

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ DEPOLAMA VE GERİ  
KAZANIMLI FRENLEME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

**GÖKÇE VAROL**

**KOCAELİ 2019**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ




ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ DEPOLAMA VE GERİ  
KAZANIMLI FRENLEME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

GÖKÇE VAROL

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR  
Danışman, Kocaeli Üniv.  
Doç. Dr. Murat KALE  
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.  
Dr. Öğr. Üyesi Murat AYAZ  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.01.2019

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında elektrikli araçların geri kazanımlı frenleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır ve buna ek olarak geri kazanımlı frenleme kapasitesinin artırılmasına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, tez konumun seçilmesinde ve ilerleme sürecinde katkıda bulunan tez danışmanım Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR hocama, tez çalışmam boyunca benim bitmek bilmeyen sorularına sabırla cevap veren Arş. Gör. Koray ERHAN hocama, lisans eğitimimden bu yana her türlü desteği ile arkamda olan ve beni cesaretlendiren nişanlım Oğuzhan ÖZDEMİR'e, anneanneme, aileme, eğitimimin sürekliliği açısından bana evlerini açan ve destek veren Serap-Erkan AKPINAR ailesine sonsuz teşekkür ederim.

Ocak - 2019

Gökçe VAROL

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	viii
GİRİŞ .....	1
1. ELEKTRİKLİ ARAÇ TOPOLOJİSİ .....	3
1.1. Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi .....	4
1.2. Günümüzde Elektrikli Araçlara Verilen Önem .....	6
1.3. Elektrikli Araç Şarj Sistemleri .....	8
1.3.1. Yavaş şarj sistemleri .....	8
1.3.2. Normal şarj sistemleri .....	9
1.3.3. Hızlı şarj sistemleri .....	9
2. GELENEKSEL VE ELEKTRİKLİ ARAÇ FRENLEME SİSTEMLERİ .....	10
2.1. Geri Kazanımlı Frenleme Sistemi .....	10
2.2. Geleneksel Araçlarda Frenleme Sistemi .....	11
2.3. Elektrikli Araçlarda Frenleme Sistemi .....	11
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ .....	14
3.1. Batarya Sistemleri .....	14
3.1.1. Kurşun asit (Pb-Acid) piller .....	14
3.1.2. Nikel kadmiyum (NiCd) piller .....	16
3.1.3. Nikel metal hidrat (NiMH) piller .....	16
3.1.4. Lityum iyon (Li-ion) piller .....	17
3.1.5. Lityum iyon polimer (LiPo) piller .....	18
3.1.6. Lityum demir fosfat (LiFePO <sub>4</sub> ) piller .....	18
3.1.7. Lityum sülfür (Li-S) piller .....	18
3.2. Ultrakapasitör Sistemleri .....	20
3.2.1. Batarya ve ultrakapasitörün karşılaştırılması .....	21
3.3. Volan .....	22
4. GÜNCEL TİCARİ ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ENERJİ ANALİZİ .....	24
4.1. Farklı Tip Elektrikli Araçların Enerji Analizi ve Kullanılan Parametreler .....	25
4.1.1. Motor gücü .....	29
4.1.2. Motor momenti .....	29
4.1.3. Maksimum hız .....	29
4.1.4. Hızlanma süresi (0-100 km/h) .....	29
4.1.5. Batarya şarj süresi .....	29
4.1.6. Menzil .....	30
4.1.7. Araç ağırlığı .....	30
4.1.8. Batarya gerilimi .....	30
4.1.9. Batarya kapasitesi .....	30
4.2. Analizi Yapılan 15 Elektrikli Araca Ait Matematiksel Hesaplama .....	31
4.2.1. Kinetik enerji hesabı .....	31
4.2.2. Araçların durma süresi (M/G ünitesi ile) .....	32
4.2.3. Araçların frenleme gücü .....	32
4.2.4. M/G ünitesiyle yapacakları en çok geri kazanımlı frenleme oranı .....	33

4.2.5. Batarya şarj gücü – akımı.....	35
4.2.6. Araçların batarya kapasitelerine göre durma süresinin hesaplanması .....	35
4.2.7. Batarya ile yapılabilecek maksimum geri kazanımlı frenleme oranı .....	36
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR .....	41
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	47
ÖZGEÇMİŞ .....	48



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektrikli aracın genel yapısı .....	4
Şekil 1.2. İlk elektrikli araç .....	5
Şekil 1.3. Günümüzde elektrikli araç yapısı .....	6
Şekil 1.4. EA batarya tahmini fiyatları.....	7
Şekil 2.1. Geri kazanımlı frenleme sistem döngüsü.....	11
Şekil 3.1. Kurşun asit pil diyagramı.....	15
Şekil 3.2. Kurşun asit pil yapısı .....	15
Şekil 3.3. Nikel kadmiyum batarya.....	16
Şekil 3.4. Nikel metal hidrat batarya.....	17
Şekil 3.5. Lityum iyon batarya .....	18
Şekil 3.6. Ultrakapasitör.....	20
Şekil 3.7. Volan genel görünümü.....	23
Şekil 3.8. Volan şematik görünümü .....	23
Şekil 4.1. Hesabı yapılan güncel ticari EA'larda frenleme algoritması.....	24

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Batarya çeşitleri ve özellikleri .....	14
Tablo 3.2. Batarya sistemlerinin birbiri ile kıyaslanması .....	19
Tablo 3.3. EA'larda kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri.....	20
Tablo 4.1. İncelenen 1.araca ait teknik bilgiler .....	25
Tablo 4.2. İncelenen 2.araca ait teknik bilgiler .....	25
Tablo 4.3. İncelenen 3.araca ait teknik bilgiler .....	25
Tablo 4.4. İncelenen 4. araca ait teknik bilgiler .....	26
Tablo 4.5. İncelenen 5. araca ait teknik bilgiler .....	26
Tablo 4.6. İncelenen 6. araca ait teknik bilgiler .....	26
Tablo 4.7. İncelenen 7. araca ait teknik bilgiler .....	26
Tablo 4.8. İncelenen 8. araca ait teknik bilgiler .....	27
Tablo 4.9. İncelenen 9.araca ait teknik bilgiler .....	27
Tablo 4.10. İncelenen 10.araca ait teknik bilgiler .....	27
Tablo 4.11. İncelenen 11.araca ait teknik bilgiler .....	27
Tablo 4.12. İncelenen 12.araca ait teknik bilgiler .....	28
Tablo 4.13. İncelenen 13. araca ait teknik bilgiler .....	28
Tablo 4.14. İncelenen 14. araca ait teknik bilgiler .....	28
Tablo 4.15. İncelenen 15. araca ait teknik bilgiler .....	28
Tablo 4.16. Hesabı yapılan tüm araçların kinetik enerji değerleri .....	32
Tablo 4.17. Hesabı yapılan tüm araçların M/G ünitesi ile durma süreleri .....	32
Tablo 4.18. M/G frenleme gücü ve geri kazanımlı frenleme yüzdesi.....	33
Tablo 4.19. M/G frenleme gücü ve geri kazanımlı frenleme yüzdesi devamı .....	34
Tablo 4.20. Hesabı yapılan araçların batarya şarj gücü-akım sonuçları .....	35
Tablo 4.21. İlk 5 aracın geri kazanımlı frenleme değeri(batarya).....	36
Tablo 4.22. İkinci 5 aracın geri kazanımlı frenleme değeri(batarya).....	36
Tablo 4.23. Son 5 aracın geri kazanımlı frenleme değeri(batarya).....	36
Tablo 4.24. Araç bataryasıyla yapılabilecek max geri kazanımlı frenleme .....	37

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Akım
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
DC	: Doğru Akım
E	: Enerji
h	: Saat
H <sub>2</sub> O	: Su
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sülfürik Asit
I <sub>şarj</sub>	: Şarj Akımı
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowattsaat
LiFePO <sub>4</sub>	: Lityum Demir Fosfat
Li-ion	: Lityum İyon
LiPo	: Lityum İyon Polimer
Li-S	: Lityum Sülfür
M	: Kütle
Ni-Cd	: Nikel Kadmiyum
NiMH	: Nikel Metal Hidrat
P	: Aracın Motor Gücü
P <sub>fren</sub>	: Fren Gücü
P <sub>motor</sub>	: Motor Gücü
P <sub>şarj</sub>	: Şarj Gücü
Pb-Acid	: Kurşun Asit
PbO <sub>2</sub>	: Kurşun Dioksit
s	: Saniye
t	: Süre
t <sub>durma</sub>	: Durma Süresi
t <sub>şarj</sub>	: Şarj Süresi
V	: Hız
V <sub>batarya</sub>	: Batarya Gerilimi
V <sub>x</sub>	: Pedala Basma Miktarı
V <sub>p</sub>	: Pedala Basma Hızı

### Kısaltmalar

EA	: Elektrikli Araç
GM	: General Motors
İYM	: İçten Yanmalı Motor
JEVS	: Araç Birliği Standartları
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
M/G	: Motor-Generatör Ünitesi



## ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ENERJİ DEPOLAMA VE GERİ KAZANIMLI FRENLEME SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Günümüzde kullanılan içten yanmalı motorlu araçlarda, frenleme sırasında aracın sahip olduğu kinetik enerji balata ve disklerde ısıya dönüştürülmektedir. Bu ısı enerjisi kaybolmaktadır. Ancak elektrikli araçlarda (EA), aracın sahip olduğu kinetik enerji elektrik motorunun generatör olarak çalıştırılmasıyla araç bataryasına depolanabilmektedir. Bu durum geri kazanımlı frenleme olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada; bir EA'nın M/G (motor/generatör) ünitesinin generatör olarak kullanılmasıyla frenleme sağlanmaktadır. Aracın motor gücüyle orantılı bir şekilde geri kazanımlı frenleme kapasitesi de artmaktadır. 100 km/h hızla giden bir aracın durması için gereken enerji miktarı hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer ile aracın generatör gücünün sağlayabileceği maksimum frenleme enerjisi karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmayla bir aracın sağlayabileceği maksimum geri kazanımlı frenlemenin mekanik frenlemeye oranı tespit edilmektedir. Böylece geri kazanımlı frenlemenin mekanik frenlemeye oranı yüzdesel olarak tespit edilmektedir.

Çalışmada 15 farklı marka araç için hesaplamalar yapılmaktadır. Her aracın sahip olduğu kg/kW değerleri farklı olduğundan, yapabilecekleri maksimum geri kazanımlı frenleme güçleri de farklı olmaktadır. Araçların M/G gücü ve batarya şarj kapasiteleri de göz önüne alınarak, geri kazanımlı frenleme oranları tespit edilmektedir.

Öncelikli olarak referans alınan 15 araca ait teknik bilgiler edinilerek değer tablosu oluşturulmaktadır. Bu araçların 100 km/h sabit hız ile ilerlerken kazandıkları kinetik enerji hesaplanarak tablo halinde verilmektedir.

Kara yolları resmi web sitesinden alınan değere göre; ortalama bir aracın 100 km/h hızdan ani frenleme ile durması 4,7 saniye olarak verilmektedir [1]. Çalışmada bu değer referans olarak kabul edilmektedir. Bu değere ilave olarak, aracın 10 ve 20 saniyede durması durumları için gerekli olan frenleme güç değerlerine de yer verilmektedir. Ayrıca araçların sadece M/G ünitesi gücü ile durabilecekleri zaman değerleri de hesaplanmaktadır. Bu sayede geri kazanımlı frenleme enerjisinden en yüksek oranda faydalanmak ve araç verimliliklerinin artırılması hedeflenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli Araç, Konvansiyonel Frenleme, Rejeneratif Frenleme.

## **ANALYZATION OF ENERGY STORAGE AND REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES**

### **ABSTRACT**

In internal combustion engine vehicles, the kinetic energy of the vehicle is transformed to heat energy by brake discs and linings to stop the vehicle. The braking energy is wasted by brakes and decreased the vehicle efficiency. In electric vehicles (EV), the kinetic energy of the vehicle is transferred to high voltage battery pack and stored as electric energy by operating vehicle's M/G unit as generator. It is called regenerative braking.

In this study, regenerative braking system is proposed to decelerate the vehicle speed by using generator unit. Regenerative braking power varies in proportion to the vehicles M/G unit power. When the M/G unit power increases the regenerative braking power is also increased.

Firstly, energy of the vehicle is calculated for top speed of 100 km/h. Then calculated power value and generator power value is compared. With this comparison, the maximum regenerative braking capacity (power) with the vehicle generator unit is determined. Thus, the ratio of regenerative braking to mechanical braking is determined as a percentage. The battery charging capacities are also determinant factor for maximum regenerative braking capacity apart from the M/G unit power.

Calculations are made for 15 different EV. All vehicles have different power density values (kW/kg). Therefore they have different regenerative braking capacities depending on generator and battery charge powers. The technical specifications are obtained for 15 vehicles. And energy values are calculated for a speed of 100km/h.

According to highway transport service data, the average deceleration/braking time to stop the vehicle for 100 km/h is given as 4.7 seconds. This value is accepted as a reference. And braking power calculations are made considering this value. In addition to this, braking power values are calculated for different deceleration times as 10 and 20 seconds. And also the braking power is calculated in case of M/G unit usage only. In this way, it is aimed to utilize the highest level of regenerative braking energy and to increase the vehicle efficiency.

**Keywords:** Electrical Vehicle, Conventional Braking, Regenerative Braking.

## GİRİŞ

Fosil kaynakların azalması ve çevre kirliliğinin artması sebebiyle elektrikli araçlara olan yönelim artmaktadır. Elektrikli araçlarda maliyeti yükselten en önemli bileşen batarya grubudur. Ancak bataryalar teknolojinin diğer dallarında yaşanan gelişmelerle aynı hızda gelişme gösterememektedir. Bataryaların istenilen enerji kapasitelerine ulaşamaması ve yüksek maliyeti elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Bu doğrultuda mevcut kapasitenin daha verimli kullanılması ile daha uzun menziller elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu alanda geliştirilen en etkili yöntemlerden biri de geri kazanımlı frenleme teknolojisidir. Geleneksel araçlar sahip oldukları kinetik enerjiyi frenleme sırasında ısı enerjisi olarak kaybetmektedir. Ancak elektrikli araçlarda bu durumun aksine geri kazanımlı frenleme ile aracın kinetik enerjisi yüksek gerilim bataryasına depolanmaktadır. Böylece aynı batarya kapasitesi ile daha uzun menziller elde edilebilmektedir. Ülkemizde kullanılan araç sayısının her geçen gün katlanarak arttığı düşünüldüğünde ve petrol konusunda dışa bağımlılığımız göz önüne alındığında elektrikli araçlara olan ilginin arttığı gözlenmektedir.

Enerji alanında dışa olan bağımlılığı azaltmak amacıyla yeni kaynaklar geliştirilse de mevcut enerjinin daha verimli kullanılması ve yönetilmesi de önemli bir alanı oluşturmaktadır. Geleneksel tip araçların mevcut enerjilerini tek yönlü kullanarak dışarı atması enerji yönetiminin eksik olduğunu göstermektedir. Elektrikli araçlar vasıtasıyla hem temiz enerjinin kullanıldığı araçların artırılması hem de daha faydalı enerji ile menzil miktarının çoğaltılması yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarının arasında bulunmaktadır.

Farklı ülkelerde de elektrikli araçlara olan ilgi neticesinde araştırma ve geliştirmeler devam etmektedir. Örneğin menzil ile yapılan bir araştırma da çeşitli sürüş çevrimleri altında geri kazanımlı frenlemeye katkısı ile menzilde %12,58'lik iyileşme olduğu görülmektedir. Ayrıca aracın enerji verimliliğine katkısı %11,18 olarak hesaplanmaktadır[2]. Çin'de denenen farklı kontrol stratejilerinden optimum

rejeneratif kazanç elde edilen sistem, araç enerji döngüsü de dikkate alınarak incelendiğinde enerji verimliliğinde %41,09 iyileşme göstermektedir.[3] Geri kazanımlı frenleme sırasında vites küçültme hamlesi elektrikli aracın verimliliğini arttırmaktadır[4]. Frenleme koşulları, farklı araç hızları ve yol türleri baz alınarak 3 ayrı simülasyon testi yapıp optimum koşul belirlenerek aracın protatipi tasarlanmaktadır[5]. Elektrik motoruna göre frenleme momentinin optimize edilmesi sonucu raylı sistemlerde geri kazanımlı frenleme yoluyla maksimum fayda elde edilmektedir. Bu oranında yapılan çalışmalar sonucu %17,23 olduğu hesaplanmaktadır[6]. Tam elektrik tahriki ile çalışmakta olan başka bir araç için geri kazanımlı frenlemeden elde ettiği enerji sayesinde bir şarj döngüsünde %16 daha fazla yol yaptığı görülmektedir[7]. Belirli hızlarda geri kazanımlı frenlemeden efektif olarak faydalanıldığı görülmektedir. Ayrıca batarya şarjı azalır, araç hızı arttıkça geri kazanımlı frenleme oranının da arttığı saptanmaktadır[8]. Bir başka çalışmada; elektrikli araçlar için 3 fazlı fırçasız DC motorun çalışmasında oluşan rejeneratif enerji kazancı bulanık mantık kontrolü kullanılarak yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarına göre rejeneratif mod ile çalışma, motor mod ile çalışmaya göre %4,7 daha fazla şarj seviyesi sağlamaktadır[9].

## 1. ELEKTRİKLİ ARAÇ TOPOLOJİSİ

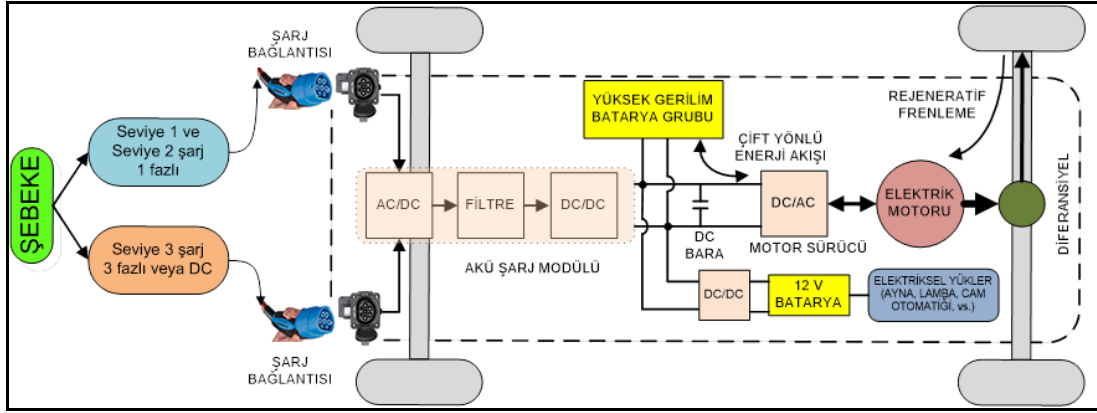
Elektrikli araçlara genel olarak bakıldığı zaman içten yanmalı motora sahip araçlarla birçok ortak yönü bulunmaktadır. Ama tabii ki de elektrikli araç teknolojisi, içten yanmalı motora sahip araç teknolojisinden oldukça basittir. İçten yanmalı motora baktığımız zaman büyük bir sistem ve bu sistemin içerisinde ahenkle çalışan birden fazla birim görülmektedir. Dakika da yapılan binlerce devir sırasında açılıp kapanan valfler, çıkan kıvılcımlar, pistonların hareketi içten yanmalı motora sahip araçların nasıl büyük bir uyum içerisinde çalıştığını göstermektedir. Birbirinden farklı birçok parçanın ahenkli de olsa çalışması kayıpları da bir o kadar arttırmaktadır. İyi bir verimle çalışan içten yanmalı motorda bile yakıt enerjisinin en fazla %30'u kullanılmaktadır. Verimi elektrikli araçlara göre düşük ve karmaşık olan içten yanmalı motor yapısını inceledikten sonra kısaca elektrikli araç yapısını inceleyelim.

Elektrikli araç yapısında içten yanmalı motordaki gibi fazlalık ve hareketli yapılar yoktur. Basit bir elektrik motorunda dönen tek parça rotordur. Bu sayede elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilmektedir. Rotorun yapısal olarak dönel hareket etmesi ekstra bir tasarıma da gerek bırakmamaktadır. Ayrıca içten yanmalı motor grubundaki gibi birbiriyle uyum içerisinde çalışması gereken bir sistem olmayışı da hem basitlik hem de verimin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. İçten yanmalı motorun aksine, elektrikli motorlar herhangi bir devirde moment üretebilmektedir.

Elektrikli araçların içten yanmalı motora sahip araçlardan farkı sadece motor yapısı değildir. Elektrikli araçlar her devirde moment üretebildikleri için vites ihtiyacı duymazlar. Böylelikle elektrikli araçlarda vites, vites kutusu, debriyaj gibi donanımsal parçalar bulunmamaktadır. Ayrıca motorun çalışma prensibinde piston da gerek yoktur. Gaz tankı, egzoz sistemi, yağ ve su pompaları gibi parçalarda elektrikli araçlarda yer almamaktadır.

Bakıldığında sadece motor yapısında farklılık varmış gibi görünse de elektrikli araçlar içten yanmalı motora sahip araçlara göre çok daha az parça bulundurmaktadır. Dolayısıyla elektrikli araçlar daha az parça ile yalın bir yapıya

sahiptir. Daha az parçaya sahip oldukları için daha az kayıp görülmektedir. Bu sebeple içten yanmalı motora göre daha verimlidirler.



Şekil 1.1. Elektrikli aracın genel yapısı [10]

### 1.1. Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi

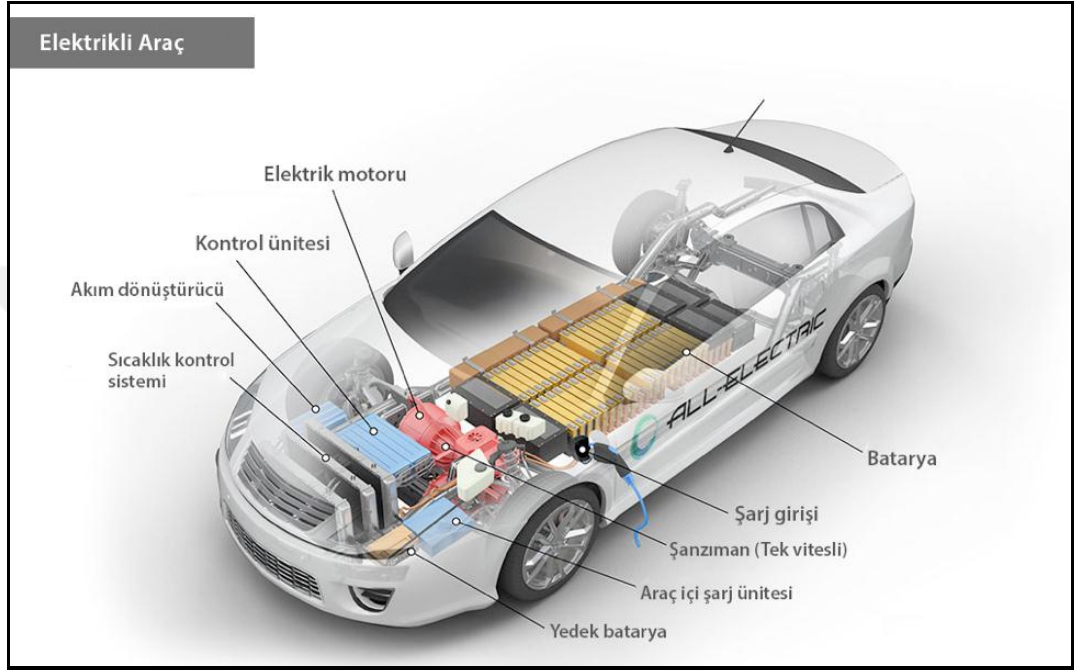
Elektrikli araç(EA) ilk olarak 1835 yılında Profesör Stratingh tarafından Hollanda’da yapılmıştır. 1859 yılından itibaren kurşun asit bataryalar geliştirilmiş ve aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu iki zaman dilimi arasında farklı elektrikli araç denemeleri de olmuştur. Fakat bu araçların bataryaları şarj yeteneğine sahip olmadığı için tercih edilmemiştir. 1859 yılından itibaren tekrar şarj edebilme yeteneğine sahip kurşun-asit bataryaların geliştirilmesiyle elektrikli araçlarda ticari boyuta ulaşılmıştır. Bu sayede gelişmeye başlayan elektrikli araç teknolojisine 1882 yılında Prof. William Ayrtton ve John Perry 3 yeni elektrikli araç kazandırmıştır. Bu 3 araçta da kurşun-asit bataryalar kullanılmıştır. 1882’de Siemens, Elektrometre adında ki dünyada ilk elektrikli trolleybüsü Berlin’de üretmiştir. Elektrikli araç teknolojisinde yaşanan olumlu gelişmeleri gören Amerika ve İngiltere’de ki birçok firma bu teknolojiye ayak uydurmaya ve geliştirmeye başlamıştır. Morris ve Salomon 1895 yılında ‘Electrobats’ adlı çift kişilik elektrikli aracı geliştirmişlerdir[12]. 1897 yılında ‘Londra Elektrikli Taksi şirketi tarafından 15 elektrikli taksi kullanılmaya başlanmıştır[13]. 1900’lü yılların başında teknolojik gelişmelerle elektrikli araç sayısı da hızla artmış hatta içten yanmalı motora(İYM) sahip araç sayısını da geçmiştir. Yaklaşık 20 yıl bu süreç devam etmiştir. Fakat teknolojinin yanında yeni yol çalışmaları da gelişim göstermiş ve araçların kullanıldığı mesafeler artış göstermiştir. Elektrikli araçların en büyük dezavantajı olan menzil sorunu gündeme gelmiştir. 1920’li yıllardan itibaren elektrikli araçlar eski rağbetini yitirmiştir.



Şekil 1.2. İlk elektrikli araç[11]

Düşük menzil, batarya ağırlığı ve üretim maliyetinin yüksek oluşu elektrikli araçların cazibesini yitirmesine sebep olmuştur. Bu yıllarda içten yanmalı motorlarda meydana gelen teknolojik gelişmeler İYM'a sahip araçların daha çok tercih edilmesine yol açmıştır. Ayrıca bu yıllarda petrol rezervlerine kolay ulaşılabilmesi ve maliyetlerinin düşük olması da İYM'a sahip araç teknolojisinin gelişimini hızlandırmıştır. İYM'a sahip araçların menzil uzunluğu, yakıtın araca yüklenme süresinin kısa olması, araç ağırlığının daha az olması ve üretiminin daha ucuz olması gibi önemli parametreler sayesinde gelişimi çok daha hızlı ve tercih sebebi olmuştur. 1960'lı yıllara kadar elektrikli araçların adı dahi anılmaz hale gelmiş İYM teknolojisine sahip araçların gelişimi hızla ilerlemiştir. Fakat İYM'a sahip araçların hızla gelişimi hava kirliliğini de beraberinde getirince elektrikli araç teknolojisi temiz olması sebebiyle tekrar gündeme gelmiştir[13]. 1970'li yıllarda petrol rezervlerindeki azalmaya bağlı fiyatların katlanmasıyla elektrikli araç teknolojisine olan eğilim daha da artmıştır. Amerikan Posta Servisi, American Motors Corporations 1975 yılında 350 adet elektrikli jip üretimi yapmış fakat batarya teknolojisinin geri olması ve yüksek maliyeti sebebiyle seri üretime geçilmemiştir[14]. Bu süre zarfında artan toplumsal örgütler hava kirliliği oranlarının giderek artmasına dikkat çekip İYM'a sahip araçlara alternatif araçların geliştirilmesi gerektiğinin ciddiyetini ortaya koymaktadır. Kaliforniya Hava Kaynakları Meclisi 1998 yılında satılacak araçların %2'sinin ve 2003 yılında satılacak araçların %10'unun sıfır emisyonlu araçlar olması yönünde bir hedef koymuş ve bu hedefini uygulamıştır[15]. Kaliforniya'nın böyle bir girişimde bulunması diğer ülkeleri de harekete geçirmiştir. Kimi ülke sıfır emisyona yönelmiş, kimisi petrol fiyatlarını yükselterek elektrikli araçları daha çekici hale getirmiştir. Kimi ülke egzoz miktarı üzerinden vergilendirme yapmayı hedef koymuştur. Bu gibi sebeplerden dolayı İYM'a sahip araçlara olan ilgi azalmıştır.

İlk seri üretim elektrikli araç olan EV1 1996 yılında Amerika’da General Motors(GM) tarafından üretilmiştir[15]. Otomotiv sektörü bu süreçle beraber tekrar odağını elektrikli araçlardan yana çevirmiştir. Honda EV Plus, Toyota RAV EV, Ford-Think City, Nissan Altra EV, Peugeot 106 Electric gibi farklı marka ve modeller piyasaya sürülmüştür.



Şekil 1. 3. Günümüzde elektrikli araç yapısı [16]

## 1.2. Günümüzde Elektrikli Araçlara Verilen Önem

Dünya üzerinde birçok sivil toplum örgütü ve araştırma enstitüsü hava kirliliği üzerine birçok araştırma yapmaktadır. Her geçen gün hava kirliliği oranının daha da artması sonucu araçlardan havaya karışan emisyon miktarı incelenmekte ve azaltılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Günümüzde Avrupa Birliği ülkelerinde CO<sub>2</sub> emisyonunun %20’si içten yanmalı motora sahip araçlardan kaynaklanmaktadır[17]. Kullanılan araç teknolojilerine bakıldığında içten yanmalı motora sahip araçların karşısında temiz enerji kaynaklı gösterilen elektrikli araçlar bulunmaktadır. Günümüzde kullanılan içten yanmalı motora sahip araçların havaya verdiği zarar gözle görülür hale gelmektedir. Elektrikli araçlara bakıldığında herhangi bir kirlenici görülmemektedir. Bu yüzden içten yanmalı motora sahip araçlar elektrikli araçlarla hava kirliliği ölçütü baz alınarak kıyaslandığında bir adım geride kalmaktadır.

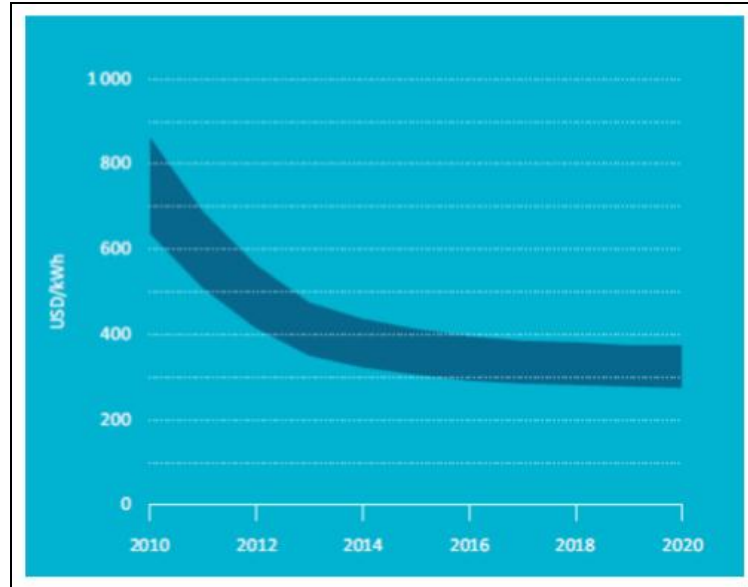


Artan nüfus karşısında tükenmeye başlayan petrol rezervleri de içten yanmalı motora sahip araçların yerini yeni bir teknolojinin alması gerektiği gerçeğini ortaya koymaktadır.

2000’li yılların başından itibaren elektrikli araçlara olan yönelim giderek artmaktadır. Elektrikli araçlarda bulunan kısıtlı menzil ve batarya maliyetleri her geçen yıl geliştirilmektedir. Günümüzde elektrikli araç teknolojisine bakıldığında menzil sorunu giderek azaltılmaktadır. Batarya maliyetlerinin azaltılması yönündeki çalışmalar devam etmektedir. Menzil miktarını uzatmak adına batarya miktarının çoğaltılmasından ziyade mevcut bataryayı daha verimli hale getirip hem araç ağırlığını arttırmadan hem de daha uzun menzillere ulaşmak amaçlanmaktadır.

Gelişen ve hala geliştirilmekte olan batarya teknolojileri sayesinde; batarya maliyetlerinin giderek azalacağı düşünüldüğünde, elektrikli araç birim fiyatlarının da aynı oranda azalacağı öngörülmektedir.

2000’li yıllarda üretilen elektrikli araç fiyatlarının, günümüzde geliştirilen elektrikli araç fiyatlarından çok fazla olduğu görülmektedir. Elektrikli araç fiyatlarının azalması ve devletin elektrikli araç satışına dair teşvikleri araç kullanıcılarının ilgisini çekmektedir. Bu doğrultuda talep söz konusu olduğu için birçok farklı firma elektrikli araç teknolojisi geliştirmekte ve satışını yapmaktadır.



Şekil 1.4. EA batarya tahmini fiyatları[13]

Günümüzde her alanda hızla artan teknolojik tüketim ulaşım alanında da tüm hızıyla devam etmektedir. Elektrikli araçların, geleneksel araçların karşısında geri planda görülmesinin ana sebeplerinden biri olan batarya maliyetlerinin yapılan çalışmalar sonucu azaltıldığı Şekil 2’de görülmektedir. Böylelikle elektrikli araçlarında birim maliyetlerinin azalması sonucu tercih sebebi haline gelmesi öngörülmektedir. Dünya nüfusunun hızla artması sonucu neredeyse nüfus ile orantılı bir şekilde artan araç sayısına ve bunlardan gelen emisyonlara bakıldığı zaman elektrikli araçların yaygın hale gelmesinde geç bile kalındığı söylenilebilir.

### **1.3. Elektrikli Araç Şarj Sistemleri**

Geleneksel araçlarda belirli aralıklarla yakıt gereksinimi olduğu gibi elektrikli araçlarda da bataryanın imkan verdiği menzil miktarı sonunda bataryanın şarj edilmesi ihtiyacı doğmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amaçlı çeşitli şarj sistemleri geliştirilmekte ve bunlar belirli standartlara dayandırılarak test edilmektedir. Araç Birliği Standartları (JEVS) ve CHADEMO gibi kuruluşlar öncülüğünde elektrikli taşıtların şarj modları ve elektrik bağlantıları konusunda uluslararası standartlar oluşturulmuştur. Türkiye’nin de dâhil olduğu IEC komisyonunun 61851 ve 62196 standartları, SAE’nin J1772 numaralı standardı ve CHADEMO’nun ise DC hızlı şarj standartları bulunmaktadır.[18]

Elektrikli araçların şarj istasyonları genel olarak 3 tipe ayrılmıştır. Bunlar kişisel otoparklar ve evlerden sağlanan uzun süre park halinde kalan araçların şarj istasyonları olan yavaş şarj sistemleri(mod-1), topluluğa hizmet veren alışveriş merkezi, otopark gibi 3-6 saat süreli araçların park halinde kaldığı ve bu sürelerde şarjın tamamlandığı normal şarj sistemleri(mod-2), yoğun olarak trafik akışının olduğu bölgelerde acil takviye şarj ihtiyacı olabilecek durumlarda kullanılabilen hızlı şarj sistemleridir(mod-3).

#### **1.3.1. Yavaş şarj sistemleri**

Yavaş şarj sistemleri; günlük hayatın içerisinde insanların vakitlerinin çoğunu geçirdiği yerler olan iş yerleri ve evlerin otoparklarında 6 saat ve üzeri sürede şarjın tamamlanmasını sağlayan sistemlerdir. Park halindeki bu araçların yavaş şarj sistemleri ile tek faz akım değeri standartlarda maksimum 16 A ve 250 V (ABD için

16 A ve 120 V), aynı akım değerinde 3 faz olması durumu için ise 480 V olarak belirlenmiştir. Bu sistemlerde ortalama güç değeri 1,4-3,5 kW arasında değişmektedir.[19]

### **1.3.2. Normal şarj sistemleri**

Normal şarj sistemleri; elektrikli aracın 3 ile 6 saat arasında park halinde kaldığı durumlarda genellikle insanların yoğun kullandığı alanlarda (alışveriş merkezleri, günlük toplu otopark alanları, sinema vb.) tercih edilen şarj sistemleridir. Bu istasyonlar ise tek faz için maksimum 32 A ve 250 V veya 3 faz için aynı akımda 480 V çıkışlarına sahiptir. SAE'ye göre ise (2009 yılında mod-2) bu değer 3 faz için maksimum 80 A'e kadar çıkmasına izin verilmiştir. EA'lar için enerji ihtiyacı standart tek fazlı veya 3 fazlı soket çıkışları kullanılarak sağlanır. Taşıt ile şarj ünitesi arasında bulunan toprak koruma iletkeni, bireylerin herhangi bir elektrik çarpmasına karşı korumasını sağlar. Pilot kontrol ünitesi ile toprak arasında 1000 ohm'luk direnç kullanılır. IEC 61851-1 standardına göre normal şarj (mod-2) bağlantı elemanlarında kontrol pin'inin EA'larda bulunması gereklidir. Normal şarj istasyonlarının anma güç değerleri 6-20 kW değerleri arasında değişmektedir.[20]

### **1.3.3. Hızlı şarj sistemleri**

Hızlı şarj sistemleri; şarj süresinin yarım saatten az olduğu sistemlerdir. Bu sistem acil durum ve yoğun trafiğin olduğu alanlarda tercih edilmektedir(dinlenme tesisi vb.). Kurulumu esnasında özel güvenlik elemanları tercih edilmesi sebebi ile yüksek güvenli şarj sistemleri durumundadır. Bağlantı kablolarının her iki tarafında da sinyal ve kontrol pinleri bulunmaktadır. Bu istasyonlarda maksimum akım 250 A seviyesine çıkmaktadır. Ayrıca IEC 61851-1 standardına göre mod-4 olarak adlandırılan DC hızlı şarj durumunda ise maksimum 600 V, 400 A seviyesine kadar çıkılmasına izin verilmektedir. Fakat DC hızlı şarj istasyonlarının maliyetleri ise diğer şarj modlarına göre çok daha yüksektir. Hızlı şarj istasyonlarının ortalama güç değerleri ise 50-150 kW arasında değişmektedir.[20] Bütün bu avantajlar karşısında hızlı şarj sistemleri batarya ömürlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkiyi en aza indirmek için elektrikli araç üreticileri hızlı şarjdan etkilenme oranını düşürme yolunda geliştirmeler yapmaktadır.

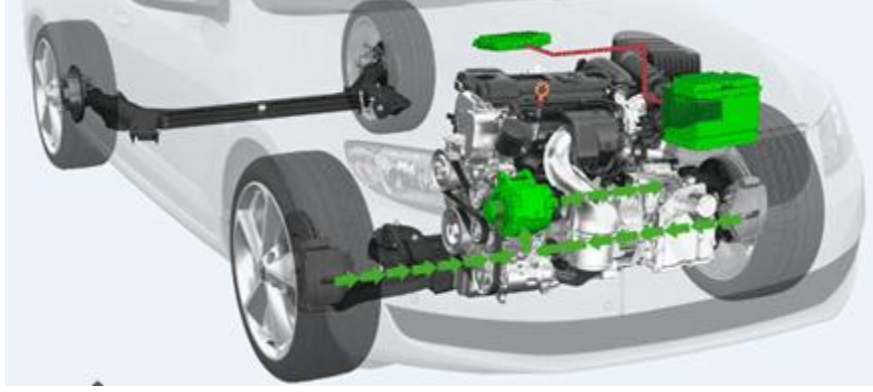
## **2. GELENEKSEL VE ELEKTRİKLİ ARAÇ FRENLEME SİSTEMLERİ**

Belirli bir hıza sahip her araç yavaşlamak veya durmak amacıyla frenleme sistemine ihtiyaç duymaktadır. Aracın çeşidi, modeli veya markası fark etmeksizin her araçta frenleme sistemi mevcuttur. Frenleme denildiği zaman geleneksel araçlarda kullanılan frenleme sistemi akla gelmektedir. Aracın hızından dolayı kazanmış olduğu mevcut kinetik enerjisi fren pedalına uygulanan kuvvet sonucunda balata ve disklerde ısı enerjisi olarak kaybedilmekte böylece araç hızını azaltarak durmaktadır.

Günümüzde üzerine çalışılan ve geliştirilmek istenen elektrikli araçlara baktığımızda, geleneksel fren sisteminin elektrikli araçlar için yararsız olduğu görülmektedir. Elektrikli araçlarda temel sorunlardan birinin menzil olduğu düşünülerek farklı bir fren sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde araç kinetik enerjisini boşa dışarıya atmak yerine faydalı enerji olarak araç sistemine kazandırmakta ve sorun teşkil eden menzil mesafesini de bir miktar arttırarak fayda sağlamaktadır.

### **2.1. Geri Kazanımlı Frenleme Sistemi**

Geleneksel araçlar sahip oldukları kinetik enerjiyi frenleme sırasında balata ve disklerde ısı olarak kaybederler. Geri kazanımlı frenleme sisteminde ise aracın kinetik enerjisi bataryalarda depo edilir. Bu sayede kayıp kazanca çevrilerek mevcut batarya ile gidilen menzile ek olarak elektrikli aracın daha uzun menzillere ulaşması sağlanmaktadır. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi şebekeden gelen enerji şarj istasyonu vasıtasıyla araca aktarılmaktadır. Bu enerji araçta doğrultucu ve filtrelerden geçtikten sonra yüksek gerilim bataryasına depolanmaktadır. Yüksek gerilim batarya grubu motor sürücüsünü enerjilendirerek elektrik motorunu çalıştırmaktadır. Geri kazanımlı frenleme yapıldığında ise; hareket halindeki aracın kinetik enerjisi yani mekanik enerji araç motorunun generatör olarak çalıştırılmasıyla yüksek gerilim bataryasına depolanmaktadır. Şekil 2.1 de görüldüğü gibi geri kazanımlı frenleme de motor sürücüsü çift yönlü çalışmaktadır. Geri kazanımlı frenleme sistemi çift yönlü olarak çalışmakta ve elektrikli araçlarda menzil probleminin azaltılması amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Geri kazanımlı frenleme sistem döngüsü[21]

## 2.2. Geleneksel Araçlarda Frenleme Sistemi

Geleneksel araçlarda frenleme sistemi; aracın kontrollü bir şekilde hızını azaltarak durmasını sağlamaktadır. Belirli bir hıza ve bu hız sayesinde kinetik enerjiye sahip olan aracın, çeşitli sebepler ile hızını azaltma veya durmaya yönelik yapmış olduğu kontrol hamlesi frenleme olarak ifade edilmektedir. Durma veya yavaşlama hamlesi ile fren pedalı kullanılarak yavaşlama esnasında; aracın sahip olduğu kinetik enerji balata ve disklerde ısı enerjisine çevrilmektedir. Elde edilen bu ısı enerjisi hiçbir şekilde kullanılmayıp dışarı atılmaktadır. Kaybedilen bu enerji azımsanmayacak kadar büyüktür. Geri kazanımlı frenleme sisteminin ne kadar önemli olduğu kaybedilen bu enerjinin matematiksel değeri görülerek karşılaştırıldığı için daha net anlaşılmaktadır. Geleneksel araçlarda elektrikli araçlarda olduğu gibi menzil sorunu yaşanmadığı için dışarı atılan bu enerjiden faydalanmak adına herhangi bir sistem kullanılmamaktadır. Tek yönlü olarak çalışan bir fren modeli görülmektedir. Bu tek yönlü sistemi kısaca şu şekilde ifade edebiliriz. Eğer durmak veya yavaşlamak istiyorsan fren pedalına kuvvet uygula.

## 2.3. Elektrikli Araçlarda Frenleme Sistemi

Elektrikli araçların içten yanmalı motora sahip araçlar kadar yaygınlaşmamasının en büyük etkenlerinden biri olan menzil sorunu, geri kazanımlı frenleme sayesinde iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Elektrikli araçlarda menzil; araç bataryalarının tek dolumu ile alınan mesafe olarak ifade edilmesinden ötürü, frenleme sırasında kaybedilen enerjinin tekrar bataryalarda depo edilmesi sayesinde uzatılmaktadır. Elektrikli araçlarda bulunan geri kazanımlı frenleme sistemi menzili iyileştirme

yolunda yapılan en iyi teknoloji olarak gösterilmektedir. Kısacası içten yanmalı motora sahip araçlar mevcut kinetik enerjisini balata ve disklerde ısı enerjisi olarak atarken, elektrikli araçlar mevcut kinetik enerjisini geri kazanımlı frenleme sayesinde ek menzil olarak daha fazla mesafe kat edebilmektedir.

Elektrikli araçlarda yapılan frenlemenin zaman ve miktarına göre geri kazanımlı frenleme mi yoksa hidrolik frenleme mi olacağına bakılmaktadır. Fren pedalına yerleştirilen sensör vasıtasıyla; pedal hareket miktarını pedal hareket süresine oranlayarak frenin ani mi yoksa olağan mı olduğu hesaplanmaktadır. Elektrikli araçlarda fren yapıldığı anda bu frenin hidrolik fren mi yoksa geri kazanımlı frenleme mi olacağına karar vermek için bir algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritma 4 katmana sahiptir. Katmanlar sırasıyla pedala basma hızı, pedala basma miktarı, akü doluluk oranı ve elektrik motor moment kapasitesinden oluşmaktadır. Pedala basma hızı önceden algoritmada belirtilen bir  $V_p$  hızından büyük ise araç ani fren yapmaktadır. Bu durumda araç güvenlik sebebiyle algoritmanın ilk katmanından diğer katmanlara bakmaksızın hidrolik frenleme yapmaktadır.

İkinci katmanda pedal basma miktarı kontrol edilmektedir. Bu katmanda algoritmanın ilk katmanında olduğu gibi ihtiyaç duyulan frenleme isteği ölçülmektedir. Eğer araç algoritmada belirtilen  $V_x$  pedala basma miktarından fazla ise sürücünün yüksek ivme ile frenleme yapma isteğini göstermektedir. Böyle bir durumda ilk katmanda olduğu gibi hidrolik frenleme devreye girmektedir.

Algoritmanın üçüncü katmanında ise akü doluluk oranına bakılmaktadır. Eğer akü doluluk oranı %70'in üzerinde ise araç aküdeki doluluk sebebiyle geri kazanımlı frenleme yapamadığı için zorunlu olarak hidrolik frenleme devreye girmektedir. Eğer akü doluluk oranı %50'nin altında ise akü şarj edilebilir demektir. Bu da aracın geri kazanımlı frenleme yapacağı anlamına gelmektedir.

Algoritmanın dördüncü ve son katmanında motor moment kapasitesinin yeterli olup olmadığına bakılmaktadır. Motor moment kapasitesi devir sayısı ile değişkenlik göstermektedir. Moment değeri istenilen frenleme değerini karşılamaya yetiyorsa geri kazanımlı frenleme, karşılamıyorsa hidrolik frenleme yapılmaktadır[22].

Yapılan bir başka simülasyon çalışmasında; 100 km/h hız ile ilerlemekte olan elektrikli aracın hızı  $2 \text{ m/s}^2$ 'lik ivmeyle sıfıra indirilmesi anında faydalı frenleme yaptırılmıştır. Üretilen güç değeri enerjiye çevrilmiştir. Elde edilen bu enerji sayesinde 50 km/h hız ile ilerlemekte olan aracın 1,7 km'lik daha menzile sahip olduğu görülmüştür[23].

Bu çalışmada da görüldüğü gibi elektrikli aracın kinetik enerjisinden dolayı sahip olduğu enerjisini faydalı frenlemeye çevirebilmesi için kontrollü frenleme yapması gerekmektedir. Ani frenleme sırasında araç güvenliği ön plana alarak geleneksel frenleme ile mevcut enerjisini balata ve disklerde ısı enerjisi olarak dışarı atmaktadır. Bu yüzden zorunlu kalınmadığı sürece faydalı frenleme yapılması amacıyla kontrollü frenleme önerilmektedir.

Elektrikli araçlarda kullanılmakta olan frenleme sistemi sürücünün kullanım haline göre değişkenlik göstermektedir. Elektrikli araçlarda hem geleneksel frenleme hem de geri kazanımlı frenleme bulunmaktadır. Sürüş anındaki kullanım şekline göre aracın geri kazanımlı frenleme mi yoksa geleneksel frenleme mi yapacağına sistem algoritması karar vermektedir. Bütün seçimler önceliğinde can güvenliği esas alınarak hareket edilmektedir.

### 3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Elektrikli araçlarda en önemli unsur sürüş devamlılığının sağlanabilmesi için sistemde kesintisiz elektrik kullanımınıdır. Elektrikli araçlarda sürüş devamlılığının kesintisiz sağlanabilmesi için çeşitli enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır. Bunlar temel olarak 3 basamakta incelenmektedir; batarya sistemleri, ultra kapasitör-süper kapasitör sistemleri ve volan. Bu sistemlerin kendi içerisinde de birçok enerji depolama sistemi geliştirilmiş ve hala günümüzde geliştirilmeye devam edilmektedir. Burada önemli olan ihtiyaca bağlı olarak teknik ve ekonomik şartlarda değerlendirilerek optimum seçimde bulunmaktır

#### 3.1. Batarya Sistemleri

Gelişmekte olan teknolojiyle birlikte günümüzde farklı anma değerlerine ve enerji yoğunluğuna sahip pil teknolojileri kullanılmakta ve halen geliştirilmektedir. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri aşağıda tablo halinde verilmektedir.

Tablo 3.1. Batarya çeşitleri ve özellikleri[24]

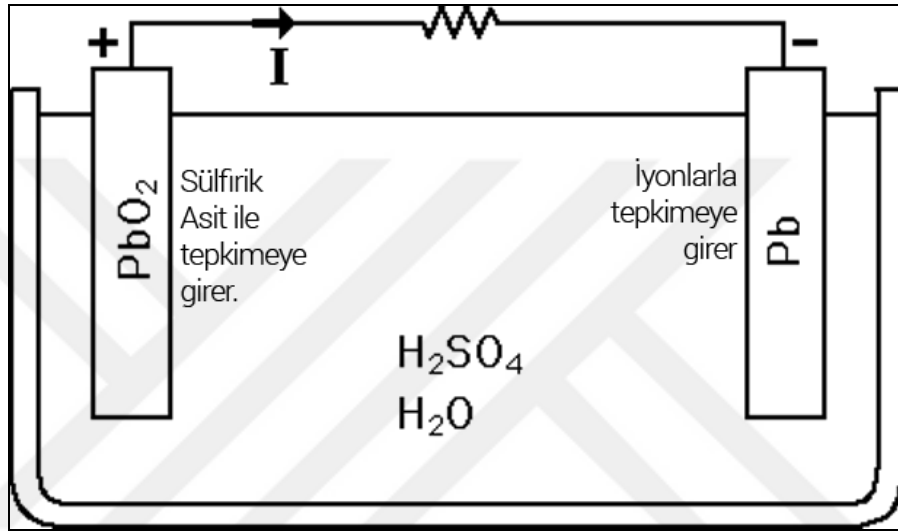
Pil Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu	Çevrim Ömrü	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı
Pb-Acid	2	35	1000	Yok	-15, +50
NiCd	1,2	50-80	2000	Var	-20, +50
NiMH	1,2	70-95	<3000	Nadir	-20, +60
Li-ion	3,6	118-250	2000	Yok	-20, +60
LiPo	3,7	130-225	>1200	Yok	-20, +60
LiFePO <sub>4</sub>	3,2	120	>2000	Yok	-45, +70
Li-S	2,5	350-650	300	Yok	-60, +60

#### 3.1.1. Kurşun asit (Pb-Acid) piller

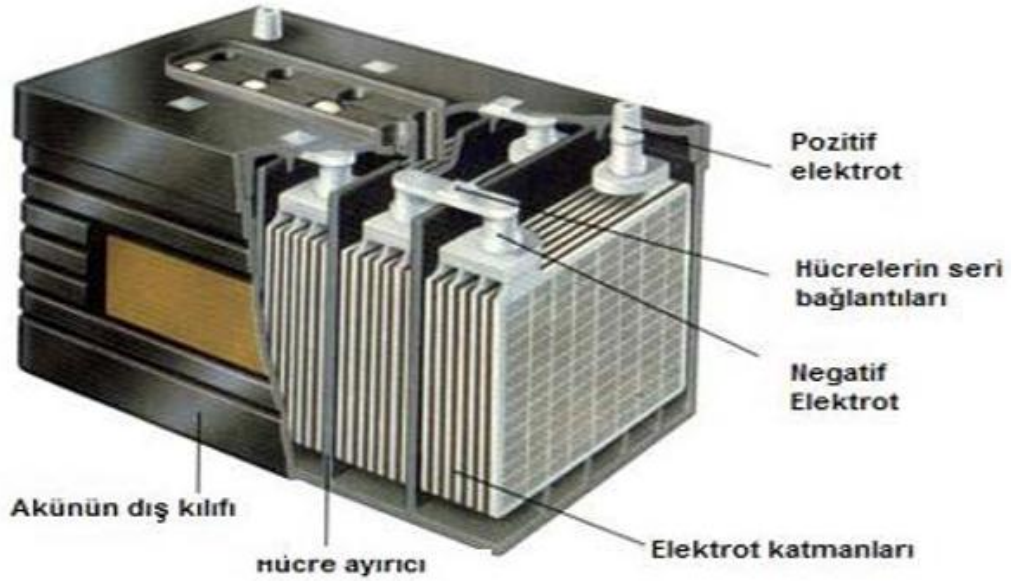
En eski teknolojiye sahip pillerdir. Negatif yüklü elektrotta kurşun, pozitif yüklü elektrotta kurşun dioksit (PbO<sub>2</sub>) ve elektrik yalıtım tabakası bulunmaktadır. Ayrıca elektrolit olarak sülfirik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) materyalleri kullanılmaktadır. Kullanılan bu aktif maddeler enerji depolanması için geniş bir yüzey alanı oluşturur. Mikrogözenekli ayırıcılar kimyasal reaksiyonun burada gerçekleşmesini sağlayarak



elektrotların kısa devre olmasını önler. Kurşun asit piller; bakım gerektirmez, maliyetlerinin düşük, enerji yoğunluklarının yüksek ve sıcaklık farkının değişken olduğu (yüksek ve düşük sıcaklıklarda) durumlarda yüksek performans göstermeleri sebebiyle önemli avantajlara sahiptir. Dezavantajları ise; fazla yer kaplamaları, ağır ve hantal oluşları, kısa süreli kullanım ömrü ve kendi kendine deşarj olmalarıdır. Genellikle otomobil ve motosikletlerde kullanılmaktadır[25]. Bütün bu dezavantajlarına rağmen tercih edilme nedenleri ucuz olmalarıdır.



Şekil 3.1. Kurşun asit pil diyagramı[26]



Şekil 3.2. Kurşun asit pil yapısı[27]

### 3.1.2. Nikel kadmiyum (NiCd) piller

Nikel-kadmiyum pilleri kullanım olarak çok yaygın değildir ve yaklaşık olarak verimlilikleri %75'tir. Zehirli ve ağır bir metal olan kadmiyum metali ile kaplı olduğu için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Son 30 yıl içerisinde dünya üzerindeki kadmiyumun 2/3'ü bu piller için kullanılmıştır. Bu pil tipinin belirli aralıklarla tam olarak deşarj edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde plakalar üzerinde kristalleşmeler meydana gelmektedir. Buna aynı zamanda hafıza etkisi de denilmektedir, bunun sonucunda zamanla pilin verimi düşmeye başlamaktadır.

Bu durumda pilin veriminde ciddi düşüş meydana gelmektedir. Genellikle aydınlatmalar, güneş enerji istasyonları, uzay araçları ve telekomünikasyon sistemlerinde kullanılmaktadır[28].

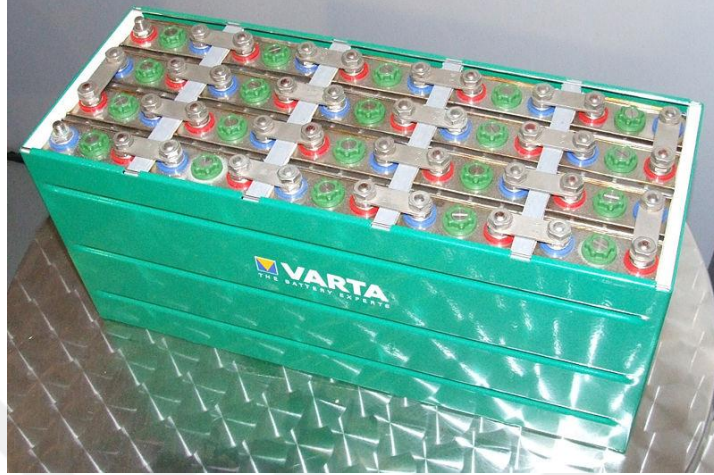


Şekil 3.3. Nikel kadmiyum batarya[29]

### 3.1.3. Nikel metal hidrat (NiMH) piller

Bu pil teknolojisi, kadmiyum elektrotu yerine metal hidrat kullanılarak Nikel-kadmiyum pil teknolojisine alternatif olarak geliştirilmiştir. Ancak Nikel Metal Hidrat pil teknolojisi yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen gelişen yeni teknolojiler sebebiyle çok fazla ilgi görememektedir. Nikelkadmiyum pillerden % 30–40 daha fazla kapasite ve bunun yanında bu değerlerin çok daha üstünde bir enerji yoğunluğuna erişilebileceği de öngörülmektedir. Hafıza etkisine nikel-

kadmiyum pillerden daha az eğilimlidir ve daha az sayıda periyodik deşarj-şarj döngüsüne ihtiyaç duymaktadır. İçeriğinde az miktarda zehirli madde içerir. Ayrıca geri dönüşümü de gayet kolaydır[30].



Şekil 3.4. Nikel metal hidrat batarya[31]

#### 3.1.4. Lityum iyon (Li-ion) piller

Lityum iyon pilleri, yüksek enerji depolama kapasiteleri ve verimleri sayesinde teknolojik cihazlarda yaygın olarak kullanılan pil çeşitlerindedir. Dağıtım sistemlerinde ve otomotiv sektöründe de sıklıkla kullanılmaktadır. Teknik yapısı ise; pilin eksi kutbu lityum metal oksit ve artı kutbu grafik karbon tabakası ile yapılmıştır. Lityum tuzu içeren elektrotlar organik karbonatlarla çözülmektedir. Pil şarj edilirken, katottaki lityum atomları iyonlaşır ve elektronlar ile birleşirler daha sonra lityum atomları olarak karbon tabakaları arasında depolandıkları karbonlar anot yönünde elektrolit boyunca ilerlerler. Bu süreç boşalma süresince tersine hareket eder/ettirilir. Li-ion pillerde şarj ve deşarj süreleri Pb-Asit, NiMH pillere göre çok çok kısadır. Bunun yanında aynı miktarda enerji elde etmek için NiMH akülere göre %40 daha az yere ihtiyaç duyar. Bu pil çeşidinin avantajları; kapalı hücre olması ve bakım gerektirmemesi, uzun süreli kullanım ömrü, çabuk şarj olabilme kabiliyeti, yüksek enerji yoğunluğu, taşınabilir oluşları, dayanıklılık ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilmeleridir. Dezavantajları ise yüksek kurulum maliyeti, yüksek sıcaklıklarda bozunması, koruyucu devre ihtiyacının olması ve kapasiteden fazla şarj olma tehlikesi denilebilir[32]. Geliştirilen elektrikli araçlarda en çok kullanılması tahmin edilen pil grubudur. Sonuç olarak Li-ion piller geleneksel Pb-asit,

NiMH pillere göre birim hacim ve ağırlık başına üç kat daha fazla enerji depolama yeteneğine sahiptir. Yüksek enerji özellikleri ile Li-ion aküler havacılık elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar gibi yüksek tork gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kendi kendine deşarj oranı Li-ion akülerde %5 iken geleneksel akülerde %20 civarındadır.[33]



Şekil 3.5 Lityum iyon batarya [34]

### **3.1.5. Lityum iyon polimer (LiPo) piller**

Lityum iyon piller ile genel olarak aynı özelliklere sahiptir. İlave olarak elektrolit kısmında polimer materyali kullanılmaktadır.

### **3.1.6. Lityum demir fosfat (LiFePO<sub>4</sub>) piller**

Lityum demir fosfat pilleri; yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir diğer pil çeşididir. Ayrıca yüksek çevrim oranına sahip olmaları da tercih edilmelerini sağlamaktadır. Güvenilir kullanım şekli de bu piller için bir diğer avantaj olarak görülebilmektedir. Ancak lityum iyon piller ile karşılaştırıldıkları takdirde daha düşük performansa sahip oldukları görülmektedir[35].

### **3.1.7. Lityum sülfür (Li-S) piller**

Lityum tabanlı pil gruplarından katot malzemesi olarak sülfür kullanılan pil çeşididir. Yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek şarj verimine, düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrüne sahiptirler[35].

Tablo 3.2. Batarya sistemlerinin birbirleri ile kıyaslanması[36]

Birbirlerine Karşı Avantajları	Kurşun Asit	Nikel Kadmiyum	Nikel Metal Hidrat	Lityum İyon Geleneksel	Lityum İyon Polimer
Kurşun Asit	-	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Çalışma sıcaklığı aralığı - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Güvenilirliği	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Tasarım özellikleri
Nikel Kadmiyum	- Yüksek döngü sayısı - Voltaj çıkışı - Fiyat	-	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Çalışma sıcaklığı aralığı	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Tasarım özellikleri
Nikel Metal Hidrat	- Yüksek döngü sayısı - Voltaj çıkışı - Fiyat	- Çalışma sıcaklığı aralığı - Yüksek döngü miktarı - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Fiyat	-	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Çalışma sıcaklığı aralığı - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Yüksek döngü miktarı - Voltaj çıkışı	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Tasarım özellikleri - Çalışma sıcaklığı aralığı
Lityum İyon Geleneksel	- Yüksek döngü sayısı - Fiyat - Güvenlik - Geri Dönüşebilme	- Çalışma sıcaklığı aralığı - Yüksek döngü miktarı - Fiyat - Güvenlik - Geri dönüşebilme	- Fiyat - Güvenlik - Geri dönüşebilme - Deşarj oranı	-	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu (potansiyekl) - Tasarım özellikleri - Güvenlik - Fiyat
Lityum İyon Polimer	- Yüksek döngü sayısı - Fiyat	- Çalışma sıcaklığı aralığı - Yüksek döngü miktarı - Fiyat	- Hacimsel enerji yoğunluğu	-	-
Mutlak Avantajlar	- Yüksek döngü sayısı - Fiyat	- Çalışma sıcaklığı aralığı - Fiyat	- Hacimsel enerji yoğunluğu	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Voltaj çıkışı	- Gravimetrik enerji yoğunluğu - Hacimsel enerji yoğunluğu - Kendiliğinden deşarj olma oranı - Tasarım özellikleri - Voltaj çıkışı

Tablo 3.3. EA'larda kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri[36]

Bataryalar	Nominal Voltaj(V)	Enerji Yoğunluğu(Wh/kg)	Güç Yoğunluğu(Wh/kg)	Verimlilik(%)
Pb-Acid	2	30-40	180	70-92
NiCd	1,2	40-60	150	70-90
NiMH	1,2	30-80	250-1000	66
Li-ion	3,6	160	1800	99
Li-Po	3,7	130-200	>3000	99

### 3.2. Ultrakapasitör Sistemleri

Ultra-kapasitörler yaygın olarak kullanılmakta olan kondansatörler ile aynı enerji depolama parametrelerine sahiptir. Ultra-kapasitörler de kovansiyonel kondansatörlerdeki gibi ortak di-elektrik yerine elektrolit malzmeden faydalanılır[37]. Bu elektrolit malzeme sayesinde iki elektrot birbirinden fiziksel olarak ayrılır ve iyon geçişi meydana gelmektedir. Ultra-kapasitör yapısı oldukça geniş yüzeye sahiptir. Bu sayede birim alana düşen kapasite değerinin de yüksek olduğu görülmektedir. Standart bir kapasitörün kapasite değeri  $1 \text{ nF/cm}^2$  iken bu değer ultra-kapasitörler de  $50 \mu\text{F/cm}^2$ 'dir[38-39].



Şekil 3.6. Ultra-kapasitör [40]

Ultra-kapasitörler de gerilim sınırlaması elektrolit çözeltinin ayrışma özelliğine göre değişkenlik gösterir. Bu değer 1V ile 5V arasında değişmektedir[39]. Ultra-kapasitörler birçok küçük sistemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ultra-kapasitörlerin yapısı hakkında detaylı bilgi sahibi olmak için elektrikli araç yapısını incelemek oldukça faydalı olacaktır. Ultra-kapasitörlerin iç yapılarında kimyasal bir

reaksiyon meydana gelmediği için araçlarda oldukça sık ve ani meydana gelen frenleme sırasında açığa çıkan enerjiyi verimli bir şekilde geri kazanabilmektedir. Aynı durum karşısında kimyasal yapıya sahip bataryaların veriminin daha düşük olduğu görülmektedir. Hızlı değişen yük karşısında bataryalar ultra-kapasitörler gibi hızlı cevap verememektedir. Böylelikle ultra-kapasitörler bataryalara göre daha verimlidirler. Ayrıca tekrar şarj edilebilen bataryalar birkaç binlik çevrim sonrası kimyasal yapıdaki bozulmalar sebebiyle verim düşüşü yaşayıp ömürleri biterken ultra-kapasitörler bir milyon çevrime kadar yüksek bir ömre sahiptir. Bunların yanında ultra-kapasitörlerin en önemli avantajlarından biri değişen sıcaklıklar da bile veriminde bir farklılık görülmeysiştir.

Günümüzde kullanılan ultra-kapasitörler aynı fiziksel özelliklere sahip batarya ile kıyaslandığında daha fazla güç yoğunluğuna sahiptir. Enerji yoğunluklarına bakıldığında ise bu durumun tam tersi olduğu görülmektedir. Bu yüzden ultra-kapasitörlerin enerji yoğunluklarını arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Sahip olduğu yüksek kapasite değeri sayesinde ultra-kapasitörler birçok açıdan konvansiyonel kapasitörlerden daha avantajlı hale gelmiş, birçok kullanım alanında da bataryaların yerini almaya başlamıştır.

### **3.2.1. Batarya ve ultrakapasitörün karşılaştırılması**

Elektrikli araçlardaki enerji depolama sistemi aracın tamamı göz önüne alındığında en önemli kısmı olarak gösterilmektedir. Aracın sistem verimi, kullanılacağı menzil gibi parametreler göz önüne alınarak araçta kullanılacak depolama sistemi tercih edilmelidir. Her enerji depolama sisteminin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Önemli olan her aracın kendi teknik ve arazi koşulları dikkate alınarak ekonomik ve verimli sistemin tercihinde bulunabilmektir.

Gelişim süreci de dikkate alınırse tarihte enerji depolama sistemi olarak ilk önce batarya sistemleri tercih edilmiş hatta günümüzde hala geliştirilmekte olan batarya sistemleri bulunmaktadır. Batarya sistemleri diğer enerji depolama sistemlerine göre daha ekonomik ve daha uzun süredir kullanılması sebebiyle ilk sırada tercih ediliyor gibi düşünülse de son zamanlarda elektrikli araç teknolojisindeki hızlı gelişim ile birlikte enerji depolama sistemi olarak ultra kapasitörlerin tercih edildiği görülmektedir. Daha dinamik bir sistem olan ultrakapasitörler geniş sıcaklık



aralıklarından çalışabildikleri için bataryalara göre işlevselliği daha fazladır. Bu özellikte göz önünde bulundurulduğunda ultra kapasitörler bataryalara tercih edilmektedir. Özellikle düşük havalarda görülen motorun ilk çalıştırılma enerjisini sağlamak açısından ultra kapasitör sistemleri oldukça verimlidir.

Elektrikli araçlarda enerji sürekli olarak birbirine çevrilmektedir. Bazen enerji depolanmakta bazen de depo edilen enerjiye aniden ihtiyaç duyulmaktadır. Aracın seyir halindeki kısa süreli değişimleri de düşünüldüğü zaman batarya üzerindeki anlık şarj-deşarj durumu karşısında batarya kısa zamanda ömrünü yitirmektedir. Bu durumda yine bataryanın ultra kapasitör karşısındaki bir başka dezavantajıdır.

Bütün bu dezavantajlarının yanı sıra bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları sebebiyle elektrikli araçlarda halen tercih edilmektedir. Günümüzde ultra kapasitörlerin enerji yoğunluklarının artırılarak elektrikli araçlarda kullanılması için her türlü geliştirme çalışmaları yapılmaya devam etmektedir.

### **3.3. Volan**

Kinetik enerjiyi mekanik enerji formunda depolayabilen, ihtiyaç anında sistemde jeneratör olarak işlev gören ve bir eksen boyunca dönen depolama sistemidir. Başlangıçta volanı hareketlendirebilmek ve dönel hız kazandırabilmek için belirli bir miktar enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Volan, dönmeye başladığı andan itibaren dönme hızı ve ataletine bağlı olarak belirli bir miktar enerjiyi depo eden ‘mekanik bir batarya’ olarak çalışmaktadır. Volan mevcut enerjisini dönme hareketinden sağladığı için dönme hızı arttıkça enerjisi de artmaktadır. Volan ne kadar hızlı dönüyorsa o kadar çok miktarda enerjiye sahip demektir. Depolanmış bu enerji istenildiğinde volan yavaşlatılarak ve bu sayede mevcut kinetik enerjinin istenilen kısmı generatör modunda çalışan bir elektrik motorunu tahrik etmekte kullanılarak elektrik enerjisine çevrilebilmektedir[41]. Volan sistemleri düşük ve yüksek hızda olmak üzere 2 ayrı hızda üretilebilmektedir. Volanın hızı arttıkça enerji yoğunluğu da artmaktadır. 50000 rpm hızlarında 100 Wh/kg’lık enerji yoğunluğuna ulaşmaktadır.

Volanlar birkaç dakika içerisinde hızlanmakta dönme hareketini rutin hale getirmektedir. Batarya sistemlerine bakıldığında şarj süresinin saat boyutunda olduğu göz önüne alınırsa volanların daha avantajlı olduğu görülmektedir.

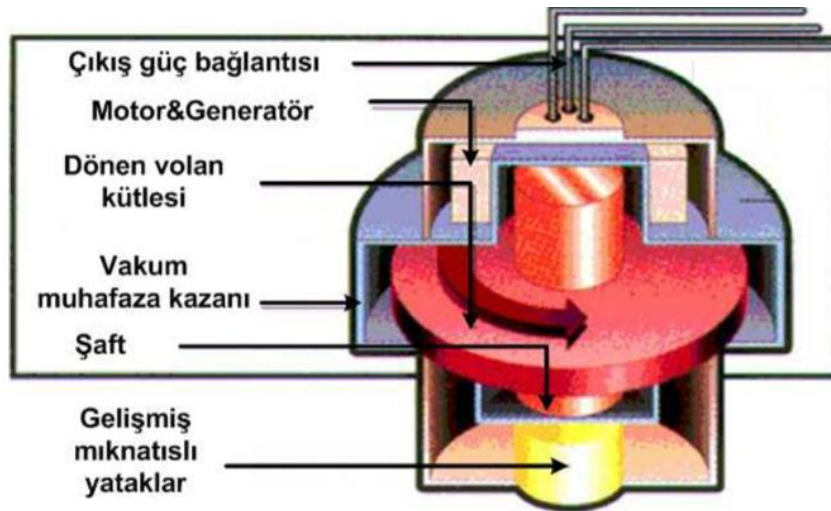




Şekil 3.7. Volan genel görünümü[42]

Volanlar uzun bir çevrim ömrüne sahip ve yüksek şarj-deşarj hızlarına uygun oldukları için diğer enerji depolama sistemlerine karşı daha avantajlıdır. Volanların çevrim ömürleri  $10^7$  mertebelerindedir[43]. Mekanik olarak volan ömrü ortalama 20 yıl olarak bilinmektedir[44].

Yüksek dönme hızlarında yüksek enerji yoğunluklarına sahip volan sistemleri de enerji depolama sistemlerinde volanların avantajlı olduğu kısımlardandır. Volanların nominal güçteki verimleri %90 civarındadır. Volanların hızlı cevap verme yetenekleri şebeke frekansının dengelenmesinde volanların kullanılmasını da mümkün kılmaktadır. Bunların yanı sıra volanların en önemli dezavantajları ekonomik maliyetlerinin yüksek olması ve boştaki kayıplarının yüksek olmasıdır. Bu yüzden volan sistemleri uzun zamanlı enerji depolama için uygun değildir. Buna ek olarak fiziksel olarak fazla yer kaplamaları sebebiyle de tercih edilmemektedir.

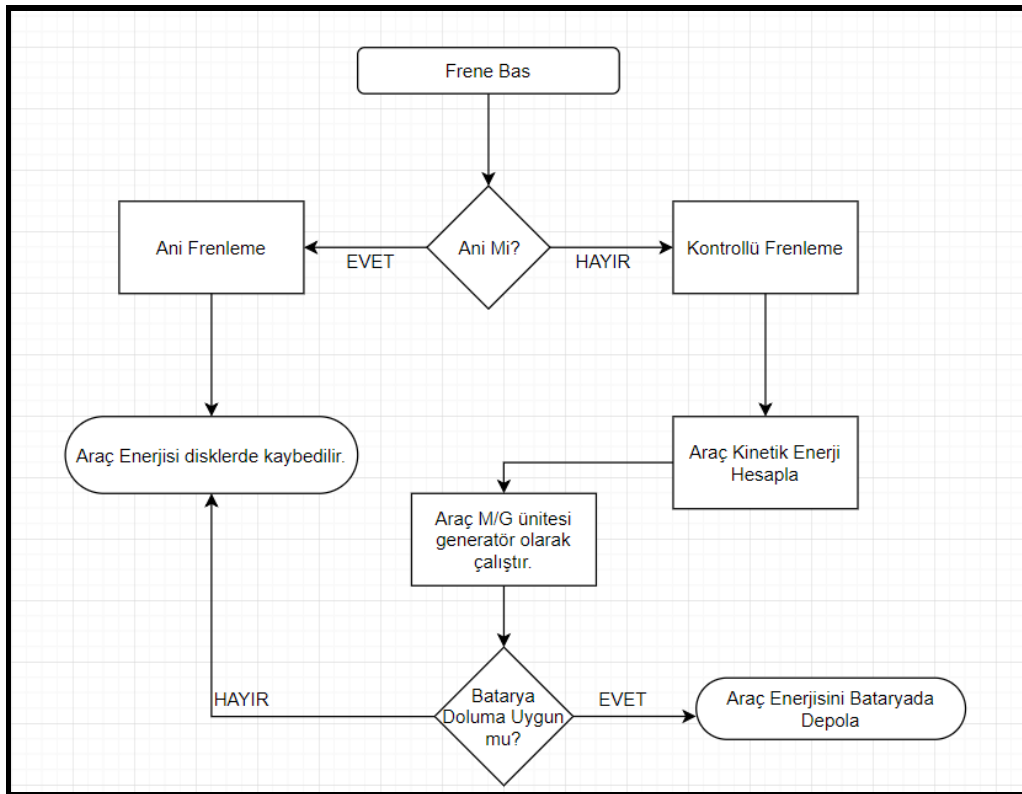


Şekil 3.8. Volan şematik görünümü [45]

#### 4. GÜNCEL TİCARİ ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ENERJİ ANALİZİ

Bu çalışma da; günümüzde kullanılan içten yanmalı motora sahip araçlara alternatif olarak geliştirilen elektrikli araçların çeşitleri ve teknik özellikleri incelenmektedir. 15 farklı araca ait olan; motor gücü, motor momenti, maksimum hız, hızlanma süresi (0-100 km/h), batarya şarj süresi, menzil, araç ağırlığı, batarya gerilimi ve batarya kapasitesi özellikleri dikkate alınarak bu çalışma geliştirilmiştir. 9 farklı teknik parametre seçilerek elektrikli araçlara ait matematiksel hesaplamalar yapılmış ve elde edilen değerler hesaplama kısmında detaylı olarak gösterilmektedir. Hesaplamalarda statik değişkenler incelenmiş, dinamik değişkenler göz önünde bulundurulmamıştır.

Bu hesaplamalardan ilki fiziğin temel formüllerinden olan kinetik enerji hesabı ile başlamaktadır. Devamında yapılan hesaplamalardan bazılarının birim dönüşümü olduğu görülmektedir. Diğer kullanılan formüllerin de birim analizi yapılarak doğruluğu kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4.1. Hesabı yapılan güncel ticari EA'larda frenleme algoritması

#### 4.1. Farklı Tip Elektrikli Araçların Enerji Analizi ve Kullanılan Parametreler

Hesaplama yönteminde kullanılan parametreler elektrikli araca ait bütün mevcut verim ve analiz hesaplamalarını yapmak için tercih edilmiş parametrelerdir. Kullanılan 9 parametre aşağıda detaylandırılmakta ve yapılan hesaplamalar adım adım verilmektedir. Baz alınan bu 9 parametre araçların marka ve modellerine göre farklılık göstermektedir. Hesabı yapılan 15 elektrikli araca ait 9 farklı parametre tablo halinde aşağıda verilmektedir.

Tablo 4.1. İncelenen 1. araca ait teknik bilgiler[46-47]

<b>Motor Gücü</b>	65 kW
<b>Motor Momenti</b>	220 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	135 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	13,3 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	6-9 saat
<b>Menzil</b>	210 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1468 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	400 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	22 kWh

Tablo 4.2. İncelenen 2. araca ait teknik bilgiler[48-49]

<b>Motor Gücü</b>	132 kW
<b>Motor Momenti</b>	340 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	160 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	7,9 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	4-5 saat
<b>Menzil</b>	200 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1625 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	380 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	28 kWh

Tablo 4.3. İncelenen 3. araca ait teknik bilgiler[50]

<b>Motor Gücü</b>	375 kW
<b>Motor Momenti</b>	649 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	250 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	3,2 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	1 saat
<b>Menzil</b>	572 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	2241 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	350 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	100 kWh

Tablo 4.4. İncelenen 4. araca ait teknik bilgiler[51-52]

<b>4.ARAÇ</b>	
<b>Motor Gücü</b>	107 kW
<b>Motor Momenti</b>	250 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	135 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	11,4 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	7 saat
<b>Menzil</b>	162 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1644 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	318 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	23 kWh

Tablo 4.5. İncelenen 5. araca ait teknik bilgiler[53]

<b>Motor Gücü</b>	125 kW
<b>Motor Momenti</b>	250 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	150 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	7,3 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	3-6 saat
<b>Menzil</b>	190 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1245 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	355 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	33 kWh

Tablo 4.6. İncelenen 6. araca ait teknik bilgiler[54-56]

<b>Motor Gücü</b>	12 kW
<b>Motor Momenti</b>	57 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	80 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	6,1 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	3,5 saat
<b>Menzil</b>	100 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	474 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	220 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	6,1 kWh

Tablo 4.7. İncelenen 7. araca ait teknik bilgiler[57-59]

<b>Motor Gücü</b>	110 kW
<b>Motor Momenti</b>	320 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	144 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	8,5 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	8 saat
<b>Menzil</b>	378 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1535 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	240 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	40 kWh

Tablo 4.8. İncelenen 8. araca ait teknik bilgiler[60-63]

<b>Motor Gücü</b>	83 kW
<b>Motor Momenti</b>	200 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	136 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	10 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	4 saat
<b>Menzil</b>	140 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1350 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	364 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	24 kWh

Tablo 4.9. İncelenen 9. araca ait teknik bilgiler[64-67]

<b>Motor Gücü</b>	85 kW
<b>Motor Momenti</b>	270 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	140 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	10,4 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	5 saat
<b>Menzil</b>	133 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1589 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	240 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	24,2 kWh

Tablo 4.10. İncelenen 10. araca ait teknik bilgiler[68-71]

<b>Motor Gücü</b>	150 kW
<b>Motor Momenti</b>	360 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	150 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	7,3 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	4 saat
<b>Menzil</b>	520 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1616 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	360 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	60 kWh

Tablo 4.11. İncelenen 11. araca ait teknik bilgiler[72-74]

<b>Motor Gücü</b>	80 kW
<b>Motor Momenti</b>	285 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	145 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	11,2 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	5 saat
<b>Menzil</b>	150 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1490 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	360 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	27 kWh

Tablo 4.12. İncelenen 12. araca ait teknik bilgiler[75-77]

<b>Motor Gücü</b>	50 kW
<b>Motor Momenti</b>	196 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	130 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	15,9 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	6 saat
<b>Menzil</b>	127 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1065 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	330 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	16 kWh

Tablo 4.13. İncelenen 13. araca ait teknik bilgiler[78-80]

<b>Motor Gücü</b>	49 kW
<b>Motor Momenti</b>	197 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	130 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	15,9 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	6 saat
<b>Menzil</b>	150 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1120 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	330 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	16 kWh

Tablo 4.14. İncelenen 14. araca ait teknik bilgiler[81-83]

<b>Motor Gücü</b>	90 kW
<b>Motor Momenti</b>	295 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	165 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	9,9 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	4 saat
<b>Menzil</b>	280 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1420 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	396 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	28 kWh

Tablo 4.15. İncelenen 15. araca ait teknik bilgiler[84-86]

<b>Motor Gücü</b>	50 kW
<b>Motor Momenti</b>	140 Nm
<b>Maksimum Hız</b>	110 km/h
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/h)</b>	7,3 s
<b>Batarya Şarj Süresi</b>	8 saat
<b>Menzil</b>	200 km
<b>Araç Ağırlığı</b>	1405 kg
<b>Batarya Gerilimi</b>	330 V
<b>Batarya Kapasitesi</b>	30 kWh

#### **4.1.1. Motor gücü**

Her marka ve model elektrikli aracın motor gücü farklılık göstermektedir. kW biriminde bulunan motor gücü araç üretici firma ile alakalı olup aracın maliyetini arttırdığı için yüksek değerlere çıkılamamaktadır. Bu değer birimi kW cinsindedir. İncelenen 15 araç arasında en yüksek motor gücü Tesla marka araca ait olup 375 kW'tır. Motor gücü tez içeriğinde aracın M/G ünitesi ile durma süresinin hesabında ve araçların M/G ünitesi ile yapılabilecek maksimum geri kazanımlı frenleme oranının hesabında kullanılmaktadır.

#### **4.1.2. Motor momenti**

İçten yanmalı motora sahip araçlara göre elektrikli araçlarda sürtünmenin olmayışı elektrikli araçların motor momentinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. 15 elektrikli aracın da farklı motor momentine sahip olması da yine marka ve modeller arası farklılıktan kaynaklanmaktadır. Birimi Nm'dir.

#### **4.1.3. Maksimum hız**

Bu parametrede de diğerlerinde olduğu gibi marka ve modeller arası farklılıktan kaynaklı değişiklikler görülmektedir. Aracın mevcut mesafede çıkabildiği en üst hız limiti olarak ifade edilmektedir. Yapılan inceleme ve hesaplarda birimi km/h olarak kullanılmaktadır.

#### **4.1.4. Hızlanma süresi (0-100 km/h)**

Bu parametre de her aracın durağan halden yani 0 km/h hızdan 100 km/h hıza gelinceye kadar geçen süre ifade edilmektedir. Karayolları genel müdürlüğünün verilerine göre ortalama bir aracın durağan halden 100 km/h hıza ulaşma süresi 4,7 saniye olarak verilmektedir. Bu çalışmada incelenen 15 elektrikli aracında durağan halden 100 km/h değere ulaşma süresi farklıdır. Bu parametrede de birim maksimum hız ile aynıdır.

#### **4.1.5. Batarya şarj süresi**

İncelenen her elektrikli aracın batarya grubu marka ve modele göre farklılık göstermektedir. Bu sebeple her aracın batarya şarj süresi de değişkendir. Elektrikli

araçtaki bataryanın şarj süresi ne kadar kısa ise batarya grubunun o kadar etkin ve kaliteli olduğu görülmektedir. İncelenen 15 elektrikli araç içerisinde batarya şarj süresi en kısa olanı Tesla aracıdır. Batarya şarj süreleri saat cinsinden tablo halinde verilmiştir. Araçlara ait batarya şarj süreleri, batarya şarj gücü hesabında kullanılmaktadır.

#### **4.1.6. Menzil**

Elektrikli araçlarda menzil, tam dolu haldeki mevcut batarya ile alınabilecek mesafe olarak ifade edilmektedir. İncelenen araçlara ait menzil değerleri de birbirinden farklılık göstermektedir. İki mesafe arasını ifade ettiği için km birimi kullanılmaktadır.

#### **4.1.7. Araç ağırlığı**

Bu parametrede marka ve model baz alınarak oluşturulan fiziksel bir özellik olup hesaplamalarda kullanılmaktadır. Her aracın ağırlığının birbirinden farklı olduğu aşağıda verilen tabloda görülmektedir. Bu parametre için araçların ağırlığı kg cinsinden kullanılmaktadır. Araç ağırlıkları her araca ait kinetik enerji hesabı yapılırken kullanılmaktadır.

#### **4.1.8. Batarya gerilimi**

Hesaplamalar kısmında kullanılan batarya gerilim değerleri araçların teknik analizinde kullanılan bir diğer parametredir. Birimi Volt (V)'tur. Her araca ait batarya gerilimi değerleri bataryanın şarj akımı hesabında kullanılmaktadır.

#### **4.1.9. Batarya kapasitesi**

Hesaplama yapılan elektrikli araçlar için batarya kapasitesi önemli bir değerdir. Diğer parametrelerde de olduğu gibi araç ve modele göre farklılık göstermektedir. En yüksek batarya kapasitesi incelemesi yapılan 15 elektrikli araç arasından Tesla aracına aittir. Birimi kWh'tir. Araçların batarya kapasitesi değerleri batarya şarj gücü hesabında kullanılmaktadır.



## 4.2. Analizi Yapılan 15 Elektrikli Araca Ait Matematiksel Hesaplama

İncelemesi yapılan 15 elektrikli araca ait dokuz ayrı parametre değerleri araçların resmi sitelerinden alınarak tablo haline getirilmiştir. Hesaplamalara ilk olarak her aracın kinetik enerjisi bulunarak başlanmaktadır. Bunun için fiziğin temeli olan kinetik enerji hesabı kullanılmaktadır. Elde edilen kinetik enerji değerleri araç motor güçleriyle oranlanarak araçların durma süreleri hesaplanmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine göre aracın 100 km/h hızdan 0'a inmesi 4,7 saniye olarak verilmektedir ve bu değer tez içerisinde referans olarak kullanılmaktadır.

İncelenen her aracın referans olan 4,7 saniyede ve tez içeriğinde daha net anlaşılması amacıyla 10. ve 20. Saniyelerdeki durması için gerekli fren gücü hesaplanmaktadır. Bu değer geri kazanımlı frenleme oranının hesabında kullanılmaktadır.

Hesaplamanın devamında araçlara ait motor gücü değerleri elde edilen fren güçleriyle oranlanarak her aracın geri kazanım % değerleri elde edilmektedir.

Son işlem basamağı olarak her aracın geri kazanımla frenleme %'lerinin ne kadarını faydalı olarak geri kazanabildiği hesaplanmaktadır. Bu aşamada ilk önce batarya şarj gücü-akımı hesabı yapılmaktadır. Elde edilen şarj gücü, fren gücü ile oranlanarak araç bataryalarının geri kazanım %'leri elde edilmektedir.

### 4.2.1. Kinetik enerji hesabı

İncelenen her araca ait geri kazanımlı frenleme %'sini hesaplayabilmek için ilk adım olarak tek tek kinetik enerji hesabı Denklem (4.1)'deki gibi;

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (4.1)$$

şeklinde olacaktır.

m : Her araca ait kütle (kg)

V : Elektrikli araçların hızı (100 km/h kabul edilerek)

Tablo 4.16. Hesabı yapılan tüm araçların kinetik enerji değerleri

Araç	Kinetik Enerji Değeri	Araç	Kinetik Enerji Değeri	Araç	Kinetik Enerji Değeri
1.Araç	157,2 Wh	6.Araç	50,7 Wh	11.Araç	159,5 Wh
2.Araç	174,04 Wh	7.Araç	164,4 Wh	12.Araç	114,1 Wh
3.Araç	240,02 Wh	8.Araç	144,6 Wh	13.Araç	119,9 Wh
4.Araç	176,08 Wh	9.Araç	170,2 Wh	14.Araç	152,1 Wh
5.Araç	133,3 Wh	10.Araç	173,1 Wh	15.Araç	150,4 Wh

#### 4.2.2. Araçların durma süresi (M/G ünitesi ile)

Yukarıda kinetik enerji değeri bulunan her araca ait frenleme gücünün hesaplanabilmesi için durma süreleri bulunmalıdır. Bunun için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$E(\text{Wh}) \times 3600 / 1000 = E(\text{kWs}) \quad (4.2)$$

$$t = E(\text{kWs}) / P \quad (4.3)$$

E(Wh) : Aracın kinetik enerjisi

P : Aracın motor gücü

t: M/G Ünitesi ile Durma Süresi

Tablo 4.17. Hesabı yapılan tüm araçların M/G ünitesiyle durma süreleri

Araç	M/G Ünitesi ile Durma Süreleri	Araç	M/G Ünitesi ile Durma Süreleri	Araç	M/G Ünitesi ile Durma Süreleri
1.Araç	8,7 s	6.Araç	15,2 s	11.Araç	7,1 s
2.Araç	4,7 s	7.Araç	5,3 s	12.Araç	8,2 s
3.Araç	2,8 s	8.Araç	6,2 s	13.Araç	8,8 s
4.Araç	5,9 s	9.Araç	7,2 s	14.Araç	6,0 s
5.Araç	3,8 s	10.Araç	4,1 s	15.Araç	10,8 s

#### 4.2.3. Araçların frenleme gücü

Yukarıda durma süreleri hesaplanan araçların frenleme gücü hesabı aşağıda verilen formül ile yapılmaktadır. Her araç için referans alınan 4,7 saniyede ve buna ilave olarak 10. ve 20. Saniyelerdeki frenleme gücü hesabı yapılmaktadır.

$$P_{\text{fren}} = \frac{E(\text{Wh})}{t(\text{h})} \quad (4.4)$$

İncelemesi yapılan 15 elektrikli araca ait frenleme gücü değerleri bir sonraki basamakta tablo halinde verilmektedir.

#### 4.2.4. M/G ünitesiyle yapacakları en çok geri kazanımlı frenleme oranı

Elektrikli araçların motor gücü, bir önceki basamakta elde edilen her aracın kendi fren gücüne oranlanarak M/G Ünitesi ile yapabilecekleri maksimum geri kazanımlı frenleme oranı elde dilmektedir.

$$[P_{\text{motor}} / P_{\text{Fren}}] \times 100 \quad (4.5)$$

Tablo 4.18. M/G frenleme gücü ve geri kazanımlı frenleme yüzdesi

Elektrikli Araç Modeli	Durma Süresi	M/G ile Frenleme Gücü	Yapılabilen Rejeneratif Frenleme %'si
1.Araç	4,7 s	120,9 kW	%53,7
	<b>8,7 s</b>	<b>65 kW</b>	
	10 s	58,2 kW	
	20 s	28,5 kW	
2.Araç	4,7 s	133,8 kW	%98,6
	<b>4,75 s</b>	<b>132 kW</b>	
	10 s	64,4 kW	
	20 s	31,6 kW	
3.Araç	<b>2,85 s</b>	<b>300 kW</b>	%100
	4,7 s	184,6 kW	
	10 s	88,1 kW	
	20 s	43,3 kW	
4.Araç	4,7 s	135,4 kW	%79,02
	<b>5,92 s</b>	<b>107 kW</b>	
	10 s	65,2 kW	
	20 s	32,1 kW	
5.Araç	<b>3,84 s</b>	<b>125 kW</b>	%100
	4,7 s	102,5 kW	
	10 s	49,03 kW	
	20 s	24,2 kW	
6.Araç	4,7 s	39 kW	%30,7
	10 s	18,7 kW	
	*15,21 s	12 kW	
	20 s	9,2 kW	

Tablo 4.19. M/G frenleme gücü ve geri kazanımlı frenleme yüzdesi devamı

7.Araç	4,7 s	126,4 kW	%87,02
	*5,38 s	110kW	
	10 s	60,8 kW	
	20 s	29,8 kW	
8.Araç	4,7 s	111,2 kW	%74,6
	*6,27 s	83 kW	
	10 s	53,5 kW	
	20 s	26,2 kW	
9.Araç	4,7 s	130,9 kW	%64,9
	*7,2 s	85 kW	
	10 s	63 kW	
	20 s	30,9 kW	
10.Araç	*4,15 s	150 kW	%100
	4,7 s	133,1 kW	
	10 s	64,1 kW	
	20 s	31,4 kW	
11.Araç	4,7 s	122,6 kW	%65,2
	*7,17 s	80 kW	
	10 s	59 kW	
	20 s	29 kW	
12.Araç	4,7 s	87,7 kW	%57
	*8,21 s	50 kW	
	10 s	42,2 kW	
	20 s	20,7 kW	
13.Araç	4,7 s	92,2 kW	%53,1
	*8,8 s	49 kW	
	10 s	44,4 kW	
	20 s	21,8 kW	
14.Araç	4,7 s	117 kW	%76,9
	*6,08 s	90 kW	
	10 s	56,3 kW	
	20 s	27,6 kW	
15.Araç	4,7 s	115,6 kW	%43,2
	10 s	55,7 kW	
	*10,82 s	50 kW	
	20 s	27,3 kW	

#### 4.2.5. Batarya şarj gücü – akımı

M/G Ünitesi ile yapabilecekleri maksimum geri kazanımlı frenleme oranları elde edikten sonra incelenmekte olan elektrikli araçların bu enerjinin ne kadarını faydalı olarak kullanabildiğine bakmak gerekmektedir. Bu yüzden aşağıda verilen formül kullanılarak batarya şarj gücü-akımı hesapları yapılmaktadır. Elde edilen veriler aşağıda tablo halinde verilmektedir.

$$P_{\text{şarj}} = \text{Batarya kapasitesi} / t_{\text{şarj}} \quad (4.6)$$

$$I_{\text{şarj}} = P_{\text{şarj}} / V_{\text{batarya}} \quad (4.7)$$

Tablo 4.20. Hesabı yapılan araçların batarya şarj gücü-akım sonuçları

Elektrikli Araç Modeli	Şarj Gücü	Şarj Akımı
1.araç	2,93 kW	7,325 A
2.araç	6,22 kW	16,36 A
3.araç	100 kW	285,71 A
4.araç	3,28 kW	10,31 A
5.araç	7,33 kW	20,64 A
6.araç	1,74 kW	7,92 A
7.araç	5 kW	20,8 A
8.araç	6 kW	16,4 A
9.araç	4,84 kW	20,1 A
10.araç	15 kW	41,6 A
11.araç	5,4 kW	1,5 A
12.araç	2,66 kW	8,1 A
13.araç	2,66 kW	8,1 A
14.araç	7 kW	17,6 A
15.araç	3,75 kW	11,3 A

#### 4.2.6. Araçların batarya kapasitelerine göre durma süresinin hesaplanması

İncelenmekte olan 15 elektrikli araca ait kinetik enerji değerleri 1 numaralı formül ile hesaplanmış ve bilgiler elimizde bulunmaktadır. Araçların kinetik enerji değerlerini şarj güçleriyle oranlayarak hareket halindeki her aracın motor gücü ile kendiliğinden durma süreleri hesaplanabilmektedir. Elde edilen bu süre değerleri araçların geri kazanımlı frenleme yetenekleri hakkında da bilgi vermektedir. Eğer araç kısa sürede kendi motor gücü ile durabiliyor ise geri kazanımlı frenleme yeteneği o oranla yüksek denilebilmektedir. Her aracın motor gücü ile durma süresi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$E(W_h) \times (3600s/1h) = E(W_s) \quad (4.8)$$

$$E(W_s)/P_{\text{şarj}} = t_{\text{durma}} \quad (4.9)$$

Tablo 4.21. İlk 5 aracın geri kazanımlı frenleme değeri(batarya)

1.Araç		2.Araç		3.Araç		4.Araç		5.Araç	
Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü
193 s	2,93 kW	101s	6,22 kW	8,6 s	100 kW	193 s	3,28 kW	65 s	7,33 kW

Tablo 4.22. İkinci 5 aracın geri kazanımlı frenleme değeri(batarya)

6.Araç		7.Araç		8.Araç		9.Araç		10.Araç	
Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü
104 s	1,74 kW	118 s	5 kW	86 s	6 kW	126 s	4,84 kW	41 s	15 kW

Tablo 4.23. Son 5 aracın geri kazanımlı frenleme değeri(batarya)

11.Araç		12.Araç		13.Araç		14.Araç		15.Araç	
Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü	Zaman	Batarya şarj kapasitesine göre Frenleme Gücü
106 s	5,4 kW	154 s	2,66 kW	162 s	2,66 kW	78 s	7 kW	144 s	3,75 kW

#### 4.2.7. Batarya ile yapılabilecek maksimum geri kazanımlı frenleme oranı

Bir zincir halinde devam eden matematiksel çözümler sonrası son olarak maksimum geri kazanımlı frenleme hesabı yapılmaktadır. Elde edilen bu son veriler incelenmekte olan 15 elektrikli araç hakkında en net bilgiyi vermektedir. Maksimum geri kazanımlı frenleme oranı ne kadar yüksek ise elektrikli aracın menzili o kadar

fazladır denilebilmektedir. Aşağıdaki formül kullanılarak maksimum geri kazanımlı frenleme oranları elde edilmektedir.

$$[P_{\text{şarj}} / P_{\text{Fren}}] \times 100 \quad (4.10)$$

Tablo 4.24. Araç bataryasıyla yapılabilecek max geri kazanımlı frenleme

Araçlar	Geri Kazanımlı % Oranı	Araçlar	Geri Kazanımlı % Oranı	Araçlar	Geri Kazanımlı % Oranı
1.araç	2,42	6.araç	4,46	11.araç	4,4
2.araç	4,64	7.araç	3,95	12.araç	3
3.araç	54,17	8.araç	5,4	13.araç	2,88
4.araç	2,42	9.araç	3,7	14.araç	5,98
5.araç	7,15	10.araç	11,2	15.araç	3,24

Analizi yapılan araçlar genel olarak 2 kısımda incelenmektedir. Araçları öncelikle ilk kısım olan M/G ünitesi tarafıyla analiz etmek gerekmektedir. Öncelikle kinetik enerji hesabı yapılan elektrikli araçların, M/G ünitesi tarafından durma süreleri elde edilir. Devamında buna bağlı olarak frenleme gücü hesabı yapılmaktadır. Bu matematiksel ifadelerin sonucunda her bir elektrikli aracın M/G ünitesi tarafından yapabileceği geri kazanımlı frenleme yüzdesi (yeteneği) elde edilmektedir.

Aracın ikinci kısmı olarak batarya grubu incelenmektedir. Bu kısımda yapılan batarya şarj gücü-akımı değerlerine göre elektrikli araçların bu kez de batarya tarafından frenleme gücü kıyaslaması yapılmaktadır. Ayrıca bu matematiksel hesaplamalar doğrultusunda her elektrikli aracın kendi motor gücü ile tamamen (%100) geri kazanımlı frenleme yaptığı düşünülerek hesap edilen durma süreleri tablo 4.2’de verilmektedir.

Son olarak; elektrikli araç bir bütün halinde düşünülürse, her elektrikli aracın birinci ve ikinci kısmına dair matematiksel hesaplamaları yapılır ve araçların şarj gücü, fren gücüne oranlanarak yüzdesel geri kazanımlı frenleme değerleri elde edilmektedir. Bu değerler her elektrikli aracın M/G ünitesi tarafından hesabı yapılan geri kazanımlı frenleme yeteneğinin ne kadarını faydalı enerji olarak kullanabildiğini göstermektedir.

Teknik analizi yapılan 15 elektrikli araca ait M/G ünitesi ile durma süreleri incelendiğinde motor gücü büyük olan aracın daha kısa sürede durduğu

görülmektedir. Dolayısıyla M/G ünitesi ile daha kısa sürede duran aracın frenleme gücünün aynı oranda yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçların ışığında M/G ünitesi tarafından yapılabilen geri kazanımlı frenleme yüzdeleri gösteriyor ki; durma süresi kısa ve frenleme gücü yüksek olan elektrikli aracın geri kazanımlı frenleme yüzdesi de o oranda yüksek olmaktadır.

İncelenen elektrikli araçların 2.kısımında yani batarya grubuna bakıldığında aracın batarya kapasitesi ile şarj gücünün orantılı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak batarya gerilimi düşük olan araçların şarj akımlarının yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Elektrikli aracın geri kazanımlı frenleme yeteneğini ortaya koyan nihai parametreler şarj gücü ve fren gücüdür. Bu iki değer yüzdesel oranı her elektrikli araca ait geri kazanımlı frenleme yüzdesini göstermektedir.

İncelenen 15 elektrikli araç arasında en yüksek geri kazanımlı frenleme yeteneğine sahip olan 3.araçtır. Elde edilen matematiksel sonuçlara göre aracın motor gücü ve motor momenti yüksek seçilmelidir. Bu iki değer elektrikli aracın ilk kısmı olan M/G ünitesinin faydalı frenleme yeteneğini en çok etkileyen iki parametredir. Elektrikli araç geri kazanımlı frenleme yeteneğini sınırlayan kısım batarya kapasitesidir. Bu yüzden batarya kapasitesi yüksek araç tercih edilmelidir. Batarya kapasitesi yüksek olan araç geri kazanımlı frenleme yeteneğini faydalı şekilde kullanabilen araç demektir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; elektrikli araçların frenleme mekanizması üzerine matematiksel incelemeler yapıldı. Elektrikli araçların tarihi gelişimi incelendi. Elektrikli araçların en önemli negatif unsuru olan kısa menzillerine çözüm üretmek amacıyla geri kazanımlı frenleme üzerine çalışıldı. Bu tez içeriğinde 15 farklı model ve marka elektrikli araç belirlendi. Belirlenen bu araçların teknik özellikleri resmi web sitelerinden elde edilerek tablo haline getirildi. Tez içeriği boyunca yapılan matematiksel hesaplamalar sonucu geri kazanımlı frenleme oranı yüksek olan araçların menzillerinin daha fazla olduğu sonucu elde edildi. Ayrıca yapılan araştırmalar sonucunda araçların kontrollü frenleme ile mevcut kinetik enerjilerini araç bataryalarında depo ederek menzil mesafelerine katkı sağlamaları gerektiği ortaya konuldu. Aksi takdirde ani frenleme yapan elektrikli araçlarda geri kazanımlı frenleme yapamayacağı ve aracın kinetik enerjisinin balata ile disklerde ısı enerjisine dönüştürülerek dışarı atılacağı ortaya konulmaktadır.

Tez çalışmasının asıl amacı 15 farklı teknik özelliğe sahip elektrikli aracın geri kazanımlı enerji yüzdelerinin hesaplanması ve yüksek verime sahip olan aracın ne gibi özelliklere sahip olduğunun ortaya konulmasıdır.

Yapılan hesaplamalar sonucu elektrikli araçların M/G ünitesi ile yapabilecekleri maksimum geri kazanımlı frenleme oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Motor güçleriyle orantılı olan geri kazanımlı frenleme miktarları %100 geri kazanımlı frenlemeye izin verse dahi aracın bataryası bu oranı kısıtlamaktadır. Burada önemli olan maksimum geri kazanımlı frenleme oranının ne kadarının faydalı enerji olarak kullanılabilirdiğidir.

İncelenen araçlar arasında M/G ünitesi tarafında %100 geri kazanımlı frenleme yeteneğine sahip araçlar olduğu görülmektedir. Örnek olarak bu özelliğe sahip olan 3.arac ve 5.arac kıyaslanacak olursa; ikisinin de M/G ünitesi tarafında %100 geri kazanımlı frenleme yeteneği olduğu halde batarya teknolojilerinin farklılığı sebebiyle

3. araç %54,17 oranında bu enerjiyi geri kazanırken 5. araçta bu oranın %7,15'te kaldığı görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi elektrikli araçlarda belirleyici unsurun batarya grubu olduğu görülmektedir. Genellikle geri kazanımlı frenleme oranını sınırlayan etken, batarya maksimum şarj akımı değerleridir.

Elektrikli araçların teknik özelliklerine bakıldığında geri kazanımlı frenleme yüzdesinin aracın şarj süresiyle ilişkili olduğu da görülmektedir. Eğer elektrikli araçta hızlı şarj özelliği varsa yani bataryasının tam dolun süresi kısa ise geri kazanımlı frenleme enerjisini büyük oranda bataryaya depolaması mümkün demektir. Bataryaları yüksek akımla şarja uyumlu olmayan yani hızlı şarj özelliği olmayan elektrikli araçlarda geri kazanımlı frenleme enerjisinin depolanabilmesi için ise ultra-kapasitör ve volan gibi güç yoğunlukları yüksek teknolojilerin kullanımı gerekmektedir. Ultra-kapasitör ve volan gibi teknolojilerin verimi batarya teknolojilerinden %95 daha yüksektir. Volanın fiziksel olarak büyük ve ağır oluşu tercih edilmemesine sebep olmaktadır. Ultra-kapasitörlerin de lityum iyon piller ile benzerlik göstermesi sonucu ekonomik olarak maliyetlerinin yüksekliği sebebiyle tercih edilmemektedir. Bu yüzden geliştirilmekte olan elektrikli araçlarda depolama sistemi olarak çoğunlukla bataryalar tercih edilmektedir. Batarya seçenekleri arasında en fazla kullanılanı ise kurşun asit piller ve lityum iyon pillerdir. Bunların en önemli sebebi ise ekonomik ve sisteme hızlı cevap vermeleridir.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/trafik/durmaintikal.aspx>, (Ziyaret Tarihi : 17 Haziran 2018).
- [2] Lv C., Zhang J., Li Y., and Yuan Y., Mechanism Analysis and Evaluation Methodology of Regenerative Braking Contribution to Energy Efficiency Improvement of Electrified Vehicles, *Energy Conversion and Management*, 2015, **92**, 469–482.
- [3] Qiu C., Wang G., New Evaluation Methodology of Regenerative Braking Contribution to Energy Efficiency Improvement of Electric Vehicles, *Energy Conversion and Management*, 2016, **119**, 389–398.
- [4] Li L., Li X., Wang X., Song J., He K., Li C., Analysis of Downshift's Improvement to Energy Efficiency of an Electric Vehicle During Regenerative Braking *Applied Energy*, 2016, **176**, 125–137.
- [5] Itani K., Bernardinis A., Member, IEEE, Khatir Z., Member, IEEE, Jammal A., Member S., IEEE, Oueidat M, Regenerative Braking Modeling, Control, and Simulation of a Hybrid Energy Storage System for an Electric Vehicle in Extreme Conditions, *IEEE Transaction on Transportation Electrification*, 2016, **4**, 464-479.
- [6] Lu S., Weston P., Hillmansen S., Gooi H., Roberts C., Increasing the Regenerative Braking Energy for Railway Vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **6**, 2506-2515.
- [7] M. Ji-Yank ve et.al., A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **6**, 2203-2212.
- [8] Gökçe C., Üstün Ö., Elektrikli Araçlarda Tam Elektrikli Frenleme İçin Bulanık Mantık Tabanlı Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulaması, 21.01.2015 Geliş/Received, 2015, *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, **3**, 339-352.
- [9] Şahin Y., Güneş U., Umman F., Ceceloğlu A., Güner H.E., Ertunç H.M., Bulanık Mantık Kontrollü Rejeneratif Frenleme Sistemi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, *TOK'2015*, Denizli, 10-12 Eylül 2015.
- [10] Erhan K., Ayaz M., Özdemir E., Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Güç Kalitesi Üzerine Etkileri, *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 26 Nisan 2013.

- [11] <http://www.dunyaninilkleri.com/ilkler/dunyadaki-ilk-elektrikli-araba.html>, (Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2017).
- [12] [http://www.normenerji.com.tr/menus/elektrikli-araclar\\_190220120138391025288910.pdf](http://www.normenerji.com.tr/menus/elektrikli-araclar_190220120138391025288910.pdf), (Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2017).
- [13] Kerem A., Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi FBE Dergisi*, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İstiklal Yerleşkesi, Burdur, 2014, **5**, 1-13.
- [14] [https://spea.indiana.edu/doc/research/TEP\\_combined.pdf](https://spea.indiana.edu/doc/research/TEP_combined.pdf), (Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2017).
- [15] <https://www.plugincars.com/sites/default/files/PEV-10-Executive-Summary.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2017).
- [16] <http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/yollardaki-enerji-donusumu>, (Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2017).
- [17] [www.avrupa.info.tr/sites/default/files/2016-08/brachure3v2.pdf](http://www.avrupa.info.tr/sites/default/files/2016-08/brachure3v2.pdf), (Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2017).
- [18] Foley A.M., Winning, I.J., Gallachoir, B.P.O. State of the Art Electric Vehicle Charging Infrastructure, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, France, 1 September, 2010.
- [19] [http://www.evworld.com/library/EPRI\\_sedan\\_options.pdf](http://www.evworld.com/library/EPRI_sedan_options.pdf)
- [20] Morrow K., Karner D., Francfort J., Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, *Vehicle Technologies Program- Advance vehicle Testing Activity*, 58517, November 2008.
- [21] [http://www.acemogluotomotiv.com.tr/Araclar-Yeni\\_Fabia-1-Teknoloji-3](http://www.acemogluotomotiv.com.tr/Araclar-Yeni_Fabia-1-Teknoloji-3), (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018)
- [22] Altındemir E., Hibrid Elektrikli Taşıtlarda Rejeneratif Frenleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 251116.
- [23] Doğan U., Erfidan T., Bilgin M.Z., Elektrikli Araçlarda Faydalı Frenleme Enerjisinin Depolanması, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2016, **5**, 41-51.
- [24] Muratoğlu Y., Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum İyon Pillerin Şarj Durumlarının Kokusuz Kalman Filtresi ile Kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2017, 465192.
- [25] Büyükyıldız D., Rüzgar Enerjisi Destekli Aslantaj Pompaj Biriktirmeli Hidroelektrik Santrali Örnek Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2012, 333061.

- [26] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/leadacid.html>, (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [27] [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/43700/mod\\_resource/content/0/Hafta2.2-Enerji%20depolama%20y%C3%B6ntemleri.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/43700/mod_resource/content/0/Hafta2.2-Enerji%20depolama%20y%C3%B6ntemleri.pdf), (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [28] Broussely, M., Pistoia, G., *Industrial Applications of Batteries*, 1st ed., Elsevier, United Kingdom, 2007.
- [29] <http://www.unitedpower-tech.com/en/list-6-85.html>, (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [30] Kiehne H. A., *Battery Technology Handbook*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York-USA, 2003.
- [31] <https://the-grayline.com/tag/nimh/>, (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [32] Breeze P., *Power System Energy Storage Technologies*, 1st ed., Academic Press, United Kingdom, 2018.
- [33] <https://www.elektrikport.com/makale-detay/elektrikli-arac-aku-sistemleri/4398#ad-image-0>, (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [34] [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcScnRnSel4ZCaF7PBfIV4DizSKSry8hZPv8DXR4yxBH\\_nhUhun9](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcScnRnSel4ZCaF7PBfIV4DizSKSry8hZPv8DXR4yxBH_nhUhun9), (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [35] Muratoğlu Y., Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum İyon Pillerin Şarj Durumlarının Kokusuz Kalman Filtresi ile Kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2017, 465192.
- [36] <http://docplayer.biz.tr/930607-Otomotiv-elektronigindeki-gelismeler.html> (Ziyaret Tarihi: 30.12.2018)
- [37] Schindall J., The Charge of the Ultracapacitors, *IEEE Spectrum*, 2007, **44**(11), 42-46.
- [38] Brandhorst H.W. Jr. and Chen Z., Achieving a High Pulse Power System Through Engineering the Battery-capacitor Combination, *The Sixteenth Annual Battery Conference*, USA, 12 January 2001.
- [39] Faggiolia E., Renaa P., Danell V., Andrieu X., Mallant R. and Kahlen H., Supercapacitors for the Energy Management of Electric Vehicles, *Journal of Power Sources*, 1999, **84**(2),261-269.
- [40] <https://turkish.alibaba.com/product-detail/650f-2-7v-edlc-ls-ultra-capacitor-138282375.html>, (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).

- [41] Hadjipaschalis I., Poullikkas A. and Efthimiou V., Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(6-7),1513–1522.
- [42] [https://www.elektrikport.com/admin/uploads/haber-ici-resimler/Resim2\(7\).jpg](https://www.elektrikport.com/admin/uploads/haber-ici-resimler/Resim2(7).jpg) , (Ziyaret Tarihi : 30.12.2018).
- [43] Liu H. and Jiang J., Flywheel Energy Storage—An Upswing Technology for Energy Sustainability, *Energy and Buildings*, 2007, **39**(5),599–604.
- [44] Hadjipaschalis I., Poullikkas A. and Efthimiou V., Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(6-7),1513–1522.
- [45] Erdiñç O., Uzunođlu M., Vural B., Hibrit Alternatf Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri, Makale, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2011.
- [46] <https://www.epey.com/araba/2015-renault-zoe-88-bg-elektrik.html>, (Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [47] <https://www.cdn.renault.com/content/dam/Renault/TR/global-brochures/ZOE.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [48] <http://www.plugincars.com/mercedes-b-class-e-cell>, (Ziyaret Tarihi : 7 Mart 2018 ).
- [49] <http://www.cars-data.com/en/mercedes-b-250-e-business-solution-specs/76367>,(Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [50] <https://www.guideautoweb.com/en/makes/tesla/model-s/2018/specifications/p100d/>, (Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [51] <http://www.cars-data.com/en/ford-focus-electric-specs/70375>, (Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [52] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/batteryFocus8207.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [53] <https://www.bmw.com.tr/tr/all-models/bmw-i/i3/2017/technical-data.html#tab-0>,(Ziyaret Tarihi: 7 Mart 2018).
- [54] <http://arabamkacyakar.com/elektrikli-arabalar/renault-twizy-tuketim-degerleri-ve-teknik-ozellikleri> (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [55] <http://www.otomobiltavsiyesi.com/v/renault-twizy/>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [56] <http://www.cars-data.com/en/renault-twizy-urban-specs/59485>, (Ziyaret Tarihi : 28 Nisan 2018).

- [57] <https://www.ototeknikveri.com/haber/11107/yeni-nissan-leaf-ozellikleri-ve-detaylari>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [58] <https://tr.motor1.com/news/226198/yeni-nissan-leaf-menzili-aciklandi/>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [59] <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf.html>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [60] <https://www.leftlanenews.com/new-car-buying/fiat/500e/specifications/>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [61] <http://www.arslania.com/fiat-500e-fiyatlari-ozellikleri.html>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [62] <http://www.fiat500usa.com/2013/04/fiat-500e-full-vehicle-specifications.html>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [63] <http://www.otomobilgunlugu.net/2013-fiat-500e-elektrikli-versiyon/>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [64] <http://www.volkswagengrubu.com/yeni-volkswagen-e-golf-7-ozellikleri-ile-taniyalim/>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [65] <http://www.automotorsport.com.tr/volkswagen-e-golfun-menzili-arttirildi/1500>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [66] <https://tr.motor1.com/news/179758/vw-egolf-menzil-guncelleme/>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [67] <https://www.caranddriver.com/reviews/2016-volkswagen-e-golf-electric-vehicle-test-review>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [68] <https://www.auto-data.net/tr/opel-ampera-e-60-kwh-204hp-cvt-32339>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [69] <https://forum.donanimhaber.com/opel-ampera-test-surusu-100-elektrik-150beygir-370nm-tork--60783287>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [70] <https://forum.donanimhaber.com/opel-ampera-test-surusu-100-elektrik-150beygir-370nm-tork--60783287>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [71] <http://www.altomelbilen.dk/presentationer/Electric%20system%20for%20Opel%20Ampera.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 29 Nisan 2018).
- [72] <https://www.auto-data.net/tr/kia-soul-ev-27-kwh-110hp-edit-22374>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [73] <http://www.arabainceleme.com/2014/02/elektrikli-kia-soul-ev.html>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).

- [74] <https://www.kia.com/us/en/vehicle/soul-ev/2017/features>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [75] <https://www.auto-data.net/tr/peugeot-ion-16-kwh-67hp-20976>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [76] <https://pod-point.com/landing-pages/peugeot-ion-charging>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [77] <http://www.cars-data.com/en/peugeot-ion-specs/72433>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [78] [https://www.autoevolution.com/cars/citroen-c-zero-2010.html#engineering\\_citroen-c-zero-2010-airdream-high-line](https://www.autoevolution.com/cars/citroen-c-zero-2010.html#engineering_citroen-c-zero-2010-airdream-high-line), (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [79] <http://carsopedia.com/tr/catalog/citroen/c-zero/c-zero/electric-car-c-zero-2010-14226/>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [80] <https://versus.com/tr/citroen-c-zero-2014>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [81] <https://www.auto-data.net/tr/hyundai-ioniq-elektro-28-kwh-120hp-cvt-30667>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [82] <https://pod-point.com/landing-pages/hyundai-ioniq-charging>, (Ziyaret Tarihi : 28 Nisan 2018).
- [83] <https://pushevs.com/2016/03/02/hyundai-ioniq-electric-compatible-with-100-kw-ccs/>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018),
- [84] <https://www.auto-data.net/tr/citroen-e-mehari-30-kwh-68hp-23715>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).
- [85] <https://www.log.com.tr/sinirli-uretim-elektrikliye-stil-dokunusu-citroen-e-mehari-by-courreges-limited-edition/> (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018)
- [86] <https://insideevs.com/citroen-e-mehari-debuts-real-electric-goes-sale-2016/>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2018).



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Özdemir E., Erhan K., **Varol G.**, Elektrikli Araçlarda Enerji Depolama Sistemlerinin İncelenmesi ve Geri Kazanımlı Frenleme Kapasitesinin Arttırılması, *3. Uluslararası Matematik, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Kongresi*, Mardin, 21-22 Nisan 2018.



## **ÖZGEÇMİŞ**

1992 yılında Kütahya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kütahya’da tamamladı. 2010 yılında Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2016 yılında Yalova Üniversitesi’nden mezun oldu. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dal’ında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

