNi_{fc}}{ZP_{fuel}V_{lpm}(fuel)x\%} \quad (5)$$

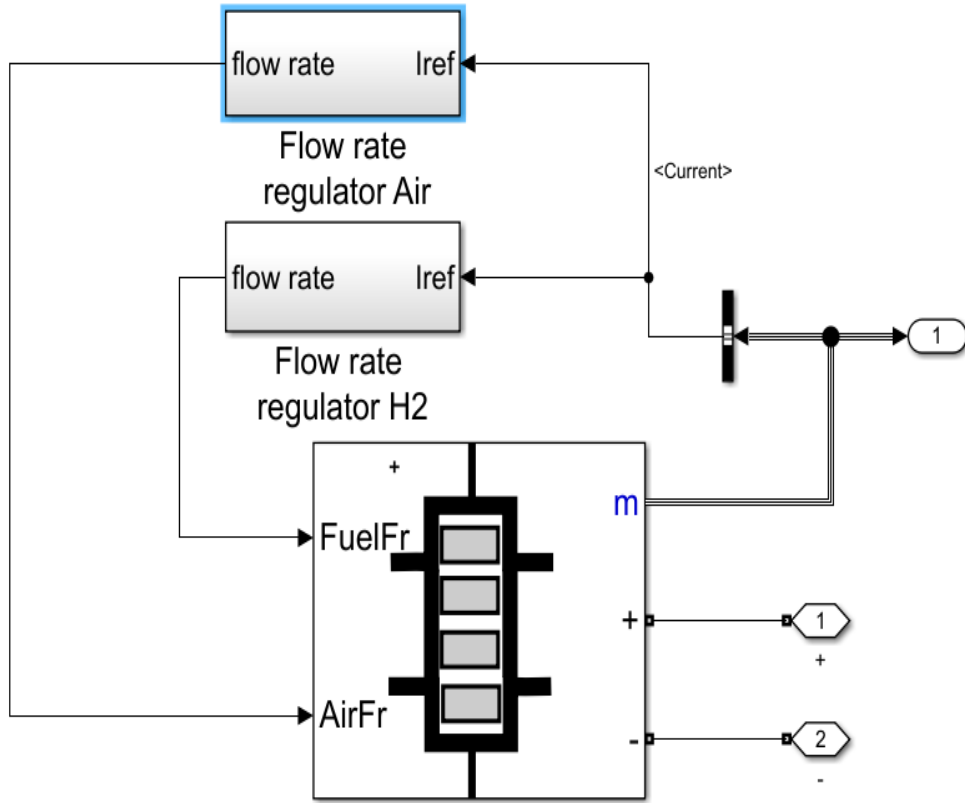
$$U_{fO_2} = \frac{6000RTNi_{fc}}{2ZP_{air}V_{lpm}(air)y\%} \quad (6)$$

Denklem 1'deki denklem yakıt tüketimini, Denklem 2'deki denklem ise yakıt pilinin oksijen kullanımını belirleyecek terminal akımının [u (1)] girdisiyle denklem 3 ve Denklem 4'teki gibi fonksiyon halinde kullanılacak fonksiyon girdisine göre yakıt tüketimi belirlenecek bu denklemler yakıt pili yığınının Simulink modeli için türetilmiştir.

$$U_{fH_2} = \frac{60000 * 8.3145 * (273 + 65) * 52 * u(1)}{(2 * 96485 * (1.16 * 101325) * (0.9898 * .9995))} \quad (7)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000 * 8.3145 * (273 + 65) * 52 * u(1)}{(2 * 96485 * (1.16 * 101325) * (0.9898 * .9995))} \quad (8)$$

ya bu hasaba göre vakit niline girdi olarak alınmaktadır.



**Şekil 6.4:** Yakıt pili ve kontrol bloğu.

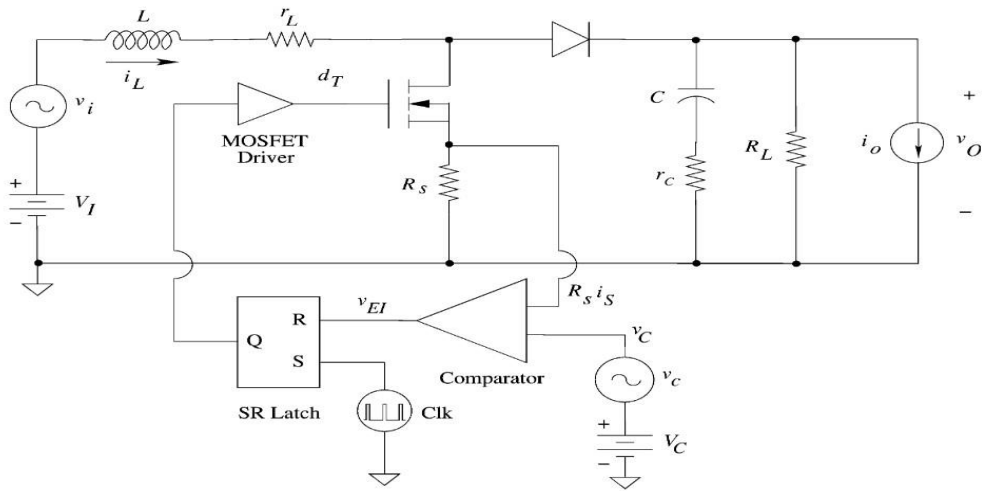
## 6.2 Doğru Akım Yükselten Dönüştürücünün Tasarımı

Batarya yakıt pili hibriti olan topoloji T2’de bahsettiğimiz gibi bu topolojide tek yönlü bir adet doğru akım dönüştürücüsü vardır o da yakıt piline bağlıdır ve yakıt pili gerilimini terminal gerilimine dönüştürür yükselten bir dönüştürücüdür.

Bara gerilimi bataryanın çıkış gerilim kadar olacağından bara için net bir gerilim söylenemese de bu gerilim genellikle nominal olarak 96V civarında olacaktır.

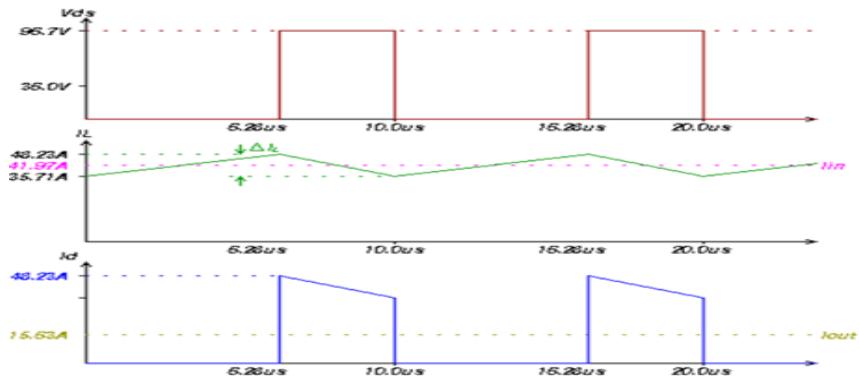
Yükselten dönüştürücü için tepe akım kontrollü yükselten dönüştürücü kullanılmıştır ve yükselten dönüştürücü akım karakteristiği artan ve düşen şekildedir. Tepe akım kontrollü bir yükselticinin kullanılmasının sebebi şekil 6.3'te görülen akım-gerilim ilişkisinde yakıt pilinden çekilen akımın derinliği arttıkça geriliminin düşmesi ve bu derin deşarjın yakıt piline zarar verebilecek olmasından dolayıdır.

Şekil 6.5'te şematiği verilen DA dönüştürücüsü devresi temel bir DA yükselten topolojisinde tepe akım kontrolü sağlar bu topoloji başlangıç akımlarını engelleyemese de tepe akımlarının durgun durumda engellenmesini sağlar. Çok küçük bir görev çevrimi olan saat sinyali SR mandalını aktif hale getirir çıkış geriliminin bir örneği alınır karşılaştırıcı devrelerde bir kompensatör üzerinden karşılaştırılır mosfet üzerinden bir akım örneği alınır karşılaştırıcı devreden kompensatör üzerinden gelen değerle karşılaştırılır ve bu değerden büyük ise reset sinyali oluşturulur. Bu topoloji dönüştürücünün gürültüye karşı hassasiyetini arttırırsa da akım üzerindeki kontrol etkisi nedeniyle tercih edilmiştir [19].



Şekil 6.5: Tepe akım kontrollü DA dönüştürücü devre şeması[20].

Şekil 6.6'da da yükselten dönüştürücü için indüktör akımı ve devre parametreleri gösterilmiştir çıkış gerilim 96v giriş gerilim 24-48v arasında olacak şekilde tasarlanmıştır, 100kHz tetik ile anahtarlanmaktadır.



Şekil 6.6: Açık çevrim da yükselten dönüştürücü şeması.

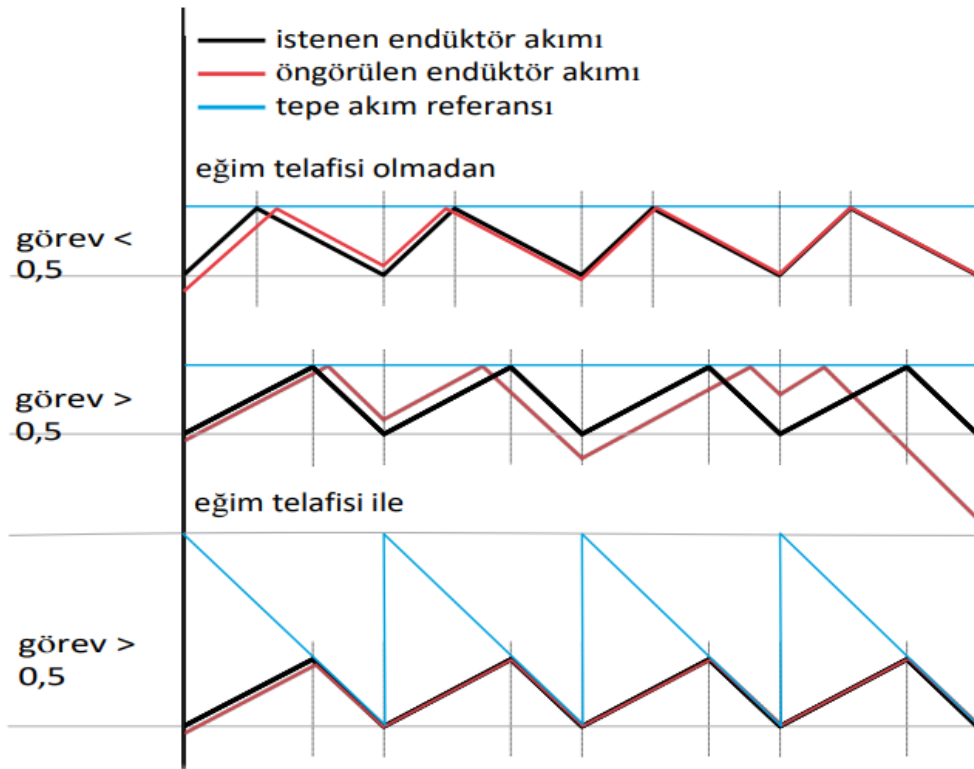


$$I_{pk} = I_{in} + \frac{V_o D (1 - D) T_s}{L}$$

9

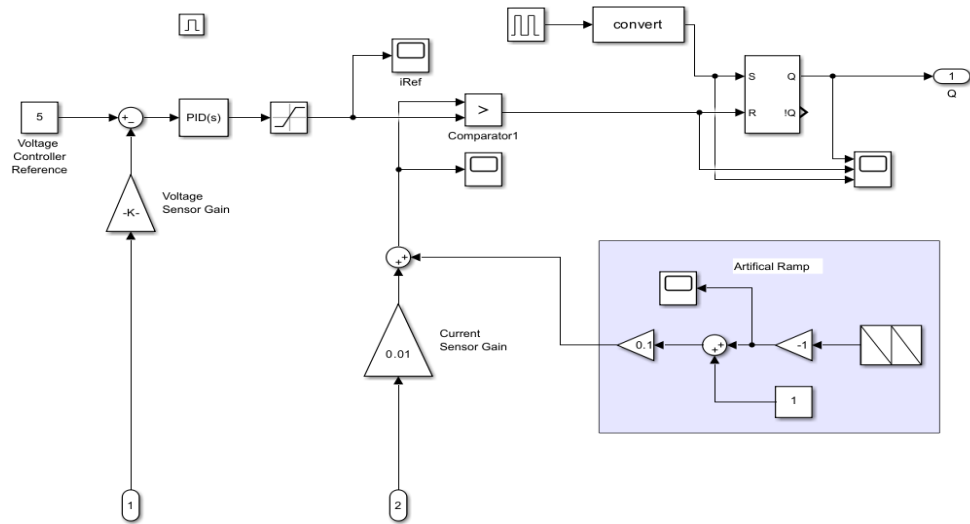
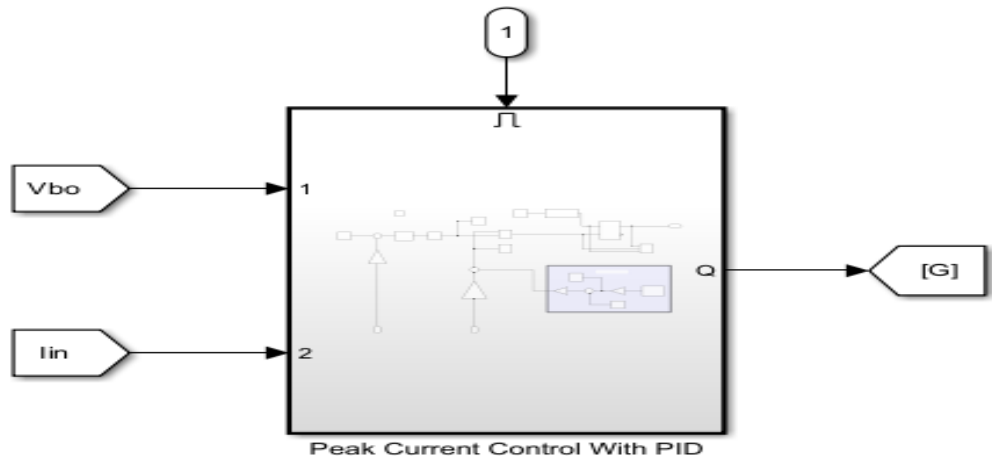
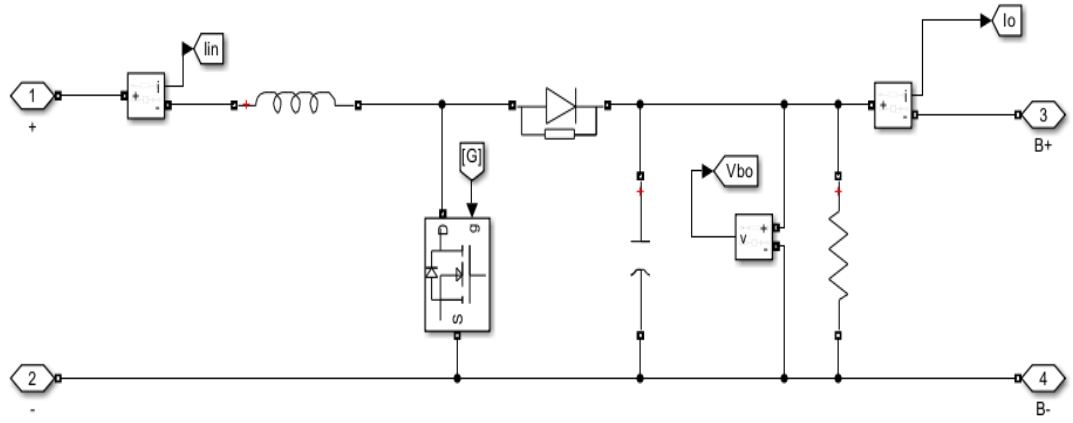
Denklem 9’da açık çevrim bir doğru akım yükselten topolojisinin tepe akımının hesaplanması verilmiştir. Görev çevrimi yüzde 50’den büyük olduğunda alt harmonik osilasyonlar indüktör akımı üzerine biner.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi görev çevrimi yüzde 50’den büyükken alt harmoniklerin giderilmesi için yapay bir rampa üreticine başvurulmuştur. Bu rampa akım üşen yönde iken gelen kurma sinyalin bastıracaktır bunun sonucunda harmonikler sönümlenecektir.



**Şekil 6.7:** İndüktör akımının durumu ve alt harmonikler[19].

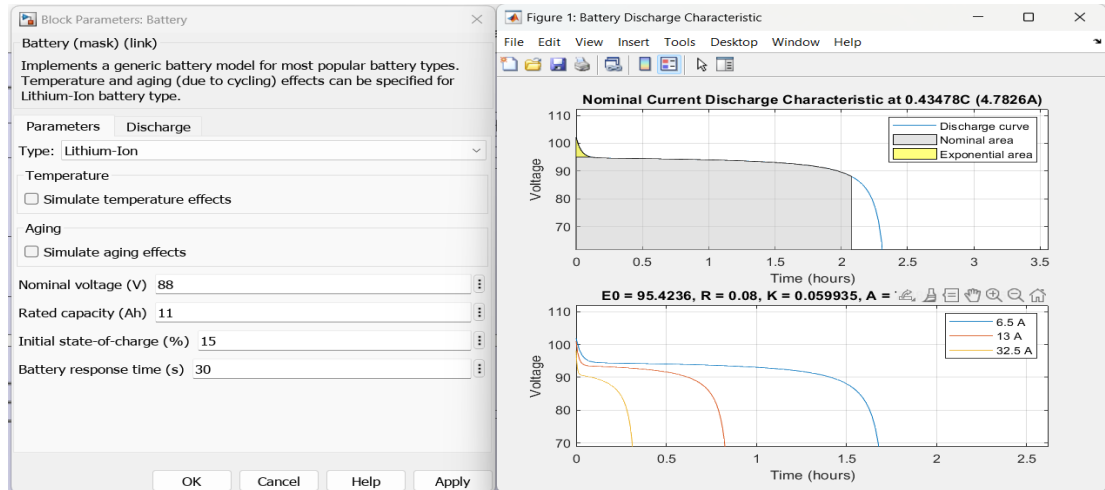
Bahsedilen bu yöntemler kullanılarak simulinkte bir tepe akım kontrollü da yükselten dönüştürücü devresi tasarlanmıştır ve yakıt pili ve kontrol hücresinin terminallerine bağlanmıştır. Şekil 6.8’de tasarlanan tepe akım kontrollü da yükselten dönüştürücünün Simulink tasarımı verilmiştir.



Şekil 6.8: Doğru akım yükselten dönüştürücünün Simulink modellemesi.

### 6.3 Batarya Modeli

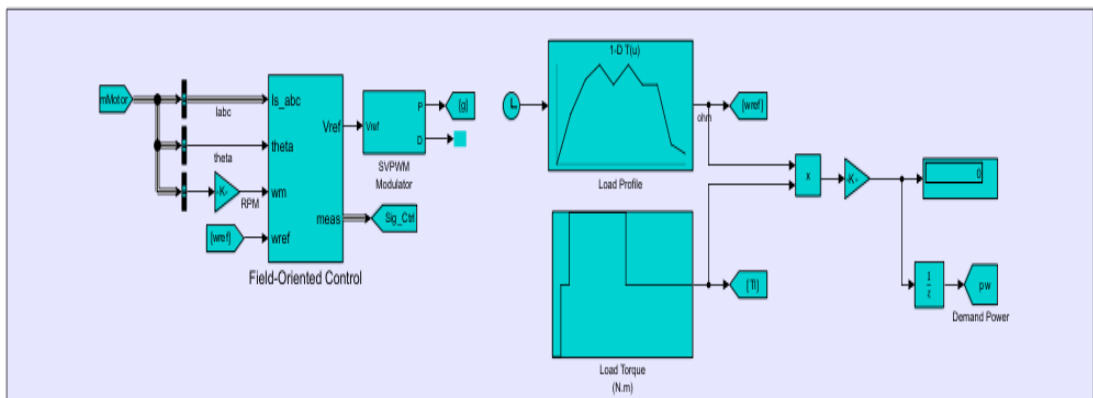
Şekil 6.9’da simulinkte oluşturulan batarya parametreleri verilmiştir. Bataryanın düşük güç taleplerini üstleneceğinden nispeten küçük kapasitede olması hedeflenmiştir. Ayrıca derin deşarjlardan korunarak bataryanın sağlığının korunması hedeflenmiştir. Bataryayı nominal olarak 96-92 V gerilim aralığında yüzde 20 ile yüzde 80 doluluk oranında tutmayı arzu ediyoruz bunun nedeni lityum bataryaların tam şarjının ve tam deşarjının batarya sağlığını kötü etkilemesidir [21].



Şekil 6.9: Oluşturulan batarya modeli ve parametreleri.

### 6.4 Güç Talebi

Şekil 6.10’da Alan kontrol edilen bir sabit mıknatıslı senkron motor için güç talebi oluşturulmuştur. Alan detaylıca bahsedilmeyecektir, kısaca tork dalgalanmasının azaltılması amacıyla matematiksel yaklaşımlarla evirici kapı sinyallerinin türetilmesidir.

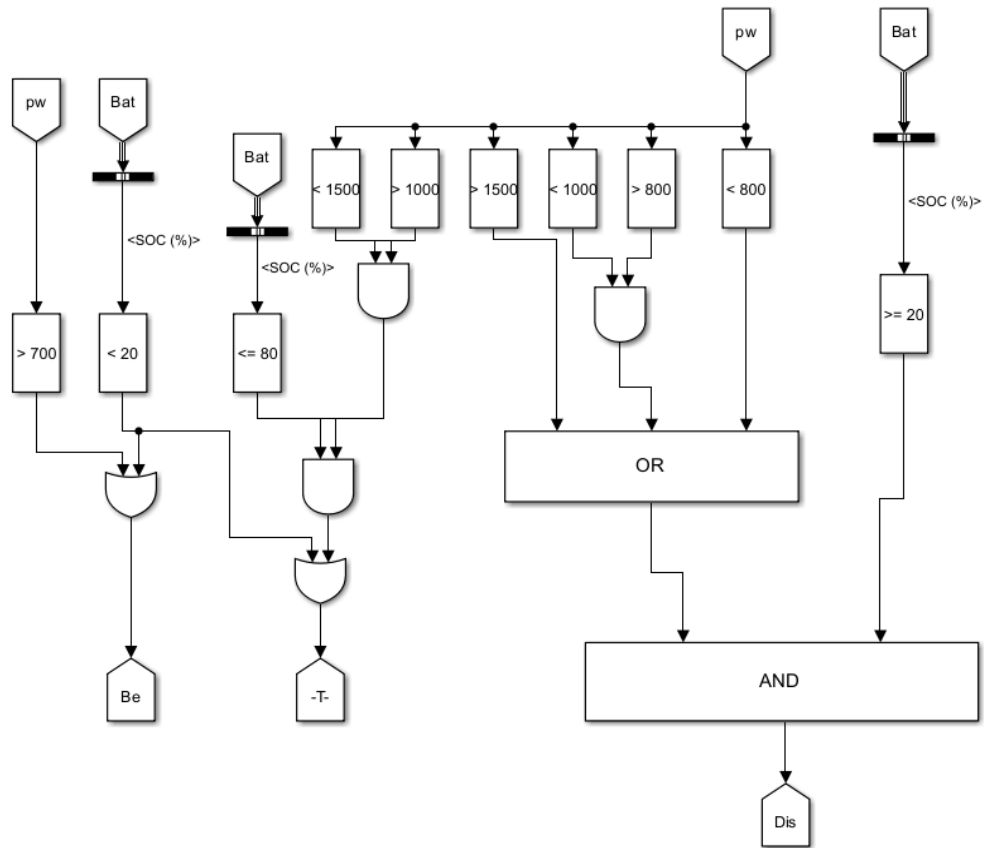


Şekil 6.10: Sabit mıknatıslı senkron motor için güç talebi.



## 6.5 Enerji Yönetim Sisteminin Kontrolü

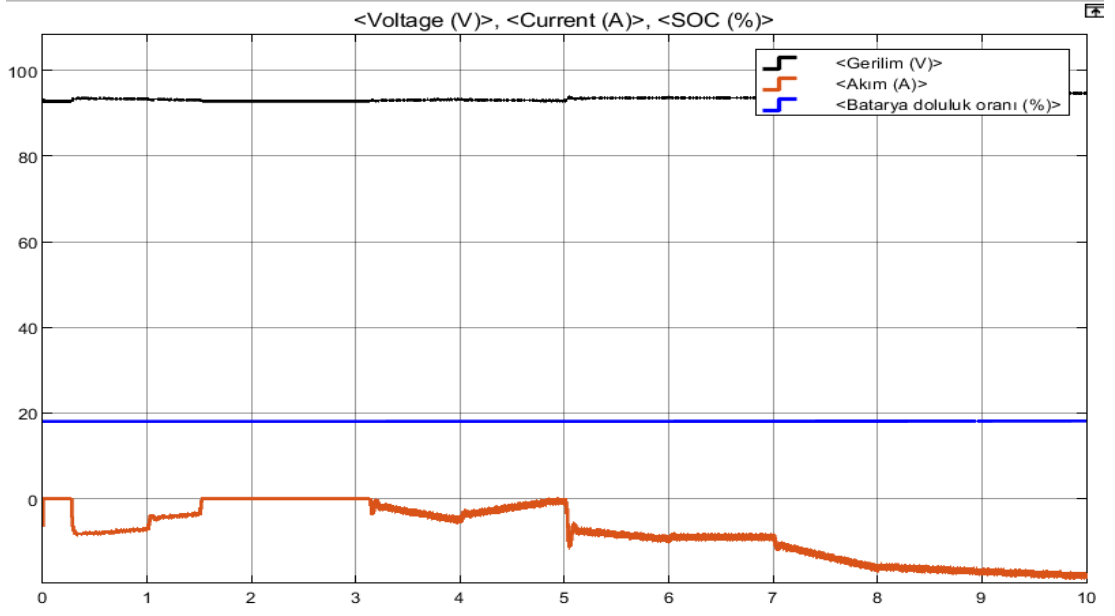
Enerji yönetim sisteminin kontrolü bir sonlu durum makinesi ile yapılıır talep tahmini stratejisi ile bu tahminin sonucunda Şekil 6.12’deki gibi bir durum makinesi ile kontrol edilir.



**Şekil 6.12:** Lojik kontrollü enerji yönetim stratejisi.

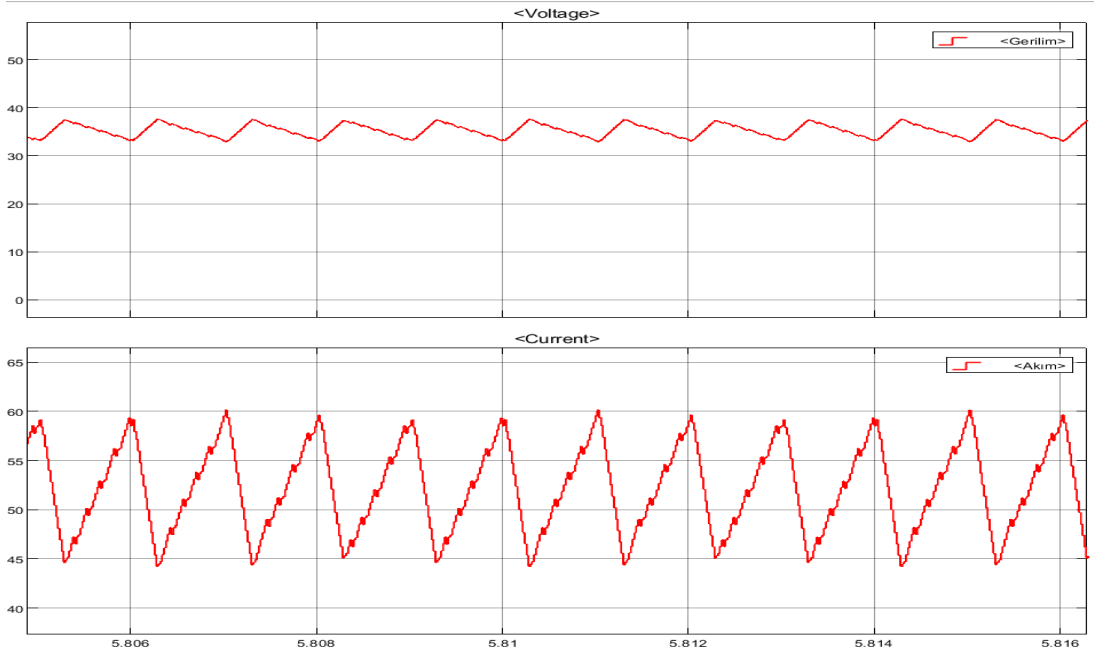
## 6.6 Simülasyon Sonuçları

Simülasyon güç talepleri için bataryanın %20 doluluk oranının altında başlatılırsa, yakıt pili güç isteklerini karşılayabiliyorsa şarj konumundadır güç isteklerinin hepsi yaktı pilinden karşılanır bu sırada batarya da şarj olur. Eğer yakıt pili motorun yüksek güç taleplerini bataryayı şarj ederken karşılayamayacak ise batarya şarjı kesilir ve tüm güç motor tarafına aktarılır. Şekil 6.13’de bataryanın doluluk oranı %20’nin altındadır bu nedenden dolayı batarya kesinlikle deşarj edilmez bu durumun sonucu olarak kırmızı olarak verilen akım grafiğinin hep negatif ekseninde kaldığı görülmektedir.



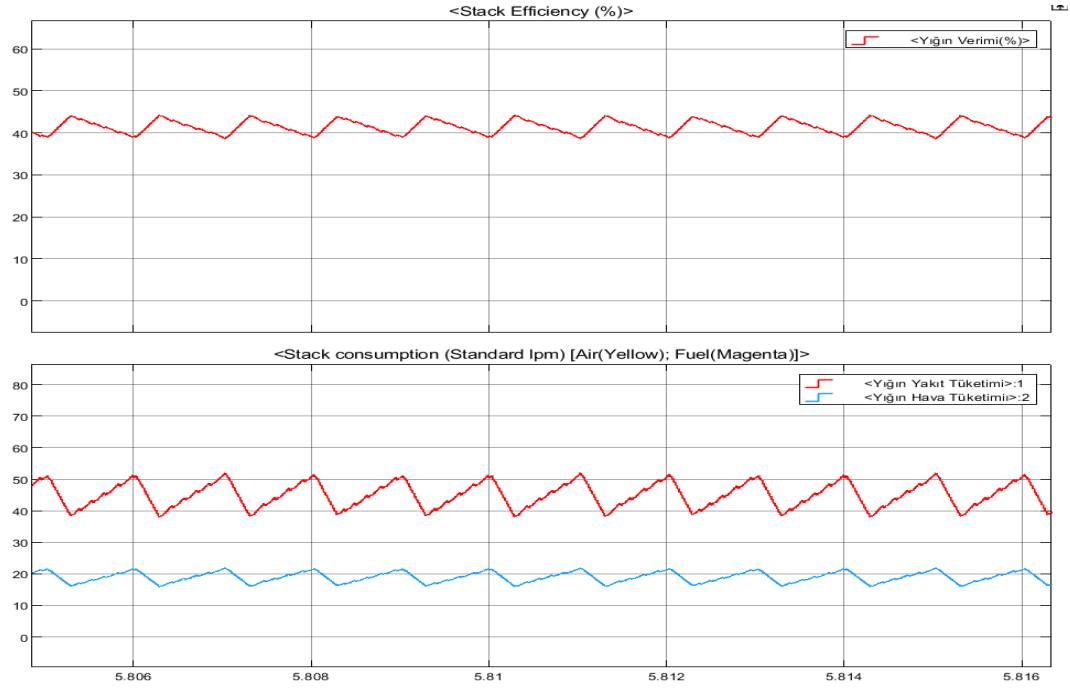
**Şekil 6.13:** Bataryanın gerilim akım ve doluluk oranı grafiği.

Şekil 6.14'te yakıt pilinin akım ve geriliminin güç isteğine göre dalgalanması izlenmektedir. Gerilimin dalgalı olması yakıt pilinin kendi karakteristiğinden dolayıdır. Akım dalgalanması ise yakıt pilinin terminal akımının indüktör akımına göre belirlenmesidir. Bu akım karakteristiği doğru akım dönüştürücülerin öz karakteristiğinden dolayıdır.



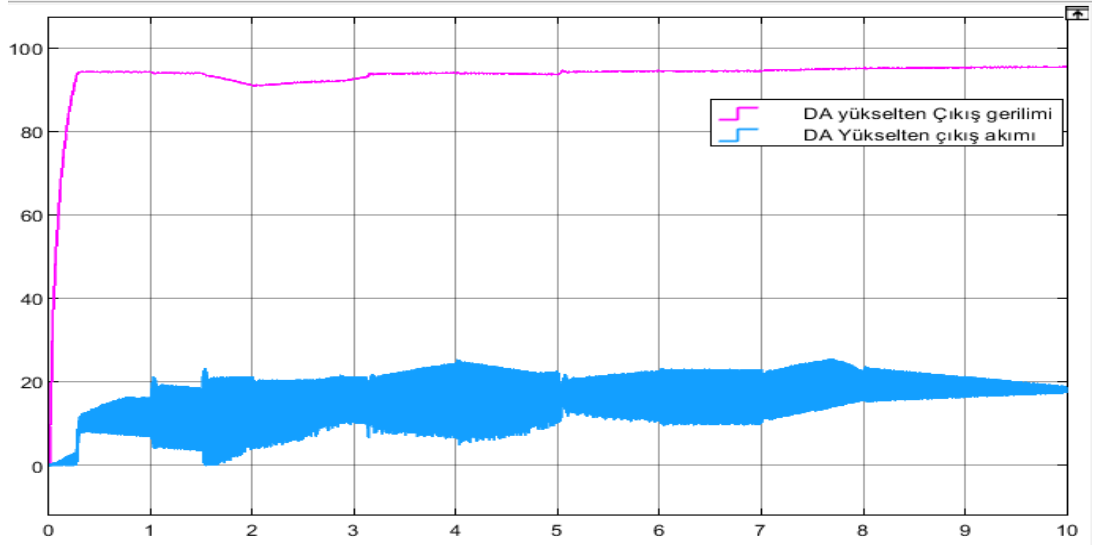
**Şekil 6.14:** Yakıt pilinin akım ve gerilim grafiği.

Akım gerilim durumuna göre yakıt pili yığnında verimlilik ölçümü de yapılmaktadır. Şekil 6.15'te yüksek güç talebinde yakıt pili verimliliği ve yakıt tüketimi verilmiştir oluşturulan yakıt pili modeli varsayımlarından kaynaklı gerçekçi olmayan bir tüketim meydana gelmiş olabilir ancak sonuç olarak bu grafik bir yakıt pilinin yakıt tüketim miktarını temsil edebilir. Verimliliğin yüksek güç isteğinde bile bu nedenle yüksek olması iyi sayılabilecek bir sonuçtur.



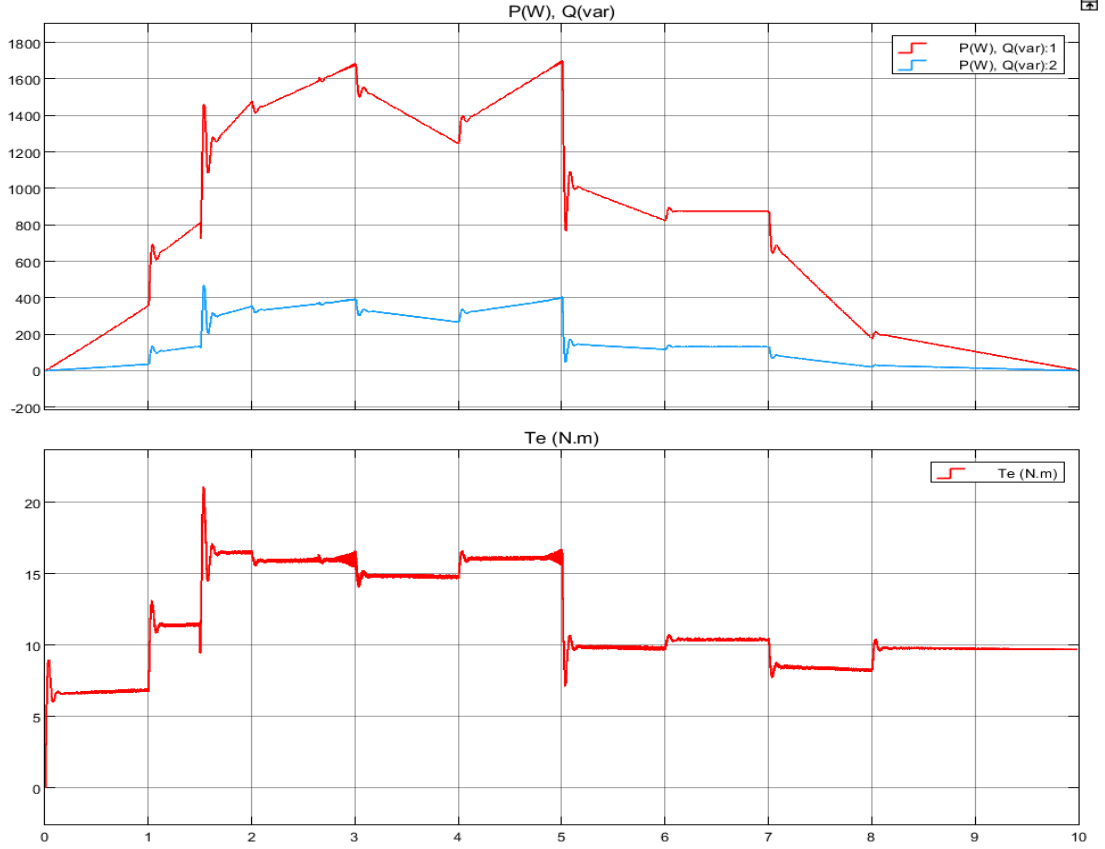
**Şekil 6.15:** Yakıt pili verimliliğini ve yakıt tüketimlerini gösteren grafik.

Şekil 6.16'da DA yükselten devrenin çıkış akımı ve gerilimi görülmektedir bu çıkış gerilimi bataryanın gerilimine zorlanmıştır, gerilim tepkisi bu durumda çok hızlıdır.



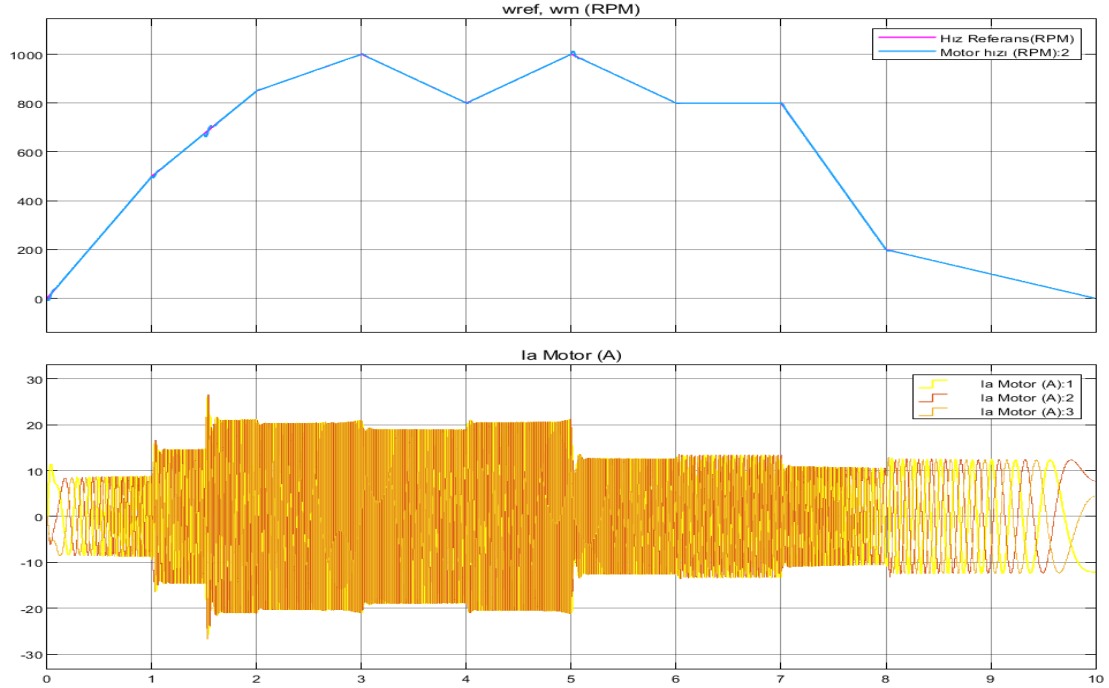
**Şekil 6.16:** Da yükselten devresinin çıkış gerimi ve akımı.

Şekil 6.17’de Güç ve tork talebinin grafiği gösterilmektedir bu grafikte güç isteklerinin karşılandığı görülmektedir ayrıca tork dengesi iyidir.



Şekil 6.17: Güç talebinin ve torkun grafiği.

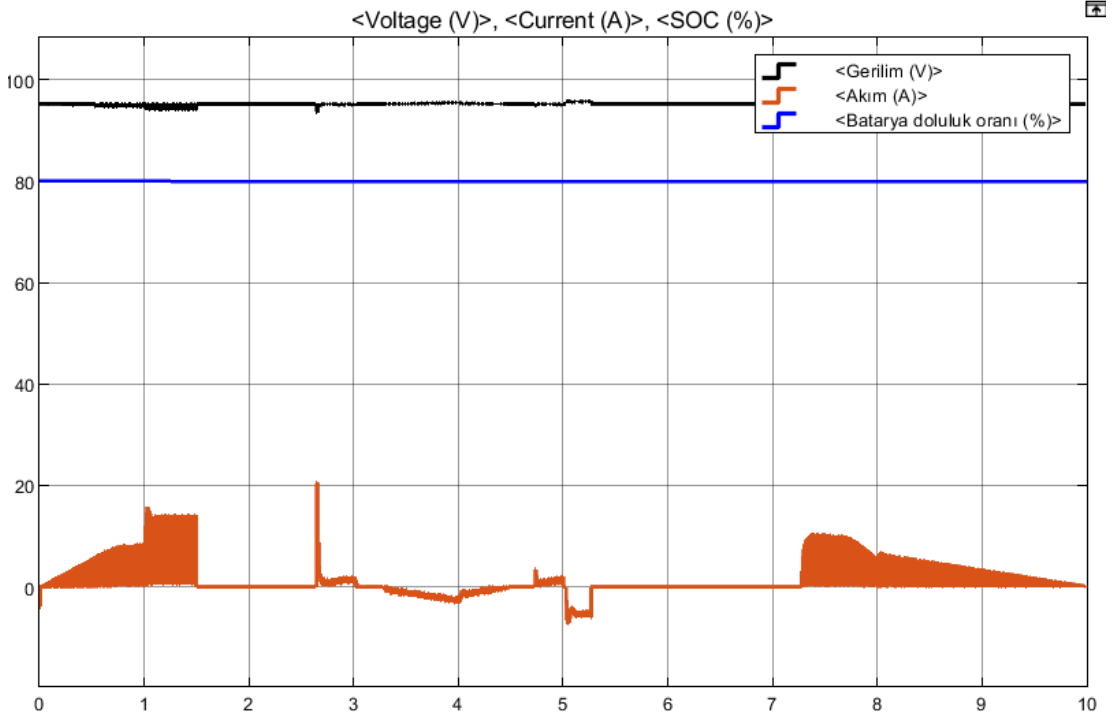
Şekil 6.18’de motorun faz akımları ve hız referans ve gerçek hız grafiği gösterilmiştir. Motor uygun hız referanslarına bağlı kalarak istenen hızı çok çabuk yakalamıştır



Şekil 6.18: Motor hızı ve faz akımlarının grafiği



Şekil 6.19’da verilen grafikte bataryanın şarj ve deşarj durumları gösterilmiştir düşük güç taleplerinde güç aktarımı bataryadan sağlanırken ortalama güç taleplerinde batarya şarj edilebilmektedir ve yüksek güç taleplerinde batarya yakıt pili ile deşarj edilebilmektedir.



**Şekil 6.19:** Bataryanın gerilim akım ve doluluk oranı grafiği.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Simulink’te modellenen enerji yönetim sistemi, istenen davranışları yerine getirme ve verimliliği yüksek tutma konusundaki performansı ile dikkat çekmiştir. Bu gözlemler, simülasyon sürecinde elde edilen verilere ve analizlere dayanmaktadır.

Enerji yönetim sistemi, çeşitli yük koşulları ve enerji talepleri altında test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, sistemin aşağıdaki davranışları başarıyla sergilediği gözlemlenmiştir:

### 7.1 Talep Tepkisi

Sistem, anlık enerji taleplerine hızlı ve doğru bir şekilde yanıt vermiştir. “

Hedeflenen güç 1.5-2kw gücündedir bu güç talebi enerji yönetiminin her anında karşılanabilecek düzeydedir. İstenen motor hızı ve tork gücü de sağlanmıştır

## **7.2 Enerji Depolama ve Dağıtım**

Batarya ve diğer enerji depolama birimlerinin verimli kullanımı sağlanmıştır.

Hedef verim yakıt pilinin nominal verimliliği olan %55 oranına çok yakındır yüksek güç taleplerinde bu verim %42 seviyelerine kadar düşebilmektedir. Yakıt tüketiminin uygun tasarımda belirlenen sınırlarda olduğu anlaşılmıştır.

## **7.3 Yük Dengeleme:**

Sistem, enerji üretimi ve tüketimi arasında başarılı bir denge kurmuştur.

Sistemin güç talebinin yüksek güç taleplerinde batarya ve yakıt pilinden aynı anda deşarj olabilecek durumda yapılmıştır şarj ve deşarj röleleri bu durumları gerçekleştirmek için durum makinesi ile kontrol edilmektedir.

Düşük güç talepleri doğrudan batarya tarafından sağlanmıştır.

## **7.4 Verimlilik**

Enerji yönetim sisteminin verimliliği, enerji kayıplarının minimize edilmesi ve enerji kaynaklarının optimal kullanımı ile sağlanmıştır. Ortalama verimlilik, sistemin farklı çalışma koşullarında gösterdiği performansa dayanarak yüksek olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler, sistemin enerji dönüşüm süreçleri, depolama verimliliği ve yük dengeleme kabiliyetleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Simülasyonda en yüksek verimlilik %60'tır bu verim düşük güç taleplerinde ortaya çıkmıştır.

Simülasyon sonuçlarını göz önünde bulundurarak bu sistemin gerçek hayatta modellerken yakıt pilinin terminal akımının kesinlikle kısıtlanması gerektiği açıktır ayrıca yakıt tüketimi için daha iyi bir strateji kurulabilir. Yük talep tahmini için derin öğrenme algoritmaları kullanılabilir. Batarya için bir batarya yönetim sistemi kurulmalıdır hücrelerin şarj ve deşarj durumları takip edilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Panday, A. and H.O. Bansal, *A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle*. International Journal of Vehicular Technology, 2014. **2014**: p. 1-19.
2. Winyuchakrit, P., Y. Sukamongkol, and B. Limmeechokchai, *Do electric vehicles really reduce GHG emissions in Thailand?* Energy Procedia, 2017. **138**: p. 348-353.
3. Lü, X., et al., *A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies*. Energy conversion and Management, 2018. **171**: p. 1273-1291.
4. Govindarajan, A. *Simulating the load sharing between a fuel cell & ultracapacitor interfaced using a boost converter*. in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2009. IEEE.
5. Zhao, X., et al., *Energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Classification, comparison, and outlook*. Energy Conversion and Management, 2022. **270**: p. 116179.
6. Sorlei, I.-S., et al., *Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies*. Energies, 2021. **14**: p. 252.
7. Burke, A., *Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles*. International Journal of Energy Research, 2010. **34**(2): p. 133-151.
8. Paganelli, G., et al. *Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains*. in *Vehicular technology conference. IEEE 55th vehicular technology conference. VTC spring 2002 (cat. No. 02CH37367)*. 2002. IEEE.
9. Guezennec, Y., et al. *Supervisory control of fuel cell vehicles and its link to overall system efficiency and low-level control requirements*. in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003*. 2003. IEEE.
10. Pisu, P. and G. Rizzoni, *A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles*. IEEE transactions on control systems technology, 2007. **15**(3): p. 506-518.
11. Zhang, X. and C. Mi, *Vehicle power management: modeling, control and optimization*. 2011: Springer Science & Business Media.
12. Kök, C. and S.O. Mert, *Yakıt Hücreli Araçlarda Enerji Yönetim Stratejileri ve Optimizasyon Hedeflerinin İncelenmesi*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2022(34): p. 80-86.
13. Ehsani, M., Y. Gao, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. 2003, CRC press.
14. Larminie, J., A. Dicks, and M.S. McDonald, *Fuel cell systems explained*. Vol. 2. 2003: J. Wiley Chichester, UK.
15. Singhal, S.C. and K. Kendall, *High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications*. 2003: Elsevier.
16. Scott, K., *Electrochemical methods for hydrogen production*. 2019: Royal Society of Chemistry.
17. Kordesch, K. and G. Simader, *Fuel cells and their applications*. 1996.
18. Appleby, A. and F. Foulkes, *Fuel Cell Handbook, Van Norstand Reinhold, New York, NY, 1989*. Republished by Krieger Publishing Company, Melbourne, FL, 1993.

19. Zhang, X., et al., *Current tracking delay effect minimization for digital peak current mode control of DC–DC boost converter*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019. **34**(12): p. 12384-12395.
20. Bryant, B. and M.K. Kazimierczuk, *Modeling the closed-current loop of PWM boost DC-DC converters operating in CCM with peak current-mode control*. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2005. **52**(11): p. 2404-2412.
21. Gao, Y., et al., *Classification and review of the charging strategies for commercial lithium-ion batteries*. Ieee Access, 2019. **7**: p. 43511-43524.

## ÖZGEÇMİŞ

1999 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu 2020 yılında Bursa Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne başladı ve halen lisans eğitimine devam etmekte.



**Ad-Soyad** : Osman Altay  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 05.03.1999 Afşin/Kahramanmaraş  
**E-posta** : 20332629079@ogrenci.btu.edu.tr