

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNİN RAYLI SİSTEMLERE
ENTEĞRE EDİLMESİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Abdurrahim TANŞU**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2017
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNİN RAYLI SİSTEMLERE
ENTEĞRE EDİLMESİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Abdurrahim TANŞU**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN**

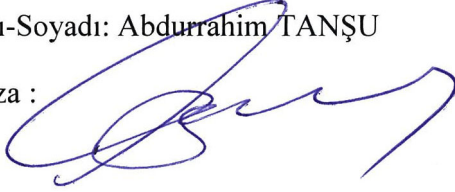
**Temmuz 2017
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Abdurrahim TANŞU

İmza :



YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Yakıt Pili Teknolojisinin Raylı Sistemlere Entegre Edilmesinin Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Abdurrahim TANŞU

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

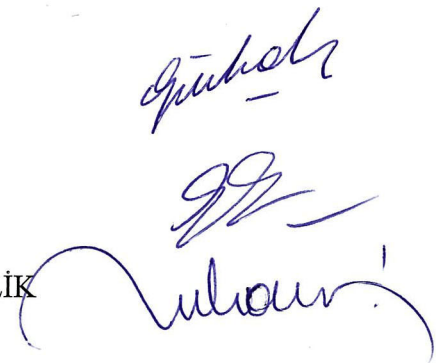
Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN danışmanlığında **Abdurrahim TANŞU** tarafından hazırlanan “**Yakıt Pili Teknolojisinin Raylı Sistemlere Entegre Edilmesinin Sayısal Olarak İncelenmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

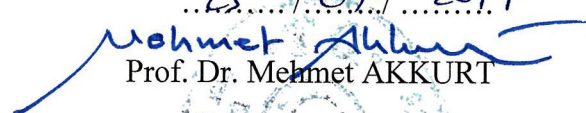
29 /06/ 2017

JÜRİ:

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN
Üye :Doç. Dr. Gamze GENÇ
Üye :Yrd. Doç. Dr. Muhammet ÇELİK

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 25/07/2017 tarih ve 2017/31-06 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..25... / 07 / ...2017

Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü



TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca bilgilendirme ve yönlendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel bir temelde sunmamı sağlayan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN'e ve çalışma sürecindeki tavsiyelerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Gamze Genç'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarımda desteklerini bir an olsun esirgemeyen aileme, her daim desteğini yanımda hissettiğim sevgili eőim ve oğluma, iő hayatındaki zorlukları karşısında hep yanımda olan arkadaőlarıma tüm kalbimle teőekkürü bir borç bilirim.

Kayseri, 2017

Abdurrahim TANŞU

YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNİN RAYLI SİSTEMLERE ENTEGRE EDİLMESİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Abdurrahim TANŞU

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2017
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Gülşah ELDEN

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, yakıt pili teknolojisinin raylı sistemlere entegre edilmesi durumunda sistem parametrelerini sayısal olarak incelemek ve raylı sistemlerde yakıt pilinin kullanılmasının çevresel ve ekonomik etkilerini araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda raylı sistem teknolojileri ve hafif raylı sistem araçlarının enerji profilleri araştırıldı. Ayrıca, katanersiz işletme modelleri ve araç üstü enerji depolama sistemleri incelenmiş olup, iki farklı matematiksel modelle belirli ölçekteki lityum iyon batarya ve Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt hücreli yığınların araç üzerinde kullanıldığı durumlar ele alındı. Çalışma kapsamında, Kayseri şehri için hafif raylı sistem hattı üzerinde belirlenen beş istasyonluk güzergah üzerinde belirlenen iki ayrı hibrit mimari için hidrojen tüketimi batarya modülü ve yakıt pili modülü boyutlandırıldı. Çalışmada farklı durum ele alınarak, Durum 1’de raylı sistem aracının yalnızca yakıt pili ile tahrik edilmesi, Durum 2’de ise raylı sistem aracının batarya ile tahrik edilmesi ve yakıt pilinin bataryanın şarjında kullanılması durumları incelendi. Çalışma sonucunda, raylı sistem aracında Durum 2’de ele alınan yakıt pilinin bataryanın şarjında kullanılması ve aracın batarya ile tahrik edilmesi durumunun, rejeneratif enerjinin kullanımına imkan sağlaması, yakıt pilinin anlık aşırı akım taleplerinden dolayı zarar görmeyecek olması ve diğer Durum 1’e göre daha ekonomik olduğu ortaya kondu.

Anahtar Kelimeler: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi, Lityum-iyon Batarya, Raylı Sistemler, Katanersiz İşletme.

NUMERICAL EXAMINATION OF FUELCELL TECHNOLOGIES INTEGRATION TO RAILWAY SYSTEMS

Abdurrahim TANŞU

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, June 2017

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gülşah ELDEN

ABSTRACT

Purpose of this thesis, integration of fuel cell technologies to railway systems, investigate the numerical examination of systems' parameters and its environmental and economic impacts. For this purpose, railway technologies and typical light railway vehicle's energy profile explained in this study. Catanerless operation and onboard energy storage technologies investigated and two different size of on-board lithium-ion battery used in two different hybrid model that also includes fuel cell modules. Fuel cell technologies and different type of fuel cells evaluated and PEM fuel cell technology is chosen as best solutions for on-board application. Five stations long part of excising light rail line is chosen as simulation line for the mathematical model, and simulated for two different hybrid model. According to result of battery module and fuel cell module is sized for both module. In results of study, using of fuel cell hybrid model on light rail vehicles is evaluated as an alternative catanerless operation mode, according financial data from existing similar project. In case 1 only fuel cell module used for the traction and in case 2 battery module used for traction and fuel cell stack used for charging battery. In the result of working it's seen that case 2 is the more effective model because of the potential of capacity to use the regenerative energy and protect the fuel cell stack from transient currents.

Keywords: Proton Exchange Membrane Fuel Cell Technologies, Lithium-ion Battery
Catanerless Operation.

İÇİNDEKİLER

YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNİN RAYLI SİSTEMLERE ENTEGRE EDİLMESİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii

BÖLÜM 1

KENT İÇİ TOPLU TAŞIMA VE RAYLI SİSTEM TEKNOLOJİLERİ

1.1 Kent İçi Toplu Taşımacılık.....	1
1.2. Raylı Sistem Araçlarının Sınıflandırılması.....	3
1.2.1. Ana Hat Trenleri.....	3
1.3. Türkiye’de Mevcut Durum	5
1.4. Raylı Sistemlerde Alternatif Uygulamalar	7
1.4.1. Frenleme Enerjisinin Geri Kazanımı Yaklaşımı.....	9
1.4.2. Rejeneratif Enerjinin Kullanımı ve Metodları.....	11
1.4.3. Depolama Sistemlerinde Kullanılan Teknolojiler.....	14

BÖLÜM 2

YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ GENEL TANITIMI

2.1 Yakıt Pili Teknolojisi	18
2.2. Yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları.....	20
2.3. Yakıt Pili Çeşitleri ve Enerji Karakteristikleri	22
2.4. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Teknolojisi.....	23

BÖLÜM 3

LİTERATÜR VE PAZARDAKİ MEVCUT DURUM

3.1. Literatür.....	26
---------------------	----

3.2. Pazardaki Mevcut Durum	33
3.2.1 ALSTOM FULLTRAM Projesi:	37
3.2.2. Vehicle Projects Inc. Yakıt Hücresi Tabanlı Lokomotif Projesi	38
3.2.3. Birmingham Üniversitesi Tarafından Yürütülen Çalışmalar	39
3.2.4. JR EAST Ve Railway Technical Research Institute (Japonya) Tarafından Yapılan Çalışmalar	40

BÖLÜM 4

RAYLI SİSTEM ARACINA YAKIT PİLİNİN ENTEGRE EDİLMESİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ

4.1. Sirio Aracı Teknik Özellikleri	43
4.1.1. Sirio Aracı Tahrik Sistemi	46
4.2. Raylı Sistem Aracı Enerji Profili	47
4.3. Yakıt Pili Modülünün Matematiksel Modeli	48
4.3. Lityum İyon Batarya Matematiksel Modeli	52
4.4. Hibrit Sistemin Genel Mimarisi	55
4.5. Araç Enerji Talebi Verisi Analizi	55
4.6. Matematiksel model çıktıları	59

BÖLÜM 5

ÇEVRESEL ETKİLER VE EKONOMİK ANALİZ

5.1. Talep Edilen Toplam Hidrojen Miktarına Göre Yakıt Tankının Boyutlandırılması	68
5.2. Yakıt Pili'nin Çevresel Etkileri	69
5.3. Yakıt Pili'nin Raylı Sistem Aracında Kullanılmasının Ekonomik Analizi	69
BÖLÜM 6	71
SONUÇLAR	71
KAYNAKÇA	72
ÖZGEÇMİŞ	76

KISALTMALAR VE SİMGELER

A	Üssel Voltaj (V)
B	Üssel Kapasite (Ah) ⁻¹
B,C	Yakıt Hücresi İçerisindeki Aşırı Gerilim Aktivasyonu Simülasyon Sabiti [A ⁻¹] ve [V]
E	Nernst Anlık Gerilimi [V]
E	Yüksüz Durumdaki Potansiyel Fark (V)
E0	Sürekli Haldeki Potansiyel Fark (V)
Eo	Standart Yüksüz Haldeki Gerilim [V]
F	Faraday Sabiti [C(kmol) ⁻¹]
IFC	Yakıt Hücresi Modülü Akımı
K	Polarizasyon Voltajı (V)
Kan	Anot Valf Sabiti
KH ₂	Hidrojen Valfi Molar Sabiti [kmol x (atm S) ⁻¹]
KH ₂	Valf Sabiti [kmol/(Sxatm)],
KH ₂ O	Su Çıkış Valfi Molar Sabiti [kmol x (atm S) ⁻¹]
KO ₂	Oksijen Valfi Molar Sabiti [kmol x (atm S) ⁻¹]
Kr	Model Sabiti [kmol (S A) ⁻¹]
MH ₂	Hidrojen Molar Kütlesi [kg x(kmol) ⁻¹]
MH ₂	Hidrojenin Mol Kütlesi (kg/kmol),
ηact	Aktivasyon Ani Gerilimi [V]
No	Yakıt Hücresi Modülü İçerisindeki Seri Bağlı Hücrelerin Sayısı
ηohmic	Omik Ani Gerilim [V]
PEM	Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
pH ₂	Hidrojenin Kısmi Basıncı [atm]
pH ₂	Hidrojenin Giriş Kanalı İçerisindeki Kısmi Basınç(atm),
pH ₂ O	Suyun Kısmi Basıncı [atm]
pO ₂	Oksijenin Kısmi Basıncı [atm]
Q	Batarya Kapasitesi (Ah)
qH ₂	Hidrojen molar akışı [kmol (s) ⁻¹]

q_{H_2}	Hidrojenin giriş valfindeki molar akışı (kmol/s),
q_{H_2in}	Yakıt hücresi modülüne giren hidrojen akışı [kmol (s) ⁻¹]
q_{H_2out}	Yakıt hücresi modülünden çıkan hidrojen akışı [kmol (s) ⁻¹]
q_{H_2r}	Yakıt hücresi modülü içerisinde reaksiyona giren hidrojen miktarı [kmol (s) ⁻¹]
q_{H_2req}	Talep yüke göre yakıt hücresi modülü tarafından ihtiyaç duyulan hidrojen miktarı [kmol (s) ⁻¹]
R	Evrensel gaz sabiti [(1 atm) (kmol K) ⁻¹]
R _{int}	Yakıt hücresi modülü iç direnci [Ω]
T	Mutlak sıcaklık [K]
T _{H₂}	Hidrojen zaman sabiti [s]
T _{H₂O}	Su zaman sabiti [s]
T _{O₂}	Oksijen zaman sabiti [s]
U	Kullanım oranı
V _{an}	Anot hacmi [m ³]
V _{cell}	Yakıt hücresi modülünün DC çıkış gerilimi

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Farklı kent içi raylı sistem araçlarının karşılaştırılması	5
Tablo 1.2.	Türkiye’de kent içi raylı sistem alt yapısının bulunduğu/ planlanan iller.	7
Tablo 1.3.	Rejeneratif enerjinin geri kazanımı yöntemleri	13
Tablo 2.1.	Yakıt Pili Teknolojileri Genel Özellikleri	23
Tablo 3.1.	Dizel otobüs teknolojisine alternatif teknolojilerin karşılaştırılması	36
Tablo 4.1.	Sirio aracı teknik özellikleri	44
Tablo 4.2.	Yakıt Hücre Model Sabitleri	51
Tablo 5.1.	Oluşturulan hibrit mimarilerin karşılaştırılması	68
Tablo 5.2.	Farklı enerji kaynaklarına ait emisyon değerleri	68
Tablo 5.3.	Düşük tabanlı raylı sistem araçları için yakıt pili uygulaması ve havai hat uygulamasının karşılaştırılması	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kataner ve 3. ray ile çalışan örnek sistemler	9
Şekil 1.2.	Frenleme ve ivmelenme anlarında enerji akışı	10
Şekil 1.3.	Raylı sistem aracında enerji akışı	10
Şekil 1.4.	Araç üstü enerji depolama yaklaşımı	12
Şekil 1.5.	İstasyonda enerji depolama yaklaşımı	12
Şekil 1.6.	Rejeneratif enerjinin istasyonda şebekeye geri basılması yaklaşımı	13
Şekil 1.7.	Elektrikli araç teknolojilerinin gelişimi	15
Şekil 1.8.	Farklı alternatif enerji depolama araçlarının güç- enerji yoğunluğu tablosu	17
Şekil 2.1.	Temel bir yakıt pili modeli ve alt bileşenleri	19
Şekil 2.2.	PEM tipi yakıt pilinin şematik gösterimi	24
Şekil 2.4.	SOFC ve PEM tipi yakıt pillerinin farklı güç yoğunluğu ve yük çevrimi altında kullanım alanları	25
Şekil 2.3.	Farklı uygulamalarda araçların talep gücü ve güç yoğunluğu ilişkisi	25
Şekil 3.1.	Yakıt hücresi sistemlerindeki ortalama enerji üretim maliyeti ve hedefler	34
Şekil 3.2.	Yakıt hücresi temelli bir hibrit otobüs mimarisi.	35
Şekil 3.3.	Alstom Fulltram projesi sisteminin genel mimarisi	37
Şekil 3.4.	Geliştirilen yakıt hücresi tabanlı hibrit lokomotif mimarisi	39
Şekil 3.5.	Oluşturulan hibrit mimari ve enerji akış yönleri	39
Şekil 3.6.	RTRI Tarafından oluşturulan hibrit mimari	41
Şekil 3.7.	RTRI tarafından yapılan test aracında elde edilen verim	42
Şekil 4.1.	Hafif raylı sistem hattının kent içerisindeki konumu	43
Şekil 4.2.	AnsaldoBreda Sirio aracı ve yeşil hat uygulamasının genel görünüşü	43
Şekil 4.3.	Sirio aracı genel görünüşü ve araç üzerindeki ana ekipmanlar.	44
Şekil 4.4.	Sirio Aracı Araç Üstü ekipman yerleşimi ve belirlenen çalışma bölgesi ...	45
Şekil 4.5.	Sirio aracı tahrik sistemi genel mimarisi	46
Şekil 4.6.	İki durak arasındaki örnek sürüş profili	48
Şekil 4.7.	Tek bir yakıt hücresi hücresinin elektriksel modeli	50
Şekil 4.8.	Yakıt Hücresi Dinamik Modeli	52

Şekil 4.9.	Batarya modeli geliştirilmiş modeli	53
Şekil 4.10.	Batarya matematiksel modeli	54
Şekil 4.11.	İstasyon 1 istasyon 2 arası eğim grafiği	55
Şekil 4.12.	İstasyon 1 – İstasyon 2 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği.	56
Şekil 4.13.	İstasyon 2 istasyon 3 arası eğim grafiği	56
Şekil 4.14.	İstasyon 2 – İstasyon 3 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği.	57
Şekil 4.15.	İstasyon 3 istasyon 4 arası eğim grafiği	57
Şekil 4.16.	İstasyon 3 – İstasyon 4 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği.	58
Şekil 4.17.	İstasyon 4 istasyon 5 arası eğim grafiği	58
Şekil 4.18.	İstasyon 4 – İstasyon 5 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği	59
Şekil 4.19.	Durum 1 genel mimari.	60
Şekil 4.20.	Araç üstündeki enerji akış yönleri	60
Şekil 4.21.	Durum 1 için araç tarafından talep edilen akımın zamana göre değişimi ..	61
Şekil 4.22.	Durum 1 için yakıt hücresi çıkış geriliminin zamana göre değişimi	61
Şekil 4.23.	Durum 1 için talep edilen H ₂ miktarının zamana göre değişimi	62
Şekil 4.24.	Durum 1 için batarya çıkış geriliminin zamana göre değişimi	62
Şekil 4.25.	Durum 1 için batarya şarj durumunun zamana göre değişimi	63
Şekil 4.26.	Batarya tahrikli hibrit mimaride enerji akış yönleri.	63
Şekil 4.27.	Batarya tahrikli hibrit mimarinin genel yapısı.	64
Şekil 4.28.	Durumu 2 için araç talep akımının zamana göre değişimi	65
Şekil 4.29.	Durum 2 için araç tarafından depolanmak üzere sisteme geri basılan rejeneratif enerji miktarının zamana göre değişimi	65
Şekil 4.30.	Durum 2 için batarya çıkış geriliminin zamana göre değişimi	66
Şekil 4.31.	Durum 2 için batarya şarj durumunun zamana göre değişimi	66
Şekil 4.32.	Durum 2 için yakıt hücresi çıkış geriliminin zamana göre değişimi	67
Şekil 4.33.	Durum 2 için talep edilen hidrojen miktarının zamana göre değişimi	67

BÖLÜM 1

KENT İÇİ TOPLU TAŞIMA VE RAYLI SİSTEM TEKNOLOJİLERİ

1.1 Kent İçi Toplu Taşımacılık

19. yüzyılda gerçekleşen sanayi devrimi sonrası kentlerde gerçekleşen büyüme beraberinde birçok problemlere sebep olmuştur. Kent içi ulaşımda bu sorunlardan birisidir. Ulaşım kavramı “insanların ve eşyaların yer değiştirmesi ve bunun organizasyonu” şeklinde tanımlanmış olsa da, sanayinin hızla artmasının yanında şehirlerinde hızla büyümesi insan ve eşya taşımacılığı kavramlarının ayrı ayrı ele alınmasına neden olmuştur. Bu ayrışma sonrası malların şehir içi yada şehirler arası yer değiştirmesine ve bu işin organizasyonu “Lojistik” alanında değerlendirilirken, insanların yer değiştirmesi ve bu işin organizasyonu ise “Toplu Taşımacılık” alanında değerlendirilmiştir.

İnsanlık tarihinin ilk dönemlerinde yaya olarak başlayan ulaşım faaliyeti tekerleğin icadı ile birlikte üretilen farklı araçlar ve sistemler üzerinde gerçekleşmeye başlamıştır. Buhar gücünün kullanımının sağlanması ile birlikte ulaşım modlarında hız ve konfor yönünden ciddi değişiklikler olmuştur.

İçten yanmalı motorların keşfi ile otomobillerin kullanımı hızla artmıştır. Bu artış büyük ölçüde bireysel ulaşımı arttırmış olsa da daha sonraları otobüs vb. toplu taşıma araçlarında da kullanılmaları ile günümüzde de en önemli toplu taşımacılık modlarından biri olan lastik tekerlekli ulaşımın hızla yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Elektrik enerjisinin toplu taşımacılıkta kullanılmaya başlanması elektrikli otomobiller ile başlamış olup sonraları otomobil teknolojisinin o zamanki kısıtlarından dolayı demir yolu araçlarında yaygınlaşmıştır. Lokomotiflerin, tramvayların ve yer altında çalışan demir yolu araçları olan metroların yaşantımıza girmesi ile toplu taşımacılıkta yeni bir dönem başlamıştır.

Ulaşım sistemlerinin tarihsel gelişimdeki kilometre taşları ise şu şekilde sıralanabilir;

- 1819 - İlk buharlı trenin Atlas Okyanusu'nu aşmıştır,
- 1825 – İlk buharlı trenin İngiltere'de taşımacılığa başlamıştır,
- 1863 – İlk yer altı treni Londra'da denenmiştir,
- 1867 – New York'ta yükseltilmiş demir yolu hattında yolcu taşımacılığına başlanmıştır,
- 1879 – Siemens Berlin'de ilk elektrikli lokomotifi ile toplu taşımacılığı gerçekleştirmiştir,
- 1885 – Daimler içten yanmalı motoru icat etmiştir,
- 1888 – ABD'de ilk otomobil satışa sunulmuştur,
- 1896 – Dizel motorların kullanılmaya başlanması ile kent içi otobüsler işletmeye başlamıştır,
- 1897 – Elektrikli trenlerin yer altında çalışmaya başlaması ile kent içi ulaşımında metro devri başlamıştır,
- 1908 – İlk uçak seyahati gerçekleşmiştir,
- 1928 - Uçak ile şehirler arası toplu taşımacılık başlamıştır [1].

Toplu taşıma araçlarının temelde kullanım yeri, kullanım amacı, yakıt türü vb. farklı referans noktaları göz önüne alınarak sınıflandırılabilir. Buna göre toplu taşıma araçları kullanım yerlerine göre; kara, deniz ve hava araçları olarak sınıflandırılabilir. Kara araçları ise yine kullanım biçimine göre; lastik tekerlekli veya raylı sistem araçları olarak ikiye ayrılabilir.

İlk lokomotifin 1804 yılında Richard Trevithick tarafından üretilerek Galler'deki bir kalay madeninde kullanılması ile başlayan raylı sistem araçlarının serüveni 1825 yılında raylı sistemlerin yolcu ve yük taşımacılığında kullanılmaya başlanması ile sanayi devrimini de başlatmış sayılır.

1.2. Raylı Sistem Araçlarının Sınıflandırılması

Raylı sistem araçlarının sınıflandırılması, referans alınan değişkene göre birçok tanımlama mümkün olmakla birlikte, en önemli farklılıklar kullanım amacı, yolcu kapasitesi ve enerji besleme alt yapısı şeklindedir. Fakat genel bir sınıflandırma adına raylı sistem araçları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır.

1.2.1. Ana Hat Trenleri

Ulusal yada uluslar arası demir yolu alt yapısı üzerinde şehirler ve ülkeler arasında yolcu taşımacılığının yapıldığı araçlardır. Ana hatlarda çalışan geleneksel dizel yada elektrikli tahrik sistemine sahip olan demiryolu araçları bu sınıfa dahil olduğu gibi yüksek hızlı, hızlandırılmış trenlerde bu kategoride ele alınabilir. Bu kategorideki araçların seyir momentleri yüksek olup hat yapısı, işletmecilik alt yapısı ve organizasyonları kendilerine has olabileceği gibi Avrupa Birliği ülkelerinde uygulanan ve ülkemizde de sağlanmaya çalışılan karşılıklı işletilebilirlik kriterlerine göre yapılmaktadır.

1.2.2. Kent İçi Raylı Sistem Araçları

Kent içerisinde yolcu taşımacılığında kullanılan demir yolu araçlarıdır. Tramvay, metro, havaray vb. ulaşım modlarında kullanılan araçlar bu kategoride değerlendirilebilir. Kent içi raylı sistem araçları gelişmiş şehirlerde birbirlerini veya diğer ulaşım modlarını tamamlayıcı şekilde dizayn edilmiş olup şehrin yolcu taşımacılığındaki ana omurgayı oluştururlar. Araçların izole yolda gidip gitmemesi, araç yolcu kapasitesi ve enerji alt yapısı farklı özellikler gösterebilir. Buna göre kent içi raylı sistem araçları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir;

Tramvay: Elektrik enerjisi ile beslenen 1 ila 3 araçlık diziler halinde çalışan araç başına yolcu kapasitesi 80 ila 300 arasında değişebilen araçlarıdır. Çoğunlukla karma trafikte çalıştıklarından seyir hızları düşüktür. Fakat yine de güzergah üzerindeki sinyalizasyon sisteminin araca öncelik vermesi yada hattın kritik kısımlarının izole olması gibi avantaj sağlayan uygulamalar ile otobüsten daha hızlı ve daha yüksek kapasitedeki bir ulaşım modudur. İstasyon aralıkları kısa mesafelerdedir.

Hafif Raylı Sistem: (HRS) Tramvayla benzer şekilde karma trafikte işletilebildiği gibi izole hatta da işletilebilen işletme hızı ve yolcu kapasitesi daha yüksek ve ileri teknoloji bir tramvayda olarak da adlandırılabilir raylı sistem aracıdır. Standartlarda kesin bir tanımı bulunmayan bu sistemin temel amacı karma trafikte, izole yolda, yer altında, yer üstünde yolcu taşımacılığı yapabilen sık istasyon aralıklarında servisin hızlı ve kesintisiz sağlanmasıdır. Maksimum hızları 100-120 km/s'e kadar çıksa da işletme altında maksimum 70 – 80 km/h hızlarda kullanılırlar. Gün içerisindeki ortalama işletme hızları ise 18 – 40 km/h aralığındadır.

Metro: Raylı sistem hattının tamamı izole olan genellikle yer altında işletilen yüksek yolcu kapasiteli kent içi raylı sistem araçlarıdır. İstenilmesi durumunda 10'lu setler halinde da çalışabilen bu araçlarda yolcu kapasitesi hafif raylı sistem araçlarına göre yolcu inme binme kapasitesi 3 – 5 kat, otobüslere göre ise 10 – 20 kat daha fazladır. Otonom sürüş imkanı da olan modelleri ile tüm şebekenin kontrol merkezinden işletilmesi mümkün olmaktadır. Metro araçları ve alt yapısı diğer bütün kent içi raylı sistem araçlarına göre daha yüksek yatırım maliyetine sahip olduklarından gerçekleştirme kriterleri kent içerisindeki yolcu sayısı ve hareketliliğine ciddi şekilde bağlıdır.

Kent içi raylı sistem araçlarında farklı enerji besleme alt yapıları bulunmakla birlikte temel mantık aynıdır. Tramvay ve HRS araçlarında havai hat üzerinden enerji beslemesi yapılırken metrolarda ise 3. Ray sistemi de bulunabilmektedir. 3. Ray sisteminde temel olarak diğer elektrik enerjisinin raylı sistem aracının altında yada yolcu erişimine uzak bir yan yüzeyinde pantograf sistemine benzer bir kollektör mekanizması ile sağlanması ve raylı sistem aracına enerji temini sağlanmaktadır.. Ayrıca tüm bu ulaşım modları için geçerli olmak kaydıyla farklı enerji besleme altyapıları, enerji depolama sistemleri ile havai hat veya 3. Rayın ortadan kaldırılması gibi uygulamalarda yaygınlaşmaktadır. Bu konudaki en önemli gelişmeler yakıt pilleri, bataryalar ve ultrakapasitörler alanlarında olmuştur. Ayrıca kent içi raylı sistem araçları 750 VDC,1500VDC ve 3000VDC gibi farklı gerilim seviyelerinde çalışmaktadır.

Kent içi raylı sistem araçlarının yatırım kriterlerinden en önemlisi yolcu kapasitesidir. Yolcu kapasitesine göre toplu taşıma modlarının karşılaştırılması Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Farklı kent içi raylı sistem araçlarının karşılaştırılması

Ulaşım Modu	Tramvay	Hafif Raylı Sistem Aracı	Metro
Araç Kapasitesi (yolcu)	100 – 250	110 – 300	140 – 300
Dizideki Araç Sayısı Sayısı	1.Mar	1 – 3	1 – 10
Dizi Kapasitesi	100 – 750	110 - 900	140 – 3000
Hat Kapasitesi (xbin yolcu/saat)	4 – 15	Haz.20	10 – 70
Maksimum Hız (km/h)	12 – 20	20 – 45	25 – 60
İstasyonlar Arası Mesafe (m)	300 - 500	500 – 1000	500 – 2000
Tam Korunmalı Hat Yüzdesi	0 – 40	40 – 90	100
Yatırım Maliyeti (milyon S/km-hat)	5 – 10	10 – 50	40 – 100

1.2.3. Banliyö Trenleri

Banliyö trenleri temelde ana hat üzerinde çalışan fakat işletme şartlarından dolayı güzergahı kent içinde ve kent dışında olabilen genellikle kentin dış çeperlerinin veya şehir merkezine uzak olan ilçelerin bağlanması amacıyla kullanılan bir raylı sistem aracıdır. Araç teknolojisi olarak ana hat trenlerinde olduğu gibi dizel yada elektrikli araçlar olabilirler. Elektrikli ana hat trenleri gibi 23 kV AC çalışma geriliminde çalışabileceği gibi ayrıca istisnai uygulamalarda da olsa Tramtrain modunda kullanılan ve kent içerisinde ana hattan ayrılan ve 750 V DC vb. gerilim altında çalışan kent dışında ise ana hat trenleri gibi hizmet veren modları da mevcuttur. Tramtrain modu raylı sistem aracının hem ana hatta 23 kV AC gerilim altında hem de kent içinde 750 V DC altında çalışabilecek şekilde dizayn edildiği hibrit işletmeye uygun bir araç modudur.

1.3. Türkiye’de Mevcut Durum

Kent içerisinde kullanılan raylı sistem araçları gerek araç özelliği bakımında gerekse alt yapı bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Hali hazırda ülkemizde kent içi ulaşımında kullanılan 34 farklı marka ve model de raylı sistem aracı bulunmaktadır. Ayrıca araç üretimi alanında da yerleştirme faaliyetleri her geçen gün artmaktadır.

Gerek araç üretimi alanında gerekse araç alt sistemlerin üretimi alanında pek çok özel firma faaliyet göstermektedir. Ayrıca sektördeki firmalar ve kuruluşların oluşturdukları kümelenmeler (RAYDER, ARUS vb.) ile yerlilik potansiyeli giderek artmaktadır. Ülkemizde kent içi raylı sistemler alanındaki tarihsel gelişimindeki ilkleri şu şekildedir;

- 1875 - İlk raylı sistem alt yapısı olan Taksim Tünel Finüküler Hattının Açılması. Bu hat aynı zamanda dünyanın Londra'dan sonraki ikinci metrosudur.
- 1914 – İlk Modern Tramvay İşletmeciliğinin İstanbul'da başlaması
- 2000 – İlk yerli hafif raylı sistem aracı olan RTE2000'nin üretimi
- 2015 – İlk katanersiz işletmeciliğın yapıldığı Konya HRS hattının işletmeye başlaması

Türkiye'de İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Kayseri, Konya, Eskişehir, Samsun, Gaziantep, Antalya ve Adana illerinde raylı sistemler ile toplu taşımacılık yapılmaktadır. Ayrıca İzmit, Diyarbakır ve Erzurum illerimizde raylı sistem alt yapısının kurulumuna yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Tablo 1.2'de şehirlerde mevcut bulunan raylı sistem teknolojileri özetlenmektedir.

Tablo 1.2'de Yerel idareler tarafından yapılan banliyö taşımacılığı dikkate alınmıştır. İzmir Konak Tramvay Projesi Kapsamında hafif raylı sistem alt yapısı kurulmaktadır. Gaziantep Büyükşehir Belediyesi ve TCDD arasında imzalanan protokol ile kent içerisinde banliyö taşımacılığının yapılması planlanmaktadır. Konya Metrosu Projesi ilan edilmiş olup henüz süreç başlamamıştır. Ülkemizde raylı sistemlere olan eğilim hızla artmakta olup gerek kent içi ulaşımda gerekse şehirlerarası ulaşımda demir yolunun önemi hızla artmaktadır.

Tablo 1.2: Türkiye’de kent içi raylı sistem alt yapısının bulunduğu/ planlanan iller.

	Tramvay	Hafif Raylı Sistem Aracı	Metro	Banliyö
İstanbul	Var	Var	Var	Var
Ankara	Yok	Yok	Var	Var
İzmir	Yok	Yok	Var	Var
Bursa	Var	Var	Var	Yok
Eskişehir	Var	Var	Yok	Yok
Adana	Yok	Yok	Var	Yok
Gaziantep	Yok	Var	Yok	Yok
Konya	Yok	Var	Yok	Yok
Kayseri	Yok	Var	Yok	Yok
Samsun	Yok	Var	Yok	Yok
Antalya	Var	Var	Yok	Yok
Erzurum	-	Planlanıyor	-	-
İzmit	-	Planlanıyor	-	-
Diyarbakır	-	Planlanıyor	-	-

1.4. Raylı Sistemlerde Alternatif Uygulamalar

Raylı sistemlerin yaygınlaşması ile şehirlerin gündemine gelen havai hatların yarattığı görsel kirlilik kaynaklı şikayetlerin geçmişi bu sistemlerin henüz başlangıcı sayılabilecek yıllara dayanmaktadır. 1890’lı yıllarda hızla büyüyen şehirlerden olan New York City, Washington D.C., Londra ve Paris gibi şehirlerde havai hatlar ciddi şekilde protesto edilmiş ve şehrin yalnızca belirli bölgelerinde yer alması için çeşitli düzenlemeler yapılarak yaygınlaşmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Fakat şehirlerin hızlı büyümesi ve raylı sisteme olan ihtiyacın giderek artması üzerine havai hatlarında yaygınlaşması hızlanmıştır. Fakat günümüzde farklı teknolojilerin de ortaya çıkması sonucu gerek şehirlerin tarihi dokusunun yoğun olduğu bölgelerde görsel kirliliğin azaltılması gerekse enerji geri kazanımı ve tasarrufu potansiyeli fazla olan sistemlerin ortaya çıkması sonucu katanersiz işletim modlarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Raylı sistemler tarihsel gelişimleri sürecinde havai hat üzerinden enerji temin edecek

şekilde yapılandırılmış olsa da günümüzde çeşitli avantajlarından dolayı katanersiz işletim modelleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Katanersiz işletim ile araç güzergahı üzerindeki havai hat, enerji besleme alt yapısı, araç üzerindeki pantograf ve havai hatla ilişkili ekipmanların ortadan kalkmasına imkan sağlamaktadır. Katanersiz işletim modunun en önemli avantajları şu şekildedir;

- Görsel kirliliğin azaltılması,
- Enerji verimlilik potansiyelinin artırılması,
- Havai hat üzerindeki enerji iletim kayıplarının ortadan kalkması,
- Havai hatta yaşanabilecek enerji kesintisi gibi işletmeyi etkileyebilecek durumların olmaması,
- Güzergah üzerindeki dar sokaklar, köprüler, üst geçitler gibi havai hattın kurulumu ve işletmesi için problemlili olan bölgelerde bu tür sıkıntıların olmaması.

Katanersiz işletme modlarından en yaygın olanları ise şu şekildedir;

- Araç üstü enerji depolama sistemleri (Ultrakapasitör, batarya, yakıt pili, vb.)
- Araç üstü enerji depolama sistemlerinin hibrit olarak kullanıldığı sistemler,
- İndüktif enerji transferi ile araç enerji beslemesinin yapıldığı sistemler,
- Elektriksel anahtarlanan 3. Ray sistemleri,
- Mekaniksel olarak anahtarlanan 3. Ray sistemleri,
- Volan gibi enerjinin mekanik olarak depolandığı sistemler,

Yukarıda bahsedilen katanersiz işletim modlarının tamamının kendine has uygulama yöntemleri ve alt yapının revize edilmesi gibi farklı gerekleri olmakla birlikte hepsinin en temel ortak yönü bu teknolojilerin henüz çok yeni kabul edilecek düzeyde olmasıdır.

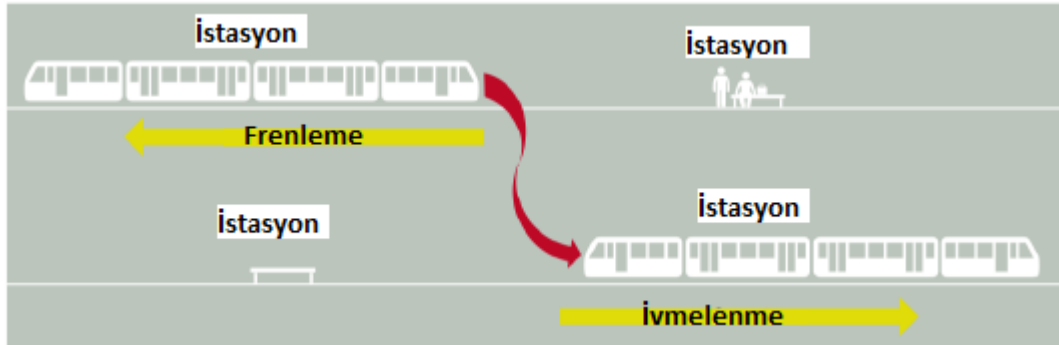
1.4.1. Frenleme Enerjisinin Geri Kazanımı Yaklaşımı

Toplu taşımada kullanılan raylı sistem araçları güzergah üzerinden beslemesi yapılan elektrik motorları ile tahrik edilirler. Şekil 1.1’de görüleceği üzere araçların elektrik beslemesinde alt yapının fiziksel biçimi (Metrolarda 3. Ray, tramvaylarda kataner sistemi vb.) veya elektrik beslemesinin alternatif akım (AC) yada doğru akım (DC) oluşu gibi farklılıklar gösterebilir de temelde kullanılan motor teknolojisi ve araç tahrik yaklaşımı aynıdır.



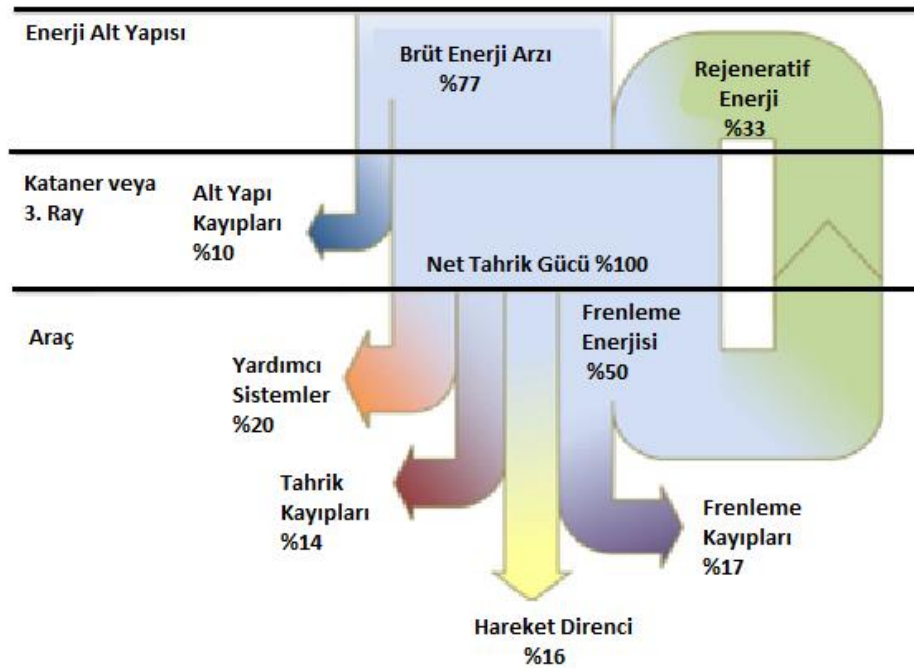
Şekil 1.1. Kataner ve 3. ray ile çalışan örnek sistemler

Mevcut araçların büyük çoğunluğunda elektriksel frenleme yaklaşımı ile rejeneratif enerjinin kullanımı yaklaşımı mevcuttur. Bu yaklaşım sayesinde elektrik motoru frenleme esnasında jeneratör olarak çalışarak aracın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Ayrıca bu yöntem sayesinde elektriksel fren ile mekanik fren kullanımları arasında doğru kullanım oranı belirlenerek araç üzerindeki mekanik fren ekipmanlarının daha az yıpranması sağlanmış olur. Rejeneratif frenleme yaklaşımının olduğu araçlarda frenleme esnasında üretilen elektrik enerjisinin küçük bir bölümü aracın yardımcı sistemlerinin beslenmesinde kullanılırken kalan kısmı frenleme yapan araca yakın ve ivmelenmekte olan bir araç olması durumunda hatta geri aktarılabilir. Frenleme esnasında yakında hatta basılan enerjiyi kullanacak başka bir araç olmaması durumunda üretilen enerji fren rezistörlerinde yakılarak ısı olarak atılmaktadır. Frenleme ve ivmelenme anlarında enerji akış yönleri Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Frenleme ve ivmelenme anlarında enerji akışı [2].

Araçlar arasındaki bu enerji transferinin miktarı trafik yoğunluğu, istasyonlar arası mesafe, hattın eğimi ve işletme modeli gibi değişkenlere bağlıdır. Bir metro hattında bu enerji transferi toplam tüketimin %30'una kadar olurken trafik yoğunluğunun az veya istasyonlar arası mesafelerin çok olduğu tramvay hatlarında daha düşük oranlarda olmaktadır. Kaybolan bu enerjinin değerlendirilerek kullanılabilir hale getirilebilmesi adına farklı uygulamalar bulunmakta olup bir sonraki bölümde incelenmektedir. Şekil 1.3'de bir raylı sistem aracında enerji akışı, kayıplar ve geri dönüştürülebilen enerji miktarı gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Raylı sistem aracında enerji akışı [3].

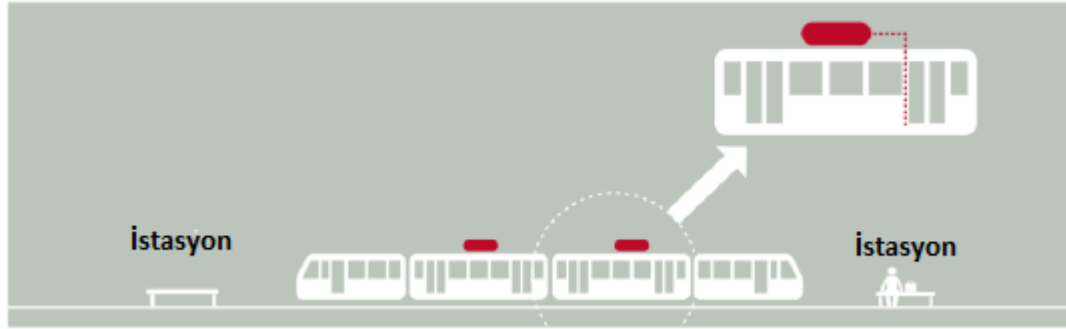
1.4.2. Rejeneratif Enerjinin Kullanımı ve Metodları

Bir önceki bölümde tanımlanan kayıpların önüne geçmek ve toplamda tüketilen enerjinin azaltılması için alternatif yöntemler geliştirilmektedir. Bu yöntemler sayesinde enerji tüketimi azaltılarak enerji fiyatları ile ilgili olan işletme giderlerinin azalmasına, elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımı vb. süreçlerde açığa çıkan CO₂ salınımının ve diğer zararlı atıkların azaltılmasını sağlanmaktadır.

Frenleme enerjisinin geri kazanımı yöntemleri temelde 3 başlık altında sınıflandırılabilir.

- Mobil depolama sistemleri
- İstasyonda depolama sistemleri
- İstasyonda enerjinin hatta geri basılması temelli sistemler
- **Mobil Depolama Sistemleri**

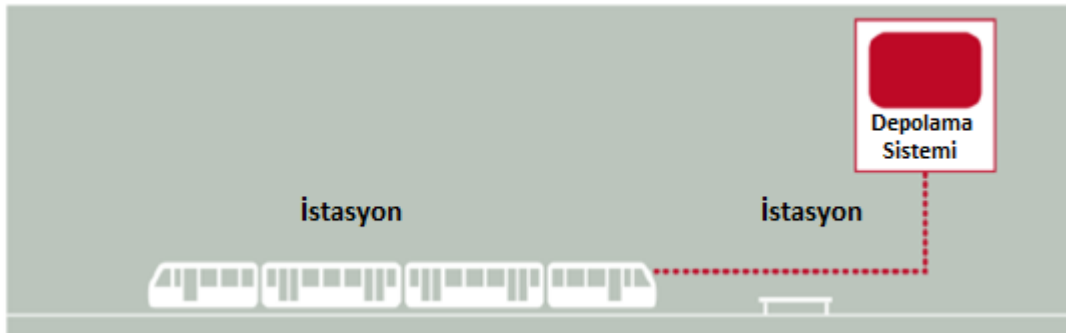
Mobil depolama sistemleri genellikle araç üzerinde bulunan ve yalnızca o aracın enerji beslemesine destek olan enerji depolama sistemleridir. Rejeneratif enerjinin yakındaki başka bir araç tarafından kullanılmayacak olması durumunda enerjinin fren rezistörlerinde ısıya dönüştürülmesi yerine mobil depolama ünitesi üzerinde kimyasal, mekanik vb. farklı enerji formlarında geri kullanılmak üzere depolanması prensibi ile çalışmaktadır. Araç üzerindeki enerji yönetimi algoritmasına ve enerjinin depolandığı ünitenin kapasitesine göre değişmekle birlikte bu enerji gerek aracın ivmelenmesinde gerekse yardımcı sistemlerin beslenmesinde kullanılmaktadır. Araç üzerindeki mobil depolama ünitesinin kapasitesine göre hattın tamamında yada bir bölümünde aracın havai hat yada 3. Ray gibi enerji besleme alt yapısından bağımsız olarak çalışmasına imkan sağlamaktadır. Şekil 1.4'de araç üstü enerji depolama yaklaşımı gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Araç üstü enerji depolama yaklaşımı [2].

- **İstasyonda Depolama Sistemleri**

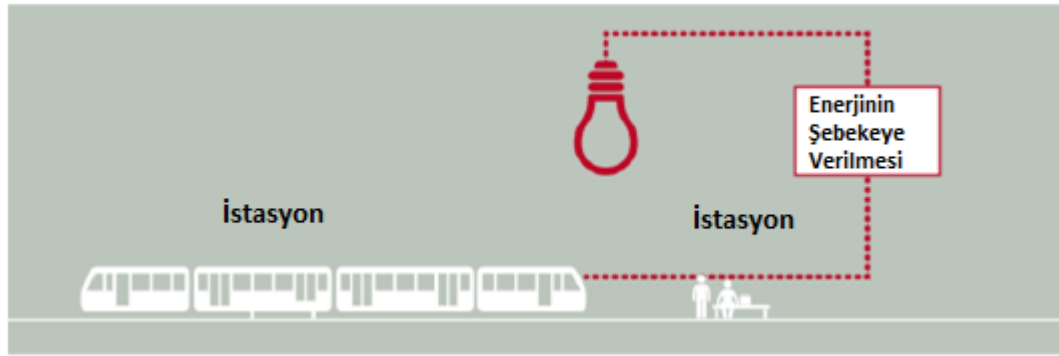
Şekil 1.5’de görüldüğü genel mimarisi verilen istasyonda yada güzergah üzerindeki depolama sistemleri hattın üzerinde bir yada daha fazla noktada yer alan ve frenleme esnasında araç tarafından hatta geri basılan enerjinin hattaki başka bir araç tarafından kullanılmıyor olması durumunda depolanarak ihtiyaç duyulduğunda hatta yeniden basılmasını sağlayan sistemlerdir.



Şekil 1.5. İstasyonda enerji depolama yaklaşımı [2].

- **İstasyonda Enerjinin Hatta Geri Basılması Temelli Sistemler**

Şekil 1.6’da belirtilen istasyonda enerji depolaması sistemlerinden farklı olarak araç tarafından hatta basılan rejeneratif enerjinin istasyonlardan yada hattaki elektrik altyapısının uygun olduğu noktalarda dağıtım şebekesine elektrik enerjisinin geri basılması temelli sistemlerdir.



Şekil 1.6. Rejeneratif enerjinin istasyonda şebekeye geri basılması yaklaşımı [2].

Rejeneratif Enerjinin Geri Kazanım Yöntemlerinin Karşılaştırılması:

Rejeneratif enerjinin geri kazanım yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 1.3'de verilmektedir.

Tablo 1.3. Rejeneratif enerjinin geri kazanımı yöntemleri [2].

Performans Parametresi	Mobil Depolama Sistemleri	İstasyonda Depolama Sistemi	Şebeke Geri Besleme Sistemi
Havai hat ve 3. Ray kayıplarının ortadan kalkması veya azalması	X		
Düşük dönüşüm ve depolama kayıplarından dolayı yüksek verim			X
Rejeneratif enerjinin istenilen herhangi bir ekipmanda kullanılabilmesi			X
Havai hat ve 3. Ray olmaksızın araçların işletilebilmesi	X		
Araçlar üzerinde modifikasyon yapılmadan sistemin kurulabilmesi		X	X
Araç üzerinde ekipman bulunmadığından daha düşük emniyet gereksinimleri		X	X
Tünel ve İstasyonlarda fren rezistörlerinde oluşan atık ısının kaynaklı etkilerin azalması	X	X	X
Daha stabil bir gerilim düzeyi oluşması	X	X	

Mobil ya da istasyon bazlı sistemlerin tamamında ana amaç raylı sistem alt yapısındaki toplam enerji tüketimini azaltmaktır, fakat mobil uygulamalar aynı zamanda katanersiz işletme modeline de imkan sağlamaktadır. Dünya genelinde bu teknolojilere dair tecrübe azlığı, sınırlı sayıda geri dönüş olması ve sistemlerin yatırım ve işletme maliyetlerinin, yatırımların geri dönüşündeki belirsizliklerin fazla olması ve bu teknolojilerin yaşam boyu maliyet analizi verilerinin yetersiz olmasından dolayı toplu taşımacılık otoritelerinin yatırım kararlarını zorlaştırmaktadır [4].

1.4.3. Depolama Sistemlerinde Kullanılan Teknolojiler

Bir önceki bölümde bahsedilen farklı uygulama metotlarında kullanılan farklı teknolojiler aşağıda sıralanmaktadır.

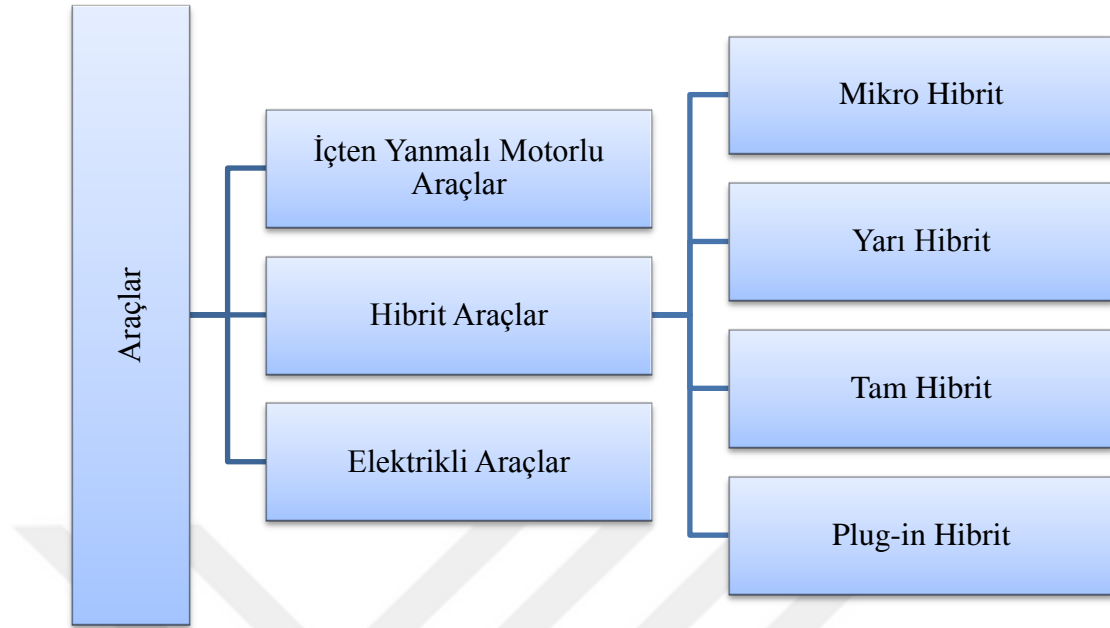
- Batarya
- Ultrakapasitör
- Yakıt pili
- Volan
- İstasyonda Enerji Depolama Sistemleri

1.4.3.1. Batarya Uygulamaları

Artan enerji kaynağı ihtiyacı ve bu ihtiyacın yanında fosil yakıtlardaki azalma ve karbon emisyonundaki ciddi artış alternatif enerji kaynaklarına yönelim her geçen gün daha fazla artmaktadır. Elektrikli araçların tarihçesi yaklaşık 1830'lu yıllarda Robert Anderson'un ilk binek elektrikli aracı tasarlamasına dayanmaktadır. 1800'lü yıllarda Amerika'da elektrikli araçlara olan ilgi ciddi oranda fazla olup 1897 yılında hayata geçen ilk ticari uygulama New York taksi filosu olmuştur [5].

1920'li yıllarda gerek şehirler arası yolların fiziki altyapısının iyileşmesi ve buna bağlı olarak uzun menzili araçlara ihtiyaç duyulması, Teksas'ta ham petrol bulunmasından dolayı benzin fiyatlarının azalması, marş motorunun icat edilmesi ve elle ilk tahriğin uygulanmasının ortadan kalkması ve Henry Ford'un içten yanmalı motorlara sahip araçları üretmeye başlaması ve buna bağlı olarak araç edinme maliyetlerinin düşmesi elektrikli araçlara olan ilginin azalmasına neden olmuştur [6].

1990'dan sonra çevre bilincinin artması ve yasal düzenlemelere gidilmesi nedeniyle sektörde ivmelenme kaydedilmiştir. İlk projeler olarak Crysler TEVan, Ford Ranger EV, GM EV1, Honda EV Plus, Nissan Altra EV, Mitsubishi i-Miev, Toyota RAV4 ve Prius sayılabilir. Elektrikli araç teknolojilerinin gelişimi sürecindeki farklı teknolojiler Şekil 1.7'de verilmiştir.[7].



Şekil 1.7. Elektrikli araç teknolojilerinin gelişimi

Batarya performansını belirleyen faktörler şu şekildedir.

Spesifik Enerji: Bataryanın birim kütlesi için depolanan elektrik enerjisi miktarıdır. Birimi Wh.kg^{-1} 'dir. Bir araçtaki bataryanın enerji kapasitesi (Wh), spesifik enerjisine (Wh.kg^{-1}) bölüldüğünde, batarya kütlesi için ilk yaklaşımı verir.

Enerji Yoğunluğu Enerji yoğunluğu, bataryanın birim hacmi başına depoladığı elektriksel enerji miktarıdır. Birimi, Wh.m^{-3} 'dür. Bataryanın enerji kapasitesinin (Wh), enerji yoğunluğuna, (Wh.m^{-3}) bölünmesi ile gereken batarya hacmini vermesi açısından önemli bir parametredir.

Spesifik Güç: Bataryanın birim kütlelerinden elde edilecek güç miktarıdır. Bataryadan dışarıya verilen güç, bataryanın kendisinden daha çok bataryanın bağlı olduğu yüke dayandığı için spesifik güç oldukça değişken ve kural dışı bir niceliktir. Bataryalar maksimum güce sahip olsalar da, çok verimsiz ve aynı zamanda kısa süreli olacağı için bataryayı maksimum gücüne yakın bir değerde birkaç saniyeden fazla çalıştırmak makul değildir. Birimi W.kg^{-1} 'dir.

1.4.3.2. Ultrakapasitör Uygulamaları

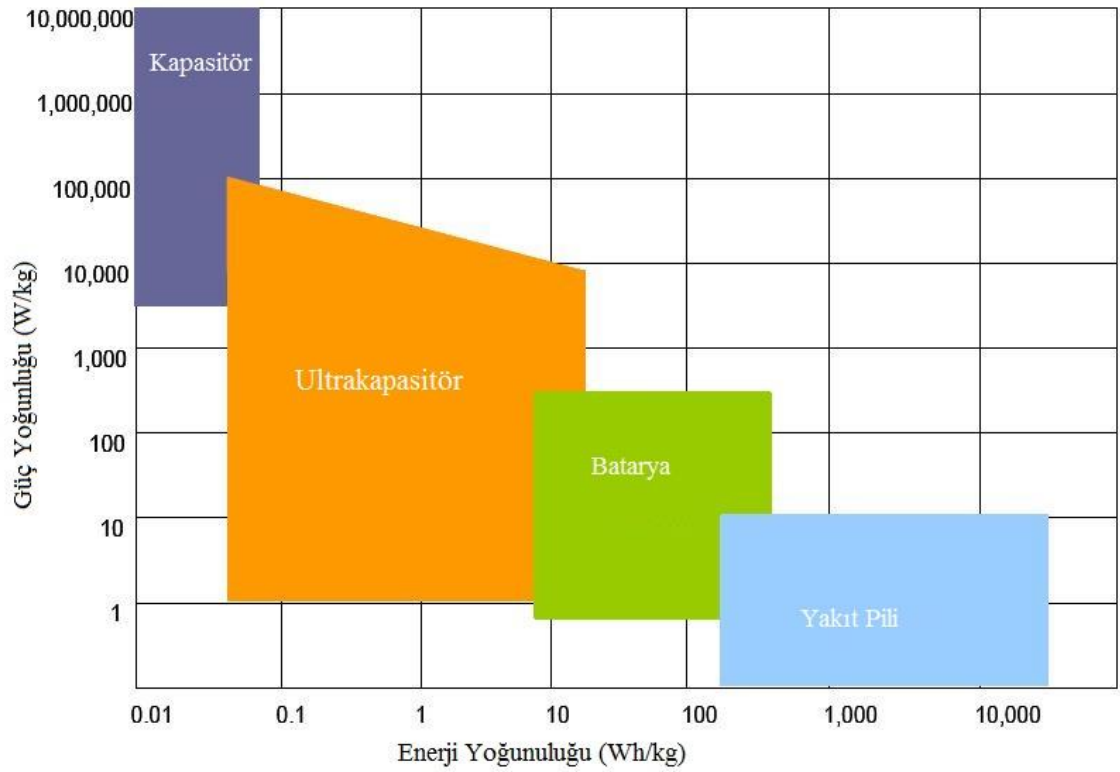
Ultrakapasitörler temelde geleneksel kondansatör mimarisine benzer bir yapıya sahip olsa da sahip olduğu kendine has özellikleri ile batarya ve geleneksel kapasitör yapısı arasında bir teknolojidir. Yüksek şarj-deşarj kapasiteleri, yüksek ömür çevrimleri (yaklaşık 100.000 çevrim) , kapasitörlere göre sahip olduğu yüksek enerji kapasitesi ve çalışma sıcaklığının düşük oluşu gibi avantajlarından dolayı ultrakapasitör teknolojilerine ciddi bir yönelim mevcuttur.

Ultrakapasitörler 100 yılı aşkındır var olan geleneksel kondansatör mimarisinin yenilikçi teknolojilerle geliştirilmesi sonucu meydana gelmişlerdir. Temelde elektrolit yüzeyin artırılması ve yalıtkan bölgedeki mikro boyuttaki seperatör yüzeyi ile çok sayıda kondansatörün bir araya gelmesinden oluşmaktadır.

İstasyonda depolama sistemleri genellikle ultrakapasitör veya batarya teknolojilerinin kullanıldığı sistemler olup prensip olarak araç için sağlanacak enerjinin istasyonlarda konumlandırılmış enerji depolama sistemleri üzerinden sağlanması ve araçlar tarafından sisteme geri basılan enerjinin depolanması üzerinde kuruludur.

Volanlarda ise araç tarafından frenleme esnasında sisteme geri basılması beklenen enerjinin mekanik olarak kısa süreler için volan üzerinde depolanması yaklaşımdır. Çalışma kapsamında batarya ve yakıt pili mimarileri sistemleri üzerinde durulacağından volan sistemine detaylı yer verilmemiştir.

Şekil 1.8'de görüleceği üzere enerji depolama sistemlerinin güç yoğunluğu ve enerji yoğunlukları arasındaki farklılıklar kullanım alanlarını da belirgin şekilde etkilemektedir.



Şekil 1.8. Farklı alternatif enerji depolama araçlarının güç- enerji yoğunluğu tablosu [8].

Ultrakapasitörlerin pek çok farklı alanda uygulaması bulunmakla birlikte özellikle raylı sistemler alanında hem frenleme enerjisinin geri kazanımı yaklaşımı ile gerek mobil (araç üstü) gerekse istasyon bazlı hem de hibrit modellerde modülün boyutlarının optimize edilmesi amaçlı pek çok uygulamada kullanılmıştır.

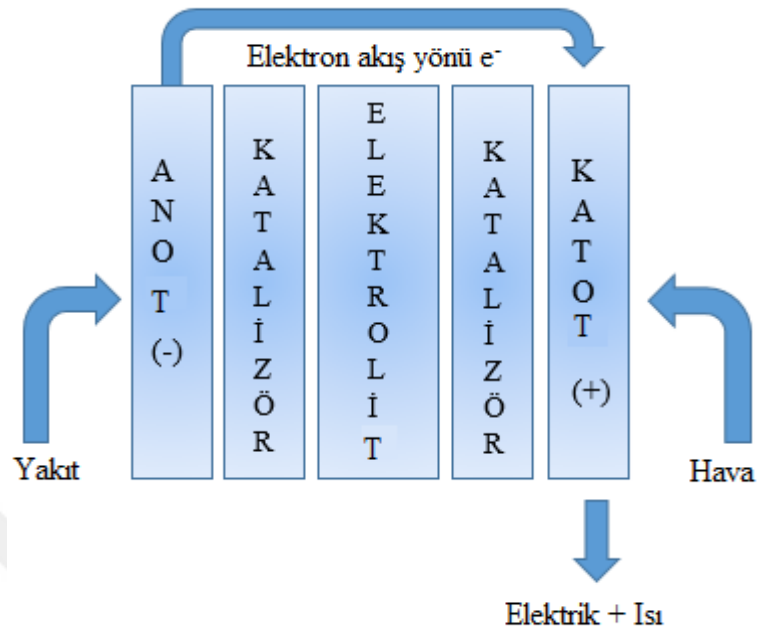
Literatürde de görüleceği üzere gerek otomotiv gerekse raylı sistemler özelinde batarya teknolojilerine yönelik pek çok araştırma ve geliştirme faaliyeti devam etmekte olup özellikle otomotiv pazarındaki gelişmeler teknolojinin ilerdeki seyrini etkileyecek başlıca büyük neden olarak görülmektedir. Bu tez kapsamında yakıt pili teknolojileri özelinde bir değerlendirme yapıldığından batarya ve diğer teknolojilerin detaylı bir analizi yerine yakıt pili teknolojileri ile olan etkileşimlerine yer verilmiştir.

BÖLÜM 2

YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ GENEL TANITIMI

2.1 Yakıt Pili Teknolojisi

Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Bataryalarla benzer olarak yakıt pilleri elektrokimyasal bir proses sonucunda elektrik üretirler. Bataryalar içerisinde depo edilen enerjiyi elektrokimyasal bir reaksiyon ile elektrik enerjisine dönüştürürler. Yakıt pillerinde ise, gaz yakıtlar anottan (negatif elektrot dan) devamlı olarak beslenirken, oksitleyici (Hava veya oksijen) gazlarda katottan (pozitif elektrot dan) devamlı olarak gönderilir. Elektrotlarda gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik akımı, ısı ve su oluşmaktadır. Yakıt pili teknolojisi ve bataryalar arasındaki temel fark bu noktadan doğmaktadır. Batarya bir tür enerji depolama aygıtı olup, kendisinde depolanmış kimyasal enerjinin miktarı ile belirlenen maksimum enerjiyi depolar. Bu nedenle batarya depolanmış kimyasal enerji bitene kadar(deşarj) elektrik enerjisi üretmeye devam edecektir. Yakıt pili yakıt ve yakıcının elektrotlar da bulunduğu süre boyunca elektrik enerjisini üretme yeteneğine teorik olarak sahip olan enerji dönüşüm aygıtıdır. Bataryaların sağladıkları enerji, içerisinde depo edilmiş olan enerji ile sınırlıdır. Yakıt pilleri ise yakıt ve hava sağlandığı sürece bu dönüşümü sürekli gerçekleştirebilen enerji üretim sistemidir. Şekil 2.1'de temel bir yakıt pili modeli ve alt bileşenleri görülmektedir [10].



Şekil 2.1. Temel bir yakıt pili modeli ve alt bileşenleri.

Temel olarak bir yakıt pili; elektrolit ve bunun her bir yüzeyi ile temas halinde bulunan geçirgen-gözenekli yapıda bulunan anot ve katot elektrotlardan oluşur. Yakıt pillerinde her bir anot-elektrolit-katod grubuna “Membran Elektrot Grubu” denilir. Ya da bunların her birisi “Yakıt Hücresi“ olarak adlandırılmaktadır. Bir yakıt hücresinde oluşan gerilim 1 Volt’un altında olduğundan çok sayıda hücre seri olarak bağlanarak, yüksek gerilim seviyelerine ulaşılabilir. Bundan dolayı çok sayıda hücre bir araya getirilerek hücre yığınının istenilen güç ve çıkış gerilimine ulaşması sağlanır. Hücreler arası bağlantı elektrotlarla temas halinde bulunan “akım toplayıcı plakalar” ile sağlanır. Bu plakaların üretiminde genellikle; iyi bir ısı ve elektriksel iletken, mekanik olarak katı (rijit) ve kimyasal olarak kararlı olmaları nedeni ile grafit malzeme kullanılmaktadır. Ancak grafitin işleme güçlüğü ve yüksek maliyeti nedeni ile çelik ve benzeri karbon içerikli metallere yönelinmektedir. Pek çok yakıt pili uygulamasında gaz dağıtım kanalları da bu plakalar üzerinde yer alır. Bu dağıtım kanalları farklı akış biçimi ve geometride olabilmektedir. Yakıt pillerinde ayrıca katalizörler de kullanılır. Reaksiyon oluşum hızını arttırmak için kullanılan bu katalizörler, yakıt pili tipine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Ve genellikle de her bir elektrotla temas halinde katalizörler kullanılır [11].

Tek bir yakıt pili hücresi çıkışında bir gerilim üretebiliyor olsa da temelde çıkışta üretebileceği güç aktif elektrot yüzey alanının genişliği ve reaksiyona giren yakıtın akış oranına bağlıdır. Yakıt pilinde çok sayıda hücrenin bir araya getirilmesiyle “yakıt pili yığını” denilen yapılar oluşturulmaktadır. Yakıt pili yığınları ile istenilen oranda voltaj üretebilecek bir sistem geliştirilerek değişik amaçlar için kullanılmaktadır.

Yakıt pillerinde yakıt pilini tamamlayan yada bir sisteme dönüştüren ekipman yada ilave üniteler kullanılması gerekebilmektedir. Bu şekildeki yani yakıt pili ve yardımcı üniteler ile birlikte oluşan sistem “Yakıt Pili Sistemi” şeklinde adlandırılabilir.

Yakıt pilinde çok sayıda hücrenin bir araya getirilmesine ilave olarak, yakıt pili sisteminin işletmesi esnasında ihtiyaç duyulan yakıt beslemesi ve dağıtım sistemi, voltaj regülatörü, invertörler elektronik kontrol üniteleri vb. alt sistemler ile birlikte bütünleşik bir mimari ortaya çıkar. Belirlenen ihtiyaca göre oluşturulan bu mimari ile birkaç watt’tan megawatt seviyelerine kadar güç çıktısı sağlanabilmektedir. Bu sistemlere ilave olarak bazı yakıt pili mimarilerinde ön ısıtma sistemi vb. diğer sistemler de bulunabilmektedir.

2.2. Yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları

Yakıt pillerinin yüksek verimlilikleri dışında;

- Hareketli parça içermeme,
- Sessiz,
- Modüler,
- Kompakt yapılı,
- Geniş yakıt yelpaze ile çalışabilme,
- Düşük emisyon,
- Yüksek güvenilirlik,
- Kolay kurulum,
- Hızlı enerji dönüşümü ve kojenerasyona uyumlu olma gibi avantajları vardır.

Yakıt pili teknolojilerinde araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin devam ettiği farklı disiplinlere ait pek çok konu bulunmaktadır. Yakıt pillerinin üzerinde çalışma yapılan pek çok çeşidi olsa da tüm bu farklı yakıt pillerinin ortak avantajları şunlardır;

1. Göreceli olarak yüksek işletme verimliliği potansiyeli ve aynı potansiyelle farklı güçlerde ölçeklendirilebilmesi.
2. Yakıt olarak hidrojenin kullanılması durumunda, yakıt kaynaklı kirlilik/ emisyonun tamamen hidrojenin üretim teknolojilerine bağlı olarak azalması.
3. İstisnai uygulamalarda kullanılan pompa, kompresör gibi elemanların dışında hareketli parça olmaması,
4. Çok çeşitli yakıt hammaddesi kullanımı alternatifi; mevcut petrol, doğalgaz ve kömür rezervleri ya da yenilenebilir etanol veya biokütle hidrojen üretimi gibi alternatifler,
5. Bataryaların yeniden şarj olunması için gereken daha kısa sürede yeniden dolumu mümkün olması,

Dezavantajları ise; yüksek maliyet, büyük hacim ya da ağırlıkta yakıt depolama gereksinimi (Özellikle mobil uygulamalarda önem taşır), direkt hidrojen kullanımı halinde yüksek yakıt fiyatı, kullanım ömürlerinin tam olarak bilinmemesi olarak özetlenebilir. Tüm yakıt pilleri için geçerli olan ve aşılması gereken temel teknik kısıtlar mevcuttur. Bu teknik kısıtlamalar ise şu şekildedir.

1. Yakıt pili sistemlerinin maliyetinin otomotiv uygulamalarında kullanılan içten yanmalı motor teknolojisi maliyeti ile rekabet edebilmesi için alternatif materyal ve alternatif üretim metotlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Örneğin bir içten yanmalı motor teknolojisinde ortalama kW başına düşen enerji maliyeti 30 \$ iken, yakıt pili ile enerji üretimi yapılan sabit uygulamalarda kW başına enerji maliyeti yaklaşık 1000 \$ civarındadır. Katalizörün maliyeti artık yakıt pili sisteminin maliyetine etki eden temel unsur olmasa da hala önem arz etmektedir. İmalat yöntemleri ve seri üretim teknolojileri yakıt pili teknolojilerinin ticari yönünü etkileyen en önemli bileşenlerdir.
2. Uygun güvenilirlik ve dayanıklılık düzeyinin sağlanması gerekmektedir. Yakıt pillerinin zaman içerisinde çeşitli etkenlerden dolayı performansları düşmektedir.

Otomotiv endüstrisinde kullanılacak bir yakıt pilinin yük çevrimine dayanımlı ve çok değişken iklimsel koşullarda kabul edilebilir ölçüde, sistem yaşam döngüsünün başlangıcından (BOL)(Begenign of lifetime) itibaren 5500 (yaklaşık olarak 30mph ile 165,000 mil mesafe kat edilmek için geçen süre) saatten daha fazla sistem performansı azalmaksızın çalışabilmelidir. Sabit bir yakıt pili uygulaması 40,000 saatten daha fazla süre ile çok değişken çalışma sıcaklığı altında sürekli olarak çalışabilmelidir.

3. Uygun güç çeşitliliği/ yoğunluğu ve spesifik güç değerlerinin sağlanması gerekmektedir.

4.Eğer yakıt olarak saf hidrojen kullanılacaksa yakıt depolama, üretimi ve dağıtım teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

5. Sistem ömrünün uzun olması adına alt bileşenlerin yüksek kalite de üretilmesinin sağlanması gerekmektedir.

6.Yakıt pili sistemleri için özellikle performans kararsızlığının önemli olduğu geçici işletme şartları için sensörler ve online teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

2.3. Yakıt Pili Çeşitleri ve Enerji Karakteristikleri

Yakıt pilleri çalışma sıcaklık aralığına göre; düşük ve yüksek sıcaklık yakıt pilleri olarak sınıflandırılabilirler. Fakat günümüzde daha çok bu sınıflandırma yerine yakıt pilleri elektrolit kısmını oluşturan malzeme cinsine göre sınıflandırılmaktadır. Bu çeşitlilik temel çalışma prensibini etkilemez, ancak performansları çalışma koşulları ve uygulama alanlarının farklılaşmasına yol açar. Tablo 2.1’de yakıt pili çeşitleri ve özellikleri görülmektedir. Uygulamada en sık karşılaşılan yakıt pili çeşitleri şunlardır:

- Alkalin Yakıt Pili
- Proton Dönüşüm Zarlı (PEM) Yakıt Pili
- Fosforik Asit Yakıt Pili
- Erimiş Karbonat Yakıt Pili
- Katı Oksit Yakıt Pili
- Direkt Metanol Yakıt Pili

Tablo 2.1. Yakıt Pili Teknolojileri Genel Özellikleri [13].

	Fosforik Asit Yakıt Pili	Katı Oksit yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Polimer Elektrolit yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili
Elektrolit	Fosforik Asit	Çinko üzerine tutturulmuş Yttria (YSZ)	Karbonat	Polimer iyon değişimi filmi	Potasyum hidroksit
Elektrolitteki Taşıyıcı	H ⁺	O ₂ ⁻²	CO ₃ ⁻²	H ⁺	OH ⁻
Hücre Materyali	Karbon	Seramik vb.	Ni, Paslanmaz Çelik, vb.	Karbon	Karbon
Güç Yoğunluğu (W/kg)	120-180	15-20	30-40	350-1500	35-105
Yakıt Türü	H ₂ , Hidrokarbonlar, Fosil yakıtlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂
Sıcaklık	200 °C	1.000°C	600-700 °C	80 °C	80 °C
Güç Üretimi Verimi	% 37-42	% 60-70	% 45-60	60%	% 42-73
Uygulama Alanı	Ticari Uyg. (Oteller, Hastaneler vb.)	Ticari Uyg., Sanayi Uyg., Elektrik Santralleri	Elektrik Santralleri	Ulaşım Araçları, Askeri Sistemler	Uzay Çalışmaları

2.4. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Teknolojisi

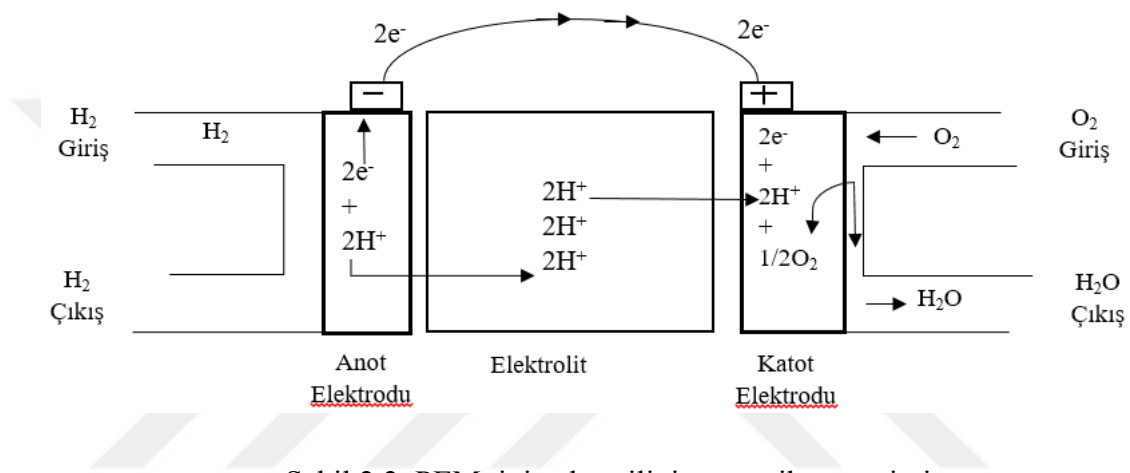
İlk kez General Electric firması tarafından 1960'larda NASA için geliştirilen proton değişim membranlı yakıt hücresi tasarım ve işletme özellikleri bakımından en hassas ve özellikle mobil uygulamalarda yaygın şekilde kullanılan yakıt hücresi modelidir. Diğer yakıt hücrelerine göre daha düşük hacim ve ağırlığa fakat daha büyük güç yoğunluğuna sahip olan PEM yakıt hücresi temelde bir katı polimer elektrolit membran ve iki platin katalizörlü gözenekli elektrottan oluşmaktadır. Yakıt hücresinde proton geçirgen yapıda olan mikron kalınlığında polimer yapıda bir elektrolit kullanılır. Çalışma sıcaklıkları uygulama türüne göre değişmekle birlikte 60-80°C aralığındadır. Katalizör olarak soy metallerin kullanılması (genellikle platinyum) maliyetini arttırmaktadır. Bir PEM tipi yakıt hücresinde meydana gelen reaksiyonlar aşağıda gösterilmektedir.

Anot Reaksiyonu: $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Katot Reaksiyonu: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Toplam Reaksiyon: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{Elektrik enerjisi}$

Yakıt pili içerisinde yukarıda verilen reaksiyonların gerçekleşebilmesi için membranın hidrojen iyonlarını iletmesi fakat elektronlar ve hücre içerisinde herhangi bir gazın geçişine izin vermemesi gerekmektedir. Elektronların iletilmesi durumunda yakıt pili içerisinde kısa devre durumu oluşmaktadır. [10].

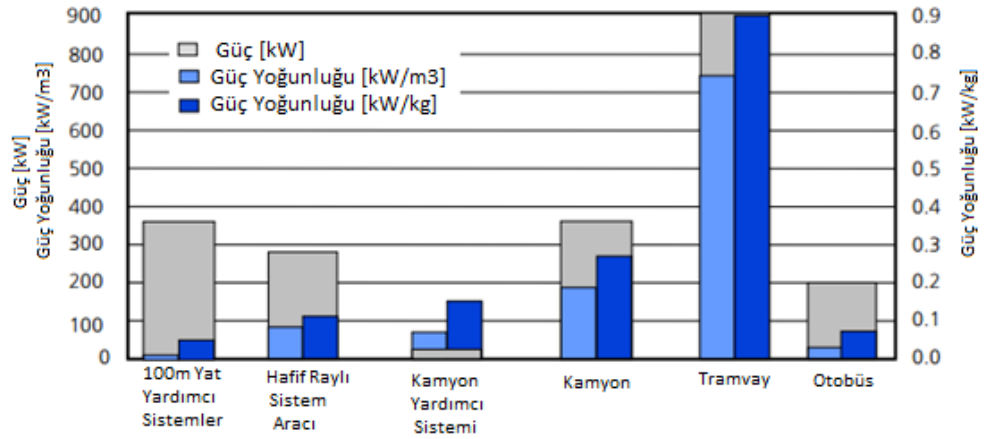


Şekil 2.2. PEM tipi yakıt pilinin şematik gösterimi

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere anota gönderilen hidrojenden elektronların ayrılması ile oluşan protonlar, proton geçirgen zardan; elektronlar ise ayrı bir devreden katota ulaşır. Katoda gönderilen hava yada oksijen yakıt ile gelen proton ve elektronların reaksiyonu ile devre tamamlanır ve elektrik, ısı ve su açığa çıkar. PEM tipi yakıt hücrelerinde hücre performansı membranların iyon geçirgenliği ile önemli ölçüde ilişkilidir. Kullanılan membranların katı olmasından dolayı membranın iyon geçirgenliği nemliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle PEM tipi yakıt pillerinde nem seviyesinin denetimi ve atık su yönetiminin sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir.. Bu amaçla genellikle sisteme hidrojen ve hava, bir nem ünitesinden geçirilerek gönderilir. Nem seviyesinin denetlenmesi ve sağlanması için sistemde genellikle su yönetimini sağlayan üniteye yer verilir. Aksi durumunda performansta önemli düşüşler olacağı gibi, membran zarar görebilmektedir [10].

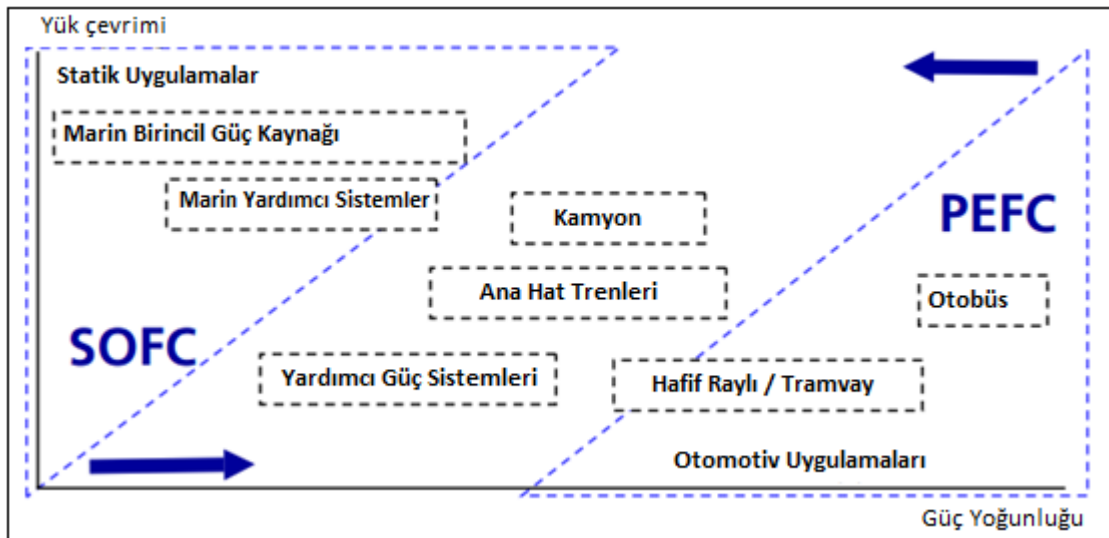
Hızlı cevap süresi, kompakt yapıları, yüksek güç yoğunluğu ve düşük çalışma sıcaklığı gibi nedenlerden dolayı PEM tipi yakıt pilleri mobil uygulamalarda ve bazı durağan (istasyon bazlı) uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada raylı sistemler özelinde yakıt pili teknolojilerinin kullanımı inceleneceğinden raylı sistemlerde araç üstü ve istasyon bazlı kullanıma uygun olan Proton değişim membranı yakıt pili (PEMFC) incelenmektedir. Farklı sistemlerde kullanılacak yakıt pili ve oluşturulacak mimariyi belirleyen en önemli özellik Şekil 2.3’de verilen ilgili sistemin m^3 ve kg başına talep ettiği güç miktarıdır.



Şekil 2.3. Farklı uygulamalarda araçların talep gücü ve güç yoğunluğu ilişkisi [14].

Şekil 2.4’den görüldüğü üzere otomotiv ve toplu taşıma araçlarında Katı oksit yakıt pili (SOFC) ve polimer elektrot membranlı (PEMFC) yakıt pili teknolojilerinin enerji yoğunluğu ve yük çevrimine göre kullanımları farklılık göstermektedir.



Şekil 2.4. SOFC ve PEM tipi yakıt pillerinin farklı güç yoğunluğu ve yük çevrimi altında kullanım alanları [15].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR VE PAZARDAKİ MEVCUT DURUM

3.1. Literatür

Literatürde her bir enerji depolama sistemi ile ilgili ve birlikte hibrit uygulamalarda davranışlarını, potansiyellerini ve gelişime açık yönleri üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar gerek raylı sistemler ve mobil uygulamalar özelinde gerekse statik uygulamalar üzerinde enerji depolama sistemlerinin performansı ve farklı uygulama topolojileri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Erdinç ve Uzunoğlu çalışmalarında PEM yakıt hücresi tabanlı hibrit sistemlerin kendilerine has avantajlarından dolayı yakın gelecekte özellikle araç üstü mobil uygulamalarda kullanımının yaygınlaşacağını belirtmişlerdir. Fakat aynı çalışmada yüksek saflıktaki hidrojenin üretimi ve tedariğinin, yakıt hücresinin ve bileşenlerinin yüksek maliyetinin bu sistemlerin pazarda yaygınlaşmasının önündeki en önemli aşılması gereken noktalar olduğu ifade edilmiştir. Hibrit sistemlerin mimarisinin ve enerji yönetim stratejilerinin performans, verimlilik ve dayanıklılık açısından sistemin durumunu belirleyici unsurlar olduğu ifade edilmiştir. Hibrit sistemlerde enerji yönetimi çalışmalarının önemli bir kısmı Fuzzy logic tabanlı çalışmalar olup, bu büyük ölçüde Fuzzy Logic yaklaşımının kompleks sistemlere kolay adaptasyonu, verimliliğinin tespitini mümkün kılması, belirsizliklerin modellenebilmesini sağlaması kaynaklanmakta olduğu değerlendirilmektedir [17].

Uzunoğlu ve arkadaşları çalışmalarında yakıt hücresi, ultrakapasitör ve solar panellerden oluşan şebekeden bağımsız bir hibrit sistemi modellemişlerdir. Solar panel kaynaklı enerjinin büyük ölçüde çevresel koşullara bağlı olduğu ve bu kısıtlılığın aşılması amacıyla solar panel sistemine, yakıt hücresi ve ultrakapasitör yapıları yeni bir yaklaşım ile entegre edilmiştir. Geliştirilen dinamik model sayesinde farklı güç seviyelerinde ve farklı çevresel koşullarda hibrit sistemin davranışının modellenmesi sağlanmıştır [11].

Fernandez ve arkadaşları, çalışmalarında bir tramvay için birincil enerji kaynağının PEM tipi yakıt hücresi modülünün olduğu ikincil enerji kaynağı olarak Ni-MH batarya modülünün olduğu bir hibrit mimari modellenmiştir. Oluşturulan modelde yakıt hücresi çıkışına doğrudan bağlı bir DC kıyıcı ve batarya modülünü DC baraya doğrudan bağlı olduğu bir mimari tasarlanmıştır. Model üzerinde Metro Centro tramvayının gerçek çalışma çevrimi baz alınarak simülasyon sonucunda hibrit sistemin boyutlandırılması, kontrol stratejisinin belirlenmesi ve enerji yönetimi yaklaşımının belirlenmesini sağlanmıştır. Çalışma ile Sevilla şehrinin tarihi dokusu içerisinde kalan tramvay hattına ait havai hattın görsel kirliliğinin önüne geçilip, CO₂ emisyonunun düşürülmesi amaçlanmıştır [12].

Baunman ve Kazerani çalışmalarında yakıt hücresi, batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit bir mimari oluşturmuşlardır. Modelde, literatürdeki benzer diğer hibrit modellere göre kütle, maliyet ve verimlilik yönünden daha başarılı bir yapı ortaya koymuşlardır. Ayrıca oluşturdukları batarya- diyot-ultrakapasitör devresi için analitik bir optimizasyon metodu geliştirmişlerdir [18].

Vural ve arkadaşları çalışmalarında yakıt hücresi ve ultrakapasitörden oluşan ve araç üstü uygulamalar için geliştirilen hibrit bir sistem için model geliştirilerek bu modelden geliştirilen bir prototip üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen bu test düzeneği üzerinde bulanık mantık kontrol sistemi stratejisi ve wavelet bulanık mantık kontrol sistemi enerji yönetimi stratejisi yaklaşımlarının performansları karşılaştırılmıştır. Uygulanan enerji yönetimi yaklaşımı ile her bir sistemin karakteristik özelliklerinin (Enerji ve güç yoğunluğu vb.) tespiti amaçlanmıştır. Enerji yönetimi stratejilerinin uygulanmasının yanında yakıt hücrelerinde gerçekleşen direncin ve bu dirençten kaynaklı hibrit mimarideki bozulmaların önüne geçmek hedeflenmiştir. Bu şekilde hibrit sistem içerisindeki yakıt hücresi ömrünün uzatılması sağlanmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan testlerde 5kW gücünde ve 48 V'luk bir PEM tipi yakıt hücresi ve iki farklı boyutta ultrakapasitör bankası (165 F-48V ve 430 F-16V) kullanılmıştır [19].

Vural ve arkadaşlarının yaptıkları başka bir çalışmada ise PEM tipi yakıt hücresi ve ultrakapasitör modüllerinden oluşan ve çok girişli bir konverter üzerinden araç üstü enerji beslemesi yapan hibrit bir mobil sistem modellenmiştir. Modelde yakıt hücresi ve ultrakapasitör kombinasyonunun farklı durumlar altında davranışlarını gözlemlenmiştir.

Oluşturulan modelde yakıt hücresi modülü enerji talebindeki temel yükü karşılayacak şekilde boyutlandırılırken, ultrakapasitör modülü ise ani yük değişimlerine cevap verecek şekilde yapılandırılmıştır. Yakıt hücresi ve ultrakapasitör modüllerinden oluşan hibrit sistemin dinamik modelinde kullanılan çok girişli kısıcının, literatürde mevcut bulunan diğer çalışmalarda kullanılan yakıt hücresi ve ultrakapasitör için ayrı ayrı konverter kullanılması topolojisine göre daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı modelleme ile yakıt hücresi modülünün anlık yük değişimine maruz kalması sayesinde kullanım ömrünün azalmasının önüne geçildiği tespit edilmiştir [20].

Gao çalışmasında yakıt hücresi ve ultrakapasitör hibrit mimarisi ile yakıt hücresi batarya hibrit mimarisinin performansları ADVISOR programı üzerinde ilgili modüllerin kapasiteleri ve boyutları tanımlanarak oluşturulan model vasıtası ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, yakıt hücresi – ultrakapasitör hibrit mimarisinin ultrakapasitör modülünün sistemdeki anlık yüklerle cevap vererek yakıt hücresi üstündeki bu anlık yüklerin olumsuz etkisini ortadan kaldırdığını bu sayede yakıt hücresi modülünün çalışma ömrünün kısalmasının önüne geçtiğini tespit edilmiştir. Yakıt hücresi – batarya hibrit mimarisinde de batarya modülünün aynı şekilde anlık yüklerle cevap verebilecek şekilde dizayn edilmesinin mümkün olduğu fakat yakıt ekonomisi yönünden bu mimarinin daha dezavantajlı olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ultrakapasitörlerin spesifik gücünün yüksek olmasından dolayı yakıt hücresi ile birlikte oluşturdukları hibrit mimaride yakıt ekonomisi ve araç ivmelenmesi gibi performansa dair faktörlerde daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir [21].

Kısacıklıoğlu ve arkadaşları çalışmalarında yeni bir bulanık mantık temelli enerji yönetim sistemine sahip yakıt hücresi ve ultrakapasitör temelli araç üstü hibrit model üzerinde çalışmışlardır. Oluşturdukları dinamik modeli MATLAB/Simulink ortamında ve ADVISOR programında ayrı ayrı gerçekleştirmişlerdir. Modelin farklı yük koşulları altında davranışı gözlemlenmiş ve oluşturulan hibrit yapı ile yakıt hücresi modülünün temel yükü karşılarken, ultrakapasitör modülünün yükteki anlık artışlara cevap vermesini ve aracın frenlemesi esnasındaki rejeneratif enerjinin depolanmasını sağlamışlardır. Geliştirilen bulanık mantık algoritması ile enerji yönetiminin tam olarak istenen şekilde sağlandığı ve ultrakapasitör modülünün boyutlarının optimize edilmesinin sağlandığı ifade edilmiştir [22].

Teymourfar ve arkadaşları çalışmalarında Tahran'da bulunan metro hattı üzerinde trafo merkezlerinde bulunan ultrakapasitör modülleri ile araçların istasyonlarda durma anlarında ve hattaki frenlemeleri anlarında ortaya çıkan rejeneratif enerjinin depolanması ve araçların ivmelenmesi anında tekrar kullanılabilmesi durumunu simule etmişlerdir. Çalışmalarında verimli ve doğru şekilde tasarlanmış bir enerji depolama sisteminin yalnızca enerji tüketimini azaltmayacağı ayrıca hatlarda gerçekleşen kayıpların azalmasını sağlayacağı ifade edilmiştir. Oluşturdukları modeli PSCAD yazılımı ile simule etmişlerdir. Modelde araçların işletme altındaki anlık enerji tüketim verileri alınarak rejeneratif enerji potansiyeli tespit edilmiş. Tespit edilen bu potansiyele uygun kapasitede olacak şekilde 3000 F, 2.7V'luk ultrakapasitör bankaları farklı istasyonlarda konumlandırılmıştır. Yapılan çalışma sonucu ultrakapasitör guruplarının konumlandırıldığı istasyonlarda pik zamanlarda yaklaşık%40 civarı enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucu 5 istasyonda gerçekleştirilecek yatırım sonucu enerji depolama sisteminin yıllık ortalama 1620 MWh enerji depolayacağı, ortalama günlük enerji tasarrufunun %25 oranında olacağı, ultrakapasitör bankalarının yaklaşık ömrü olan 6 yıl 10 aylık süre içerisinde 1.760.000 \$ tasarruf sağlayacağı ve toplam yatırımın geri ödeme süresinin 10 ay olacağı tespit edilmiştir [23].

Iannuzzi ve arkadaşları çalışmalarında istasyon bazlı ultrakapasitör uygulamaları için boyutlandırma ve temel parametrelerin belirlenmesi adına yeni bir metod geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri mekanik simülasyon ile gerçek bir raylı sistem aracının mekanik davranışı, enerji dönüşüm amaçlı kullanılan güç elektroniği elemanları ve ultrakapasitör bankasının birbirleri ile olan etkileşimlerinin bir ara yüzde gözlemlenmesini gözlemlemiştir [24].

Li ve arkadaşları çalışmalarında ADVISOR programı içerisinde geliştirdikleri bulanık mantık algoritması temelli bir enerji yönetim sistemi ile batarya, ultrakapasitör ve yakıt hücresi modüllerinin farklı kombinasyonları için verimlilik analizi yapmışlardır. Çalışmalarında 4 farklı sürüş çevrimi kullanmışlardır. Bulanık mantık temelli enerji yönetim sistemi sayesinde yakıt hücresi batarya hibrit modülünün, güç takip yaklaşımına (power tracking control) göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada yakıt hücresi- ultrakapasitör ve batarya modüllerinin birlikte olduğu hibrit modelin yakıt ekonomisi yönünden en avantajlı model olduğu belirtilmiştir [25].

Bauman ve Kazerani çalışmalarında literatürde mevcut bulunan yakıt hücresi ultrakapasitör ve batarya temelli hibrit sistem topolojilerinin incelemiştirlerdir. Düşük maliyet, yüksek verimlilik ve batarya ömrü uzunluğu açısından avantaj-dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Yüksek güçlü tek yönlü DC-DC kısıyıcı yerine düşük güçlü bir boost konvektör kullanılmasının batarya ömrünü uzattığı, yüksek verimli batarya şarj-deşarj aralığı sunduğu ve batarya boyutlarının optimize edilerek minimize edilmesini sağladığı bu sayede kütle ve maliyet yönünden modelin verimliliğini arttırdığını tespit etmişlerdir [26].

Kumar ve arkadaşları çalışmalarında yakıt hücresi tabanlı şebekeye bağlı dağıtık bir üretim sistemi modelinde ultrakapasitör uygulamasını ve sistemin performansının analizini gerçekleştirmişlerdir. Dağıtık üretim sistemleri için yakıt plinin avantajlı bir kaynak olduğu fakat yükteki ani değişikliklere karşı yakıt hücresinin dinamik tepkisinin geciktiği ve bu durumların yakıt hücresinin ömrünü azaltan etkenler olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında MATLAB/SIMULINK üzerinde geliştirdikleri model üzerinde ultrakapasitör tabanlı şebekeye bağlı bir dağıtık üretim sistemi ile bu sisteme çift yönlü konvektör üzerinden bağlı katı oksit yakıt hücresi sistemi mimarisini simüle etmişlerdir. Simülasyon sonucunda çift yönlü konvektörün bu yapı için en uygun şekilde yük akışını sağladığı gözlemlenmiştir. Sistemde yalnızca yakıt hücresi olması durumunda ise yükteki ani değişikliklere yakıt hücresinin cevap veremediği bu yüzden şebeke frekansında bozulmalar oluştuğu ifade edilmiştir. Ultrakapasitörün sistemin ani yük değişimlerine karşı cevap potansiyelini ve güvenilirliğini artırdığı ifade edilmiştir [27].

Chen ve arkadaşları çalışmalarında PEM tipi yakıt pillerinin hidrojeni doğrudan elektriğe dönüştüren temiz ve yüksek verimlilikteki elektrokimyasal cihazlar olduğu bu yüzden yakıtlar, mobil robotlar, harici güç kaynakları vb. yapılar için kullanıldığını ifade etmişlerdir. Yakıt hücresi tarafından sisteme sağlanan enerjinin düzenli olduğu fakat ani yük değişimleri karşısında yakıt hücresinin oksijen açlığına girmesi hem yakıt hücresinin ömrünü azaltmakta olup hem de sistemdeki ultrakapasitör ve batarya gibi diğer kaynaklar üzerinde aşırı yükler oluşmasına neden olacağı belirtilmiştir. Bu yüzden yakıt hücresine özel bir enerji yönetim yaklaşımının geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [28].

Wang ve Li çalışmalarında yakıt hücresi tabanlı bir araçta ultrakapasitör ve batarya modüllerinin kullanımı durumu için yeni bir enerji yönetim sistemi tasarlanmış ve bu sayede sistemin boyutlandırılmasının, yük akışı ve dağılımının optimize edilmesi sağlanmıştır. Oluşturulan enerji yönetim sistemi sayesinde enerji depolama sisteminin yüksek verimli hale gelmesi sağlanmıştır [29].

Bubna ve arkadaşları çalışmalarında yakıt pillerinin yakıt ekonomisi ve emisyon düşüklüğü yönünden en avantajlı enerji üretim kaynaklarından biri olduğu, PEM tipi yakıt pillerinin ise düşük işletme sıcaklığı ve yüksek güç yoğunluğu sayesinde özellikle otomotiv ve mobil uygulamalarda en avantajlı yakıt hücresi gurubu olduğu ifade edilmiştir. Yakıt pillerinin anlık yükler karşısındaki yetersizliğinin önüne geçmek, rejeneratif enerjinin kazanımını sağlamak amacıyla farklı enerji depolama sistemleri ile birlikte hibrit şekilde kullanıldıkları belirtilmiştir. Çalışmalarında yakıt pili tabanlı bir enerji depolama sistemine batarya ve ultrakapasitör modüllerinin entegrasyonunun 6 farklı kombinasyonda uygulanması durumu modellenmiştir. Modelleme sonucunda ultrakapasitör modülünün batarya modülü ile birlikte kullanılmasının bataryaların enerji geçişini artırdığı ve hücre sıcaklığındaki artışı önlediği gözlemlenmiştir. Ultrakapasitör kullanımının batarya ağırlığını da azalttığı bu sayede araç üstü kütlenin ve yakıt tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir. Modelleme de gerçek sürüş çevrimleri kullanılmıştır [30].

Lin ve Zheng, çalışmalarında ultrakapasitör tabanlı bir hibrit sistem modeli oluşturmuşlar ve bu modele PEM tipi yakıt hücresini entegre etmişlerdir. Model yakıt hücresi taban yükünü karşılayabilecek şekilde yapılmış olup sistemdeki ani yüklerin ve taban yükün üstündeki yüklerin ultrakapasitör üzerinden beslenmesinin sağlanmıştır. Bu şekilde yakıt hücresinin ömrünün uzatılması hedeflenmiştir. Geliştirdikleri adaptif optimal kontrol sistemi ile enerji yönetim sistemi oluşturulmuştur [31].

Khaling ve Li çalışmalarında elektrikli araçların, hibrit elektrikli araçların, yakıt pilli hibrit araçların ve elektrikli araçların hâlihazırdaki enerji ve çevresel sorunlar karşısında efektif birer çözüm olduğunu ifade etmişlerdir. Güç elektroniği elemanlarındaki ve enerji depolama sistemlerindeki devrimsel gelişmelerden dolayı alternatif kaynaklara olan eğilimin hızla artacağı belirtilmiştir. Fakat yalnızca batarya, yalnızca ultrakapasitör yada yalnızca yakıt hücresi bulduran sistemlerin gelişmiş hibrit araçların ihtiyaçlarını tek başına karşılamakta yetersiz kalacağı öngörülmüştür. Hibrit sistemlerde beklenenin,

sistemin yüksek kapasiteli, hızla şarj/deşarj olabilen uzun işletme ömürlü ve düşük maliyetli olmasıdır. Çalışmada farklı hibrit topolojiler ve bu topolojilerin farklı araç tipleri ve işletme şartlarındaki avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir [32].

Lipman ve arkadaşları çalışmalarında sabit bir PEM tipi yakıt hücresi sisteminin ürettiği elektrik enerjisinin farklı büyüklükteki yükler için ekonomik analizi yapılmıştır. Yakıt hücresi tabanlı hibrit araçların park halindeki zaman dilimlerinde ev içi enerji tüketimi için dağıtık enerji üretim kaynağı olarak kullanılması durumu değerlendirilmiştir. Bu uygulama esnasında karşılaşılabilecek problemler tek tek tespit edilerek çözüm önerileri sunulmuştur. Buna göre problem 1 araç üzerinde bulunan kurulu gücün çoğunlukla bir evin akşam zamanındaki enerji tüketiminin çok üstünde olacağı bu yüzden yakıt hücresinin verimsiz çalışmasına neden olacağı ifade edilmiş, buna çözüm olarak da aracın bölgedeki birden çok evi beslemesi durumunda bu problemin aşılabileceği yada araç tarafından üretilen fazla enerjinin elektrik şebekesine geri basılarak satılabileceği belirtilmiştir. Problem 2 olarak ise yakıt hücresine yakıt tedarikinin nasıl yapılacağı belirlenmesi gerektiğidir. Ayrıca yakıt pilli araçların genellikle saf hidrojenle çalışan araçlar olduğu ifade edilmiştir. Problem 3 olarak ise şebeke bağlantı kriterlerinde yasal mevzuatın düzenlenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda ise küçük büyüklükteki ev tipi tüketim durumunda (5kW civarı) maliyetin 1200 \$/kW civarı olacağı, daha büyük boyutlu ev tipi tüketim durumunda (250kW civarı) maliyetin 700 \$/kW civarı olacağı ifade edilmiştir. Ayrıca bu maliyetlerin büyük ölçüde şebeke bağlantı maliyetleri, doğalgaz maliyetleri gibi diğer etkenlere de bağlı olduğu belirtilmiştir [33].

Yoneyama ve arkadaşları çalışmalarında geliştirdikleri 100kW gücünde yakıt hücresi modülü ile çalışan raylı sistem aracı üzerinde yapmış oldukların testlere yer vermişlerdir. Testlerde yakıt hücresinin gerekliliklerinin belirlenmesi, hidrojen depolama modülünün boyutlandırılması ve tahrik zincirinin tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Testlerde ulaşılan maksimum hız 104km/h ve maksimum güç 90kW olmuştur. Ayrıca test sürecinde yakıt hücresinin performans değerleri tespit edilmiştir. Buna göre yakıt hücresinin çıkış gerilimi 850V ile 630V aralığında (%26) değişmektedir. Çıkış gerilimi uluslararası standartlara uygun aralıkta olup motor karakteristik verilerinin minimum çıkış gerilimi göz önünde bulundurularak belirlenmesi gerekmektedir. Yakıt hücresi yükteki ani değişimlerine gerilim düşümü

belirlenen aralıkta kalacak şekilde tepki vermektedir. Çalışmalarının sonraki adımlarında ise yük akışı değerleri incelenerek aracın ivmelenme, duruş yada ani frenleme esnasındaki yük akış durumunun yakıt hücresinin performans değerleri aralığında sağlanabilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca rejeneratif enerjinin geri kazanımı için araç üstü batarya veya ultrakapasitör uygulamalarının da test edileceği belirtilmiştir [34].

Takizawa ve Kondo çalışmalarında yakıt hücresi çıkış geriliminin ve ultrakapasitör modülünün kapasitesinin belirlenmesi adına farklı hibrit konfigürasyonlarda belirlenmesi için metot geliştirmişlerdir. Aracın maksimum hızının yakıt hücresi ve ultrakapasitör modüllerinin çıkış gerilim aralığı tarafından sınırlandırıldığı ifade edilmiştir. Fakat yakıt hücresinin taban yükü karşıladığı ve ultrakapasitör modülünün yükteki anlık değişimlere cevap verecek şekilde konumlandırıldığı hibrit modelde bu sınırlılığın aşıldığı tespit edilmiştir. Oluşturulan bu model gerçek bir sürüş çevrimi ile simule edilerek yakıt hücresi ve ultrakapasitör modüllerinin boyutlarının belirlenmesi sağlanmıştır [35].

3.2. Pazardaki Mevcut Durum

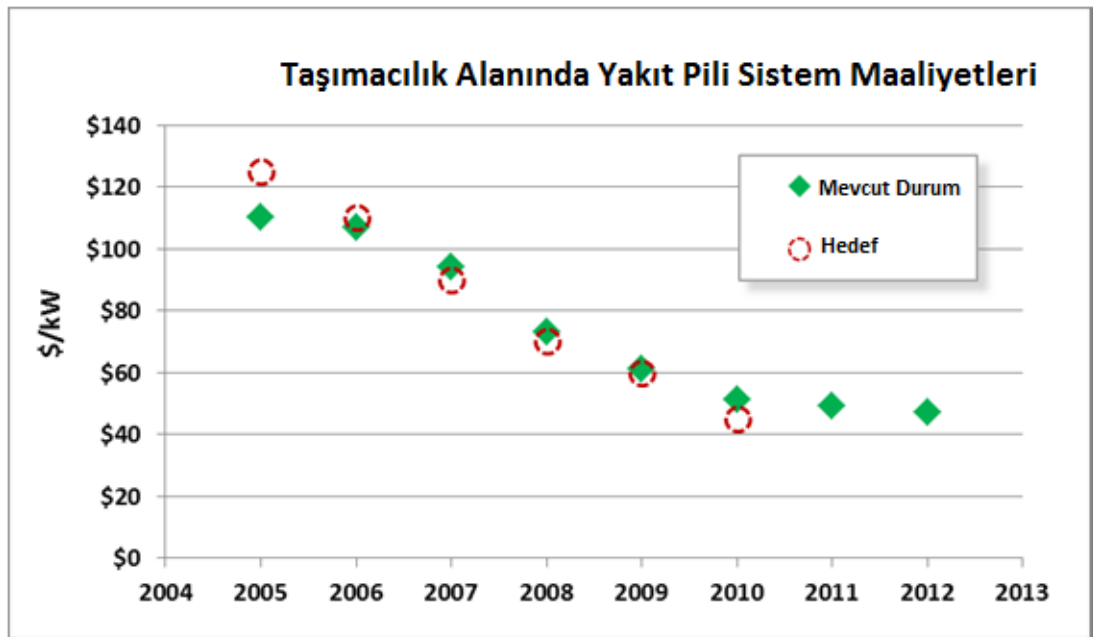
İçten yanmalı motor tabanlı olmayan en yaygın alternatif tahrik sistemi mimarisi elektrik bataryalı araçlardır. Elektrikli araçların kullanımı içten yanmalı motorların gürültü ve karbon salınımının önüne geçmek amacıyla her geçen gün artmaktadır. Farklı ulaşım modlarında kullanılan batarya tabanlı elektrikli araçların temel problemleri ise günlük işletmenin tamamı için yetersiz enerji kapasitesine sahip olması, yüksek maliyet, uzun şarj süresi ve düşük çalışma sıcaklığı aralığına sahip olmasıdır [36].

Yakıt pillerinin ise içten yanmalı motorlara göre araç teknolojilerinde kullanımı konusunda enerji verimliliğinin yüksek olması, temiz olması ve yakıt alternatiflerinin fazla olması gibi avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Hidrojen yakıt pilleri içten yanmalı motorlara göre %60'a varan daha fazla enerji verimliliğine sahip olup araç üstü tahrik sistemlerinde kullanılan yakıt hücresi sisteminden ise atık olarak yalnızca su çıkmaktadır. Yakıt hücresi sisteminin bir başka avantajı ise yakıt olarak kullanılan hidrojenin fosil yakıtlar, doğal gaz, rüzgar, solar ve biomass gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından ve nükleer enerjiden üretilmesidir [37].

Otomobiller, otobüsler, golf araçları, servis araçları (forklift ve havaalanı araçları vb.), lokomotifler, tramvaylar, botlar, uçaklar, sualtı araçları PEM tipi yakıt hücresi teknolojilerinin kullanıldığı taşımacılık modlarından bazılarıdır. Özellikle otomotiv sektöründe neredeyse bütün ana araç üreticilerinin tamamı prototip yakıt hücresi tabanlı araçlarını pazara sunmuş ve yakın gelecekteki yakıt pilli araç üretim stratejilerini yayınlamışlardır [38].

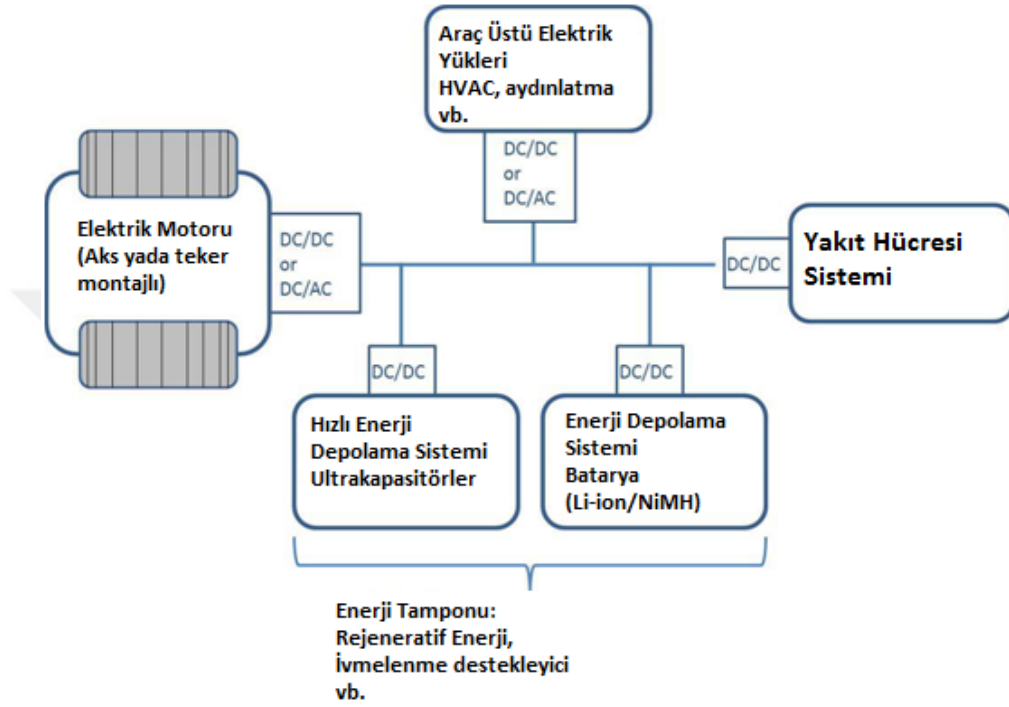
Özellikle otobüs sektöründe yapılan çalışmalar pazardaki yakın gelecekte büyük bir olasılıkla yakıt hücresi teknolojilerinin kullanıldığı araç modunun otobüsler olacağını göstermektedir. Ayrıca yakıt hücresinin yakın gelecekteki en fazla kullanım alanının taşımacılık sektörü olduğu söylenmektedir.

Yakıt hücresi ile enerji üretimi konusunda yapılan çalışmaların artışı ile her geçen gün yeni bir çözüm üretilmekte ve buna bağlı olarak da yakıt hücresinden enerji üretim maliyeti ciddi oranlarda düşmektedir. Şekil 3.1' de Amerika'da bulunan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarlarının (NREL) yıllara göre yakıt hücresi sistemlerin kW başına enerji maliyeti hedefleri ve gerçekleştirilen maliyetlerdeki değişimler görülmektedir. Kurumun stratejik planına göre 2017 yılında enerji üretim maliyetinin 30\$/kW olması beklenmektedir.



Şekil 3.1. Yakıt hücresi sistemlerindeki ortalama enerji üretim maliyeti ve hedefler [39].

Yakıt hücresi teknolojilerinin en yaygın kullanıldığı otobüslerde ise farklı hibrit modellerde ve farklı tiplerde yakıt hücresi modülleri kullanılmaktadır. Fakat geliştirilmiş bir model olarak Şekil 3.2’de gösterilen mimari en yaygın uygulama biçimidir.



Şekil 3.2. Yakıt hücresi temelli bir hibrit otobüs mimarisi. (Yapıda batarya veya ultrakapasitör modülleri ayrı ayrı yada birlikte bulunabilmektedir.)

Özellikle otobüs pazarında hızla artan yakıt pili kullanan tahrik mimarileri ile diğer geleneksel mimarilere göre maliyet ve teknik özellikler bakımından karşılaştırması Tablo 3.1’de verilmiştir.

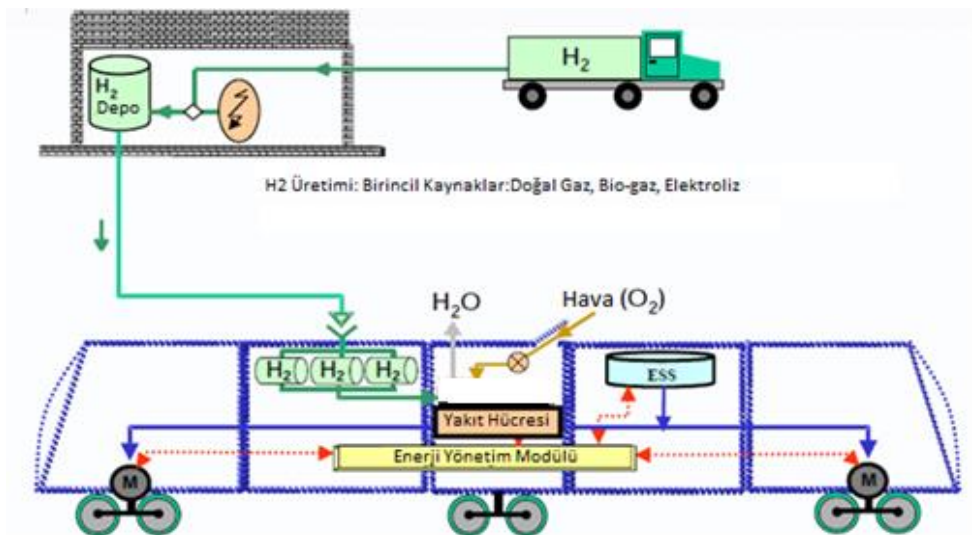
Tablo 3.1. Dizel otobüs teknolojisine alternatif teknolojilerin karşılaştırılması [40].

12 m Otobüs Platformu	İşletme Altındaki Mod	Batarya	Hibrit Yakıt Pili	Hibrit Dizel	Trolleybüs
İlk Yatırım Maliyeti	Klasik dizel mimarisi yaklaşık olarak 170,000€ - 300,000€	Yaklaşık olarak ≥ 1 million	Yaklaşık olarak 1.2€ - 1.8€ milyon	Yaklaşık olarak €350,000 (seri üretim) €500,000 (Prototip)	Yaklaşık olarak 500,000 € - 600,000 €
Yakıt tüketimi (Sürüş çevrimine göre değişebilir)	Dizel Otobüs: 0.35 - 0.5litre/km (~ 3.5 – 5kWh/km)	Testler devam ediyor	Aynı güzergahta çalışan dizel eşdeğerine göre %40 daha ekonomik	Aynı güzergahta çalışan dizel eşdeğer otobüse göre %25-%30 aralığında daha ekonomik.	Aynı güzergahta çalışan dizel eşdeğer otobüse göre %50 daha ekonomik
Yakıt Maliyeti	~ €0.35 – 0.5/km	Testler devam ediyor	Yaklaşık 0.32 – 0.9 €/km (hidrojen üretim maliyetinin yaklaşık 4-6€/kg)	Yaklaşık olarak €0.23 – 0.4/km (dizel yakıt maliyetinin €1/litre olması kabulü ile)	Yaklaşık olarak 0.18€ /km + 20% (elektrik maliyetinin 0.1€/kWh olduğu varsayımı ile)
Menzil	≥ 500 km (şehir içi serviste)	genel olarak <100km olamakta birlikte günümüzde 250 km mesafeli mezile sahip araçlar mevcuttur.	500 km'ye kadar	Dizel otobüsle eşdeğer.	x
Depodaki enerji kapasitesi ile ağırlık oranı	~ 3.5 kWh/kg (assuming 280kg of diesel on board and a 200kW engine)	~ 0.08 – 0.12kWh/kg	Yaklaşık 1kWh/kg (sistemde 35kg Hidrojen bulunduğu ve 150kW gücünde yakıt pili sistemi bulunduğu varsayılmıştır)	Dizel otobüsle eşdeğer.	x
Emre amadeliliği	~ 90%	Testler devam ediyor	Kullanılan yakıt pilinin jenerasyonuna göre %55 ila %80 aralığında değişmektedir.	Dizel otobüsle eşdeğer.	Dizel otobüsle eşdeğer.
Yeniden Dolun Süresi	≤ 0.1 saniye/kWh	15 saniye/kWh'e kadar indirilebilir. (Endüstriyel altyapı kurulması kaydıyla)	≤ 0.45 seconds/kWh (araç üstünde 350 bar altında 40 kg tank olduğu varsayımı ile)	Dizel otobüsle eşdeğer.	x
Atık türü	CO, NOx, SOx, PMs	Yok	Su buharı	CO, NOx, SOx, PMs (dizel otobüse göre %30 daha az)	Yok
CO2 emisyonu	1.15 – 1.6 kg-CO2/km (dizel yakıt karbon içeriği 2.3kg/litre)	Kullanılan elektrik enerjisinin üretiminden kaynaklı carbon miktarına bağlı (yenilenebilir enerji kanakları kullanılması durumunda emisyon %100 düşürülebilir.)	Kullanılan hidrojenin üretiminden kaynaklı carbon miktarına bağlı (yenilenebilir enerji kanakları kullanılması durumunda emisyon %100 düşürülebilir.)	Kullanılan altyapıya göre dizel otobüse göre %30 oranında daha az.	Kullanılan elektrik enerjisinin üretiminden kaynaklı carbon miktarına bağlı (yenilenebilir enerji kanakları kullanılması durumunda emisyon %100 düşürülebilir.)
Enerji depolama/taşıma sisteminin ömrü	Dizel motorlar ağır işletme şartlarında yaklaşık olarak 7 yıl işletme ömrüne sahiptir.	Testler devam ediyor. Halihazırda batarya sistemleri mak. 5 yıl performans düşüklüğü olmadan çalışabilmektedir.	Ağır işletme şartları altında yakıt pili sistemlerin garanti süresi 10,000-15,000 saat aralığında (yaklaşık 5 yıl), bataryaların ise 5 yıldır.	Hibrit mimarinin bakımı için ekstra bakım maliyeti gerekmektedir. (Bataryaların 5 yıl garanti altında olması kabulü ile)	x
Alt yapı maliyeti	x	Şarj altyapısının kurulması gerekmektedir. (istasyonda veya güzergah üzerinde)	Araç depolarında hidrojen dolun istasyonlarına ve dağıtım alt yapısına ihtiyaç vardır.	x	Tüm hat boyunca havai hat ve bu hatta ait altyapıların kurulması gerekmektedir.

Raylı sistem pazarında ise gerek işletmeciliğin boyutunun, kapasitesinin ve menzilin fazla oluşu gerekse raylı sistem araçlarının enerji profiline farklı oluşundan dolayı yakıt hücresi teknolojilerinin kullanıldığı çalışmalar henüz prototip veya deneme sürecindedir. Pazardaki büyük araç üreticilerinin neredeyse tamamı yakıt hücresi tabanlı mobil ya da istasyon bazlı uygulamalar üzerine prototiplerini geliştirmişlerdir. Ayrıca raylı sistemler üzerine araştırma yapan üniversiteler bünyesindeki araştırma enstitülerinin tamamı aynı şekilde hem araç üstü hemde istasyon bazlı yakıt hücresi sistemleri üzerine çalışmaktadır.

3.2.1 ALSTOM FULLTRAM Projesi:

Alstom firmasının ana yürütücülüğünde Axane, AirLiquide, INRETS ve Grenoble Tramvay işletmesi konsorsiyumu tarafından gerçekleştirilen projede yakıt hücresi teknolojilerinin ALSTOM Citadis araçları üzerinde gerçekleşen sistemin maliyet analizi, performansı ve fizibilitesine dair bilgi edinmek amacıyla uygulama yapılmıştır. Çalışmada yakıt hücresi sistemi ile birlikte hibrit bir mimari oluşturularak yakıt hücresi boyutunun optimize edilmesi amacıyla bir enerji depolama sistemi ve bu mimarinin yönetimini sağlayan bir enerji yönetim sistemi kullanılmıştır. Şekil 3.3'da sistemin genel mimarisi görülmektedir [41].



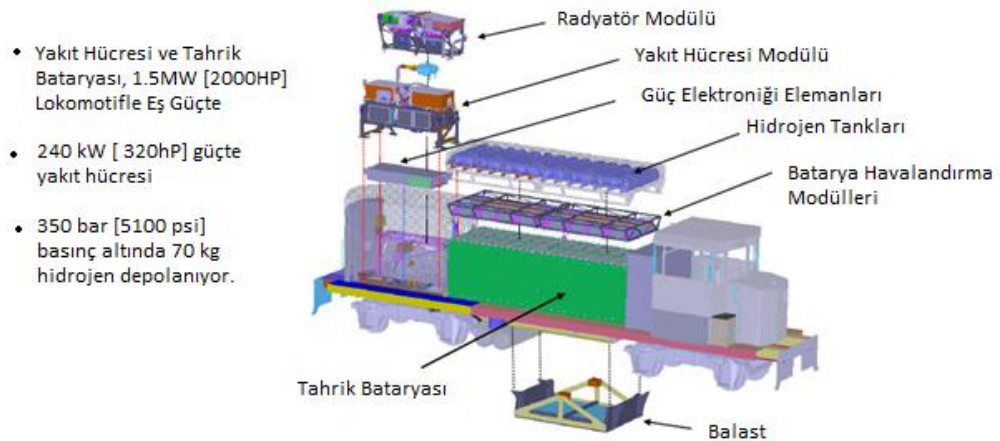
Şekil 3.3. ALSTOM FULLTRAM projesi sisteminin genel mimarisi

Araç üstüne ilave edilecek ekipmanlar için Citadis aracının mevcut araç üstü ağırlığının azaltılması gerekmiştir. Bu yüzden araç üstü ekipmanların bir kısmı daha hafif ve küçük boyutlu ekipmanlarla değiştirilerek araç üzerinde yakıt hücresi modülüne, hidrojen tanklarına ve enerji depolama sistemine yer açılmıştır. Tasarlanan mimari öncelikle NREL tarafından geliştirilen ADVISOR programında analiz edilmiş daha sonra gerçek uygulama yapılmıştır. Testlerde her bir alternatif enerji depolama sistemi Ultrakapasitör (2004), volan (2005) ve yakıt hücresi modülü (FEBUSS marka 100kW gücünde) 2007 yıllarında test edilmiş. Son olarak ise tüm alternatifler birlikte simule edilmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar ortaya konulmuştur;

- Katanersiz sistemlere olan ihtiyaç her geçen gün arttığı,
- Yakıt hücresi sistemlerinin ticarileşmesinin hızlanması için; dayanıklılığı, güvenilirliği, boyutu ve ağırlığı gibi değerlerde iyileşme gerekmediği,
- Ayrıca mevcut yasa ve standartların hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda yeterli güvenliğin sağlanması konusunda yetersiz kalabileceği bu yüzden yeni düzenlemeler yapılması ve daha kapsamlı standartlar oluşturulması gerektiği,
- Yakıt hücresi sisteminin yatırım maliyetinin iyileştirilmesi hayati önem taşıdığı,
- Hidrojenin üretimi konusunda daha kapsamlı alt yapı yatırım projeleri ve gerekli standartizasyon faaliyetlerinin organize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

3.2.2. Vehicle Projects Inc. Yakıt Hücresi Tabanlı Lokomotif Projesi

Amerika Savunma Bakanlığı tarafından finanse edilen çalışmada fosil yakıtlara dayanmayan bir demir yolu altyapısının oluşturulması, hava ve gürültü kirliliğinin azaltılması ve mobil acil durum enerji kaynağı olarak servis sağlayabilecek bir lokomotif geliştirilmiştir. Geliştirilen bu mimaride yakıt hücresi temel enerji kaynağı olarak konumlandırılırken batarya modülü ile rejeneratif enerjinin geri kazanımı hedeflenmiştir [42]. Sistemin genel mimarisi Şekil 3.4’de görülmektedir.

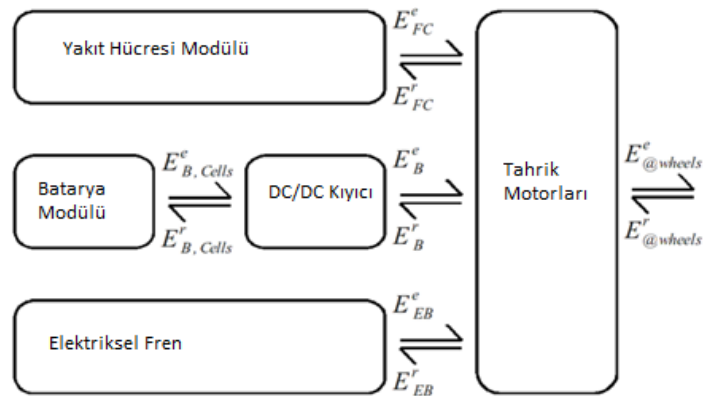


Şekil 3.4. Geliştirilen yakıt hücresi tabanlı hibrit lokomotif mimarisi [42].

Çalışma sonucunda başarılı bir şekilde gerçek işletme şartlarında çalışan bir araç üretilmiş olup, gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalar için fiziksel bir zemin oluşturulmuştur.

3.2.3. Birmingham Üniversitesi Tarafından Yürütülen Çalışmalar

Birmingham Üniversitesi raylı sistemler araştırma enstitüsü tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında yakıt hücresi sistemlerinin İngiltere’de kullanımının mümkün olduğu pazar araştırmasını yapmışlar, Snow Hill bölgesinde banliyö işletmeciliği yapılan bir güzergah üzerinde veri toplanarak aracın enerji karakteristiğinin profili çıkarılmıştır. Sistemin enerji karakteristiğinin analizi sonrası hibrit bir mimari oluşturulmuştur. Oluşturulan mimari ve enerji akış yönleri Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5. Oluşturulan hibrit mimari ve enerji akış yönleri

Oluşturulan bu hibrit mimarinin enerji verimliliği dizel, hibrit ve yalnızca yakıt hücresi kullanımı senaryoları simule edilmiştir. Buna göre ;

- Yalnızca yakıt hücresi kullanılması durumunda 38 kg hidrojen kullanılmıştır,
- Hibrit yakıt hücresi mimarisi kullanılması durumunda 27 kg hidrojen kullanılmıştır,
- Yalnızca dizel yapının kullanılması durumunda 102 litre dizel yakıt kullanılmıştır,
- Hibrit Dizel mimari kullanılması durumunda 82 litre yakıt kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda farklı konseptlerde enerji depolama sistemlerinin araç üstünde farklı uygulamalarda (tahrik sistemi , yardımcı sistemler vb) kullanılmasının ciddi çevresel etkisinin olacağı değerlendirilmiştir. Fakar prototip maliyetlerinin yüksek oluşu bu tip çalışmaların önündeki en önemli zorluklardan biri olduğu ifade edilmiştir [43].

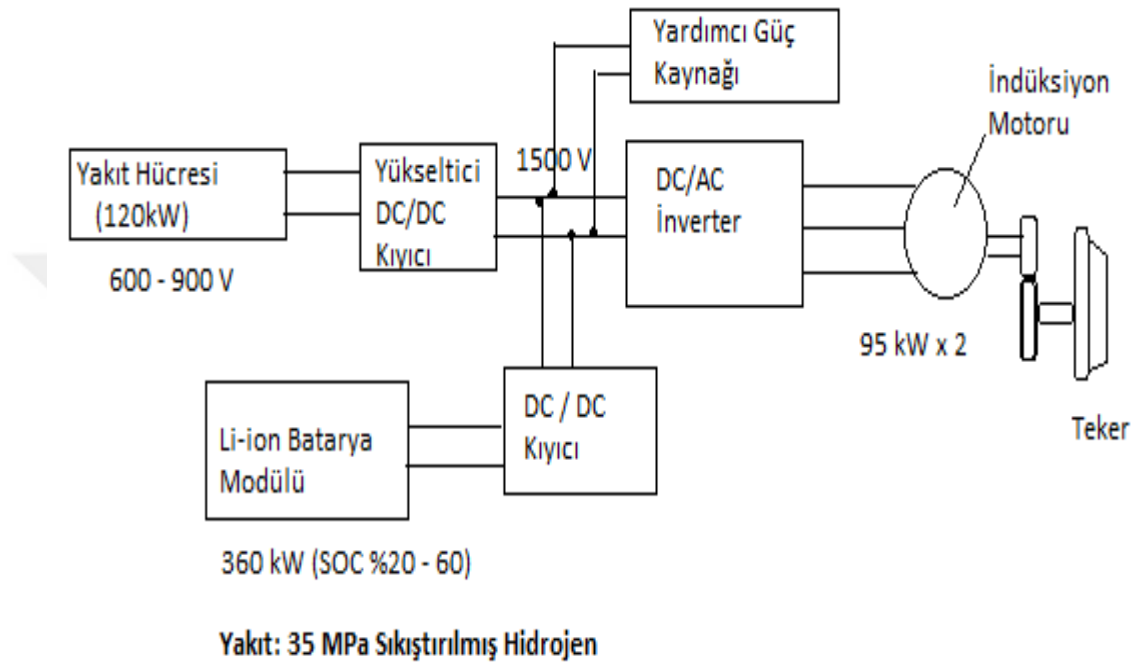
3.2.4. JR EAST Ve Railway Technical Research Institute (Japonya) Tarafından Yapılan Çalışmalar

Yapılan çalışmaların motivasyon noktası dizel demiryolu araçlarının frenleme enerjisini geri kazanmaya uygun olmayan mimarisi ve elektrikli ana hat trenlerinin elektrifikasyonunun yüksek maliyetli olmasıdır. Bu kapsamda gerek ana hat trenlerinin seyir profiline bağlı olan enerji karakteristiğinin yakıt hücresi kullanımına uygun oluşu gerekse frenleme enerjisinin geri kazanımının sağlanması için iyi bir alternatif olan batarya teknolojilerinin maliyetinin düşüyor olması bu iki teknolojinin birlikte kullanıldığı bir hibrit mimari oluşturulmasını sağlamıştır. Oluşturulan bu hibrit mimari ile enerji verimliliği yüksek, karbon emisyonu düşük, sessiz ve daha konforlu bir araç konsepti oluşturulmuştur [44].

Bu kapsamda;

- Güney Japonya Demiryolu Şirketi (JR East) 2006- 2009 yılları arasında araç üstü gerçekleştirdiği uygulamasında 150 kW PEM tipi yakıt hücresi ve batarya modülü bulunan bir prototip araç üretmiş,

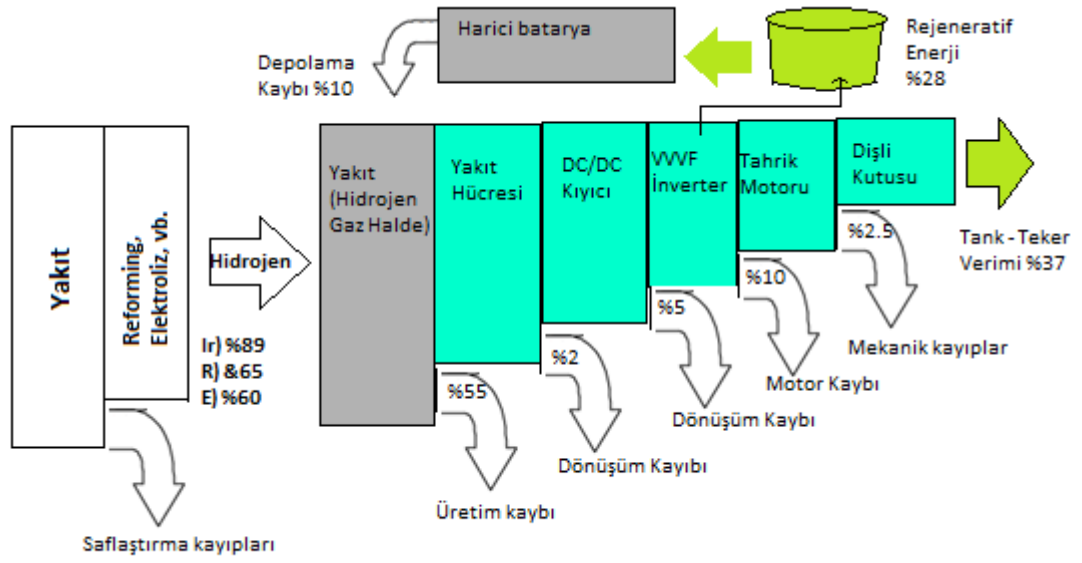
- Raylı Sistemler Teknik Araştırma Enstitüsü (RTRI) ise 2006 yılında başlayan ve halen devam eden çalışmalarında araç üstü uygulaması yapımlı ve testleri devam eden 120 kW PEM tipi yakıt hücresi ve batarya modülleri bulunduran bir prototip araç üretmişlerdir. Oluşturulan hibrit mimari Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.6. RTRI Tarafından oluşturulan hibrit mimari [44].

Yapılan çalışmalarda ayrıca farklı hibrit modeller, farklı güç elektroniği ekipmanları ve yaklaşımları üzerinde testler devam etmekte olup sistemin uygulanabilirliğinin en önemli değişkeninin uygulamanın yapıldığı araca ve işletmecilik modeline en uygun mimarinin ve yönetim yaklaşımının oluşturulması olduğu belirtilmiştir.

Oluşturulan mimarinin uygulandığı araçlar ile yapılan test sürüşleri kapsamında sistemin verimliliği ve kayıpları ile ilgili veriler toplanmıştır. Buna göre sistemin yakıt hücresine hidrojen sağlayan yakıt tankından tekere olan verimi %37’dir. Şekil 3.7’den de görüleceği üzere çalışmalar sonucunda frenleme enerjisinin geri kazanımı yoluyla %28 oranında enerjinin kazanıldığı görülmektedir.



Şekil 3.7. RTRI tarafından yapılan test aracında elde edilen verim [44].

BÖLÜM 4

RAYLI SİSTEM ARACINA YAKIT PİLİNİN ENTEGRE EDİLMESİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ

4.1. Sirio Aracı Teknik Özellikleri

Kayseri Büyükşehir Belediyesi tarafından Kayseri ili kent içi yolcu taşımaları amacıyla kentin Doğu Batı aksı üzerinde 2008 yılından itibaren hafif raylı sistem işletmeciliği yapılmaktadır. Toplam 35 km uzunluğundaki hat üzerinde 52 istasyon bulunan bu işletmecilik 38 adet AnsaldoBreda firması tarafından üretilmiş Sirio modeli hafif raylı sistem araçları ile yapılmaktadır. Yeşil hat uygulaması ile Türkiye’de tek olan güzergahı ve kent dokusuna entegrasyonu ile uluslararası pek çok ödül almış olup hattın önümüzdeki yıllarda giderek genişlemesi ve bu sayede şehrin ulaşım alt yapısının omurgasını oluşturması beklenmektedir. Şekil 4.1’de Kayseri kent içi raylı sistem hattı güzergahı verilmektedir.



Şekil 4.1. Hafif raylı sistem hattının kent içerisindeki konumu

Şekil 4.2’de AnsaldoBreda Sirio aracı ve yeşil hat uygulamasının genel görünümü gösterilmektedir. Bu araç %100 düşük tabanlı hafif raylı sistem aracı olup kent içerisinde kavşak geçişlerinde karma trafikte, diğer bölgelerde yarı izoleli güzergah üzerinde işletilmektedir.



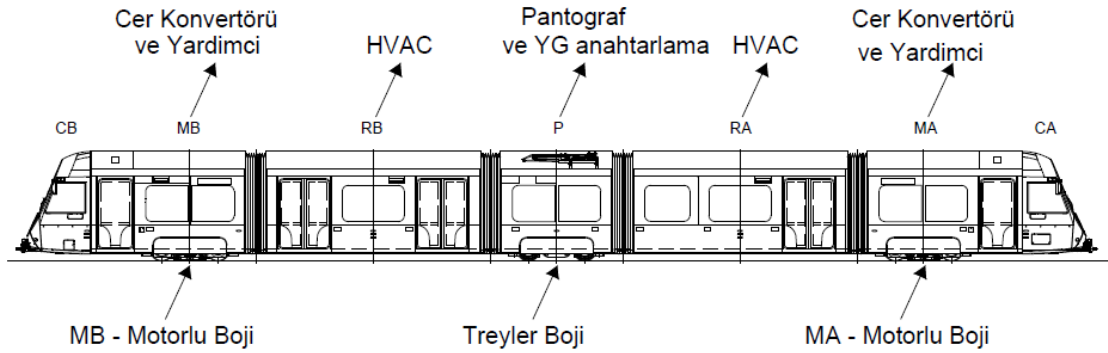
Şekil 4.2. AnsaldoBreda Sirio aracı ve yeşil hat uygulamasının genel görünüşü

Güzergah üzerinde yaklaşık olarak 400 ila 800 m aralıklarla istasyonlar bulunmakta olup asgari sefer süresi 4 dakikadır. Aracın teknik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Sirio aracı teknik özellikleri

Adet	38
Tip	İki yönlü, Mafsallı ve 5 Bölmeden oluşuyor
Ray Açıklığı	1453 mm
Gövde Yapısı	Yüksek Dirençli Çelik
Voltaj	750 V DC
Maksimum Hız	80 km/h
Maksimum İvmelenme	1.1 m/s ²
Maksimum Servis Freni	1.2 m/s ²
Maksimum Acil Fren	2.8 m/s ²
Minimum Kurp	25 m
Araç Uzunluğu	32,250 m
Boş Ağırlık	43.068 kg
Yolcu Kapasitesi	68 Oturan + 203 Kişi Ayakta+2 Özürlü
Teker Çapı	656 - 610 mm
Kataner Seyir Seviyesi	3,85 - 5,80 m

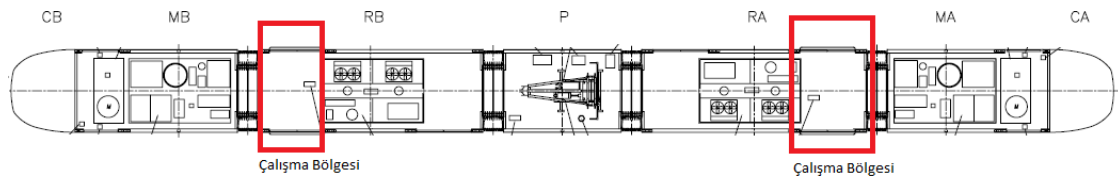
Sirio aracı 5 modülden oluşan ve 2’li diziler halinde çalışabilen araçlardır. Şekil 4.3’de araç üzerindeki ana ekipman gurupları ve araç genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 4.3. Sirio aracı genel görünüşü ve araç üzerindeki ana ekipmanlar.

Düşük tabanlı araçlarda araç altında kalan bölgenin sınırlı olmasından dolayı yakıt pili modülünün araç üzerinde konumlandırılması gerekmektedir. Şekil 4.3’de de görüldüğü üzere araç üzerindeki araç ortadan ikiye ayrıldığında tam olarak simetrik şekildedir. Yanı ekipmanların tamamı öncelikli olarak kendi buldukları taraf ile ilgili çalışırken ancak bir kısmı yedekli çalışma yada arıza durumlarında aracın tamamını kapsayacak şekilde çalışmaktadır.

Bundan dolayı yakıt pili modülünün de araç üzerinde simetrik şekilde doğrudan buldukları tahrik sistemi ünitesine bağlanacak şekilde konumlandırılması gerektiğine karar verilmiştir. Şekil 4.4’de araç üstü ekipman yerleşimi farklı kesitlerden ayrıntılı şekilde verilmektedir.

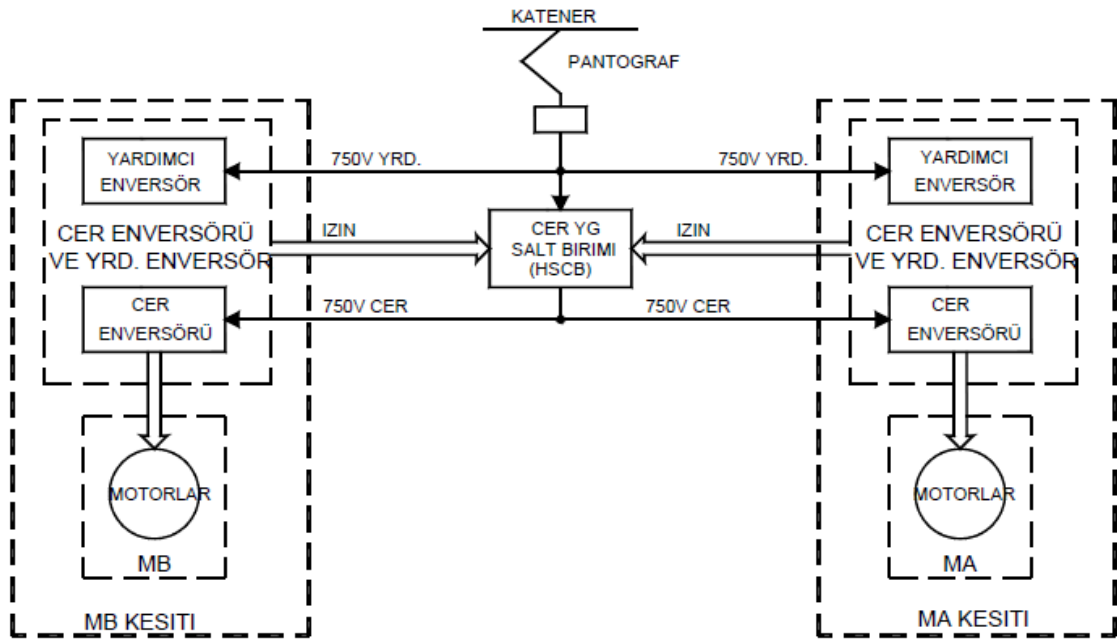


Şekil 4.4. Sirio Aracı Araç Üstü ekipman yerleşimi ve belirlenen çalışma bölgesi

Yakıt pili modülünün yerleştirileceği çalışma bölgesi olarak simetrik olarak aracın her iki başında HVAC üniteleri ile tahrik sistemi üniteleri arasında kalan RA ve RB modüllerindeki alanların kullanılması planlanmaktadır.

4.1.1. Sirio Aracı Tahrik Sistemi

Sirio aracı 550 – 850 VDC gerilim aralığında çalışmakta olup havai hatta bulunan enerji pantograf üzerinden araca aktarılır. Enerji besleme yaklaşımı havai hatta bulunan ortalama 750 VDC gerilimin araç üzerinden raylara geçerek trafo merkezine dönmesi ile devresini tamamlamasına dayanır. Araç üzerinde de bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere sistemler simetrik haldedir. Ancak arıza halinde işletmenin aksamaması amacıyla tahrik üniteleri sistemin belirlenen asgari şartlar altında çalışmasını sağlayacak şekilde yedekli olarak çalışırlar. Şekil 4.5’de araç üzerindeki tahrik sisteminin genel mimarisi görülmektedir.



Şekil 4.5. Sirio aracı tahrik sistemi genel mimarisi

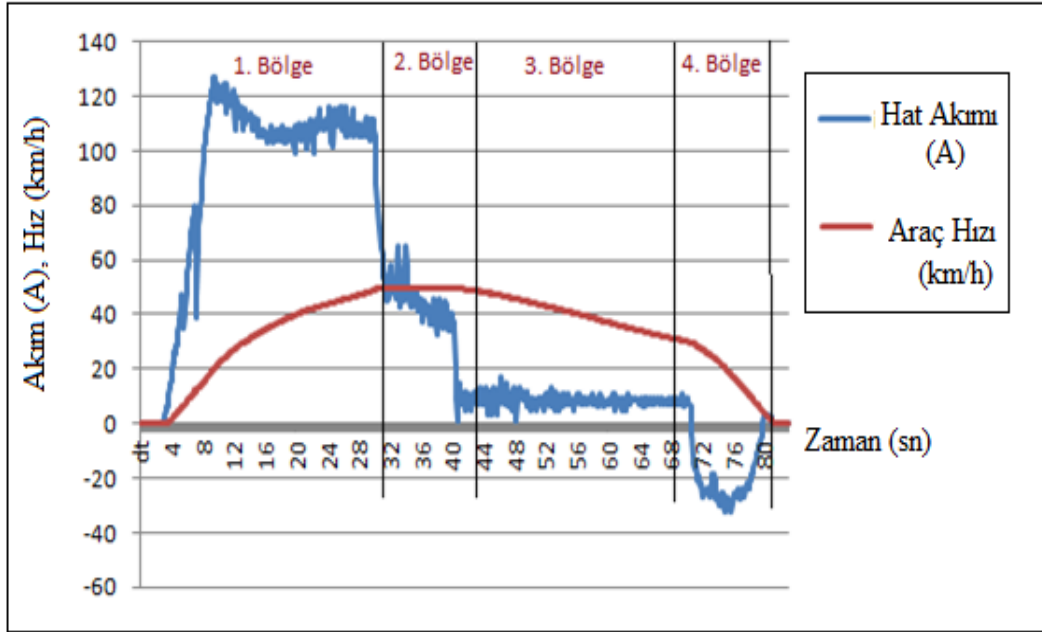
Bu çalışmada yakıt pili modüllerinin belirlenen güzergah için boyutlandırılarak tahrik sistemini havai hattın olmadığı varsayılan bölge içerisinde doğrudan bağlı olarak besleyeceği durumu simule edilecektir. Ayrıca yakıt pili modüllerine hidrojen sağlayacak olan yakıt tanklarının boyutlandırılarak konumlandırılması sağlanacaktır. Sistemin belirlenen güzergah üzerindeki gerçek enerji tüketim verileri referans alınarak oluşturulan matematiksel model ortamında yakıt tüketimi, ekipman boyutu ve maliyet analizi gibi konulara dair değerlendirme yapılacaktır.

Bu çalışmada Sirio aracının belirlenen test istasyonları aralığında katanersiz şekilde Durum 1’de yalnızca yakıt pili sistemi tarafından tahrik enerjisinin sağlanması ve Durum 2’de tahrik enerjisinin batarya modülü tarafından sağlanması durumu simule edilmektedir. Bu amaçla matematiksel modeli oluşturulan yakıt pili sistemi, belirlenen güzergah üzerinde aracın işletme altında olduğu bir zaman dilimine ait enerji tüketimi verileri ile ilişkilendirilerek yakıt pili modülünün davranışı, yakıt tüketimi ve yakıt pili modülünün boyutlandırılmasının sağlanması amaçlanmıştır. Yine bu kapsamda araç üstünde gerçekleştirilmesi gereken değişikliklerin azaltılması ve simülasyonun sadeleştirilmesi amacıyla yakıt pili modülünün tahrik sistemine doğrudan bağlandığı yalnızca istenilen bölgede devrede kaldığı kabul edilmiştir. Ayrıca yakıt pili modülünün boyutlandırılması sonrası araç üstü yerleşiminin ve nihai konumun belirlenmesi amaçlanmaktadır.

4.2. Raylı Sistem Aracı Enerji Profili

Raylı sistem araçlarının enerji profili incelendiğinde enerji verimliliği ve enerji depolama sistemlerinin uygulanması adına ciddi bir potansiyel olduğu görülecektir. Aracın iki durak arasındaki hareketini temelde 4 bölgeye inceleyebiliriz. 1. bölge ivmelenme bölgesi olup enerji tüketiminin en yüksek olduğu bölgedir, 2. bölge süzülme bölgesi olup aracın sabit hızla hareket ettiği ve enerji tüketiminin hattın profiline göre genellikle sabit kaldığı bölgedir. 3. bölge yavaşlama bölgesi olup aracın ivme kolunun boşta olduğu ve güzergahın profiline göre aracın yavaşladığı bölgedir. 4. bölge frenleme bölgesi olup ivme kolunun frenleme bölgesinde olduğu ve aracın hızla yavaşladığı bölgedir.

Şekil 4.6 incelendiğinde iki durak arası sürüş profilinde de görüleceği üzere 1. bölgede aracın ulaşacağı hız değerinin optimize edilmesi ile enerji tüketiminin azaltılabileceği ve bu sayede potansiyel bir enerji depolama sisteminin boyutlandırılmasının mümkün olacağı görülmektedir. 2. bölge ve 3. bölge iki durak arasındaki işletme süresinin müsaade ettiği ölçüde uzun tutulmasının aracın toplam enerji tüketimini ciddi şekilde azaltacağı görülmektedir. 4. bölgede ise frenleme esnasında aracın hatta enerji bastığı görülmekte olup özellikle bu bölgedeki frenleme enerjisi batarya, ultrakapasitör vb. enerji depolama sistemlerinin kullanımı durumunda ciddi oranlarda geri kazanım imkanı sağlayacağı görülmektedir.



Şekil 4.6. İki durak arasındaki örnek sürüş profili

4.3. Yakıt Pili Modülünün Matematiksel Modeli

Dinamik modelin oluşturulmasında referans noktası olarak hidrojenin molar akışı ile kısmi basıncı arasındaki ilişki baz alınır. Buna göre hidrojenin giriş valfindeki molar akışı (q_{H_2} (kmol/s)) ile kanal içerisindeki kısmi basıncı arasındaki ilişki eşitlik 1'de gösterilmektedir.

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = KH_2 \sqrt{MH_2} \quad (1)$$

Burada; q_{H_2} hidrojenin giriş valfindeki molar akışı (kmol/s), p_{H_2} hidrojenin giriş kanalı içerisindeki kısmi basıncı (atm), KH_2 valf sabiti (kmol/(sxatm)), MH_2 : hidrojenin mol kütleini (kg/kmol) ifade etmektedir.

Hidrojenin molar akışı ile ilgili üç temel değişken bulunmaktadır: hidrojen giriş akışı (q_{H_2in}), hidrojen çıkış akışı (q_{H_2out}) ve reaksiyon esnasındaki hidrojen akışı (q_{H_2r}). Bu üç faktör arasındaki bağıntı eşitlik 2'de gösterilmektedir.

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2in} - q_{H_2out} - q_{H_2r}) \quad (2)$$

Burada; T hidrojen besleme akışı sıcaklığının Kelvin cinsinden karşılığı, Van (lt) anot hacmini ifade etmektedir.

Hidrojen akışı ile yakıt hücresi sisteminin çıkış akımı arasındaki elektrokimyasal ilişki sonucu reaksiyona giren hidrojenin akış oranı eşitlik 3'de verilmiştir.

$$qH_{2r} = \frac{NoI}{2F} = 2KrI \quad (3)$$

Burada: No yakıt hücresi modülü içerisindeki seri bağlı yakıt pilli sayısı, I (A) yakıt hücresi modülünün çıkış akımını, F (C/kmol) Faraday sabitini, Kr (kmol/(sA)) model sabitini ifade etmektedir.

(1),(2) ve (3) numaralı eşitliklere Laplace dönüşümü uygulandığında hidrojenin kısmi basıncı aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$pH_2 = \frac{\frac{1}{KH_2}}{1+TH_2s} (qH_{2in} - 2KrI) \quad (4)$$

$$TH_2 = \frac{Van}{KH_2 RT} s \quad (5)$$

Benzer şekilde (1) ve (5) numaralı eşitlikler kullanılarak , modüle giren oksijenin kısmi basıncı ve reaksiyon sonucu ortaya çıkan suyun kısmi basıncı elde edilmektedir.

PEM tipi yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi ise Nernst voltajı, aktivasyon gerilimi ve omik gerilimin toplamı ile bulunmaktadır. Yakıt hücresi modelinin çalışma sıcaklığının ve oksijen konsantrasyonunun sabit olduğu varsayımı ile yakıt hücresi modülünün çıkış voltajı;

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohmic} \quad (6)$$

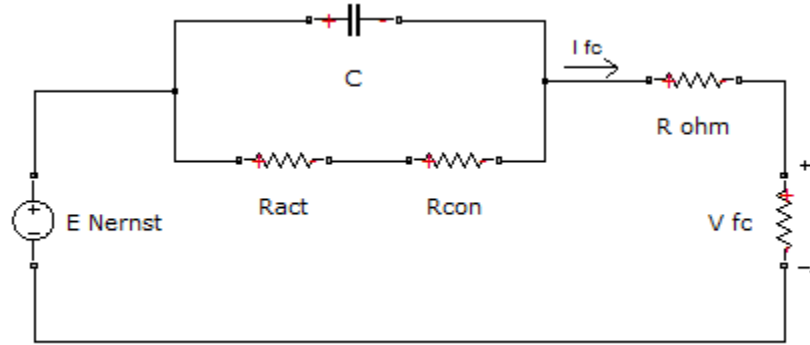
$$\eta_{act} = -B \times \ln(CIFC) \quad (7)$$

$$\eta_{ohmic} = -R_{int} \times I \times F \times C \quad (8)$$

Bu denklemlere göre Nernst voltajı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$E = No \left[E_o + \frac{RT}{2F} \log \left[\frac{pH_2 \sqrt{pO_2}}{pH_2O} \right] \right] \quad (9)$$

Verilen 6,7,8 ve 9 numaralı eşitlikler ile oluşturulan tek bir yakıt hücresinin elektriksel modeli Şekil 4.7'de verilmektedir.



Şekil 4.7. Tek bir yakıt hücresi hücresinin elektriksel modeli

Yakıt hücresi sistemi talep edilen güç ile orantılı olarak hidrojen akışına ihtiyaç duyar. Yani talep edilen güç miktarı arttıkça modülün bu ihtiyacı karşılamak için ihtiyaç duyacağı hidrojen miktarı da artacaktır. İşletme esnasında hidrojen yüksek basınçlı bir tank içerisinde sağlanır. Bu yüzden işletme esnasında hidrojen akış oranının kontrolü yakıt hücresi modülünün çıkış gücü üzerinden oluşturulacak bir geri besleme mekanizması üzerinden sağlanır. Bu geri besleme mekanizması kullanılarak bulunan talep edilen hidrojen miktarı ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

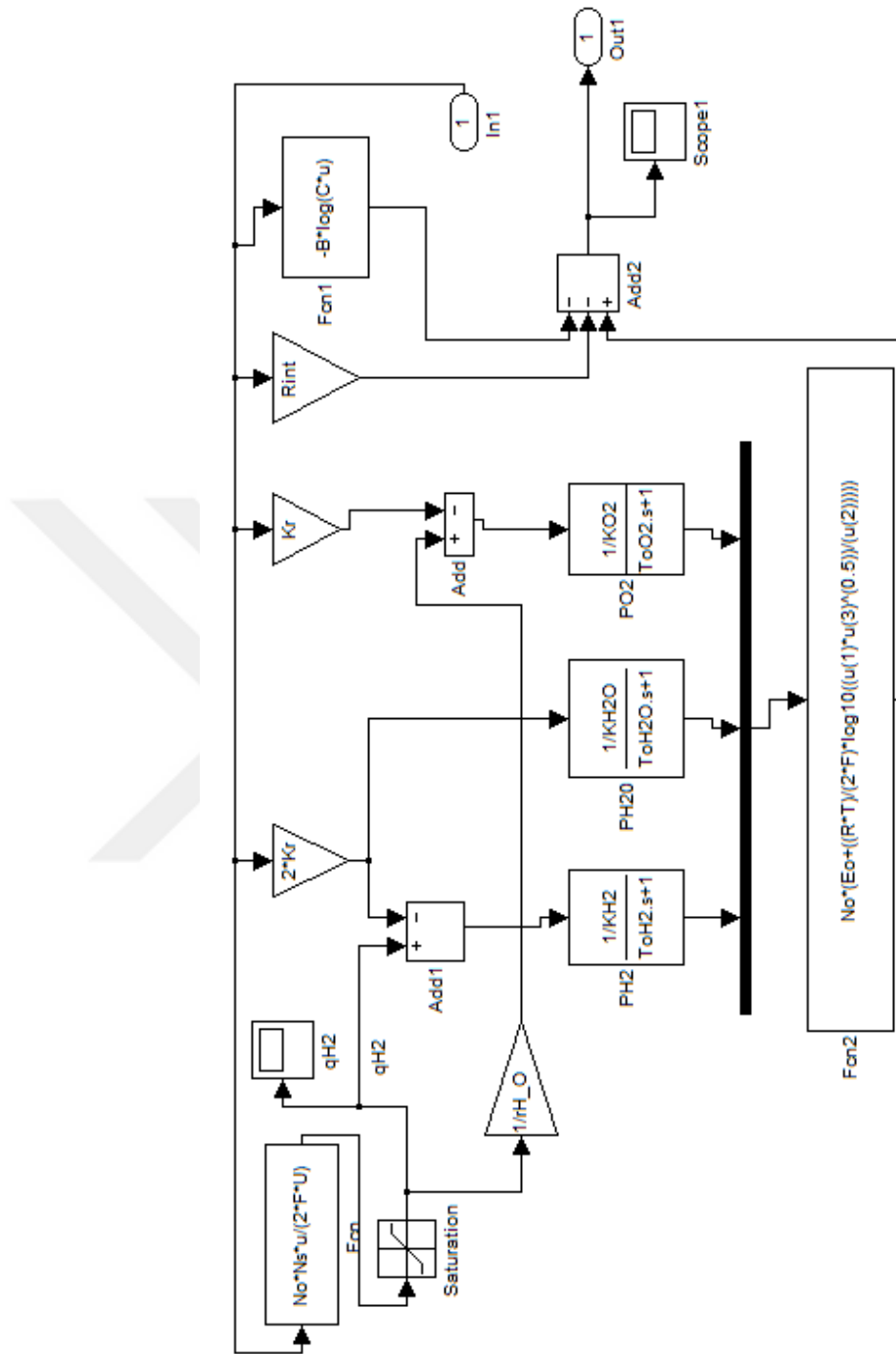
$$qH_{2req} = \frac{NoIFC}{2FU} \quad (10)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ile Matlab/SIMULINK ortamında yakıt pili modülünün matematiksel modeli oluşturulmuştur. Yakıt pilinin sayısal modelinde kullanılan parametreler Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

Şekil 4.8'da verilen matematiksel model oluşturulurken yakıt hücresi modülünün çalışma sıcaklığı, giriş oksijenin kısmi basıncı gibi bir takım değerler gerek modelin sadeleştirilmesi, gerekse yoğunlaştırılan alanın yalnızca yakıt hücresinin kullanım alanı olmasından dolayı sabit alınmıştır ve alınan değerler Tablo 4.2'de verilmektedir. Çalışmada konsantrasyon kayıpları gerçekleşme faktörü üzerinden sabit alınarak genelleştirilmiş matematiksel model oluşturulmuştur.

Tablo 4.2. Yakıt Hücresi Model Sabitleri

Aktivasyon voltaj sabiti (B)	0.04777 [A^{-1}]
Aktivasyon voltaj sabiti (C)	0.0136 [V]
Faraday Sabiti (F)	964845 [C/(mol)]
Hidrojen zaman sabiti (TH ₂)	3.37 [s]
Hidrojen valf sabiti (KH ₂)	4.22x10 ⁻⁵ [kmol (s atm) ⁻¹]
Hidrojen – Oksijen akış oranı (r H ₂ O)	1.168
Kr sabiti =No/4F	8.3951X10 ⁻⁷ [kmol (s A) ⁻¹]
Boş yükteki gerilim (E _o)	0.6 [V]
Seri hücre sayısı (No)	332
Oksijen zaman sabiti (TO ₂)	6.74 [s]
Oksijen valf sabiti [kO ₂]	2.1x10 ⁻⁵ [kmol (s atm) ⁻¹]
PI kazanç sabiti (k ₁ ,k ₂)	10
Yakıt hücresi hücre başına iç direnç (R _{int})	0.00303 [Ω]
Yakıt hücresi mutlak sıcaklığı (T)	343 [K]
Evrensel gaz sabiti (R)	83114.47 [J (kmol K) ⁻¹]
Gerçekleşme faktörü (U)	0.8
Voltaj referans sinyali (V _r)	188 [V]
Su zaman sabiti (TH ₂ O)	18.418 [s]
Su valf sabiti (KH ₂ O)	7.716x10 ⁻⁶ [kmol (s atm) ⁻¹]

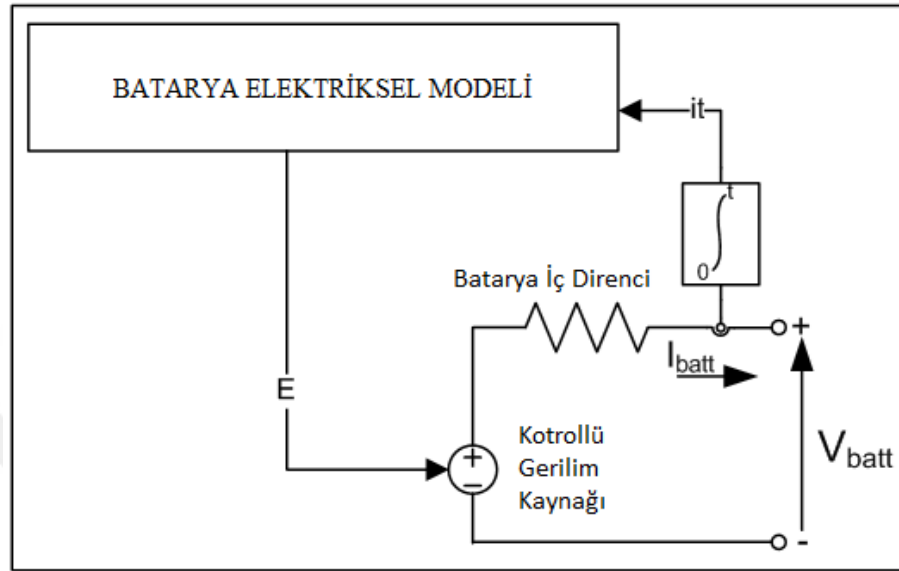


Şekil 4.8. Yakıt Hücresi Dinamik Modeli

4.3. Lityum İyon Batarya Matematiksel Modeli

Lityum-İyon temelli bataryalar diğer batarya teknolojilerine göre yüksek enerji yoğunlukları, hızlı tepki süreleri ve uzun çevrim ömürleri gibi özelliklerinden dolayı elektrikli araçlarda ve diğer mobil uygulamalarda yoğun şekilde kullanılmaktadır.

Batarya matematiksel modeli olarak SIMULINK platformunda hazırda bulunan batarya modeli kullanılmış olup modelde batarya çıkış gerilimi bataryanın iç direnci ve deşarj akımlarına göre modellenmiş olup geliştirilmiş modeli Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9. Batarya modeli geliştirilmiş modeli

Buna göre oluşturulan batarya modelinde bataryanın çıkış gerilimi eşitlik 11'de verilmektedir;

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (11)$$

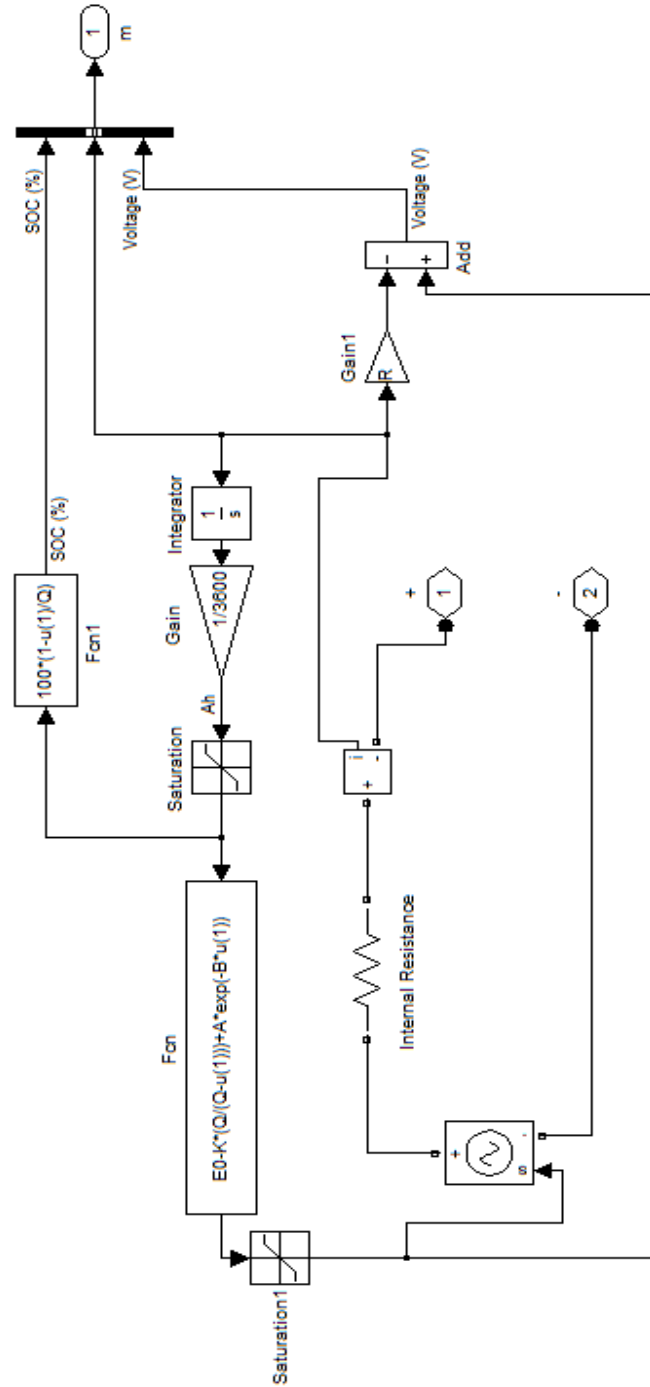
Burada; E yüksüz durumdaki potansiyel farkı (V), E_0 sürekli durumdaki potansiyel fark (V), K polarizasyon voltajı (V), Q batarya kapasitesi (Ah), A üssel voltajı (V) ve B üssel kapasiteyi (Ah)⁻¹ ifade etmektedir.

Batarya modülüne ait aşağıdaki kabuller yapılarak matematiksel model oluşturulmuştur;

- Batarya iç direncinin şarj veya deşarj çevrileri süresince değişmediği, sabit olduğu ve akımın yüksekliği ile değişmediği kabul edilmiştir,
- Model parametreleri deşarj karakteristiğinden uyarlanmış olup şarj karakteristiğinin aynı olduğu kabul edilmiştir,
- Batarya kapasitesinin akımın genliği ile değişimi (Peukert Effect) göz ardı edilmiştir.
- Sıcaklık değişimi etkisi model davranışında göz ardı edilmiştir.

- e) Bataryanın iç direncinden kaynaklı deşarj olması durumu göz ardı edilmiştir.
- f) Batarya hafıza etkisi ihmal edilmiştir.

Matlab / SIMULINK ortamında oluşturulan matematiksel model Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.10. Batarya matematiksel modeli

4.4. Hibrit Sistemin Genel Mimarisi

Bu çalışmada iki ayrı hibrit senaryo üzerinde yakıt hücresi kullanımı durumu incelenmektedir.

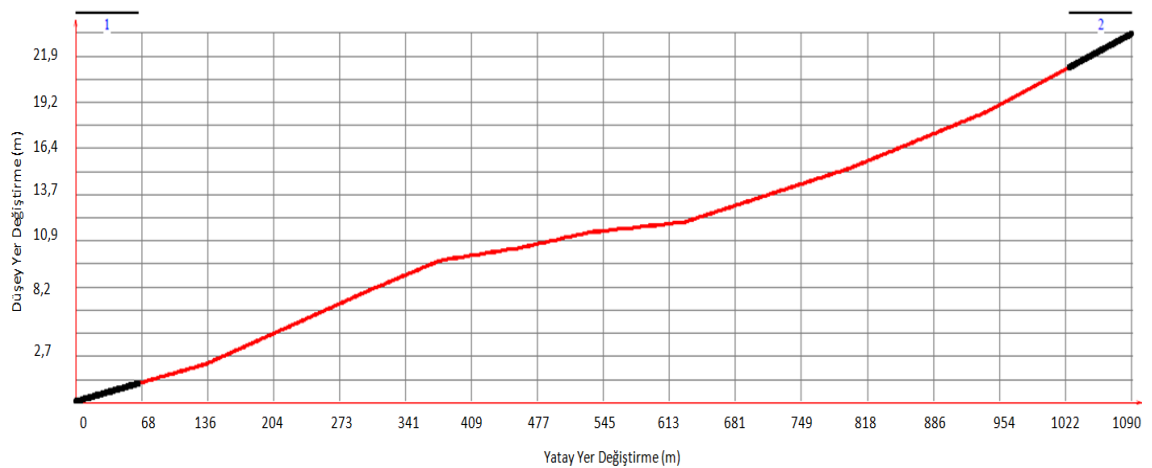
Oluşturulan her iki hibrit sistemde raylı sistem hattının 5 istasyonluk belirli bir kesitinde hali hazırdaki raylı sistem araçlarının enerji tüketim verileri alınarak modeldeki talep akım bilgisi elde edilmiştir. Araç üzerinde raylı sistem modülü katanersiz bölgede aracın enerji ihtiyacının tamamını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

4.5. Araç Enerji Talebi Verisi Analizi

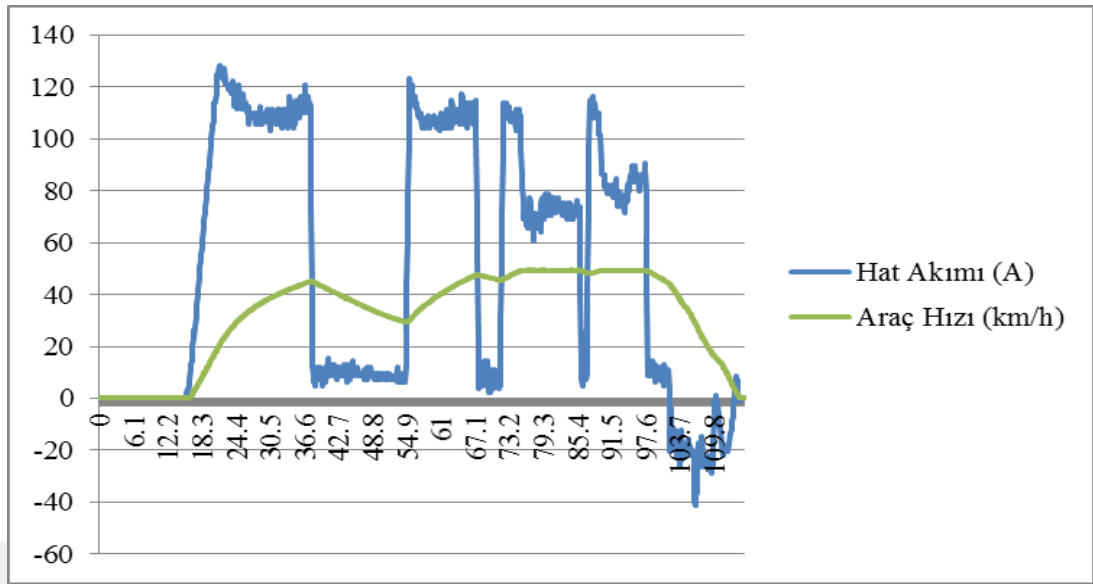
Kayseri Büyükşehir Belediyesi bünyesinde yer alan AnsaldoBreda Sirio marka araçlar üzerinde işletme güzergâhının belirlenen bir bölümünde araç üzerinde ölçüm yapılmış olup ölçüm sunucunda aracın çektiği akım, gerilim, hız, ivmelenme, frenleme, sürüş zamanı ve toplam yol verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu verilere göre;

İstasyon 1-2 arası:

Şekil 4.11’de istasyon 1 ve istasyon 2 arasındaki düşeydeki yer değiştirmeye ait grafik verilmektedir. Araç üzerinde bu iki istasyon arasında yapılan ölçüm sonucunda Şekil 4.12’de hat akımının ve araç hızının değişimi gösterilmektedir. Akım [I]: hattan çekilen akım, Hız: km/saat cinsinden aracın o anki hızını göstermektedir.

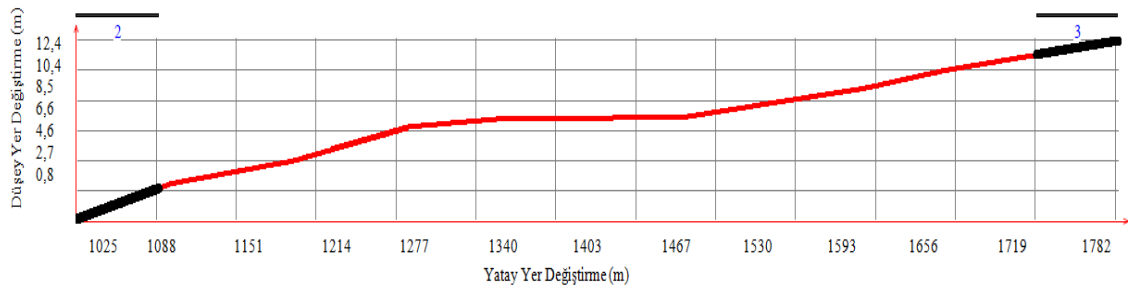


Şekil 4.11. İstasyon 1 İstasyon 2 arası eğim grafiği

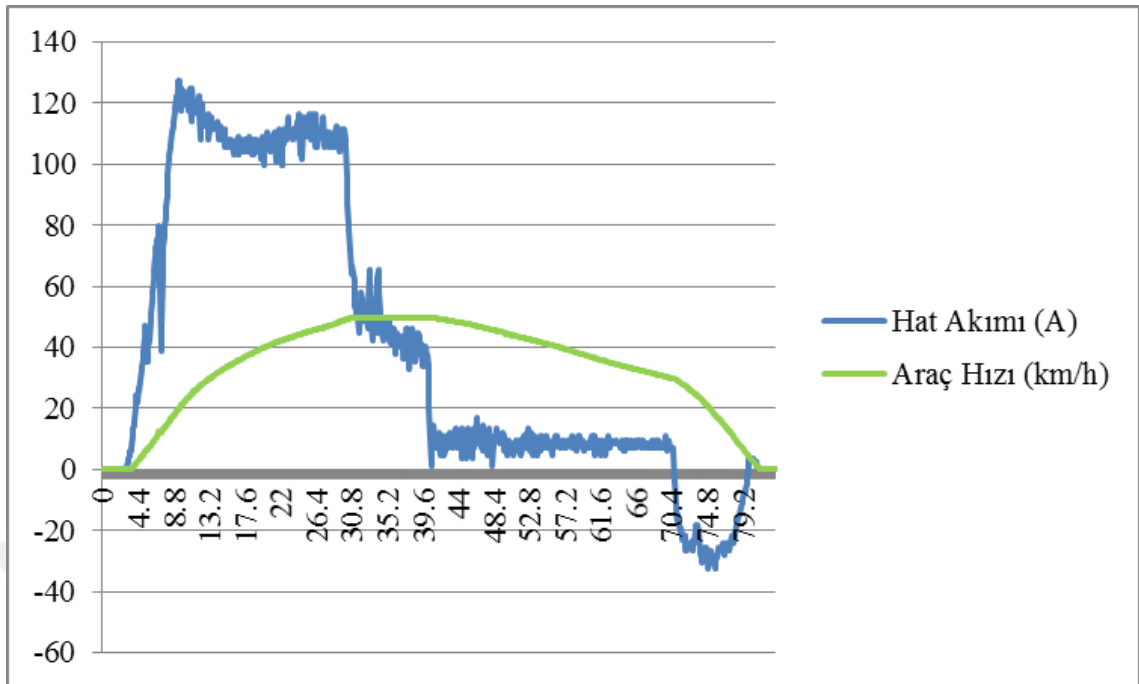


Şekil 4.12. İstasyon 1 – İstasyon 2 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği.

Şekil 4.13’de istasyon 2 ve istasyon 3 arasındaki düşeydeki yer değiştirmeye ait grafik verilmektedir. Araç üzerinde bu iki istasyon arasında yapılan ölçüm sonucunda Şekil 4.14’de hat akımının ve araç hızının değişimi gösterilmektedir.

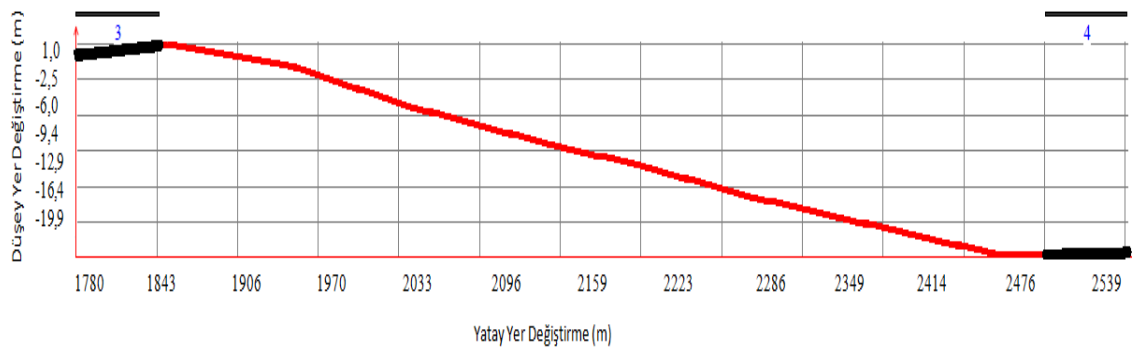


Şekil 4.13. İstasyon 2 istasyon 3 arası eğim grafiği

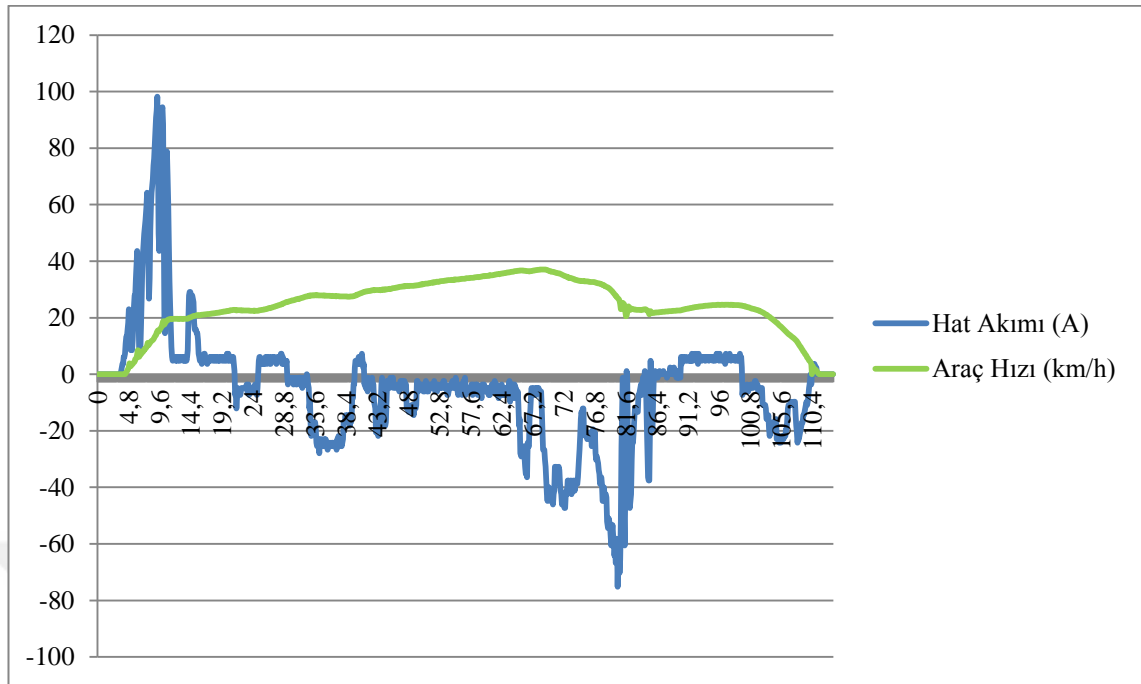


Şekil 4.14. İstasyon 2 – İstasyon 3 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği.

Şekil 4.15’de istasyon 3 ve istasyon 4 arasındaki düşeydeki yer değiştirmeye ait grafik verilmektedir. Araç üzerinde bu iki istasyon arasında yapılan ölçüm sonucunda Şekil 4.16’de hat akımının ve araç hızının değişimi gösterilmektedir.

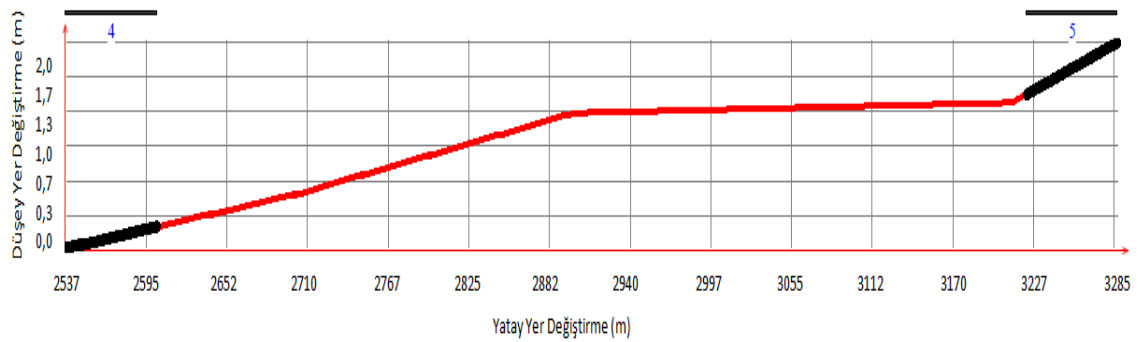


Şekil 4.15. İstasyon 3 İstasyon 4 Arası Eğim Grafiği

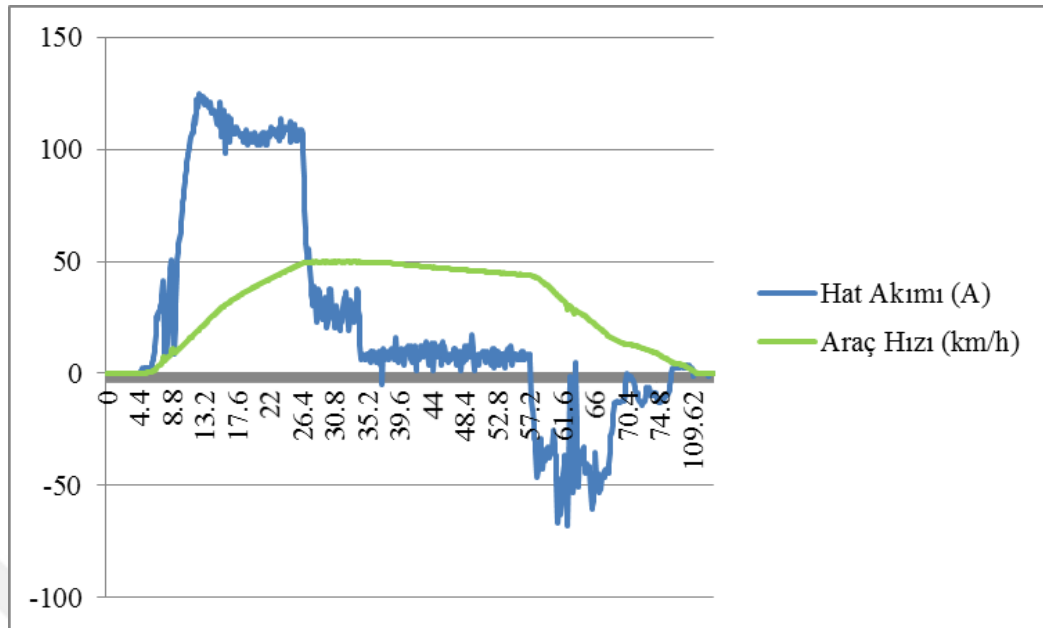


Şekil 4.16. İstasyon 3 – İstasyon 4 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği.

Şekil 4.17’de istasyon 4 ve istasyon 5 arasındaki düşeydeki yer değiştirmeye ait grafik verilmektedir. Araç üzerinde bu iki istasyon arasında yapılan ölçüm sonucunda Şekil 4.18 hat akımının ve araç hızının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.17. İstasyon 4 İstasyon 5 Arası Eğim Grafiği



Şekil 4.18. İstasyon 4 – İstasyon 5 Arası Akım (A)-Zaman, Hız(km/h) – Zaman Grafiği

4.6. Matematiksel model çıktıları

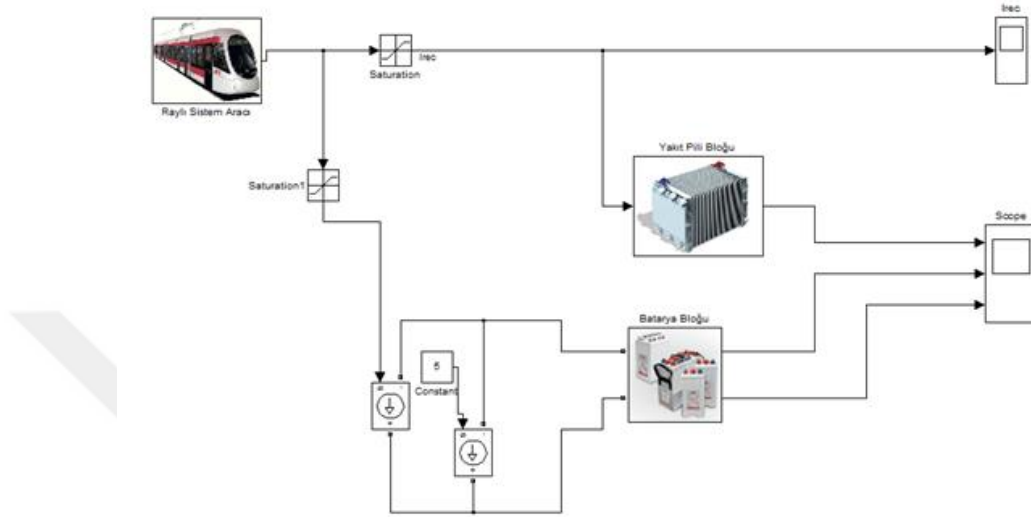
Durum 1’de aracın yalnızca yakıt hücresi ile tahrik edildiği ve bataryanın sadece yardımcı sistemler için kullanıldığı, Durum 2’de ise aracın lityum iyon batarya ile tahrik edildiği ve yakıt hücresi modülünün bataryanın şarj edilmesinde kullanıldığı varsayılmaktadır.

4.6.1. Durum 1: Yalnızca Yakıt Hücresi ile Tahrik:

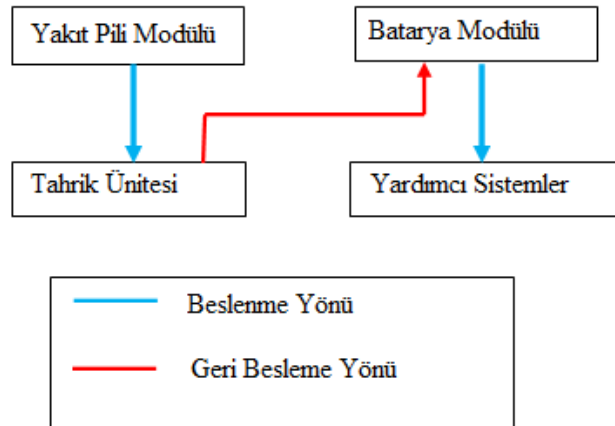
Durum 1’de katanersiz olarak çalıştırılması düşünülen bölgede raylı sistem aracının yalnızca yakıt hücresi ile tahrik edildiği ve rejeneratif enerjinin araç üzerinde teşkil edilecek batarya guruplarında depolandığı varsayılmaktadır.

Araç üzerinde frenleme esnasında oluşan rejeneratif enerjinin teorik potansiyelini gösterebilmek adına ortaya çıkan rejeneratif enerji ile araç üstünde lityum iyon bataryaların şarj edilmesine imkan sağlayacak bir model oluşturulmuştur. Modelde araç üstündeki yardımcı sistemlerin yükü ortalama bir değer olarak sabit 5A alınmış ve araçtan talep edilen akım değeri, batarya modülünün çıkış gerilimi, şarj durumu, yakıt hücresi modülünün çıkış gerilimi ve talep edilen H_2 miktarı model çıktıları olarak verilmektedir. Sistemin genel mimarisi Şekil 4.19’da verilmektedir.

Durum 1'deki enerji akış yönleri Şekil 4.20'de verilmiş olup yakıt pili aracın tüm tahrik ihtiyacını karşılarken, frenleme esnasında ortaya çıkan rejeneratif enerji araç üstünde yer alan ve yardımcı sistemleri beslemede kullanılan bataryaları şarj etmektedir.



Şekil 4.19. Durum 1 genel mimari.

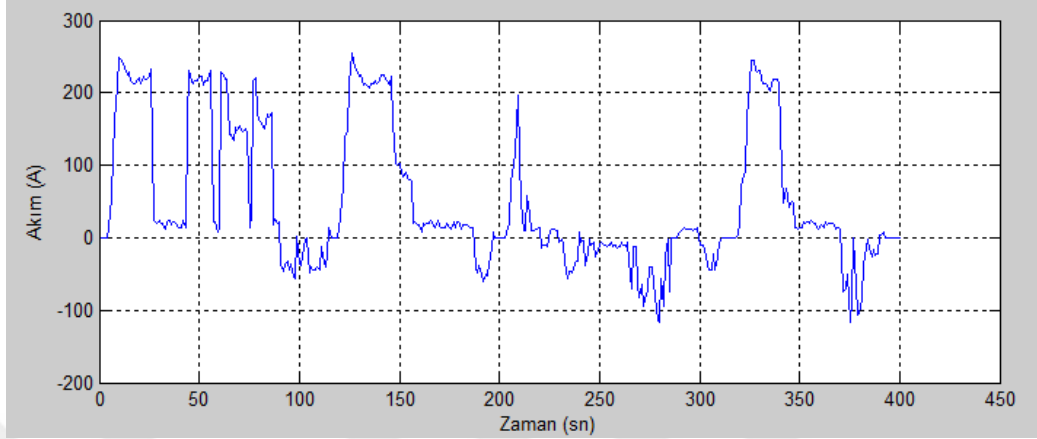


Şekil 4.20. Araç üstündeki enerji akış yönleri

Durum 1'de yukarıda bahsedilen hibrit mimari Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulmuştur. Sistemin model çıkışları aşağıda sunulmuştur.

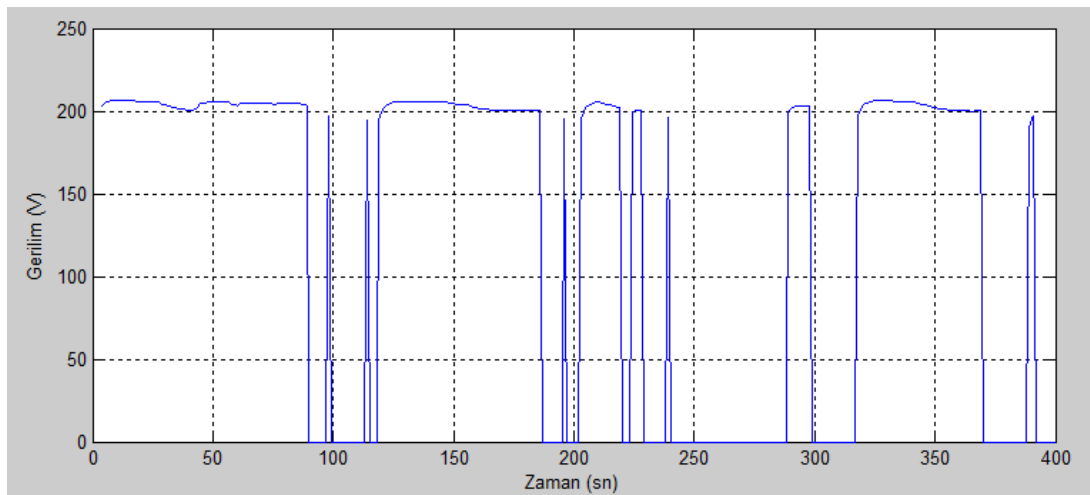
Şekil 4.21 araç tarafından talep edilen akımın zamana göre değişimini göstermektedir. Şekildende görüleceği üzere Durum 1'de araç tarafından talep edilen akım değerleri

maksimum 250 A civarında olup frenleme esnasında talep akımı negatif bölgeye geçmiştir.



Şekil 4.21. Durum 1 için araç tarafından talep edilen akımın zamana göre değişimi

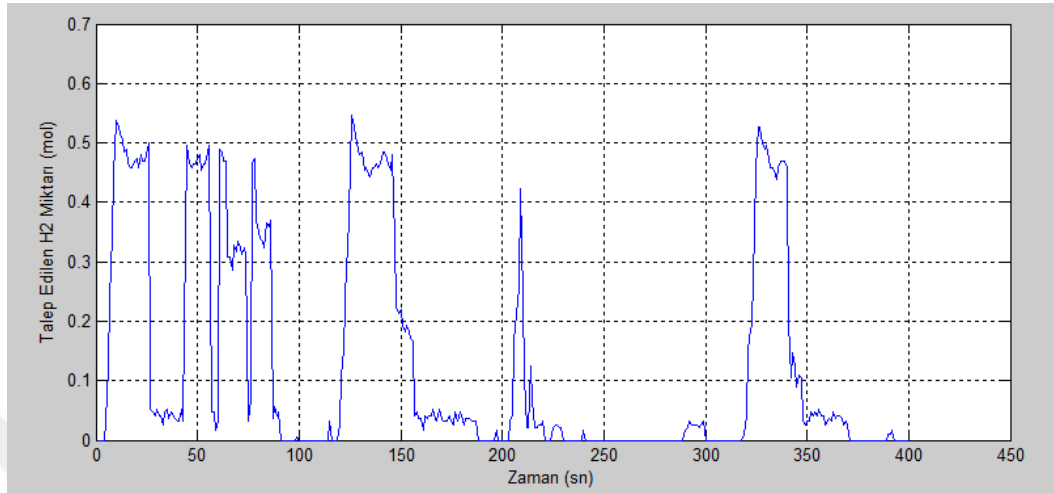
Şekil 4.22 yakıt hücresinin çıkış geriliminin zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 1’de yakıt pilli modülü araç talep akımının pozitif olduğu bölgelerde devrede olup, modül çıkış gerilimi düzeyi 200V civarındadır. Yine ilgili grafikte görüleceği üzere anlık akım talepleri durumunda yakıt pilli modülü çıkış geriliminde anlık pikler oluşmaktadır.



Şekil 4.22. Durum 1 için yakıt hücresi çıkış geriliminin zamana göre değişimi

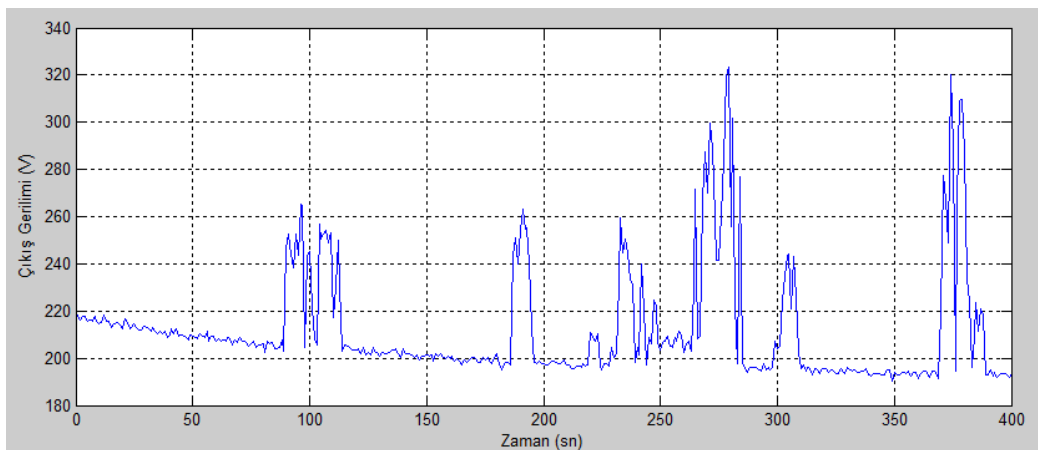
Şekil 4.23 talep edilen H_2 miktarının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 1’de yakıt hücresi modülünden akım talebi olduğu anlarda talep akımı ile ilişkili olarak hidrojen tüketimi olmuştur. Buna göre Durum 1’de katanersiz bölgede tek bir geçişte talep edilen hidrojen miktarı 52.5 mol hidrojen olup

gün içerisinde her bir aracın ilgili bölgeden 10 defa geçtiği varsayımı ile günlük toplam 526 mol hidrojen ihtiyacı bulunmaktadır.



Şekil 4.23. Durum 1 için talep edilen H₂ miktarının zamana göre değişimi

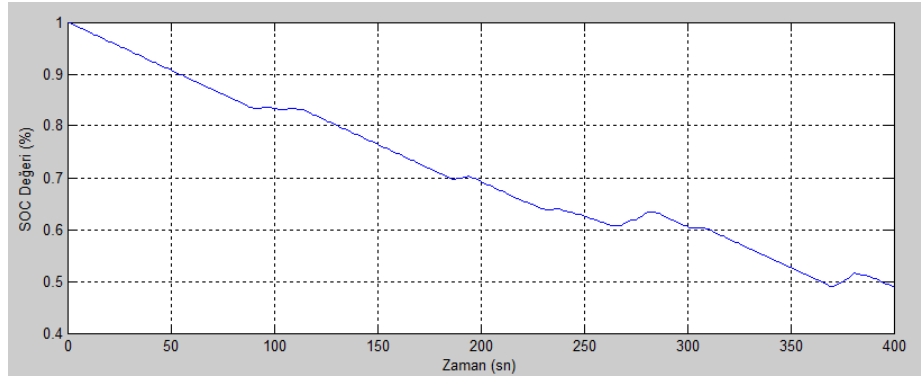
Şekil 4.24 batarya çıkış geriliminin zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 1'de aracın frenlemesi esnasında ortaya çıkan rejeneratif enerji yardımcı sistem besleme için kullanılan batarya modülünde depolanmıştır. Simülasyonda batarya şarj durumu değeri için bir üst limit tanımlanmadığı için batarya çıkış gerilimi 320 V'a kadar yükselmiş görülmektedir.



Şekil 4.24. Durum 1 için batarya çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 4.25 batarya şarj durumunun zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 1'de yardımcı sistemlerin beslemesi için kullanılan batarya modülü şarj durumu, rejeneratif enerji batarya modülünde depolanmış olsa da her bir

geçişte %50 düzeylerine düşmektedir. Fakat aracın havai hattın olduğu bölgede geçişi sürecinde batarya şarj seviyesinin tam doluluk oranına ulaşacağı görülmektedir.

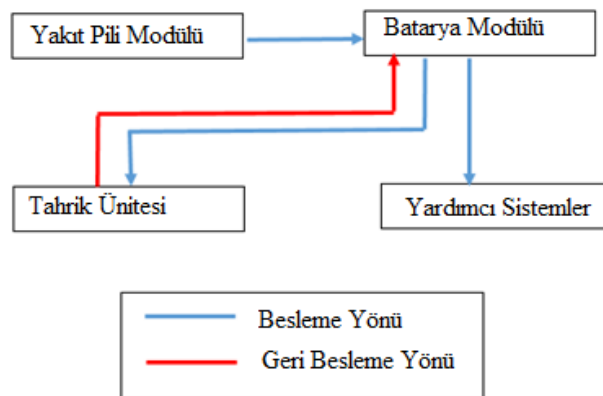


Şekil 4.25. Durum 1 için batarya şarj durumunun zamana göre değişimi

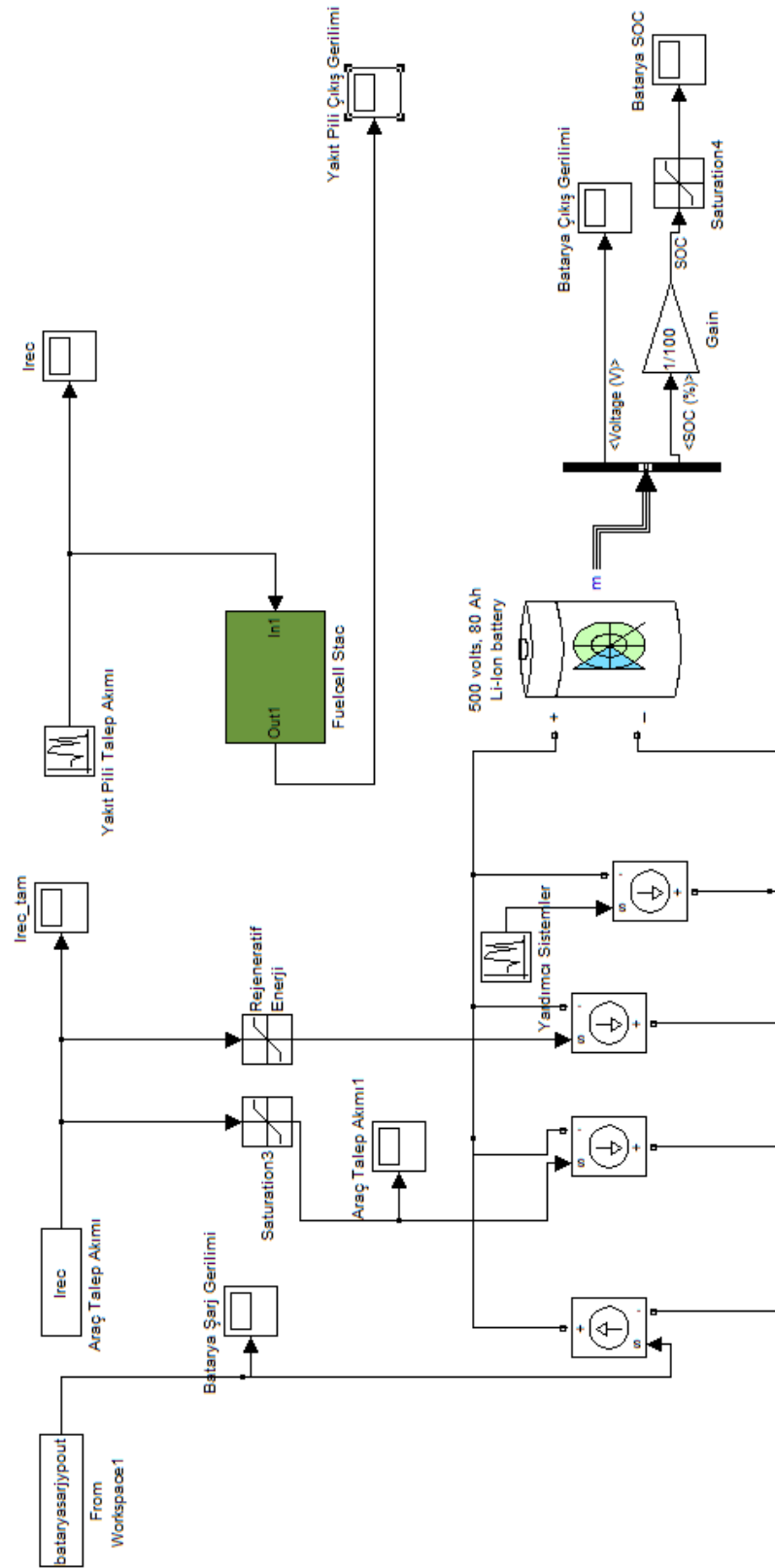
4.6.2. Durum 2: Aracın Batarya İle Tahrik Edilmesi ve Yakıt Hücresi ile Şarjı

Durum 2’de aracın katanersiz bölgede araç üzerine konumlandırılan Lityum-iyon batarya modülü ile tahrik edildiği ve yakıt hücresi modülünün yalnızca batarya bloğunun şarjında kullanıldığı varsayıldığı durumdur.

Sistemde araç üzerinde oluşan rejeneratif enerji batarya modülünde depolanmaktadır. Hibrit mimarinin genel gösterimi Şekil 4.27’de, sistem içerisindeki enerji akış yönleri Şekil 4.26’de verilmiştir. Buna göre araç katanersiz bölgede yalnızca batarya ile tahrik edilmiş olup, yakıt pili sürekli olarak bataryanın şarj edilmesinde kullanılmaktadır. Yine bu modelde frenleme esnasında ortaya çıkan enerji tahrik bataryalarında depolanacak şekilde kurgulanmaktadır.



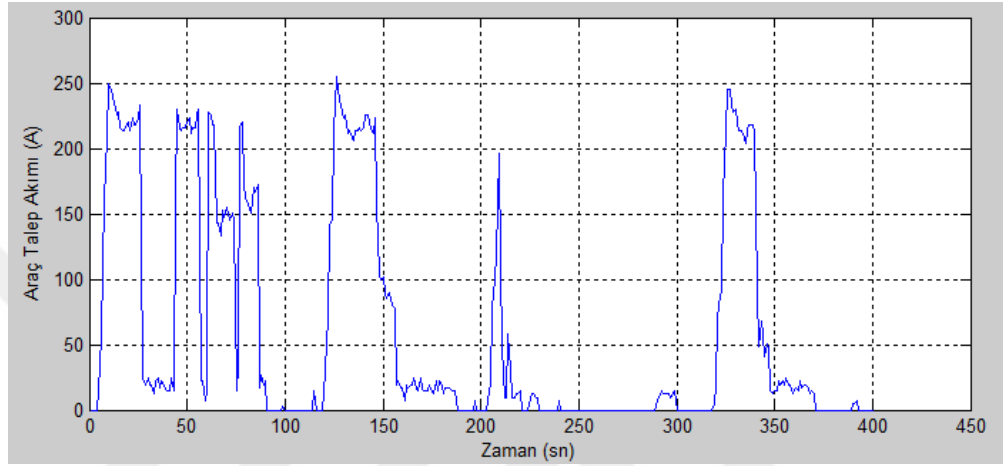
Şekil 4.26. Batarya tahrikli hibrit mimaride enerji akış yönleri.



Şekil 4.27. Batarya tahrikli hibrit mimarinin genel yapısı.

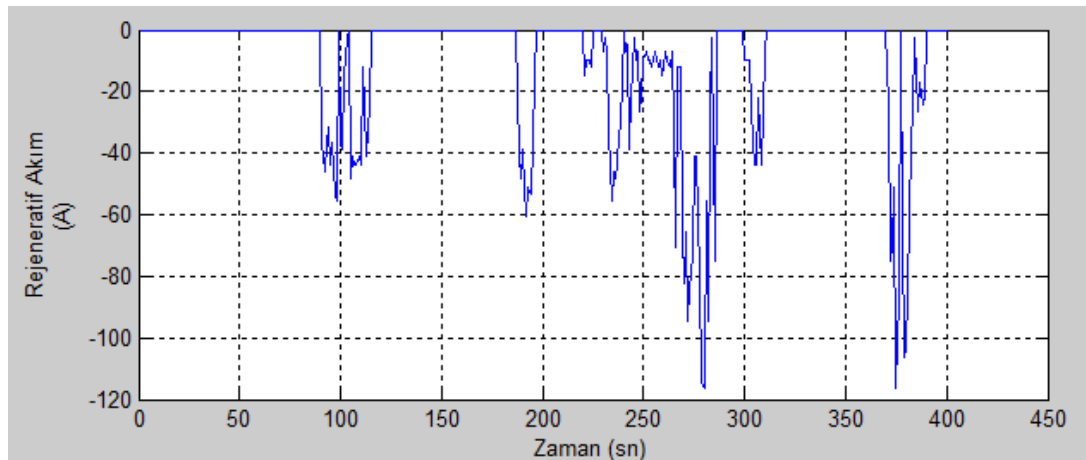
Durum 2’de yukarıda bahsedilen hibrit mimari Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulmuştur. Sistemin model çıkışları aşağıda sunulmuştur.

Şekil 4.28 araç talep akımının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 2’de araç tarafından talep edilen akımın pozitif bölgede kalan bölümü enerji tüketiminin ana bileşeninin oluşturmaktadır.



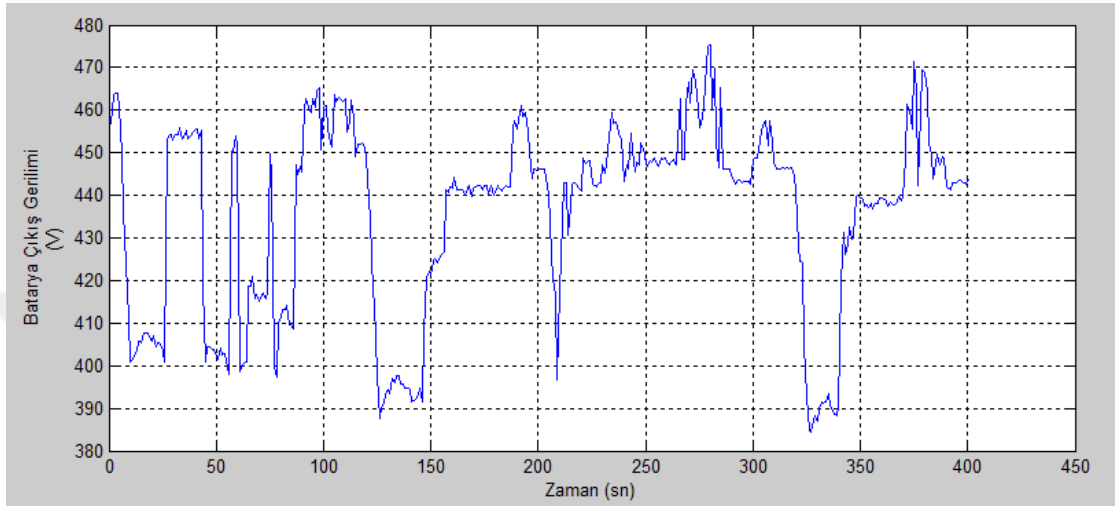
Şekil 4.28. Durumu 2 için araç talep akımının zamana göre değişimi

Şekil 4.29 araç tarafından depolanmak üzere sisteme geri basılan rejeneratif enerjinin zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 2’de araç talep akımı verisinde frenleme bölgesinde araç tarafından üretilen rejeneratif akımından dolayı ortaya çıkan bu enerji batarya modülünde depolanacak şekilde mimari oluşturulmuştur.



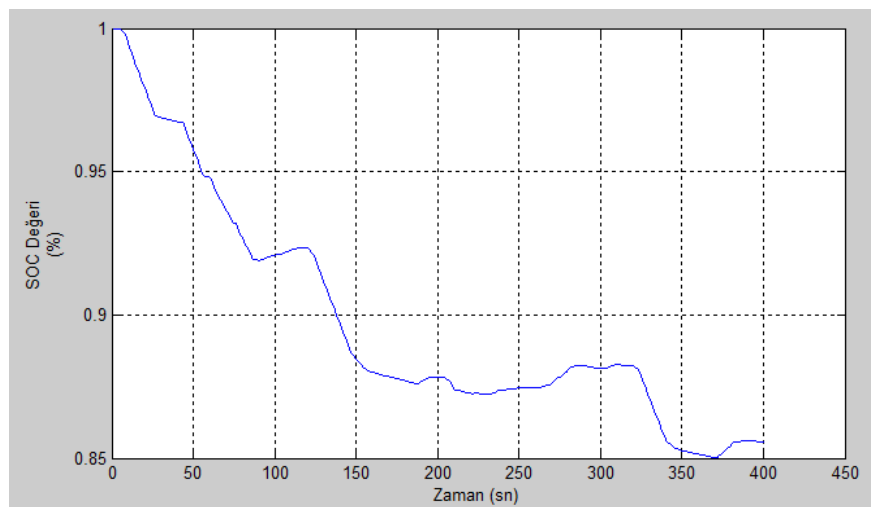
Şekil 4.29. Durumu 2 için araç tarafından depolanmak üzere sisteme geri basılan rejeneratif enerji miktarının zamana göre değişimi

Şekil 4.30 batarya çıkış geriliminin zaman göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 2’de kurgulanan hibrit mimaride başlangıçta tam dolu kabul edilen batarya modülünde araç tarafından çekilen akım sonrası batarya çıkış gerilimi görülmektedir.



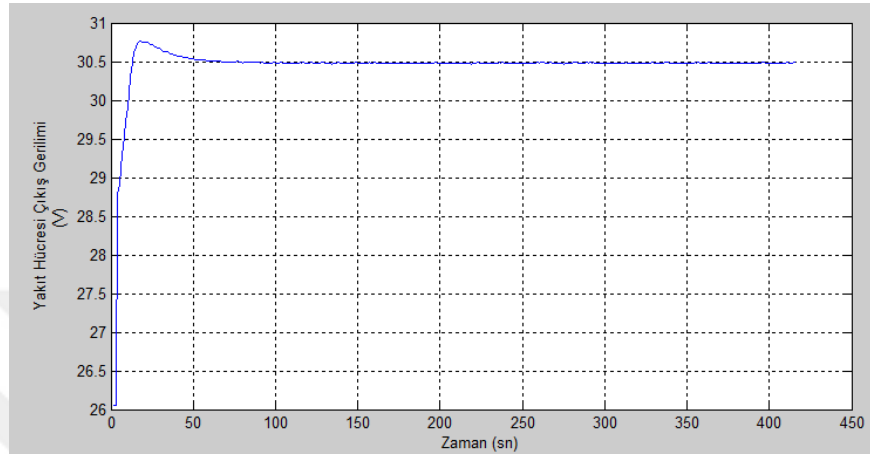
Şekil 4.30. Durum 2 için batarya çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 4.31 batarya şarj durumunun zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 2’de başlangıçta %100 şarj düzeyindeki batarya modülünün katanersiz bölgede tek bir seferlik geçişi sonucunda araç şarj kapasitesinin %85 oranına düştüğü görülmektedir.



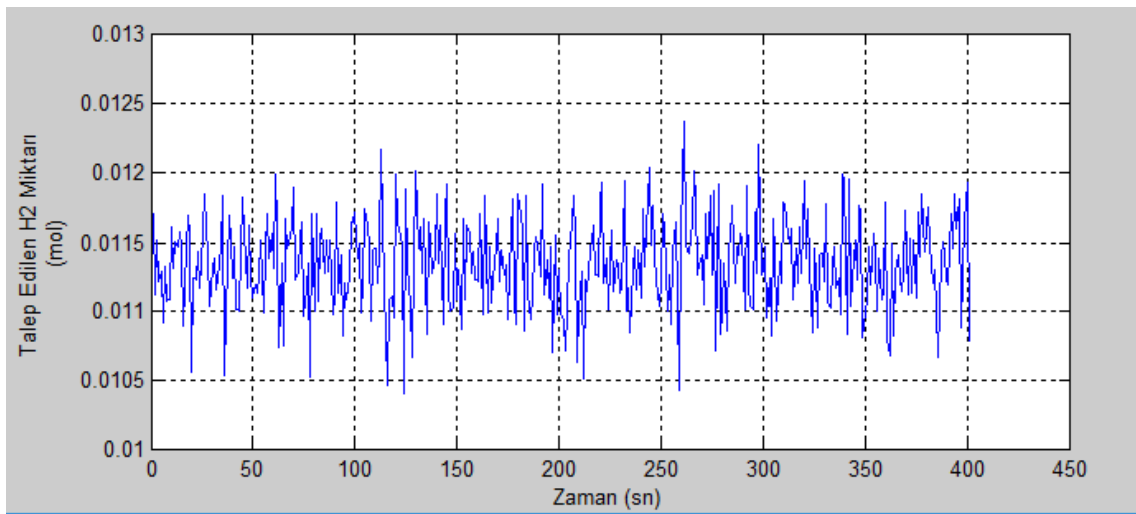
Şekil 4.31. Durum 2 için batarya şarj durumunun zamana göre değişimi

Şekil 4.32 yakıt hücresi çıkış geriliminin zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere Durum 2’de yakıt hücresi modülü sürekli olarak batarya modülünü şarj edecek şekilde kurgulandığından dolayı yakıt pili çıkış gerilimi sabit ve 30V dolaylarındadır.



Şekil 4.32. Durum 2 için yakıt hücresi çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 4.33 talep edilen H_2 miktarının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilde Durum 2’de yakıt pili modülü tarafından talep edilen hidrojen miktarı görülmekte olup, Durum 2’de tek bir geçişte talep edilen hidrojen miktarı 4,5519 moldür, gün içerisinde aracın ilgili bölgeden 10 defa geçtiği varsayımı ile günlük hidrojen ihtiyacı yaklaşık 46 moldür.



Şekil 4.33. Durum 2 için talep edilen hidrojen miktarının zamana göre değişimi

BÖLÜM 5

ÇEVRESEL ETKİLER VE EKONOMİK ANALİZ

5.1. Talep Edilen Toplam Hidrojen Miktarına Göre Yakıt Tankının Boyutlandırılması

Ele alınan aracın gün içerisinde çalışma yapılan katanersiz bölgeden geçiş sayısı 10 sefer olarak kabul edilmektedir. Buna göre oluşturulan her iki mimari için ihtiyaç duyulan hidrojen miktarı, ilave ekipman ve maliyetler Tablo 5.1’de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Oluşturulan hibrit mimarilerin karşılaştırılması

	Durum 1	Durum 2
Yakıt Hücresi Kapasitesi	332 hücre	50 hücre
Batarya Kapasitesi	220 V, 10 Ah, Lityum-ion	400V, 40Ah, Lityum-ion
Tek Bir Geçişte H ₂ İhtiyacı	0.0525 kmol	0.004552 kmol
Günlük H ₂ İhtiyacı	0.526 kmol	0.046 kmol
Yakıt Tankı Hacmi (70MPa)	21.42 lt	1.87 lt
İhtiyaç Duyulacak İlave Güç Elektroniği Elemanı	Yakıt Hücresi modülü çıkışında DC-DC dönüştürücü, Batarya Önünde rejeneratif enerjinin depolanması için DC-DC dönüştürücü	Batarya Önünde DC-DC dönüştürücü

5.2. Yakıt Pili'nin Çevresel Etkileri

Literatürde yere alan çalışmalarda da görüleceği üzere yakıt pili teknolojilerinde kullanılan hidrojenin üretiminden ve yakıt hücresi modülünün imalatından kaynaklı emisyonlar dışında yakıt hücresinin işletmesinden kaynaklı bir karbon emisyonu bulunmamaktadır.

100kWh enerjinin farklı enerji kaynaklarından üretimine ait emisyon değerleri Tablo 5.3'de verilmiş olup üretimi için her bir enerji kaynağına ait CO₂ salınımı kg cinsinden verilmektedir. Tablo 5.2'den de görüleceği üzere fosil yakıtlar kullanılarak elde edilmesinin çevresel etkileri oldukça fazla iken hidrojenden bu enerjinin elde edilmesi durumunda herhangi bir çevreye zararlı atık çıkmayacağı görülmektedir.

Tablo 5.2. Farklı enerji kaynaklarına ait emisyon değerleri [48].

Kaynak	Sera gazı emisyonu (Ton-CO ₂ /GWh)	100kWh'lik Enerji İçin (kg- CO ₂)	120kWh'lik Enerji İçin (kg- CO ₂)
Doğal Gaz	499	49,9	59,88
Linyit	1054	105,4	126,48
Taş Kömürü	888	88,8	106,56
İthal Kömür	888	88,8	106,56
Fuel-oil	733	73,3	87,96
Nükleer	66	6,6	7,92

5.3. Yakıt Pili'nin Raylı Sistem Aracında Kullanılmasının Ekonomik Analizi

Katanersiz işletme imkanı sağlayan ve önceki bölümlerde tanımlanan sistemlerin fayda maliyet analizlerinin karar süreci, ilk yatırım maliyeti, ekipman maliyeti, işletme maliyeti ve işletme ömrü gibi kompleks değişkenlere bağlıdır. Bu sistemlerin henüz sınırlı sayıda uygulamalarının bulunması ve uygulamaların geçmişinin henüz sistemin işletme ve bakım maliyetleri hakkında nihai bilgi veremeyecek kadar kısa olmasından dolayı gerçek yatırım maliyeti yada nihai maliyeti (Yatırım, işletme, bakım vb. dahil) ile ilgili net bir değer bulunmamaktadır. Konu ile ilgili yakıt pili özelinde beyan edilen yaklaşık değerlere göre maliyet değerlendirmesi ise aşağıda Tablo 5.3'de verilmektedir.

Tablo 5.3. Düşük tabanlı raylı sistem araçları için yakıt pili uygulaması ve havai hat uygulamasının karşılaştırılması [46].

20 Km'lik Hat Ve 40 Araçlık Tramvay Yatırımının Farklı Katanersiz Teknolojilerde Maliyeti							
Teknoloji	Araç Yatırımı	Güç Temin Alt Yapısı (€/km)	Toplam Araç Maaliyeti	Güç Temin Sistemi Toplam Maliyeti	Alt Yapı Maliyeti	Hattın Toplam Maliyeti	Fark
Havai Hat	€ 1.959.000,00	€ 2.612.000,00	€ 78.360.000,00	€ 52.240.000,00	€ 261.200.000,00	€ 391.800.000,00	0,0%
3. Ray	€ 2.352.600,00	€ 7.842.000,00	€ 94.104.000,00	€ 156.840.000,00	€ 261.200.000,00	€ 512.144.000,00	30,7%
İndüksiyon	€ 2.614.000,00	€ 7.842.000,00	€ 104.560.000,00	€ 156.840.000,00	€ 261.200.000,00	€ 522.600.000,00	33,3%
Yakıt Pili	€ 3.267.500,00	€ 3.921.000,00	€ 130.700.000,00	€ 3.921.000,00	€ 261.200.000,00	€ 395.821.000,00	1,0%

Yakıt pili tabanlı elektrikli araçlar genel olarak tüm toplu modlarında (otomobil, motosiklet, otobüs, raylı sistem araçları vb.) verimli, temiz ve en geniş potansiyele sahip alternatif enerjili araçlardır. Yakıt pili tabanlı mimari, kullanımından dolayı geleneksel içten yanmalı vb. teknolojilere sahip araçlarda bulunan kullanıcı memnuniyetini etkileyebilecek performans kriterlerinden hiç birisinden (boyut, sürüş menzili, hız, yeniden dolun süresi veya sürüş konforu vb.) feragat etmeyecek şekilde kullanılabilir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, hafif raylı sistemlere yakıt pili teknolojisinin entegre edilmesinin etkileri incelenmiştir. Bu etkileri ortaya koymak için iki durum ele alınmıştır. Durum 1’de raylı sistem aracının tamamen yakıt pili tarafından tahrik edilmesi ve Durum 2’de ise raylı sistem aracının batarya tarafından tahrik edildiği, yakıt pilinin ise batarya modülünün şarjında kullanılması durumu analiz edilmiştir. Buna göre nihai sonuçlar şu şekildedir;

- Durum 1’de yalnızca yakıt pili ile tahrik enerjisinin sağlanmasının araç enerji profilinden kaynaklanan piklere karşısında yakıt pili modülünün yönetiminin zor olacağı ve sistemin kullanım ömrünü azaltacağı görülmektedir.
- Durum 2’de yakıt pili modülü ile batarya modülünün sürekli olarak belirli bir akım ile şarj edilmesi ve aracın batarya modülü tarafından tahrik edilmesinin daha verimli olduğu ortaya çıkmaktadır.
- Batarya teknolojisinin gelişimi ile birlikte yakıt hücresi ile hibrit kullanım alanlarının artacağı ve oluşturulacak hibrit mimarilerin daha çevreci olacağı düşünülmektedir.
- Hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından yapılması durumunda yakıt pili ile oluşturulan hibrit mimariler sıfır emisyonu sahip olacaktır.
- Model sonuçlarından da görüleceği üzere yakıt pillerinin batarya vb. enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılması durumunun, özellikle araç üstü mobil uygulamalarda sistemin genel hacmi ve ağırlığına ciddi etkisi bulunmaktadır.
- Mobil uygulamalarda yakıt pili ile mümkün olmayan rejenereatif enerjinin depolanmasının batarya, ultrakapasitör vb. alternatifler ile sağlanabildiği ve bununla hibrit mimarilerin verimini ciddi şekilde arttırdığı görülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Abbasgil, E. (1994). İstanbul'daki Toplu Taşımacılık Kapsamında Raylı Sistemlerin Değerlendirilmesi (Esenler – Aksaray Hızlı Tramvay Örneği). İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.
2. Ticket to Kyoto Final Report, http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K_rapport_final_EN.pdf , Erişim Tarihi 01.06.2017
3. González-Gil, A. P. (2014). A systems approach to reduce urban rail energy consumption. **Energy Conversion and Management** - 80, s. 509-524.
4. Devaux, F. O., & Xavier, T. (2011). WP2B ENERGY RECOVERY. Ticket to Kyoto: http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K_ER_overview_technologies_web.pdf adresinden alındı
5. PBS. (2009). Timeline: History of the Electric Car. <http://www.pbs.org/shows/223/electric-car-timeline.html> adresinden alındı
6. Bellis, M. (2016). History of Electric Vehicles. ThoughtCo: <https://www.thoughtco.com/history-of-electric-vehicles-p2-1991595> adresinden alındı
7. Ali Abdullah Sayın, İ. Y. (2011). Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-İyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. **Mühendis ve Makine**, 52 (615), 75-82.
8. <https://www.extremetech.com/extreme/180636-philadelphia-unveils-new-hybrid-subway-system-that-uses-prius-like-regenerative-breaking-to-feed-energy-back-into-the-grid>
9. Applied Physical Chemistry Laboratory, Department Of Applied Chemistry . (2017). Energy Storage Devices. http://www.ec.appchem.waseda.ac.jp/researche/researche_energy.htm adresinden alındı.
10. Yıldırım, Y. (2011). Yakıt Pilleri Ders Notu. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü.
11. Uzunoglu, M., Onar, O., & Alam, M. (2009). Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. **Renewable Energy** 34, 509–520.
12. Fernandez, L., Garcia, P., Garcia, C. A., & Jurado, F. (2011, May). Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway. **Energy Conversion and Management, Volume 52**, Issue 5, s. 2183–2192.

13. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2017, Haziran 02). www.eie.gov.tr: http://www.eie.gov.tr/teknoloji/h_yakit_pilleri.aspx adresinden alındı.
14. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy. (2011). Comparison of Fuel Cell Technologies Report. Fuel Cell Technologies Program.
15. FELICITAS - Fuel cell power trains and clustering in heavy-duty transports. (2009). Final Report. Fraunhofer Institute for Transportation and Infrastructure Systems.
16. USA Department of Energy. (2015). Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles. Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability.
17. Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2010). Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **14** (9), 2874–2884.
18. Bauman, J., & Kazerani, M. (2008). An improved powertrain topology for fuel cell-battery-ultracapacitor vehicles. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge, UK: IEEE.
19. Vural, B., Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2010). Parallel combination of FC and UC for vehicular power systems using a multi-input converter-based power interface. **Energy Conversion and Management**, **51**, (12), 2613–2622.
20. Vural, B., Boynuegri, A., Nakir, I., Erdinc, O., Balikci, A., Uzunoglu, M., . . . Dusmez, S. (2010). Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**, 20, 11161–11171.
21. Gao, W. (2005, May). Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid powertrain and a fuel cell-ultracapacitor hybrid powertrain. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, **54** (3), 846 - 855.
22. Kisacikoglu, M., Uzunoglu, M., & Alam, M. (2009, February). Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34** (3), 1497–1507.
23. Teymourfar, R., Asaei, B., & Iman-Eini, H. (2012). Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. **Energy Conversion and Management**, **56**, 206–214.

24. Iannuzzi, D., Ciccarelli, F., & Lauria, D. (2012). Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, **21**, (1), 321–337.
25. Lia, Q., Chena, W., Lia, Y., & Liub, S. (2012). Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, **43**(1), 514–525.
26. Bauman, J., & Kazerani, M. (2009). An Analytical Optimization Method for Improved Fuel Cell–Battery–Ultracapacitor Powertrain. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, **58** (7), 3186 - 3197.
27. Kumar, A., Gaonkar, D., & Nayak, S. (2011). Performance study of grid connected fuel cell based distributed generation system with ultracapacitor. Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East). Jeddah, Saudi Arabia: IEEE.
28. Chen, Q., Gao, L., Dougal, R., & Quan, S. (2009). Multiple model predictive control for a hybrid proton exchange membrane fuel cell system. **Journal of Power Sources**, **191** (2), 473–482.
29. Wang, L., & Li, H. (2009). Maximum Fuel Economy-oriented Power Management Design for a Fuel Cell Vehicle Using Battery and Ultracapacitor. Applied Power Electronics Conference and Exposition. Washington, DC, USA: IEEE.
30. Bubna, P., Advani, S., & Prasad, A. (2012). Integration of batteries with ultracapacitors for a fuel cell hybrid transit bus. **Journal of Power Sources**, **Volume 199**, 360–366.
31. Lin, W.-S., & Zheng, C.-H. (2011). Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method. **Journal of Power Sources**, **196**, (6), 3280–3289.
32. Khaligh, A., & Li, Z. (2010, July). Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, **59**, 6, 2806 - 2814.
33. Lipman, T., Edwards, J., & Daniel, M. (2004, January). Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems. **Energy Policy**, **32** (1), 101–125.
34. Yoneyama, T., Yamamoto, T., & Kondo, K. (2007). Fuel cell powered railway vehicle and experimental test results. European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark: IEEE.

35. Takizawa, K., & Kondo, K. (2010). A designing method of the power source specifications for hybrid powered traction systems with fuel cells and EDLCs. International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE.
36. Larminie, J., & Lowry, J. (2003). Use of Batteries in Hybrid Vehicles. J. Larminie, & J. Lowry içinde, *Electric Vehicle Technology Explained* (s. 28-35). Wiley.
37. Wee, J.-H. (2007). Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **11** (8), 1720–1738.
38. Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen – opportunities and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34** (2), 615-627.
39. Satyapal, S. (2013). Hydrogen and Fuel Cell Technologies, FY 2014 Budget Request Rollout to Stakeholders. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
40. Zaetta, R., & Madden, B. (2011). Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review. New Energy World JTI framework.
41. Moskowitz, J.-P. (2006). Alstom Fulltram Project Report,. 2nd International Hydrogen Train and Hydrail Conference. Herning, Denmark: International Hydrail Conference.
42. Hess, K. (2010). Demonstration of a hydrogen fuel cell locomotive. Apta 2010 Rail Conference. Vancouver, Canada: Vehicle Projects Inc.
43. Hillmansen, S. (2012). Autonomous fuel cell railway vehicles. Seventh International Hydrail Conference. Birmingham, UK.
44. Kondo, K. (2010). Two Pioneering Hydrail Projects in Japan and technical issues for the hydrails. The 6th Hydrail Conference. İstanbul.
45. The “Ticket To Kyoto” project . (2017, 06 01). WP2B Energy Recovery. http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K_rapport_final_EN.pdf adresinden alındı
46. Weirong, C., Zhixiang, L., & Xuexia, Z. (2016). Fuel Cell Based Hybrid Power System Design For A Passenger Tram. 11th HYDRAIL. Birmingham,UK.
47. Report of European Expert Group on Future Transport Fuels. (2011). Infrastructure for Alternative Fuels.
48. Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources, World nuclear association (WNA), London UK, http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Abdurrahim TANŞU

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 29/06/1988 – Yeşilhisar

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Y. Lisans	EÜ Enerji Sis. Müh. ABD.	(Devam)
Lisans	Yıldız Teknik Üniv. Elektrik Müh. Bölümü	2011

YABANCI DİL

İngilizce