

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**L7E SINIFI ELEKTRİKLİ ARAÇ GÜÇ HESAPLAMASI VE  
BATARYA PAKETİ TASARIMI**

**Ömer Oğuz SOYDAŞ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman  
Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ

January, 2022

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**L7E SINIFI ELEKTRİKLİ ARAÇ GÜÇ HESAPLAMASI VE BATARYA  
PAKETİ TASARIMI**

Ömer Oğuz SOYDAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 15.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Otomotiv Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Övün Işın, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tiryaki, Üye  
İstanbul Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Danışmanım Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan L7E Sınıfı Elektrikli Araç Güç Hesaplaması ve Batarya Paketi Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ömer Oğuz SOYDAŞ

İmza





## TEŞEKKÜR

---

Tez hazırlama süresince bana her türlü desteği sağlayan, mühendislik bakış açısı ile sorunları çözmeme yardımcı olan sayın hocam Doç. Dr. Alp Tekin Ergenç'e teşekkürlerimi sunarım. Tez yazım sürecinde her zaman motivasyonumu yüksek tutan değerli aileme teşekkürü borç bilirim.

Ömer Oğuz SOYDAŞ

# İÇİNDEKİLER

---

|                                                            |             |
|------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>                                       | <b>viii</b> |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                                    | <b>ix</b>   |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                       | <b>x</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                       | <b>xii</b>  |
| <b>ÖZET</b>                                                | <b>xiii</b> |
| <b>ABSTRACT</b>                                            | <b>xiv</b>  |
| <b>1 GİRİŞ</b>                                             | <b>1</b>    |
| 1.1 Literatür İncelemesi . . . . .                         | 2           |
| 1.2 Tezin Amacı . . . . .                                  | 6           |
| 1.3 Hipotez . . . . .                                      | 6           |
| <b>2 BATARYA VE ELEKTRİKLİ MOTOR SİSTEMLERİ</b>            | <b>7</b>    |
| 2.1 Batarya Paketi ve Alt Sistemleri . . . . .             | 7           |
| 2.1.1 Lityum İyon Hücre . . . . .                          | 7           |
| 2.1.2 Modül . . . . .                                      | 9           |
| 2.1.3 Batarya Paketi . . . . .                             | 10          |
| 2.1.4 Batarya Paketi Alt Üniteleri . . . . .               | 10          |
| 2.2 Elektrik Motoru . . . . .                              | 13          |
| 2.2.1 Fırçalı Doğru Akım Motor . . . . .                   | 13          |
| 2.2.2 Sabit Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor . . . . . | 14          |
| 2.2.3 İndüksiyon Motoru . . . . .                          | 15          |
| 2.3 Araç Tanımı . . . . .                                  | 16          |
| 2.3.1 Homologasyon Kategorisi . . . . .                    | 16          |
| 2.3.2 Araç Değerleri . . . . .                             | 17          |
| 2.4 Araç Modellemesi . . . . .                             | 18          |
| 2.4.1 WLTP Sürüş Çevrimi . . . . .                         | 18          |
| 2.4.2 Sürüş Dirençleri . . . . .                           | 20          |
| 2.4.3 Rejeneratif Frenleme . . . . .                       | 23          |

|          |                                        |           |
|----------|----------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>BATARYA VE MOTOR TASARIMI</b>       | <b>24</b> |
| 3.1      | Güç Aktarım Elemanları . . . . .       | 24        |
| 3.1.1    | Motor . . . . .                        | 24        |
| 3.1.2    | Vites Kutusu . . . . .                 | 24        |
| 3.1.3    | Elektrik Kontrol Ünitesi . . . . .     | 25        |
| 3.1.4    | Sürüş Simülasyonu . . . . .            | 26        |
| 3.1.5    | WLTP Sürüş Çevrimi Sonuçları . . . . . | 27        |
| 3.2      | Batarya Paketi Tasarımı . . . . .      | 33        |
| 3.2.1    | Hücre Seçimi . . . . .                 | 35        |
| 3.2.2    | Modül Konfigürasyonu . . . . .         | 36        |
| 3.2.3    | Modül Tasarım Detayları . . . . .      | 37        |
| <b>4</b> | <b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>               | <b>41</b> |
|          | <b>KAYNAKÇA</b>                        | <b>42</b> |
|          | <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>       | <b>44</b> |



## SİMGE LİSTESİ

---

|        |                                          |
|--------|------------------------------------------|
| $F_I$  | Araca Etkiyen İvmelenme Kuvveti          |
| $F_D$  | Araca Etkiyen Rüzgar Direnci Kuvveti     |
| $F_T$  | Araca Etkiyen Toplam Kuvvet              |
| $F_Y$  | Araca Etkiyen Yokuş Direnci Kuvveti      |
| $F_R$  | Araca Etkiyen Yuvarlanma Direnci Kuvveti |
| $m$    | Araç Kütlesi                             |
| $A$    | Araç Ön Yüzey Alanı                      |
| $C_D$  | Araç Sürtünme Katsayısı                  |
| $\rho$ | Hava Yoğunluğu                           |
| $g$    | Yerçekimi İvmesi                         |
| $C_R$  | Yuvarlanma Direnci Katsayısı             |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|         |                                                   |
|---------|---------------------------------------------------|
| BKÜ     | Batarya Kontrol Ünitesi                           |
| SOC     | Batarya Paketi Şarj Doluluk Oranı                 |
| BYS     | Batarya Yönetim Sistemi                           |
| DA      | Doğru Akım                                        |
| ECU     | Elektronik Kontrol Ünitesi                        |
| LiFePo4 | Lityum Demir Fosfat Hücre                         |
| LTO     | Lityum Titanat Hücre                              |
| NEDC    | New European Driving Cycle                        |
| PTC     | Positive Temperature Coefficient                  |
| WLTP    | Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                                                 |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1  | Alke elektrikli araç seçeneklerinden biri . . . . .                                                                             | 3  |
| Şekil 2.1  | Farklı hücre tipleri ve iç katman yapılarının karşılaştırılması . . . . .                                                       | 9  |
| Şekil 2.2  | Modül içi hücre bağlantısı elektrik şeması[6] . . . . .                                                                         | 9  |
| Şekil 2.3  | Hücreden modüle ve modülden pakete geçiş[7] . . . . .                                                                           | 10 |
| Şekil 2.4  | Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan kontaktörlerden biri[8] . . . . .                                                  | 11 |
| Şekil 2.5  | Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan sigortalardan biri[9] . . . . .                                                    | 11 |
| Şekil 2.6  | Bir elektrikli motor ve benzer içten yanmalı motorun tork/devir grafiği [15] . . . . .                                          | 13 |
| Şekil 2.7  | Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motorların Genel Tork ve Devir Grafiği . . . . .                                                    | 14 |
| Şekil 2.8  | Sabit mıknatıs motor ve indüksiyon motorun karşılaştırması [19] . . . . .                                                       | 15 |
| Şekil 2.9  | Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motorların Genel Tork ve Devir Grafiği . . . . .                                                    | 17 |
| Şekil 2.10 | WLTP sürüş çevrimi hız/zaman(a) ve ivme/zaman(b) grafiği . . . . .                                                              | 19 |
| Şekil 2.11 | Sabit hızda sürüşte araca etkiyen dirençlerin gösterimi[20] . . . . .                                                           | 20 |
| Şekil 2.12 | Yuvarlanma direnci ve hıza bağlı değişimi[21] . . . . .                                                                         | 21 |
| Şekil 2.13 | Bir aracın ön kesit alanı . . . . .                                                                                             | 22 |
| Şekil 2.14 | Yol dirençleri ve tüketime etkilerinin kıyaslanması[21] . . . . .                                                               | 22 |
| Şekil 2.15 | Bir elektrikli araç simülasyonunda rejeneratif frenlemenin hız, şarj durumu ve fren pedal pozisyonu ile gösterimi[23] . . . . . | 23 |
| Şekil 3.1  | Kullanılan AC Motor Tork Devir Eğrisi . . . . .                                                                                 | 25 |
| Şekil 3.2  | MATLAB’de motor ve batarya ile koşturulan sürüş çevrimi . . . . .                                                               | 27 |
| Şekil 3.3  | MATLAB’de koşturulan aracın bataryasından alınan güç değerleri . . . . .                                                        | 28 |
| Şekil 3.4  | MATLAB’de ardışık 5 defa koşturulan WLTP Sınıf 1 batarya kapasite tüketim değerleri . . . . .                                   | 29 |
| Şekil 3.5  | Yol Eğimlerinin Gösterilmesi . . . . .                                                                                          | 30 |
| Şekil 3.6  | Yol Eğimlerinin Gösterilmesi . . . . .                                                                                          | 31 |
| Şekil 3.7  | Yol Eğimlerinin Gösterilmesi . . . . .                                                                                          | 32 |
| Şekil 3.8  | MATLAB’de tek sefer koşturulan WLTP Sınıf 1 batarya çıkış gerilimi . . . . .                                                    | 33 |
| Şekil 3.9  | Sürüş sırasında batarya paketinden talep edilen akım seviyeleri grafiği . . . . .                                               | 34 |
| Şekil 3.10 | Seçilen CATL LiFePO4 Hücrenin Değerleri . . . . .                                                                               | 35 |
| Şekil 3.11 | Modül içerisindeki elektriksel bağlantı konfigürasyonu . . . . .                                                                | 36 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.12</b> Modül konfigürasyonuna göre tasarlanmış 3B model ve bara bağlantıları . . . . .        | 37 |
| <b>Şekil 3.13</b> Modül konfigürasyonuna göre tasarlanmış 3B model ve bara bağlantıları . . . . .        | 38 |
| <b>Şekil 3.14</b> Batarya paketinin güç çıkışında kullanılacak olan rakor bağlantısı parçaları . . . . . | 38 |
| <b>Şekil 3.15</b> İzmir şehrinin aylık bazda bir yıllık sıcaklık dağılımları grafiği . . . .             | 39 |
| <b>Şekil 3.16</b> 5 defa art arda WLTP sürüş çevrimi sırasında batarya hücre sıcaklıkları                | 39 |
| <b>Şekil 3.17</b> Ankara şehrinin aylık bazda bir yıllık sıcaklık dağılımları grafiği . . .              | 40 |



## TABLO LİSTESİ

---

|                  |                                                                                                       |    |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1</b> | Aixam Hafif L7e Elektrikli Araç Aktarma Organı Detay Bilgileri . . .                                  | 2  |
| <b>Tablo 1.2</b> | Aixam Hafif L7e Elektrikli Araç Ölçüleri Detay Bilgileri (mm) . . . .                                 | 3  |
| <b>Tablo 1.3</b> | Alke Hafif L7e Elektrikli Araç Ölçüleri Detay Bilgileri (mm) . . . . .                                | 4  |
| <b>Tablo 2.1</b> | Elektrikli araçlarda kullanılan hücre teknolojilerinin özeti (iyi (+),<br>orta(O), kötü(-)) . . . . . | 8  |
| <b>Tablo 2.2</b> | L7e sınıfı araçların regülasyonda tanımları . . . . .                                                 | 16 |
| <b>Tablo 2.3</b> | L7e sınıfı araçlar ve regülatif kısıtları . . . . .                                                   | 16 |
| <b>Tablo 2.4</b> | Araç Değerleri . . . . .                                                                              | 17 |
| <b>Tablo 2.5</b> | Araç . . . . .                                                                                        | 17 |
| <b>Tablo 2.6</b> | WLTP sürüş çevrimi sınıfları ve şartları . . . . .                                                    | 18 |
| <b>Tablo 3.1</b> | Simülasyonda koşturulan araç değerleri . . . . .                                                      | 26 |

# L7E Sınıfı Elektrikli Araç Güç Hesaplaması ve Batarya Paketi Tasarımı

Ömer Oğuz SOYDAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ

Lityum iyon pillerin kapasite ve güç tarafındaki gelişmeleri nedeniyle kullanım alanları giderek artmaktadır. İçten yanmalı motorların çevresel sorunlara etkisini de değerlendirdiğimizde, elektrikli araçların ve şarj edilebilir sistemlerin toplum içerisindeki farklı kullanım alanlarına nüfuz etmesi önem göstermektedir.

L7E sınıfı araçlar, boyutsal olarak küçük ve manevra kabiliyetlerinin yüksek olması nedeniyle öne çıkan araçlardır. Ulaşım ve özel hizmet gibi bir çok alanda kullanılabilecek olan L7E sınıfı araçların lityum iyon batarya tahrikli elektrikli araçlar olarak üretilmesinin faydaları yüksektir. Hem şehir içinde emisyonlar azaltılmış olacak hem de gürültü seviyeleri düşürülerek dar sokaklarda ve yaya yürüyüşüne özel kapatılmış alanlarda dahi ulaşım ve hizmet aksamadan devam edebilecektir.

Lityum iyon bataryaların şarj sıcaklık kısıtlamaları ve kullanım ömrü gibi durumları göz önünde bulundurularak yapılacak olan batarya paketi tasarımları ve seçimi doğru yapılmış motor ve batarya ikilisi gerek performans gerek ömür ve kullanım olarak beklentileri karşılayabilecek durumdadır.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya paketi, Lityum iyon batarya, L7 sınıf araç, elektrikli motor, hücre

# Li-ION Battery Pack Configuration and Design for L7 Class Vehicles

Ömer Oğuz SOYDAŞ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Alp Tekin ERGENÇ

Li-ION batteries are having widened usage area due to improvements about the capacity and power levels. Considering of environmental pollution and contribution of internal combustion engines to this, penetration of electric vehicles and re-chargeable systems to the common usage areas need to be emphasized.

L7 class vehicles become prominent about municipal work as a result of their high manoeuvrability and small dimensions. Developing electric vehicles have various advantages especially in the areas of garbage collection, scavenging and post delivery. Thus, both of incity emissions and noise pollution would bve reduced. Additionally, with the contributions of small volumed micro cars, side street and pedestrian roads would not be blocked by vehicles.

Battery pack design will be completed based on the requirements like current limitations, performance, life-time and thermal behaviour. Battery pack and electric motor configuration and selection will be completed based on those limitations.

**Keywords:** Battery pack, lithium ion battery, L7 class vehicle, eletric motor, cell

# 1 GİRİŞ

---

İklim değışikliğinin gelecekteki durumu sera gazlarının ve diğer hava kirletici etmenlerin artışına bağlıdır. Yüksek etkiye sahip bu sera gazları ve diğer etmenlerin de doğal ve insan nedenli olmak üzere bir çok sebebi bulunmaktadır. Teknoloji gelişimi, nüfus artışı ve ekonomik gelişim gibi bir çok sebep iklim değışikliğini dolaylı olarak etkilemektedir.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın tahminine göre yakıt tüketimi ve karbondioksit salınımı 2000 ve 2050 yılları arasında iki katına çıkacaktır. Fosil yakıt tüketimi nedenli karbondioksit emisyonunun 2006 ile 2030 arasında 1,5 kat artacağı tahmin edilmekte ve bu artışın neredeyse tamamının gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerden kaynaklanacağı öngörülmektedir. Küresel olarak karbondioksit üretimini yavaşlatmaya katkı sağlamak amacıyla, teknik tarafta bir çok adımın hızlıca atılması gerekmektedir. Küresel anlamda devletler ve toplum, küresel ısınmayı yavaşlatma amaçlı yapılan planlamaların hedeflerini karşılayamamaktadır. Yeni araçlarda yapılacak olan verimlilik geliştirmeleri ile 2050 yılına kadar yola çıkacak araçların toplam emisyon değerlerini yarıya düşürmek mümkün görünmektedir. [1]

Günümüzde, toplam karbondioksit emisyonunun dörtte birinin sebebi taşıma ve ulaşımdır ve bu sektör, karbondioksit emisyonunun artışında diğer sektörlere kıyasla zirvededir. Küresel ısınma ile ilgili savaşa katkıda bulunmak isteyen Avrupa Birliđi (AB) yasal olarak kısıtlamaları giderek artırarak araç üreticilerini emisyonu düşürücü önlemler almaya zorlamaktadır. Bu nedenle yeni oluşturulan WLTP sürüş profili de test sonuçları ve gerçek hayat emisyonları arasındaki farkın kapatılması amacıyla oluşturulmuş olan yeni bir sürüş profilidir.

Bu çalışmada da lityum-iyon hücrelerle üretilmiş olan batarya sistemleri ve L7e sınıfı gibi hafif elektrikli araçların motor seçimi, batarya konfigürasyonu ve tasarımı konularında detaylı çalışma yapılmıştır. Ancak araç seviyesinde detay içeren bazı konularda ilerlemeye açık alanlar mevcuttur. Batarya Paketinin hacimsel yerleşimi, motorun hacimsel yerleşimi ve araç gövdesine bağlantıları gibi konular; aracın



üç boyutlu modelinin eksik olması nedeniyle geliştirilmeye açık olarak kalmıştır. Ancak paket ve motorun yaygın yolcu araçlarına göre daha küçük boyutlarda olması nedeniyle boyut optimizasyonunun büyük bir efor gerektirmeyeceği ve risk teşkil etmediği düşünülmektedir.

## 1.1 Literatür İncelemesi

Son yıllarda endüstri ve markette yükselen trend olan elektrikli araçlar, karbon emisyonlarını azaltma konusunda yüksek potansiyele sahip olmakla birlikte dünyanın fosil yakıtlara olan bağlılığını da azaltmak için büyük bir gelişme olarak görülüyorlar. Her ne kadar elektriğin üretimi de düşük karbondan uzak olsa da, elektrikli motorların ve batarya sistemlerinin yüksek verimleri içten yanmalı motorlar ile kıyaslandıklarında tüm ömürleri düşünüldüğü takdirde elektrikli araçların bir avantaj olduğunu tekrardan öne çıkarmaktadır.

Elektrikli araçlarla ve elektrik sistemlerinin yüksek verimliliği nedeniyle tekrardan öne çıkan hafif araçlar, son yıllarda tekrar tüketicilerin ilgisini çeker haline gelmiştir. Motorlarının ve gövde ağırlıklarının düşük olması nedeniyle, küçük kapasiteli bir pil sistemi ile dahi şehiriçi sürücülerini gayet tatmin eden menzillere ulaşan hafif araçlar; ayrıca elektrikli motorların yapısı gereği tüketicilere tatmin edici bir performans sunmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan en yaygın hücre tipleri kurşun-asit, nikel-metal ve lityum bazlı hücrelerdir. Ortalama özgül enerjileri ise sırasıyla: 30 Wh/kg, 60 Wh/kg ve 100 Wh/kg'dir. Sırasıyla kilowatt başına fiyatları ise 12 Wh/kg, 3 Wh/kg ve 1,5 Wh/kg'dır[2]. Hem maliyet, hem de aracın hafif olması isterleri göz önünde bulundurulursa, L7e sınıfı bir araç için de en öne çıkan hücre tipi lityum iyon hücre olmaktadır.

Son yıllarda sadece elektrikle çalışan kadrisaykıl olarak adlandırılan dört tekerlekli hafif taşıtlara örnek vermek gerekirse, Fransız üretici Aixam, İtalyan üretici Alke ve İsviçre'den MicroLino bunlara örnek olarak verilebilir.

**Tablo 1.1** Aixam Hafif L7e Elektrikli Araç Aktarma Organı Detay Bilgileri

| Tanım             | Değer       |
|-------------------|-------------|
| Motor             | Elektrikli  |
| Azami Güç (kW)    | 6 kW        |
| Torque (N*m)      | 50 N*m      |
| Yakıt Türü        | Elektrikli  |
| Hücre Teknolojisi | Lityum İyon |

Aixam araçları hem elektrikli hem dizel motor seçeneğiyle satılmaktadır. Elektrikli seçeneği sadece lityum iyon bataryaya sahiptir. Kapasite ile ilgili detay üretici tarafından paylaşılmamıştır.

**Tablo 1.2** Aixam Hafif L7e Elektrikli Araç Ölçüleri Detay Bilgileri (mm)

| Tanım          | Değer | Birim |
|----------------|-------|-------|
| Uzunluk        | 3000  | mm    |
| Genişlik       | 1500  | mm    |
| Wheelbase      | 2252  | mm    |
| Ön Teker İzi   | 1345  | mm    |
| Arka Teker İzi | 1284  | mm    |
| Maksimum Hız   | 45    | km/s  |
| Menzil         | 80    | km    |

Aixam'a ek olarak verilecek bilecek örnek araç üreticilerinden biri olan Alke'nin de araç detayları aşağıda verilmiştir.



**Şekil 1.1** Alke elektrikli araç seçeneklerinden biri

Alke elektrikli araç seçeneğinde lityum iyon, kurşun-asit ve jel batarya gibi farklı seçenekler bulunmaktadır ve azami menzil farklı seçeneklerle birlikte 200 kilometreye kadar çıkabilmektedir.

**Tablo 1.3** Alke Hafif L7e Elektrikli Araç Ölçüleri Detay Bilgileri (mm)

| Tanım          | Değer     | Birim |
|----------------|-----------|-------|
| Uzunluk        | 3530      | mm    |
| Genişlik       | 1500      | mm    |
| Wheelbase      | 2252      | mm    |
| Ön Teker İzi   | 1345      | mm    |
| Arka Teker İzi | 1284      | mm    |
| Maksimum Hız   | 44        | km/s  |
| Menzil         | Azami 200 | km    |

L7e sınıfı araçlar(2002/24 EC Direktifine göre düzenlenirler), regülatif düzenlemeler içerisinde değerlendirilmektedir. Avrupa ülkeleri ve Türkiye sınırları içerisinde satışının yapılabilmesi için belirli sınırlar içerisinde teknik değerlere sahip olmaları gerekmektedir. Bu sınırlar aşağıda genel olarak paylaşılmıştır[3]:

-Batarya hariç ağırlık üst sınırı 450 kg.

-Motor Gücü üst sınırı 15 kW

-Azami hız üst sınırı 90 km/saat olmalıdır.

Diğer L7e elektrikli araç sınıfındaki rakip araçlar incelendiğinde aşağıdaki ek isterler belirlenmiş ve araç motor ve batarya tasarımı yapılırken bu kıstaslar göz önünde bulundurulmuştur.

-0-50 km/saat hız arasındaki ivmelenme 7 saniyeden uzun sürmemelidir.

-Batarya gerilim seviyesi 48 Volt'u geçmemelidir. Bu gerilim limiti Avrupa Regülasyonu 168/2013'ten gelmekte ve elektrik güvenliği gerekçesiyle üst limit regülasyon tarafından belirlenmektedir. L-sınıfı araçlar, boyutları ve hızları nedeniyle daha zayıf gövdeye sahip olmaları nedeniyle elektrik şoku oluşmaması nedeniyle gerilim seviyelerine üst limit belirlenmiştir. Bu elektrik şokuna karşı gerilim sınırı da UNECE 13063:2012'den gelmektedir. Bir çok üretici de bu sınırlar içerisinde olmak zorunda kaldıkları için L7e sınıfı araçlar içerisinde bir trend haline gelmiştir.

-Çekiş: Araç önden çekişli olarak tasarlanacaktır. Dolayısıyla tek elektrik motor yeterli olacaktır.

-Menzil: Geçerli sürüş çevriminde en az 80 kilometre olacak şekilde.

Bunların haricinde L7e sınıfındaki elektrikli araçlarda frenleme için özel bir güvenlik özelliği gerekmemektedir. ABS ve ESP gibi özellikler homologatif olarak zorunlu kılınmamıştır. Ancak menzil olarak geçerli değerlere gelebilmek için rejeneratif frenleme aktif olarak kullanılmalıdır.

Batarya paketlerinde önemli rol oynayan konulardan biri de soğutmadır. Batarya paketi içerisindeki hücreler iç dirençleri nedeniyle güç sağladıkça veya şarj oldukça ısınmaktadırlar. Bu ısınmaya hücre tipinin ve kimyanın belirlediği bir limitin üstüne çıktıktan sonra batarya paketinin sağlayabileceği gücü kısmak gerekmektedir. Aksi takdirde hücrelerin ömrünün azalmasına veya hücrelerin yangın durumuna geçmesine neden olunabilir. Bu nedenle batarya paketlerinde soğutma ve ısıtma sisteminin olmasının nedeni iki ana senaryoya bağlıdır; hızlı şarj durumu ve yüksek güç isterleri. Bu gibi soğutma ihtiyaçlarını sağlamak amacıyla günümüzde batarya paketlerinde hava ile soğutma, su ile soğutma veya FDM (Faz Değiştiren Malzeme) kullanılmaktadır. Ancak FDM araca ve bataryaya hem ağırlık kattığı hem de yüksek maliyeti nedeniyle çok tercih edilmemektedir.

Ayrıca hücrelerin sıcaklığı yükseldikçe iç dirençleri düşmektedir. Bu nedenle hem şarj işlemi daha hızlı yapılabilmekte hem de soğutma ihtiyacı yüksek sıcaklıkta kalması uygun hücreler için daha az olmaktadır. [4]

## 1.2 Tezin Amacı

L7e sınıfı araç kıstasları regülatif düzenlemeler doğrultusunda belirlenecektir. WLTP sürüş çevrimi göz önünde bulundurularak, tüm sürüş çevrimini performans düşüşü yaşamadan tamamlayabilecek olan bir güç aktarma organı ve batarya sistemi kurgulanacak ve MATLAB yazılımında rakipleriyle benzer ölçülerde ve ağırlıkta olmak üzere modeli koşturulacaktır.

Amaç sıfırdan bir aracın güç aktarma organına ve sürüş çevrimine göre hücre seçimi ve batarya tasarımının yapılması olması nedeniyle, sürüş çevriminde koşturulacak olan araç isterlerine göre araç değerlerini önden belirlemek gerekmektedir. Araç L7e sınıfının sınırlarını içerisinde tasarlanacak olup, Türkiye düzenleyicilerine göre homologasyon koşullarını sağlar olmalıdır. Bu nedenle ağırlık, motor gücü ve hız limiti gibi sınırlandırmalar en başından itibaren göz önünde tutulmuştur.

Koşturulan modelin çıktısı olan akım ve gerilim seviyeleri ile birlikte bir motor seçimi yapılacak ve batarya gerilim seviyeleri motoru sürebilecek şekilde konfigüre edilecektir. Batarya paketinin hücre seçimi ve ilgili elektrik-mekanik aksam tasarımı bu gerilim ve akım seviyelerine uygun olarak yapılacaktır.

SolidWorks ortamında 3 boyutlu tasarımı yapılacak olan batarya paketi ve ilgili parçalarının sistem tasarımı, menzilin sağlanabilmesi amacıyla hafiflik ve yapısal dayanım göz önünde bulundurularak tasarlanacaktır.

Böylece elde edilen batarya paketi tasarımı ve güç aktarma organı seçimi ile birlikte WLTP sürüş çevrimini sorunsuz tamamlayabilen lityum iyon batarya paketi tasarımı tamamlanmış olacaktır.

## 1.3 Hipotez

Bu çalışmada L7e araçlarına özel olarak elektrikli motor seçimi ve bu motora özel olarak bir batarya paketi tasarlanacaktır. Yüksek menzil ve yüksek performans ile birlikte ana kullanım alanı olan şehir içi ulaşım ve taşımada, elektrikli seçenek ile birlikte sessiz çalışabilen bir alternatif olacaktır.

Tezde tüm hücre tipleri incelenecektir. Akım ve gerilim motorun optimum çalışma seviyesine uygun olan alanda hücre seçimi ile birlikte batarya ve motorun sürüş çevrimine en uygun şekilde çalışabilmesi sağlanacaktır.

Hücre seçimi sonrasında detaylı tasarım ile birlikte modül, güç kesme kutusu, paket tasarımı, soğutma tasarımı gibi detaylı tasarım çalışmaları yapılacaktır.

## **2.1 Batarya Paketi ve Alt Sistemleri**

Batarya Paketi ve Alt Sistemleri; lityum iyon hücre, modül, batarya dağıtım ünitesinden oluşmaktadır.

### **2.1.1 Lityum İyon Hücre**

Elektrikli araçların ana teknolojisi olan batarya paketlerinde günümüzde kullanılan ana kimya lityum iyondur. Elektrikli araçların geleceği için en öne çıkan teknoloji olan lityum iyonun enerji yoğunluğu mevcut ve eski teknolojilere göre çok daha yüksektir. Enerji yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle hem araçlarda hafiflemeyi sağlamakta hem de küçük ve taşınabilir cihazlarda dahi kullanımı kolay olmaktadır.

Lityum iyon bir hücre anot, katot, elektrolit ve seperator katmanlarından oluşur. İyonlar anot ve katot arasında elektrolit ortamında geçiş yaparlar. Elektrolit sıvısı, lityum tuzları ve organik çözeltilerden oluşmaktadır. Seperatör katman anot ve katot arasındaki oluşabilecek potansiyel kısa devreleri engelleyen bir izolasyon malzemesidir. Genellikle polipropilen veya polietilen bazlı bir malzemedir.

Katot ise genellikle alüminyum akım toplayıcı ve katot-aktif malzemelerdir.

Günümüzde lityum iyon hücreler için en yaygın formlar 3 farklı tiptedir. Silindirik, kese ve prizmatik olarak isimlendirilen bu tipler genel olarak kimyasal farklılıklar barındırmazlar da formları ve batarya paketleri içerisindeki yerleşimleri, soğutma stratejisi gibi paketleme konularında farklılıklar öne çıkmaktadır.

Silindirik hücreler sert muhafazaya sahiptirler ve formları nedeniyle bu isimlendirmeyi almışlardır. Ana tercih edilme sebeplerinden biri, bir çok alanda kullanılıyor olması nedeniyle maliyetlerin düşük olmasıdır. Silindirik formları ve küçük hacimleri nedeniyle batarya paketi ve modül tasarımında kolaylık sağlarlar.

Şarj edilebilir olan batarya paketlerinde kimyasal ve elektrik enerjisi arasında sürekli bir dönüşüm vardır. Şarj durumunda, elektriksel enerji hücre içerisinde kimyasal enerji olarak depolanır. Lityum iyonları katot malzemesinden anot malzemesine geçiş yaparlar. Deşarj durumunda ise tam tersi gerçekleşerek, hücre içerisinde anottan katota geçen lityum iyonları ile kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüşür.

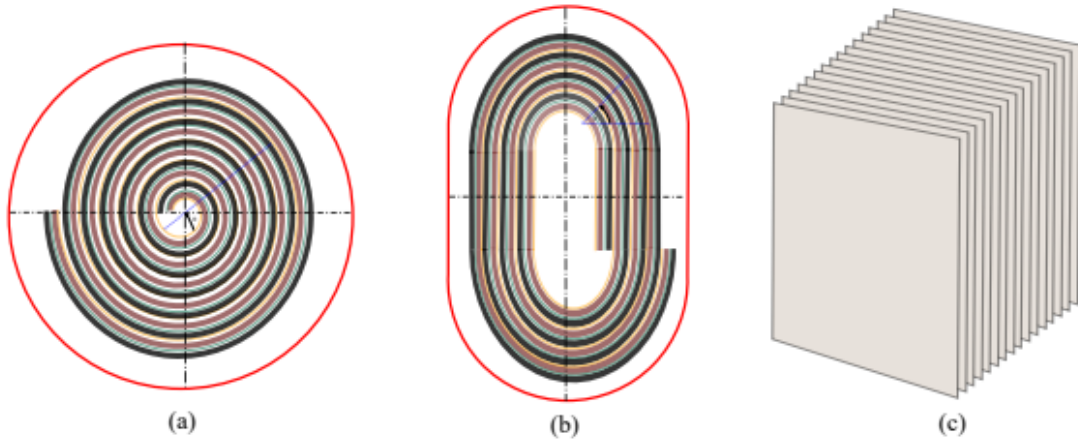
Mevcutta farklı kullanım alanlarında bir çok farklı kimyada lityum iyon hücre vardır. Bunların en yaygın kullanılanlarını adlandırmak gerekirse; Lityum Demir Fosfat(LFP), Lityum Titanat Oksit(LTO) ve Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit(NMC) gösterilebilir. Batarya paketlerinde en yaygın olarak kullanılan kimyalar bunlardır. Bir batarya paketinde birden fazla kimya veya formda hücreler kullanılamaz.

Hücreler içerisindeki anot malzemeler genellikle aynı veya çok benzerdir. Hücrelere isimlerini veren malzemeler genellikle katot malzemelerden kaynaklanmaktadır.

**Tablo 2.1** Elektrikli araçlarda kullanılan hücre teknolojilerinin özeti (iyi (+), orta(O), kötü(-))

|     | Özgül Güç | Özgül Enerji | Şarj Döngüsü | Güvenlik | Akım Kapasitesi |
|-----|-----------|--------------|--------------|----------|-----------------|
| LTO | -         | -            | +            | +        | +               |
| LFP | O         | O            | O            | +        | -               |
| NMC | +         | +            | O            | O        | O               |

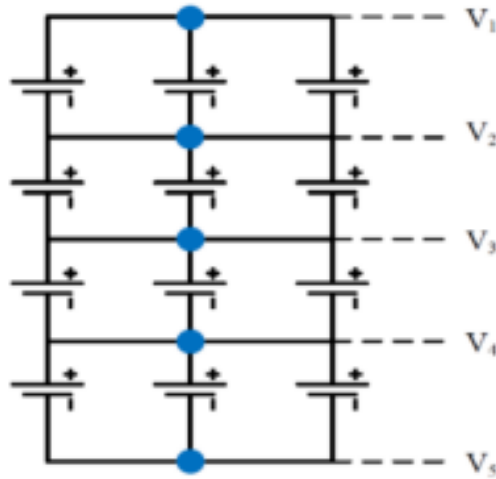
Farklı form faktörlerinin hücrenin performansına ve yaşlanmasına etkisi vardır. Hücrenin silindirik formdan, prizmatik forma kadar büyümesi mikroskobik seviyeden bir fark oluşturmuyor gibi görünsede, makroskobik seviyeden performans ve yaşlanmasına etkisi büyüktür. Büyük hacimli bir hücrenin "yüzey alanı/hacim" oranı bozulacağı için hücreden ısı yayılımı da düzensizleşmekte ve hücrenin iç kısımlarında dış yüzeyine kıyasla daha sıcak alanlar kalmaktadır. Bu da soğutma performansını bozmakta ve dolayısıyla hücrenin erken yaşlanmasına neden olmaktadır.[5]



**Şekil 2.1** Farklı hücre tipleri ve iç katman yapılarının karşılaştırılması [5]

### 2.1.2 Modül

Hücrelerin birbirine seri ve paralel olarak bağlandığı ve batarya paketinin bir alt sistemini oluşturduğu hücre gruplarına modül adı verilir. Modül ile birlikte alt parçalara bölünmüş batarya paketlerinin hem kontrolü hem de güvenliği daha kolay sağlanmış olur. Her modüle bir adet eklenecek olan kontrol modülü ile paralel bağlı her hücre grubunun gerilimi sürekli olarak ölçülür. Böylece şarj ve deşarj işlemleri sırasında hücreler arasındaki gerilim farkları denetlenmiş olur. Ayrıca modüller içerisindeki sıcaklık sensörleriyle birlikte batarya paketlerinin akım değerleri belirlenir ve soğutma/ısıtma işlemi duruma göre aktif edilir.



**Şekil 2.2** Modül içi hücre bağlantısı elektrik şeması[6]



Modül içerisinde hücrelerin elektrik bağlantısı; hücrelerin seri veya paralel gruplanmasıyla batarya paketinin gerilim ve akım isterlerini karşılamak amacıyla sağlanır. Seri bağlantı yapılan hücrelerde gerilim paralel kol sayısı ile doğru orantılı olarak artarken, paralel bağlantı yapılan hücrelerde de akım seri kol sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.



**Şekil 2.3** Hücreden modüle ve modülden pakete geçiş[7]

### 2.1.3 Batarya Paketi

Batarya paketi, içerisinde hücrelerden oluşan modülleri, elektrik dağıtım kutusunu ve soğutma sistemini içeren sızdırmaz bir yapıdır. Modüller, batarya paketi içerisinde akım ve gerilim isterlerini karşılamak üzere baralarla veya yüksek gerilime uygun kablolarla birbirilerine bağlanırlar. Batarya paketlerindeki gerilim seviyeleri yüksek gerilim olması nedeniyle, tasarımda elektriksel izolasyon gibi dikkat edilmesi gereken konular vardır.

Ayrıca hücrelerin ısıl yönetim sistemine ihtiyaç duymaları halinde soğutma plakası da batarya paketine dahil edilir ve bu soğutma plakası; hücrelerin şarj durumuna geçebilmesi için ısıtma ve ömür/performans dengesini koruyabilmesi için de soğutma görevini üstlenir.

### 2.1.4 Batarya Paketi Alt Üniteleri

Batarya paketlerinde, modüller, elektrik bağlantıları, muhafaza ve soğutma sistemleri dışında elektrik ve elektronik denetimi sağlayan parçalar da bulunmaktadır. Bu parçalar batarya paketleri içerisinde birlikte sistem olarak çalışır ve akım, sıcaklık, gerilim kontrolü gibi detaylı görevleri yerine getirerek hem batarya paketinin güvenli çalışabilmesini hem de uzun ömürlü olabilmesini sağlarlar. Aşağıda batarya paketi alt ünitelerine yer verilmiştir.

#### **-Kontaktörler:**

Amaçları batarya paketlerinin uçlarını aktarma organlarına bağlamak ve ayırmaktır. Batarya Yönetim Sistemi (BYS)'ten gelen sinyallere bağlı olarak denetlenir ve kontağı sağlar veya keserler. İçerisinde hareketli bir kontakt olması nedeniyle mekanik tasarımda yerleşimi önemli rol oynar. Yerleşimi ile ilgili bilgi üretici tarafından paylaşılır[8].

Kontaktörün akım kapasitesinin üzerinde çalıştırılması, kontakt bölgelerinde ark oluşmasına ve kontaktların ayrılamamasına neden olabilir.



**Şekil 2.4** Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan kontaktörlerden biri[8]

#### **-Sigortalar**

Batarya paketi içerisindeki güvenlik amaçlı yerleştirilmiş parçalardır. İçerisindeki iletken madde, yüksek akım seviyelerine çıktığında eriyerek kutuplar arasındaki teması keserek batarya paketinin çıkışlarındaki teması keser. Yanmış olan bir sigortanın paket açılarak değiştirilmesi gerekir. Bu nedenle batarya paketlerinde servis edilebilir alanlara yerleştirilirler.[9]



**Şekil 2.5** Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan sigortalardan biri[9]

#### **-Akım Sensörleri:**

Batarya paketlerindeki akım sensörleri, modül grubundan veya şarj girişinden elde edilen doğru akımların ölçümünü yaparak Batarya Yönetim Sistemi'ni (BMS) bilgilendiren parçalardır. Akım değerlerine göre Hall ve Şönt sensör olarak iki farklı varyasyonu bulunmaktadır. Akım değerlerinin düşük olduğu bölgelerde Hall sensör yüksek doğruluk ile sonuçlar verirken, şönt sensör de yüksek akım bölgelerinde doğruluğu yüksek sonuçlar vermektedir.

#### **-Konnektörler:**

Batarya paketinin çıkışları konnektörler aracılığıyla olur. Konnektörler en az IP67 sertifikasına sahip olmalıdırlar. Dahili HVIL döngüsüne sahip olmaları gereklidir. Yüksek gerilim konnektörleri, regülasyona tabii olarak RAL2003 turuncu rengiyle üretilmeleri gerekmektedir[10].

#### **-Batarya Yönetim Sistemleri:**

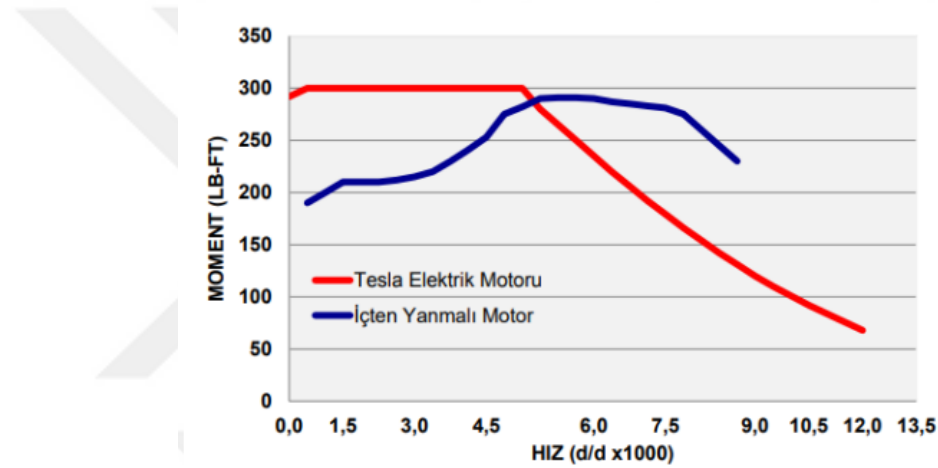
Batarya Yönetim Sistemleri, batarya paketlerinin fonksiyon ve güvenlik açısından değerlendirmesini yaparak, güvenli çalışma koşullarında, uzun ömür isterlerini sağlamak üzere denetimlerini yapan sistemlerdir. Lityum iyon hücrelerin, şarj deşarj işlemlerinde tavan ve taban değerlerine uyumu çok kritiktir. Uyulmadığı takdirde, güvenlik sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle her hücrenin denetim altında olması ve gerilim seviyelerinin takip edilmesi gerekmektedir[11]

Batarya Yönetim Sistemi iki ana bölümden oluşur. Biri Batarya Kontrol Ünitesi (BKÜ) olan ana kontrolcü kart, diğeri de her modülde bir adet olmak üzere, hücre gerilim ve sıcaklıklarını takip eden Modül Kontrol Ünitesi (MKÜ)'dur. Modül Kontrol Ünitelerinin, modüllerin içerisinde hücre gerilim ve sıcaklık sensörleri vardır. Her bir MKÜ, modülden aldığı bilgileri işleyerek, karar verici olan BKÜ'ya iletir. Güvenlik açısından kritik bir işlem olan gerilim ve sıcaklık takibi, MKÜ'lar tarafından araç operasyonunda sürekli olarak gerçekleştirilir[12].

## 2.2 Elektrik Motoru

Elektrikli araçlarda en önemli sistemlerden biri de tahrik sistemidir ve elektrik motoru da bu sistemin ana üyesidir. Motor, bataryadan gelen elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek itki sağlar. Ayrıca frenleme anında da jeneratör görevi görerek, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek batarya paketinin şarj olmasını sağlar. İsterlere göre elektrikli araçlar farklı sayılarda motorlara sahip olabilirler.

Doğru akım (DA) motorları elektrikli araçlardaki performans isterlerinin bir bölümünü karşılasalar da verimsiz ve ağır olmaları ve fırçalı olan versiyonlarının sık sık bakım ihtiyacı duyması nedeniyle dezavantaja sahiptirler. Gelişen güç elektroniği ve kontrol sistemleri ile farklı tipte elektrik motorlarının kullanımı elektrikli araçlarda mümkün olmuştur.[13][14]



Şekil 2.6 Bir elektrikli motor ve benzer içten yanmalı motorun tork/devir grafiği [15]

Şekil 2.4'te de görülebileceği üzere, kompleks sistemlere ve fazlaca hareketli parçalara sahip olmayan elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara göre azami torklarını daha geniş bir devir aralığında sağlayabilmektedirler. Parça sayısının az olması ve çoğunlukla vites kutusu gerektirmemeleri sebebiyle aracın da ağırlığını hafifletmektedirler. Son yıllarda kullanılan elektrikli motorların; elektrik enerjisi ve mekanik enerjisi çevirimindeki verimi %90'ın üzerindedir.

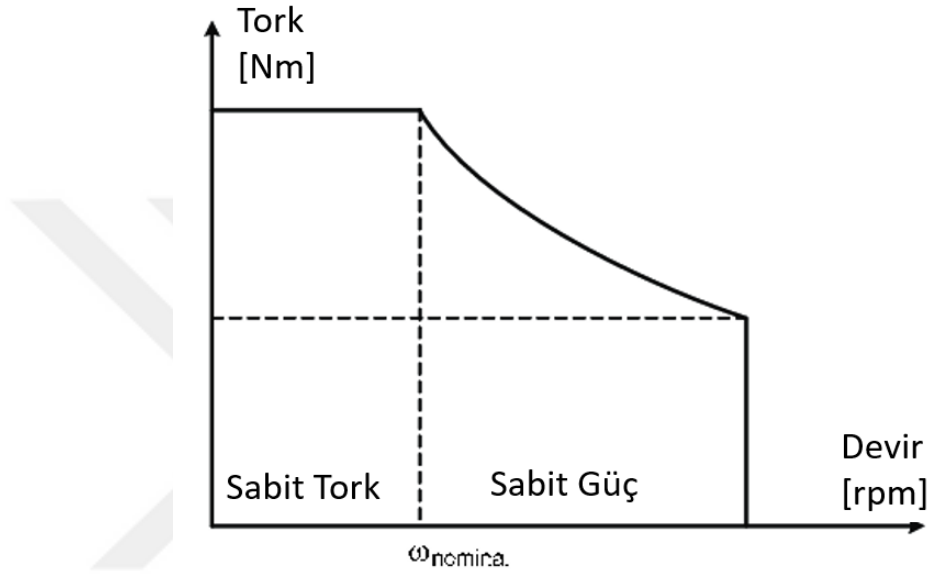
### 2.2.1 Fırçalı Doğru Akım Motor

Bu tip motorlar stator tarafında sabit mıknatıs bulundururken rotor tarafında da statoru yüklemek için fırçalar bulundururlar. Düşük hızlarda bile yüksek tork verebilirler ancak ağır, düşük verimli ve ısınmaya yatkındırlar. Rotor, motorun merkezinde bulunduğu için ısıyı atmak zor olduğu için elektrikli araçlarda kullanımı yaygınlaşamamıştır.[16]

### 2.2.2 Sabit Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor

Genellikle rotor sabit mıknatıstan oluşur, stator ise invertör üzerinden alternatif akım ile yüklenir. Rotorda sargı olmadığından, bakırlarda kayıp olmamakta ve bu da verimi artırmaktadır. Ayrıca hafiftirler ve ısınan bölümün stator olmasından dolayı ısıyı uzaklaştırmaya daha uygundurlar. [2]

Sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlar, elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan motorlardandır.

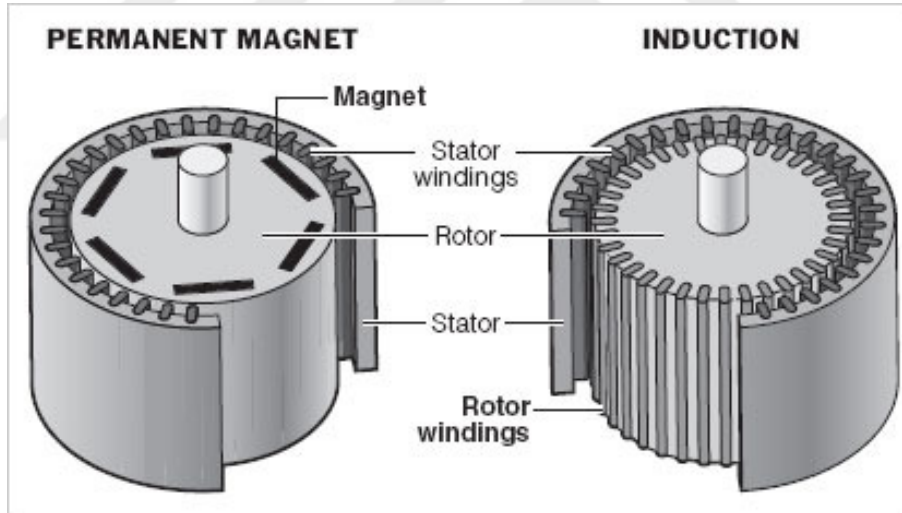


Şekil 2.7 Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motorların Genel Tork ve Devir Grafiği

### 2.2.3 İndüksiyon Motoru

İndüksiyon motoru daha çok elektrikli araçların ilk örneklerinde kullanılmış olan motor tipidir. Alternatif akım ile tahriklenir. Alternatif akım, motorun statorunda manyetik alan oluşturur. Elektrikli araçlarda kullanılan indüksiyon motorlarında evirici, yük durumuna göre gerilim seviyelerini düşürebilir ve böylece manyetik kayıplar doğru akım motorlara göre azalmış olur. Bu nedenle yüksek yüklerde genel olarak verim doğru akım motorlarına göre düşük olsa da genel çerçevede daha yüksek verimlere sahiptirler. Ayrıca sabit mıknatıs fiyatları yüksek olması nedeniyle, sabit mıknatıs doğru akım motorlarına göre daha düşük maliyetlere sahiptirler.

İndüksiyon motorunda rotor bölümü de sargılardan meydana gelmektedir. Bu nedenle stator sargıları uyarıldığında rotor sargıları gerilim endüklemiş olur. Bu nedenle, indüksiyon motorlarında rotor stator döner alanını kayma ile asenkron takip etmektedir[17] Bu motorların rotor ve stator bölgelerinden ikisi de ısındığı için aktif soğutmaya ihtiyaç duyarlar. Soğutmanın gereken güçte olmaması durumunda güvenlik ve koruma amaçlı performans düşüşleri görülür. İndüksiyon motorun avantajı ise basit mimarisi, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyetidir.[18]



Şekil 2.8 Sabit mıknatıs motor ve indüksiyon motorun karşılaştırması [19]

## 2.3 Araç Tanımı

### 2.3.1 Homologasyon Kategorisi

Avrupa içerisinde homologasyon kategorileri UNEEC (United Nation European Economic Commission) tarafından 70/156/EEC regülasyonu içerisinde tanımlanmıştır. Motor ve batarya tasarımı yapılacak olan araç da bu regülasyon isterlerine uygun olacak şekilde tanımlanacaktır. Araç sınıfı regülasyon içerisinde L7e olarak geçmektedir. L7e araçların regülasyon içerisinde tanımlanmış özellikleri aşağıdaki gibidir:

**Tablo 2.2** L7e sınıfı araçların regülasyonda tanımları

| Sınıf  | Tanım                                                                          |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|
| L7e    | Ağır dört tekerle gi olan motorlu araçları kapsamaktadır                       |
| L7e-C  | Ağır dört tekerle gi olan motorlu araçları kapsamaktadır                       |
| L7e-CU | Ağır dört tekerle gi olan motorlu araçlar.                                     |
| L7e-CP | Yolcu taşıma amacı için tasarlanmış, ağır dört tekerleği olan motorlu araçlar  |
| L7e-B  | Her türlü arazi şartlarında gidebilen, gır dört tekerleği olan motorlu araçlar |
| L7e-A  | Karayolu üzerinde gidebilen, ağır dört tekerleği olan motorlu araçlar          |

İncelenecek ve hesaplanacak olan araç L7e-CU sınıfını temsil edecektir. L7e-C sınıfı araçların ölçü standartları tablo 2.3'te verilmiştir.

**Tablo 2.3** L7e sınıfı araçlar ve regülatif kısıtları

| Sınıf              | Tanım       |
|--------------------|-------------|
| Sürücü Ağırlığı    | 75 kg       |
| Uzunluk            | <3700 mm    |
| Genişlik           | <1500 mm    |
| Yükseklik          | <2500 mm    |
| Azami net güç      | <15 kW      |
| Azami tasarım hızı | <90 km/saat |

### 2.3.2 Araç Değerleri

Benzerlerine yakın değerlerde seçilen L7e sınıfı araç değerleri aşağıdaki gibi seçilmiştir. Araç modellemesi bu değerler üzerine kurulmuş olup, kuvvet analizlerine göre de motor ve batarya seçimi yapılacaktır.



Şekil 2.9 Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motorların Genel Tork ve Devir Grafiği

Şekil 2.6’da gösterilen harflere uygun olarak Tablo 2.3’te aracın MATLAB yazılımında koşturulacak olan değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre sürüş ve tüketim hesaplamaları yapılacaktır.

Tablo 2.4 Araç Değerleri

| Gösterim | İsim             | Değer | Birim |
|----------|------------------|-------|-------|
| A        | Uzunluk          | 3600  | mm    |
| B        | Genişlik         | 1350  | mm    |
| C        | Yükseklik        | 1900  | ömm   |
| D        | Yerden yükseklik | 185   | mm    |
| E        | Aks mesafesi     | 2462  | mm    |
| F        | Azami Ağırlık    | 1500  | kg    |

Tablo 2.5 Araç

| Kuvvet | Açıklama                                 | Araç Formülasyonu                | Birim |
|--------|------------------------------------------|----------------------------------|-------|
| $F_T$  | Araca etkiyen toplam kuvvet              | $F_T = F_I + F_Y + F_L + F_R$    | N     |
| $F_I$  | Araca etkiyen ivmelenme kuvveti          | $\lambda m a$                    | N     |
| $F_Y$  | Araca etkiyen yokuş direnci kuvveti      | $F_Y = m g \sin \alpha$          | N     |
| $F_D$  | Araca etkiyen rüzgar direnci kuvveti     | $F_D = 1/2 \rho * C_w * A * w^2$ | N     |
| $F_R$  | Araca etkiyen yuvarlanma direnci kuvveti | $F_R = f_R * F_Z$                | N     |



## 2.4 Araç Modellemesi

L7e sınıfı araç, piyasada yaygın olarak kullanılan firmaların ürettiği araçlara yakın değerlere sahip olacak şekilde MATLAB yazılımında modellenerek, WLTP sürüş çevriminde koşturulmuş ve sonucunda güç, kapasite, gerilim, akım değerleri hesaplatılmıştır. Araç üzerinde oluşan kuvvetler, yolun eğimi, çevresel koşullar, hız, ivmelenme gibi parametrelere bağlı olduğu gibi aracın ağırlığı, aracın aerodinamik modeli gibi direkt araçla ilişkili sebepleri de vardır.

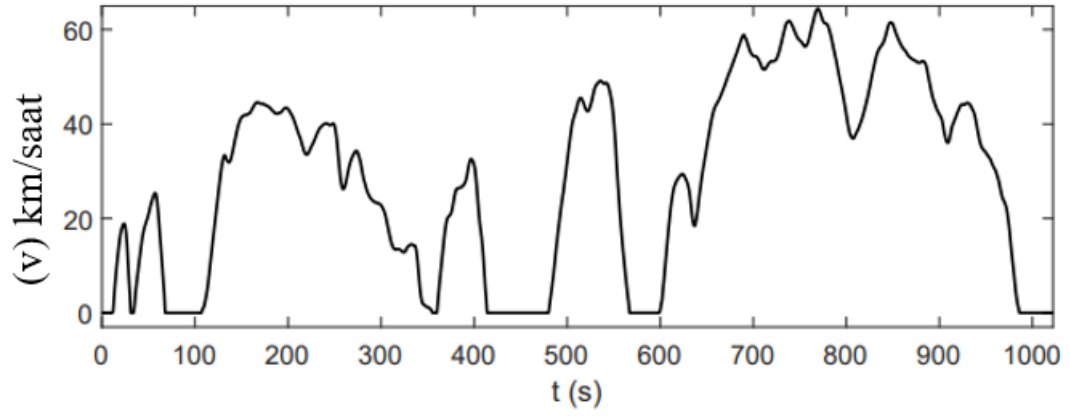
Aerodinamik sürüklenme, yuvarlanma direnci ve ivmelenme en çok öne çıkan kuvvetlerdendir.

### 2.4.1 WLTP Sürüş Çevrimi

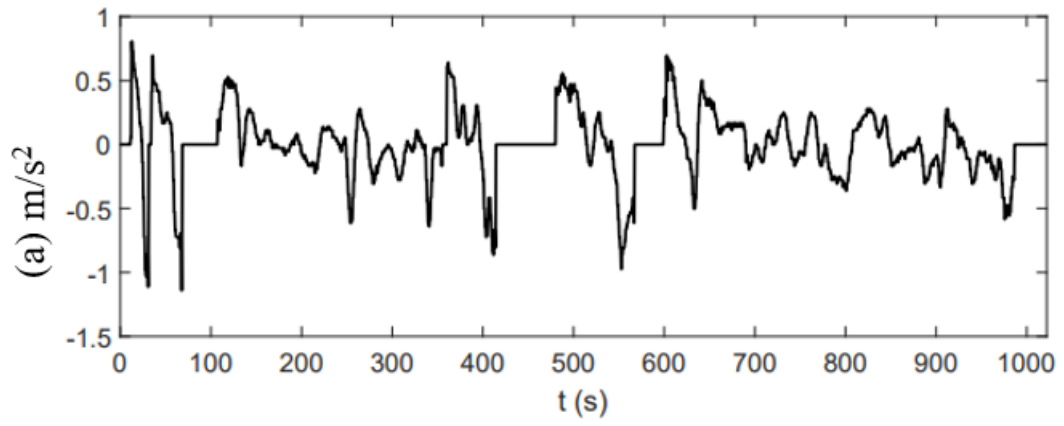
WLTP sürüş çevrimi, araç üreticilerinin motorlarını sürüş çevrimlerine göre optimize ederek sonuçlarda manipülasyon yapmalarını engellemek amacıyla oluşturulmuştur. Araçların güç ve ağırlık değerlerine göre 3 ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Sektörde yaygın olarak kullanılan NEDC sürüş çevrimine kıyasla en ana farklarından biri budur. Araçların sahip olduğu güç ve ağırlık oranlarına göre farklılaşan sürüş çevrimleri, farklı isterlere sahip olan araçların daha doğru kapsanmasını sağlamaktadır. Çoğu yolcu aracı Sınıf 3 isterlerinin içerisinde kalırken, çalışmada incelenen araç; daha düşük güç isterleri ve ağırlık seviyeleri nedeniyle Sınıf 1 içerisinde kalmaktadır. Mevcut tasarımı yapılacak olan araç kW/ton (GA oranı) sınıflandırmasında "Sınıf 1" sınıfına girmektedir. Sınıf 1 sınıfının sürüş çevrimi aşağıda paylaşılmıştır.

**Tablo 2.6** WLTP sürüş çevrimi sınıfları ve şartları

| Sınıf   | Şart                 |
|---------|----------------------|
| Sınıf 1 | $GA < 22$            |
| Sınıf 2 | $22 \leq GA \leq 34$ |
| Sınıf 3 | $34 \leq GA$         |



(a) Hız



(b) İvmelenme

Şekil 2.10 WLTP sürüş çevrimi hız/zaman(a) ve ivme/zaman(b) grafiği

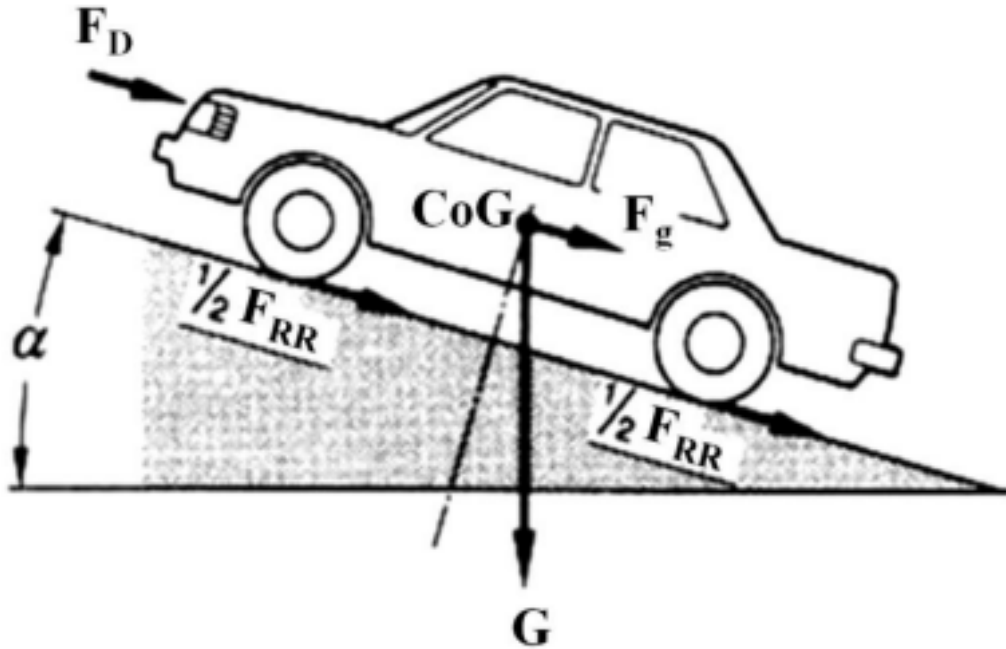
#### 2.4.2 Sürüş Dirençleri

Tablo 2.3'te belirtildiği üzere 15 kW motor gücü, regülasyonlar tarafından azami olarak limitlenmiştir. Bu sürüş performansını da limitlemektedir. Tırmanılabilen azami eğim de %25 olarak tanımlanmıştır. Sürüş hesaplamaları WLTP sürüş çevrimine göre hazırlanacaktır.

Araca etkiyen toplam dirençlerin hesaplanması için;

$$F_T = F_I + F_S + F_L + F_R \quad (2.1)$$

formülasyonundaki değerler ve tanımları aşağıda belirtilmiştir.



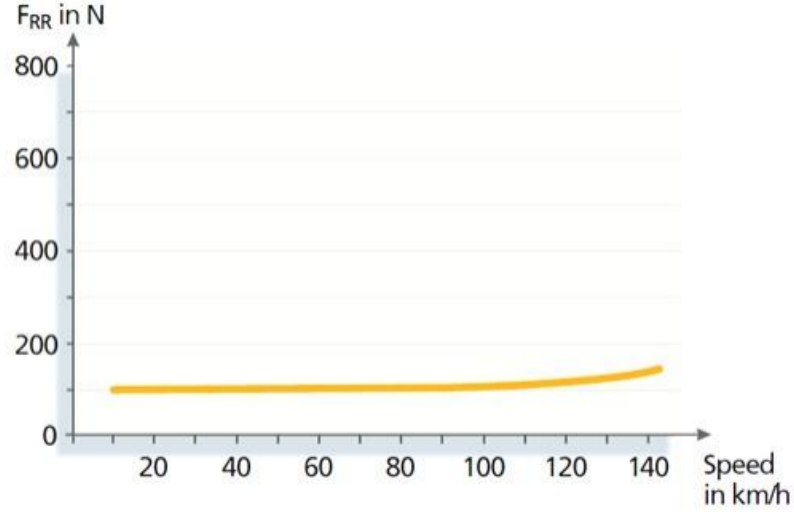
Şekil 2.11 Sabit hızda sürüşte araca etkiyen dirençlerin gösterimi[20]

Eğim direnci, aracın ağırlığına ve eğimin açısına bağlıdır. Formülü aşağıda formül 2.2'de verilmiştir.

$$F_G = m * g * \sin \alpha \quad (2.2)$$

Yuvarlanma direnci, araca sürekli olarak etkiyen, harekete karşı kuvvettir. Tekerleğin üstüne etkiyen kuvvetler nedeniyle formu değişir. Yuvarlanma direnci, ISO8767'te katedilen birim mesafede bir teker tarafından harcanan enerji olarak tanımlanmıştır. Yuvarlanma direnci genel olarak tekerlek ve lastik üzerine binen yüklere bağlı olarak değişse de aracın hızına da bağlıdır. Aracın hızı arttıkça yuvarlanma direncine olan

etkisi de artar. Ancak L7e sınıfı şartları nedeniyle 90 km/saat hızı aşmayacak olan araçta aracın hızından doğacak olan etki ihmal edilebilir.



**Şekil 2.12** Yuvarlanma direnci ve hıza bağlı değişimi[21]

Yuvarlanma direncinin formülü aşağıda formül 2.3'te verilmiştir.

$$F_{RR} = C_{RR} * m * g * \cos \alpha \quad (2.3)$$

Yuvarlanma direnci  $F_{RR}$  tekerlere gelen yükün  $C_{RR}$  ile çarpılmasından elde edilir.  $C_{RR}$ , teker ölçüsü, lastik dişi, malzeme bileşimi, lastik basıncı, sıcaklık ve hız gibi bir çok bileşene bağlıdır. Seri üretim lastikler 8.5 kg/t ile 13 kg/t arasında  $C_{RR}$  değerine sahiptir. Bu nedenle hesaplamalarda  $C_{RR}$  değeri 10 kg/t olarak alınmıştır.

Hava direnci, aracın dış geometrisine, hava yoğunluğuna ve aracın hızına bağlıdır. Formülü, formül 2.4'te verilmiştir.

$$F_D = 1/2 * A * C_d * \rho * v^2 \quad (2.4)$$

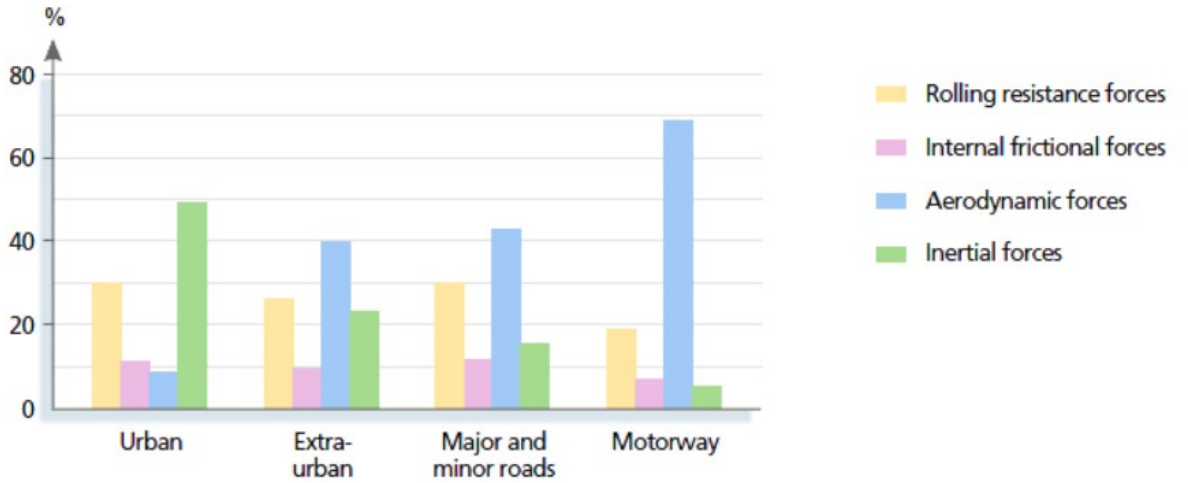
Araç geometrisi formül içerisinde iki farklı değişkeni etkilemektedir. Biri, aracın önkesit alanı olan  $A$ , diğeri sürüklenme katsayısı olan  $C_d$ 'dir. L7e-CU sınıfı araçların öncelikleri aerodinamik tasarım olmadığı için, tutarlı sonuç alabilmek adına  $C_d$  değeri 0.4 alınmıştır.  $F_D$ , aracın hızının karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak WLTP'deki düşük hızlar nedeniyle  $F_D$ 'nin tüm dirençlere kıyasla etkisi küçük olacaktır.

Araca etkiyen bir diğer kuvvet de atalet direncidir. Araç kütlesi  $m$  ve döngüsel hareket yapan parçaların eylemsizlik momenti  $I$  düşünüldüğünde, araç harekete geçmek için bu atalet dirençlerinin üstesinden gelmelidir.



**Şekil 2.13** Bir aracın ön kesit alanı

Atalet direnci, araç ivmelenmesinde önem oynamaktadır. Şekil 2.11’de de görülebileceği üzere; atalet direnci düşük hızlı ve dur-kalk yapılan sürüş çevrimlerinde tüketimi artırıcı ana sebeplerden olacaktır.



**Şekil 2.14** Yol dirençleri ve tüketime etkilerinin kıyaslanması[21]

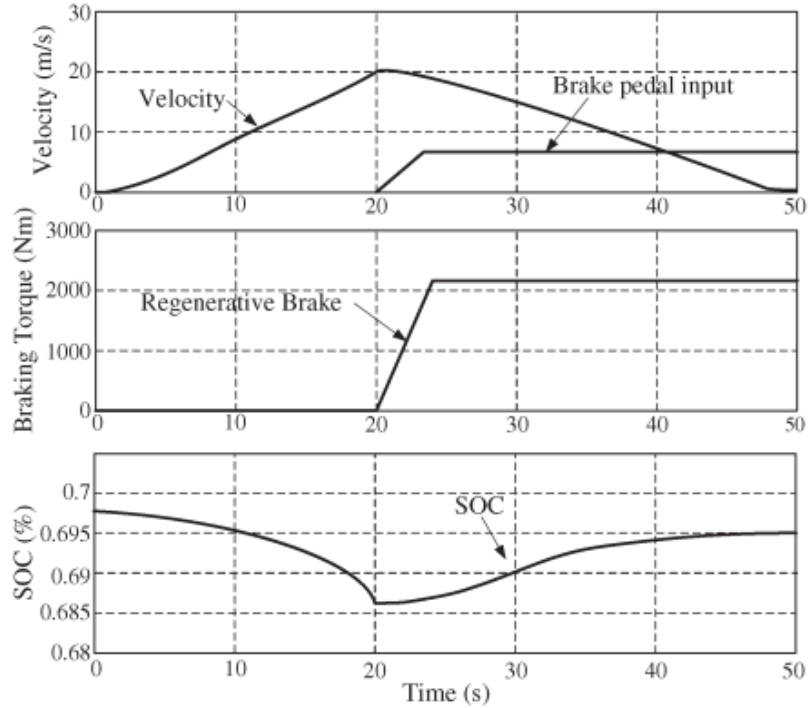
Aerodinaik kuvvetler, araç hızı arttıkça önemli hale gelmektedir. L7e sınıfı isterlerinde belirtilen üst sınır olan 90 km/sat hız üst sınırı nedeniyle, aerodinamik sürtünme direnç kuvvetinin etkisi kısıtlı olacaktır. Bu nedenle bu sınıftaki araç tasarımında  $C_D$  sürüklenme katsayısı önemli önceliklerden olmamaktadır. Daha önemli olan iki değer, yuvarlanma direnci ve atalet direncidir. Bu da araç tasarımında ağırlığı önemli hale getirmektedir.

### 2.4.3 Rejeneratif Frenleme

Hareket halindeki bir araç yavaşlarken veya yokuş aşağı hareket ederken, aracın kinetik enerjisi elektrik motorunun jeneratör görevinde çalışması ile batarya paketinde depolanabilir. Frenleme anında, motordan elde edilecek olan alternatif akım eviriciden geçerek bir miktar verim kaybı ile doğru akıma dönüştürülür. Böylece sürüş çevrimi ve eğimin değerine de bağlı olarak elektrikli araçlarda menzilin artırılması sağlanabilir.

Rejeneratif frenleme, elektrikli araçlarda kendi başına kullanılabilecek bir çözüm değildir. Disk frenleri veya kampana fren mekanizması araçta yine de bulunmalıdır. Rejeneratif frenleme mekanizmasında, frenleme kontrolcüsü çok önemli rol oynamaktadır çünkü motorun fren ve tahrik süreçlerinin tamamını denetlemektedir. Fren kontrolcüsü, motorun devir hızını, torkunu ve oluşturduğu akımı takip ederek batarya beslesine ve fren torkuna karar verir.

Rejeneratif frenleme sağlayacak motor ve kontrolcüsü doğru seçildiğinde ve kalibre edildiğinde, batarya paketine geri kazandırılacak olan enerji %8 ile %25 arasında olacaktır. Geri kazandırılan enerji oranı, araç üzerindeki tüketicilere ve sürüş çevrimine bağlıdır. [22]



**Şekil 2.15** Bir elektrikli araç simülasyonunda rejeneratif frenlemenin hız, şarj durumu ve fren pedal pozisyonu ile gösterimi[23]

Önceki bölümde verilen değerler ve simülasyon kurgusu ile birlikte gerekli hesaplamalar MATLAB ortamında yapılarak aracı koşturabilecek olan batarya-motor ikilisi seçimi incelenecektir.

Motoru sorunsuz yürütebilecek olan batarya konfigürasyonu belirlendikten sonra batarya paketi 3D ortamda tasarlanacak ve iç komponentleri belirlenecektir. Batarya paketi tasarımında çalışma koşulları ile birlikte soğutma ve ısıtma ihtiyacı değerlendirilecektir. Soğutma sistemi ve sızdırmaz gövdesiyle birlikte batarya paketi tasarımı detaylı olarak yapılacaktır.

### 3.1 Güç Aktarım Elemanları

#### 3.1.1 Motor

Elektrikli motorlar, elektrikli araçlarda en önemli elemanlardan oldukları gibi, tüm sürüş performansını ve karakteristiğini de etkilerler. Müşteri ihtiyacını karşılamak amaçlı olarak seçilecek olan batarya-motor ikilisi seçimi araç hızlanması, frenlemesi ve sürüş hızlarında büyük rol oynamaktadır. Araçta kullanılacak motor olarak Magna marka, Şekil 3.1’de tork-devir eğrisi paylaşılmış olan motor kullanılmıştır.

#### 3.1.2 Vites Kutusu

Elektrikli araçlarda vites kutusu, içten yanmalı motorlara göre daha az önemdedir. Çünkü elektrikli araçlar geniş bir devir aralığında yüksek performans ve verim sağlayabilmektedir. Bu nedenle, regülasyon kısıtı olan üst sınırdaki 90 km/saat hızı, motorun üst devir eşiği olan 12000 devir/dakika’da çalıştırabilmek için yeterli olan dişli oranı 12, gerekli hesaplamalarda kullanılabilmek için seçilmiştir.

### 3.1.3 Elektrik Kontrol Ünitesi

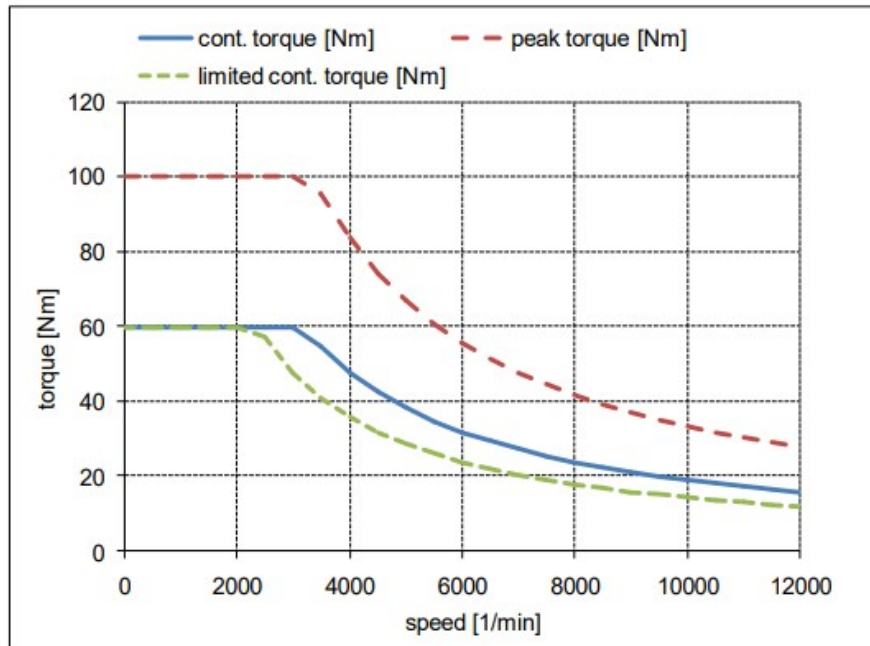
Elektrikli araçlarda içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha fazla sayıda "elektrik kontrol ünitesi" bulundurulması gerekir. Bir çok kompleks kontrol sistemi bu üniteler aracılığıyla çalıştırılır. Bunların bir kısmına örnek aşağıdan verilebilir:

-VCU (Araç Kontrol Ünitesi): İçten yanmalı araçlardaki Motor Kontrol Ünitesi (ECU)'ya benzer işlevi vardır. Pedal pozisyonu ve hıza göre, aracın ihtiyaç duyduğu torku ayarlar. Sadece motor değil, aracın kritik fonksiyonlarının ve bataryanın şarj/deşarj durumlarının da kontrolü genellikle VCU sorumluluğundadır.

-Şarj Ünitesi: Özel bir soket yardımı ile batarya paketinin şarj edilmesini denetler, şarjın başlangıç ve bitişine karar veren ünedir.

-Evirici: Batarya paketinden gelen doğru akım (DA)'ı alternatif akım ile çalışan elektrikli motoru tahrik etmek için eviriciden geçirilir, böylece doğru akım; alternatif akıma dönüştürülmüş olur. Frenleme anında bataryayı şarj etmek için gerekli olan dönüşüm de tersi şekilde alternatif akımdan doğru akım'a evirici tarafından döndürülerek bataryaya gönderilir.

-DA/DA Çevirici: Araçta bulunan standart 12V ürünleri çalıştırmak için kullanılan akünün şarj olma işlemlerinden sorumludur. Batarya paketinden gelen gerilim akımı düşük gerilim aküye göndermek için çevirici gereklidir.



Şekil 3.1 Kullanılan AC Motor Tork Devir Eğrisi



### 3.1.4 Sürüş Simülasyonu

Bu motor bilgilerine göre aşağıdaki tablodaki araç bilgileri simülasyona girilmiş ve MATLAB ortamında aracın WLTP Sınıf 1 ve NEDC sürüş çevrimine göre, motor ve batarya yeterliliğini değerlendirebilmek için farklı eğim değerlerinde çevrimi tamamlanmıştır.

**Tablo 3.1** Simülasyonda koşturulan araç değerleri

| Tanım                          | Değer | Birim             |
|--------------------------------|-------|-------------------|
| Araç Ağırlığı                  | 1500  | kg                |
| Azami Hız                      | 90    | km/saat           |
| Araç Ön Alanı                  | 2.5   | mm <sup>2</sup>   |
| Motor Gücü                     | 15    | kW                |
| Motor Torku                    | 90    | $N * m$           |
| rdyn                           | 0.3   | m                 |
| Dişli Oranı                    | 12    | -                 |
| Yuvarlanma Direnci Katsayısı   | 0.1   | -                 |
| Sürüklenme Katsayısı ( $C_d$ ) | 0.35  | -                 |
| Hava Yoğunluğu                 | 1.1   | kg/m <sup>3</sup> |

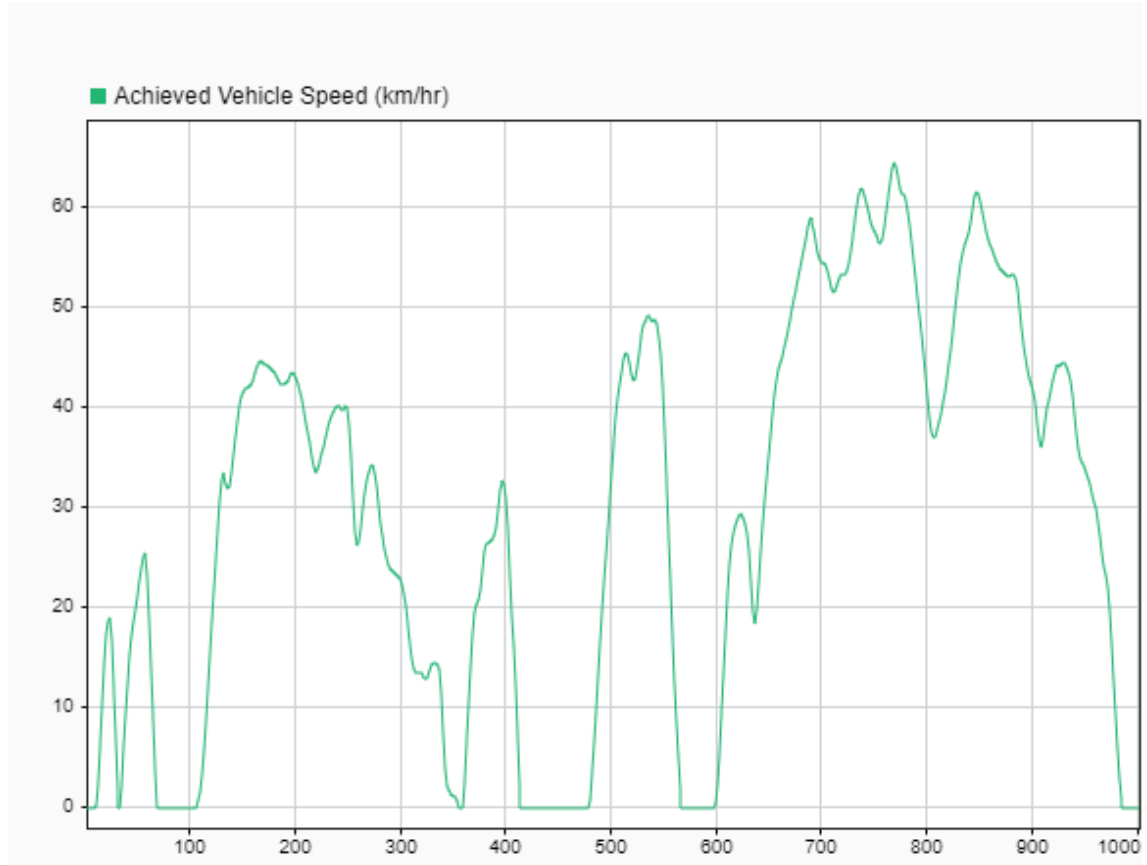
Azami motor gücü ve araç hızı homologasyon kriterlerinden gelen değerler olarak simülasyona girilmiştir. Aracın geri kalan kriterleri de benzer rakip araçlardan örnek alınarak belirlenmiş gövde ve güç aktarma elemanları bilgileri olup, 8.1 km uzunluğunda olan WLTP Sınıf 1 sürüş çevriminin ilk "düşük" ve "orta" bölümleri koşturulmuştur.

Sonuçların daha doğru yorumlanabilmesi ve sıcaklık seviyelerinin daha gerçekçi görüntülenebilmesi amacıyla WLTP Sınıf 1 sürüş çevrimi art arda 5 defa koşturulacak şekilde simüle edilmiştir. Ayrıca elektrikli araçlarda geliştirme süreçlerinde yine yaygın şekilde kullanılan NEDC sürüş çevrimi de farklı eğim seviyelerinde değerlendirilmiştir.

### 3.1.5 WLTP Sürüş Çevrimi Sonuçları

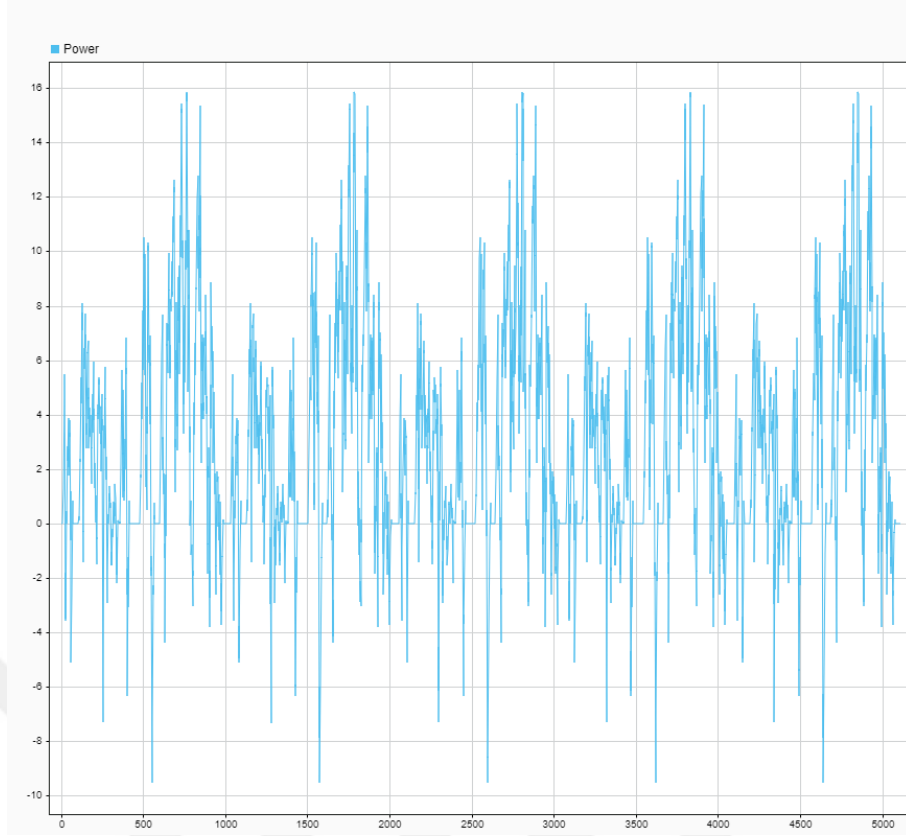
#### 3.1.5.1 Eğimsiz Yolda Sürüş Çevrimi

Şehiriçi sürüşlere daha yakın olan bu gerçekçi profile, azami hız 65 km/saat'e kadar çıkmaktadır. Sürüş çevriminde eğim bulunan bir kısım olmadığı için eğimli alanda sürüş daha sonrasında simüle edilecek ve motor-batarya kabiliyeti değerlendirilecektir. Şekil 3.2'de verildiği üzere WLTP Sınıf 1 sürüş çevrimi; Tablo 3.1'de verilen motor ve araç bilgileri ile sorunsuz koşturulabilmiştir.



Şekil 3.2 MATLAB'de motor ve batarya ile koşturulan sürüş çevrimi

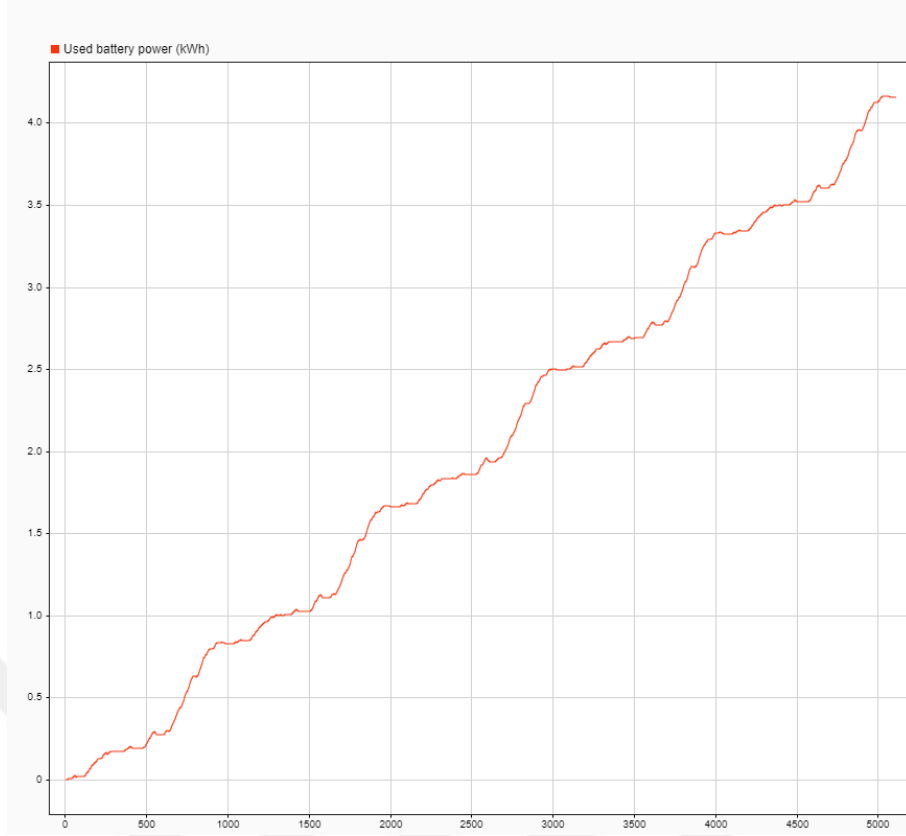
Şekil 3.3'te verilen batarya güç grafiğinde ise, %90 olan batarya-inverter ve motor sistemlerinin toplam verimi dahil edilerek koşturulan araçta, sıfırın altında bulunan alanlarda rejenerasyon ile bataryaya geri kazandırılacak olan güçler hesaplanmıştır. Ayrıca Şekil 3.3'te görüldüğü üzere batarya paketinin azami güç değerleri de 16 kW'tır. Verim kayıplarının da hesaba katıldığı simülasyonda motordan elde edilecek olan azami 15 kW güç için batarya paketinden 16 kW güç elde edilmiştir.



**Şekil 3.3** MATLAB’de koşturulan aracın bataryasından alınan güç değerleri

Araç modellemesi sadece motor ve batarya içermektedir. Diğer yan tüketiciler hesaba katılmamıştır. Sadece motorun, aracın gövdesini istenen sürüş profilinde sürebilmesi için gerekli ortalama tüketim değeri 10.3 kWh/100 km olarak belirlenmiştir. Batarya paketlerinin doğası gereği hücreler arası dengeleme ve kimyasal farklar nedeniyle gerilim farkları hesaba katıldığında, güvenli bölgede kalmak amacıyla %80 deşarj derinliği (DoD) hesaba katıldığında; batarya paketinin 100 kilometre menzilli bir operasyonu desteklemesi için en az 12.8 kWh kapasiteye sahip olması gerekmektedir. 12.8 kWh kapasite ile, batarya paketinin genel olarak 8 yıl boyunca operasyonu sorunsuz sağlayabileceği düşünülebilir.

Batarya paketinin kapasitesinin düşük olması nedeniyle şarj işlemi de hızlı tamamlanacaktır. Ev tipi şarj sistemlerinde özel bir girişe ihtiyaç duymadan direkt olarak priz çıkış gücü 3.2 kW’tır. Bu güç düşünüldüğünde batarya paketi ek olarak ısıtma ve soğutma ihtiyaç duymayacaktır ve ek olarak araç üzerindeki tüketiciler de çalışmazsa; şarj işlemi dört saatten az sürede tamamlanacaktır.

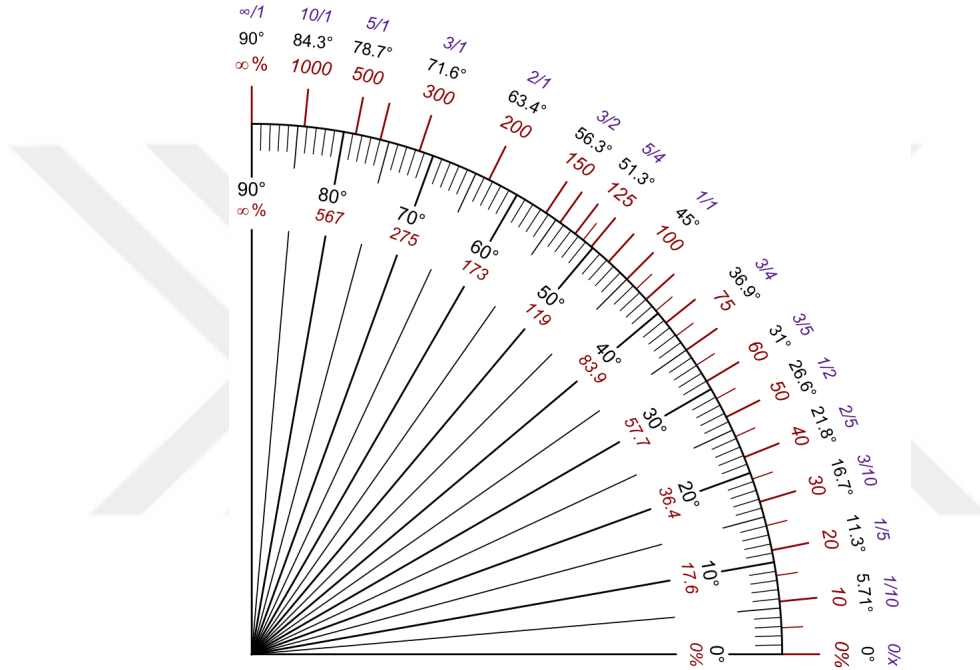


**Şekil 3.4** MATLAB’de ardışık 5 defa koşturulan WLTP Sınıf 1 batarya kapasite tüketim değerleri

Şekil 3.4’te gösterildiği üzere art arda 5 defa koşturulmuş olan WLTP Sınıf 1 çevriminde batarya paketinden elde edilen toplam enerji, frenleme kazanımları dahil edildiğinde 4.1 kWh değerindedir. Eğim, WLTP koşulları gereği eğim %0 kabul edilmiştir.

### 3.1.5.2 Eğimli Yolda Sürüş Çevrimi

Motor ve batarya paketinin performansını ve farklı eğimlerde tüketimlerini değerlendirmek üzere, WLTP Sınıf 1 sürüş çevriminde eğim Şekil 3.5'te de gösterilmiş olan 0.5 (26.5°) değerinde girilerek simülasyon tekrar oluşturulmuştur. Aracın üzerindeki dirençlerin bir kısmını değiştirecek olan eğim nedeniyle, sürüş çevriminin aynı kalması durumunda batarya paketinden talep edilecek olan akım değerleri yükselecektir. Bu da batarya paketinin daha kısa sürede şarjının bitmesine ve akım seviyesinin karesiyle doğru orantılı olması nedeniyle daha hızlı tükenmesine neden olacaktır.



Şekil 3.5 Yol Eğimlerinin Gösterilmesi

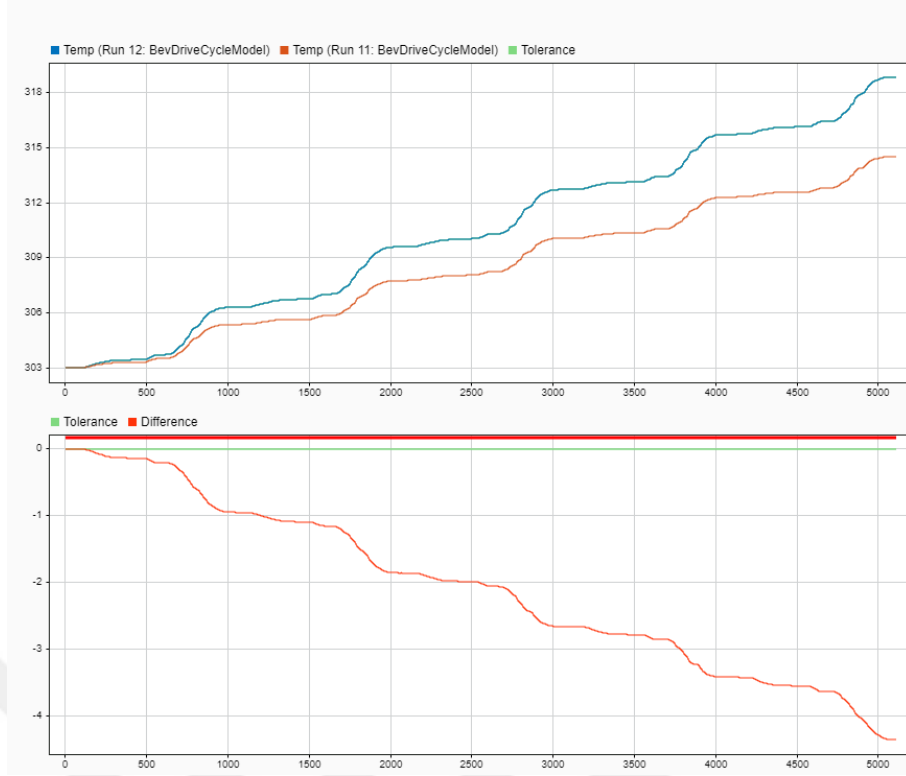
Batarya paketinin soğutma sistemine ihtiyaç duyup duymayacağı, zorlanmış olacağı 26.5° eğimli sürüş çevrimi olan bu senaryoda belirlenebilecektir. Eğim, batarya paketinde olduğu gibi elektrik motor üzerindeki yükleri ve dolayısıyla akımları da artırmakta, elektrik motorun da ısınmasına neden olmaktadır.

Şekil 3.6’da da görülebileceği üzere eğimli ve eğimsiz yol arasındaki sürüş çevriminde araç hızları neredeyse aynıdır. Sürüş çevriminin en yüksek hıza ulaşılan kısımlarında referans araç hızı ile ulaşılan hız arasında 2 km/saat hız farkı oluşmaktadır. Bu fark yüksek hızlara çıkılan kısımlara özel olarak kalmakta; sürüş hızının düştüğü bölümlerde motor, kendisine gelen talebi karşılayabildiği için referans ve gerçekleşen sürüş hızları arasındaki fark kapanmaktadır.



Şekil 3.6 Yol Eğimlerinin Gösterilmesi

Böylece, seçilen elektrikli motorun; sürüş çevriminde eğim yüksek olsa dahi kolaylıkla sürüşü sağlayabildiği ve düzenlenen batarya konfigürasyonu ile güç açısından bir sorun yaşanmadığı görülmektedir. 5 defa art arda sürülen WLTP sürüş çevriminde, eğimli ve eğimsiz sürüşlerin batarya sıcaklık farkları karşılaştırması ise Şekil 3.7’de verilmiştir.



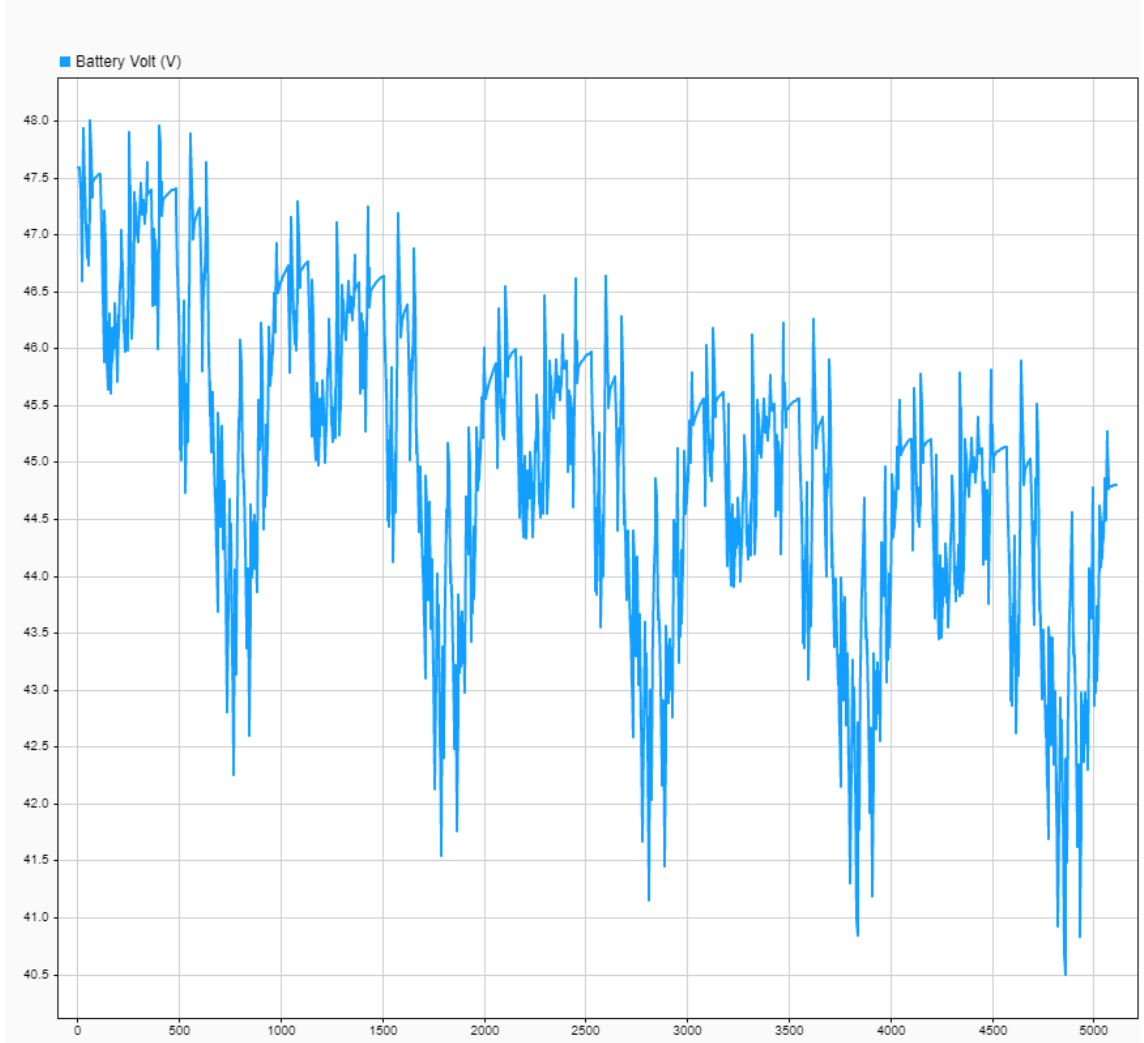
**Şekil 3.7** Yol Eğimlerinin Gösterilmesi

İki farklı senaryo için 30 °C başlangıç sıcaklığı baz alınarak, sıvı veya hava soğutmanın düşünülmediği, sistemin tüm ısı kayıplarının ihmal edildiği kötü senaryoya uygun hazırlanmış olan simülasyonda, batarya paketlerinden 0° eğimli ortamda aracı tahrik edilmesini sağlayan, 11.5 °C sıcaklık artışına maruz kalırken; eğimin 26.5°C olduğu durumdaki batarya paketinin sıcaklığı ise 15.2 °C daha fazla olarak 45.2 °C seviyesine gelmektedir.

Hücrelerin güvenli operasyon alanlarının 55 °C sıcaklık seviyesine kadar çıkabilmesi nedeniyle iki durumda da batarya paketleri ısınmamakta ve ayrı bir soğutucu döngüsüne ihtiyaç duymamaktadırlar. Olası ısıtma ihtiyacı durumu Bölüm 3.2.4.1’de farklı şehirlerin sıcaklık seviyeleri incelenerek belirlenecektir.

### 3.2 Batarya Paketi Tasarımı

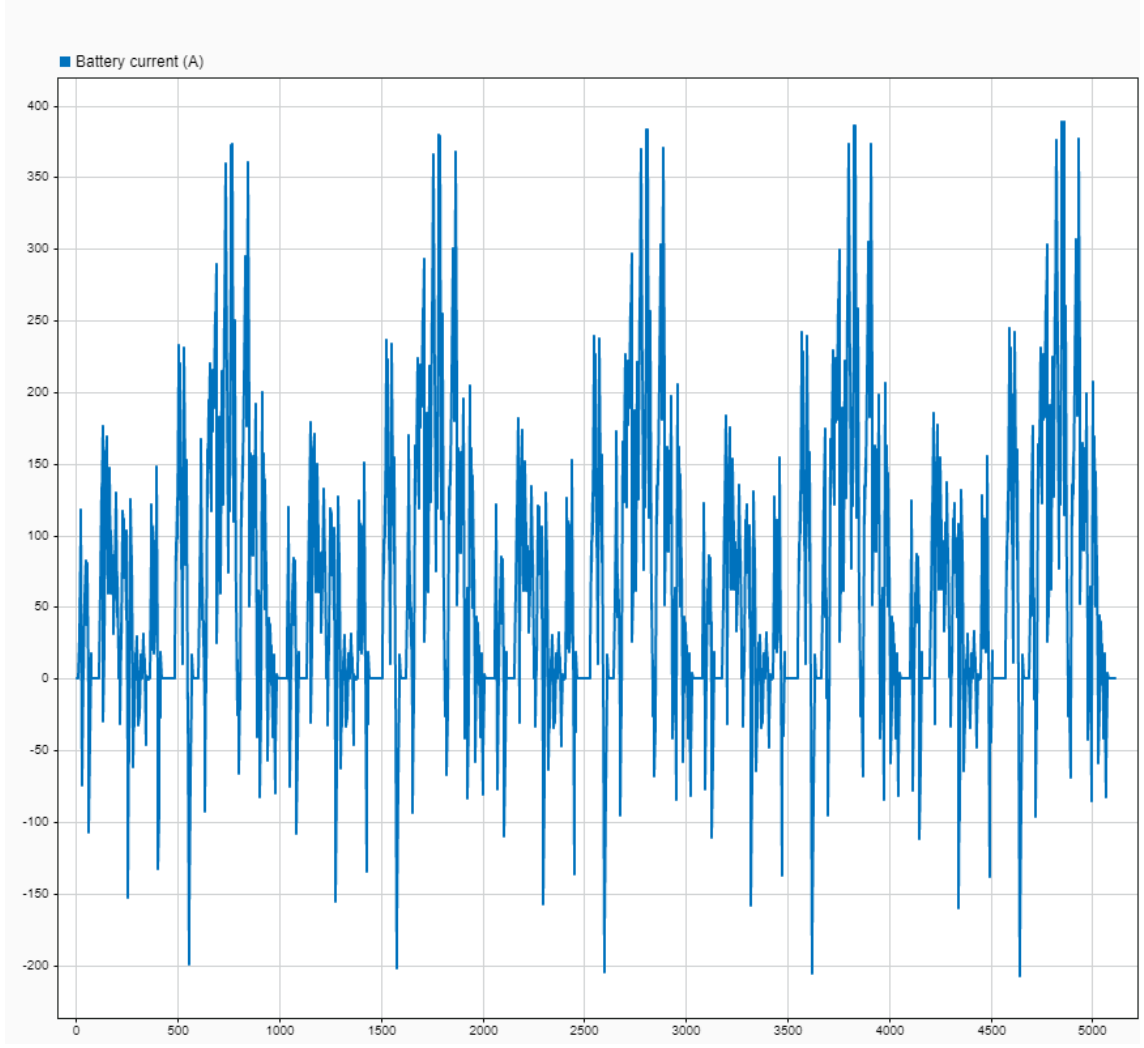
Yürütülen senaryoda, gerekli güç seviyelerinin sağlanabilmesi için motor gerilimi 48 Volt olarak seçilmiştir. 48 Volt motor geriliminde, batarya paketinin WLTP Sınıf 1 sürüş çevrimindeki gerilim seviyeleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu gerilim değerlerini sağlamak için seçilecek hücrenin seri konfigürasyonu kontrol edilmelidir. Bu inceleme Bölüm 3.2.2’de yapılmıştır.



Şekil 3.8 MATLAB’de tek sefer koşturulan WLTP Sınıf 1 batarya çıkış gerilimi

Bir diğer kontrol edilmesi gereken unsur da hücrelerin paralel bağlantı konfigürasyonudur. Hücreler paralel bağlantılarıyla doğru orantılı olarak akım sağlayabilirler. Şekil 3.9’da verilen akım değerlerini sağlamak için seçilecek olan hücrenin paralel konfigürasyonu hazırlanmıştır.





**Şekil 3.9** Sürüş sırasında batarya paketinden talep edilen akım seviyeleri grafiği

Akım seviyelerinde görülen tepe değerler 375 Amper değerini aşmamaktadır. Sürekli akım seviyeleri ise 150 Amper seviyesindedir. Paketten elde edilebilecek akım seviyeleri değerleri bu olması nedeniyle paralel konfigürasyon tek hattan oluşmamalıdır. Bu değerlerde akım sağlayan bir hücre, mevcut ürünlerde bulunamamaktadır.

### 3.2.1 Hücree Seçimi

MATLAB’de koşturulan araç seviyesindeki simülasyonlara bağılı olarak gerilim ve akım seviyeleri WLTP Sınıf 1 sürüş çevrimi baz alınarak değerlendirilmiştir. Paralel ve seri elektriksel bağlantı konfigürasyonu sağlanarak, batarya paketinin 48 Volt gerilimi ve 250 Amper akımı sürüş çevrimi boyunca sorunsuz olarak sağlayabilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle seri bağlantının gerilim optimizasyonunda ve paralel bağlantının akım optimizasyonunda konfigüre edildiğı göz önünde bulundurularak; batarya paketi modülü konfigürasyonu aracı ve motoru sorunsuz çalıştıracak şekilde belirlenmiştir.

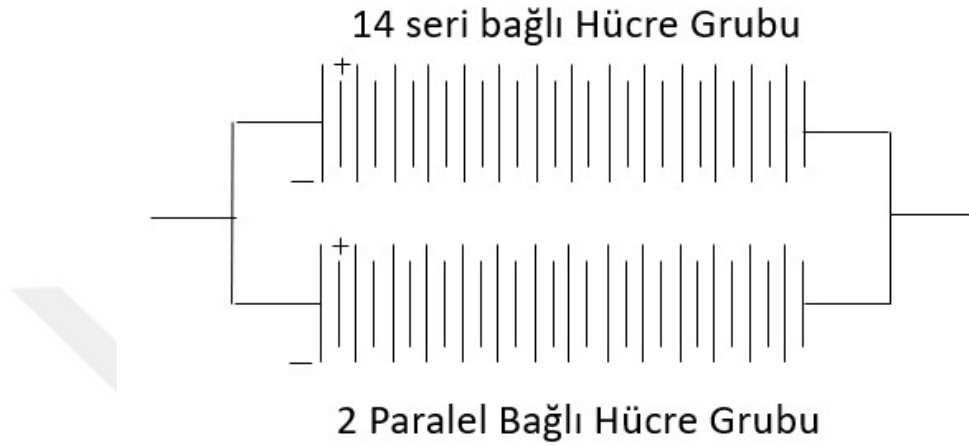
Hücrelerin 0 °C altındaki sıcaklıklarda şarj olamaması nedeniyle ayrıca bir ısıtma sistemi tasarımı ileriki bölümlerde incelenecektir.

| No | Item                         |                              | Parameter Specification |
|----|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1  | Battery Module               |                              | 120AH LiFePO4 Battery   |
| 2  | Nominal Capacity             |                              | 120Ah @ 1C Discharging  |
| 3  | Minimum Capacity             |                              | 120Ah @1C Discharging   |
| 4  | Nominal Voltage              |                              | 3.2 V                   |
| 5  | Internal Resistance          |                              | ≤1mΩ                    |
| 6  | Charging(CC-CV)              | Maximum Charging Current     | 1C                      |
|    |                              | Charging Upper Limit Voltage | 3.65V                   |
| 7  | Discharging                  | Maximum Discharging Current  | 2C                      |
|    |                              | Discharging Cut-off Voltage  | 2.5V                    |
| 8  | Charging Time                | Standard Charging            | 4h                      |
|    |                              | Quick-acting Charging        | 1h                      |
| 9  | Recommended SOC Usage Windom |                              | SOC: 10%~90%            |
| 10 | Operation Thermal Ambient    | Charging                     | 0°C ~ 45°C              |
|    |                              | Discharging                  | -20°C ~ 55°C            |
| 11 | Storage Thermal Ambient      | Short-term (within 1 month)  | -20°C ~ 45°C            |
|    |                              | Long term (within 1 year)    | -20°C ~ 20°C            |
| 12 | Storage Humidity             |                              | < 70%                   |
| 13 | Battery Weight               |                              | Around 2.8kg            |
| 14 | Battery Dimension            |                              | 180 x 180 x 50 mm       |
| 15 | Shell Material               |                              | Aluminium               |

Şekil 3.10 Seçilen CATL LiFePO4 Hücresinin Değerleri

### 3.2.2 Modül Konfigürasyonu

Akım ve gerilim seviyeleri göz önünde bulundurularak elektriksel bağlantı konfigürasyonu belirlenen batarya paketinde kapasitenin düşük olması nedeniyle 1 adet modül tasarımı yeterli olmaktadır. Modüller, şekil 3.11’de de gösterildiği üzere 14 seri ve 2 paralel elektriksel bağlantıya sahip olacaklardır.



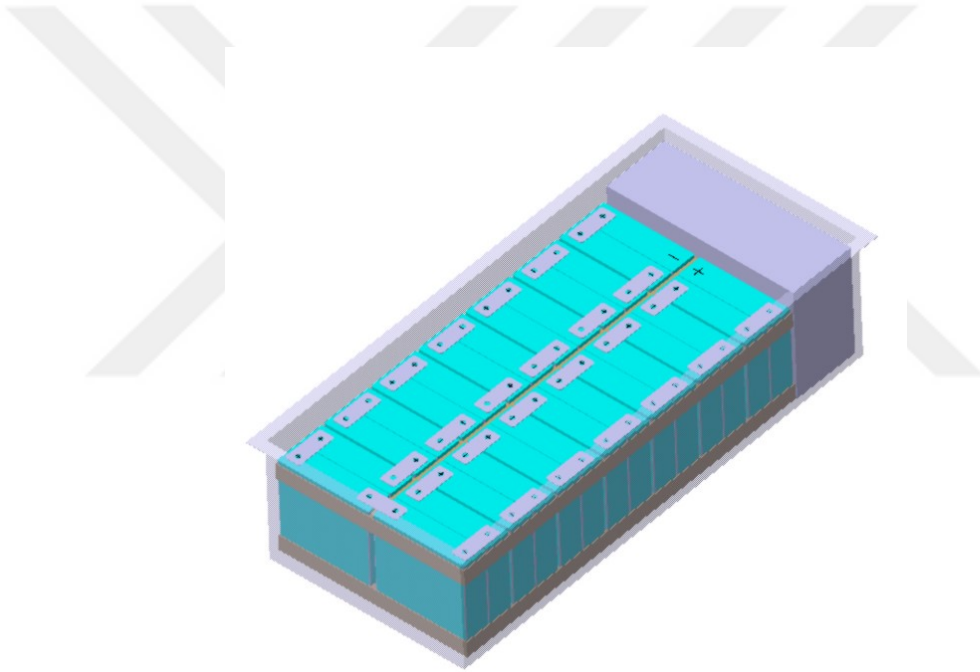
**Şekil 3.11** Modül içerisindeki elektriksel bağlantı konfigürasyonu

2 paralel bağlantı sistemin güvenilirliği açısından da tercih edilmiştir. Seri bağlantılı hücrelerden herhangi birinin bozulması ve gerilimini kaybetmesi durumunda batarya paketi işlevini yitirmeden ikinci bir paralel bağlantı kolundan aracın performansını etkileyecek boyutta olsa da akım elde edilebilmektedir. Hücre değerlerinde verilen "C" değeri, hücrenin akım kapasitesine oranla verebileceği akım seviyelerini göstermektedir. Sürüş çevrimine göre seçilmiş olan CATL LiFePo<sub>4</sub> prizmatik hücresinin akım kapasitesi "2C" değerindedir. Bu da bir adet hücrenin sürekli olarak 240 Amper akım verebileceğini belirtmektedir.

### 3.2.3 Modül Tasarım Detayları

Elektrikli araçların enerji kapasitelerinin düşük olması nedeniyle; hedeflenen menzil değerlerini sağlayabilmesi için ağırlık çok önemlidir. Bu nedenle batarya paketlerinde yaygın olarak kullanılan malzeme alüminyum ve alaşımlarıdır. Hem hafif hem de son yıllarda imalat yöntemlerindeki gelişmeler nedeniyle, üretimi kolay olması nedeniyle, araca ağırlık katmaması için muhafaza malzemesi alüminyum olarak seçilmiştir.

Sızdırmazlık, batarya paketi içerisindeki hücreleri korumak ve olası kısıtdevreleri engellemek adına güvenlik amaçlı sağlanması gereken isterlerdendir. Batarya paketi IP67 seviyesi isterlerini sağlayacak şekilde, muhafazanın üst yüzeyi su yüzeyinin 1 metre altında kaldığında 30 dakika boyunca sıvı sızdırmazlığını sağlayacaktır. Bu nedenle üst yüzeyinde conta basma yüzeyi kullanılmıştır. Seçilecek olan konnektör ve ekipmanlar da bu isterleri sağlayacaktır.



**Şekil 3.12** Modül konfigürasyonuna göre tasarlanmış 3B model ve bara bağlantıları

Batarya paketinin ön kısmında, elektrik ve kontrol ünitelerinin yerleşebilmesi için alan bırakılmıştır. Kontaktör, sigorta, kontrol kartı gibi elektronik ekipmanlar bu alana yerleştirilebilecektir. IP67 isterlerini sağlayan ekipmanlar, eğer batarya

paketi veya elektronik ekipmanlar gibi ısı üretimi sağlayan parçalar ise, sızdırmaz muhafaza üzerine havalandırma valfi yerleştirilmesi gerekir. Batarya paketinde de kullanılacak olan havalandırma valfi Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Havalandırma valfi olmayan muhafazalarda yüksek ve düşük sıcaklıklar arasında oluşan basınç farkları contalar üzerinde baskı oluşturmakta ve muhafazanın sızdırmazlığını riske sokmaktadır. Batarya paketi güç çıkışlarında yüksek gerilim olmaması nedeniyle

**PolyVent  
High Temperature Series**

**AVS 67**

AMF300167



**Şekil 3.13** Modül konfigürasyonuna göre tasarlanmış 3B model ve bara bağlantıları

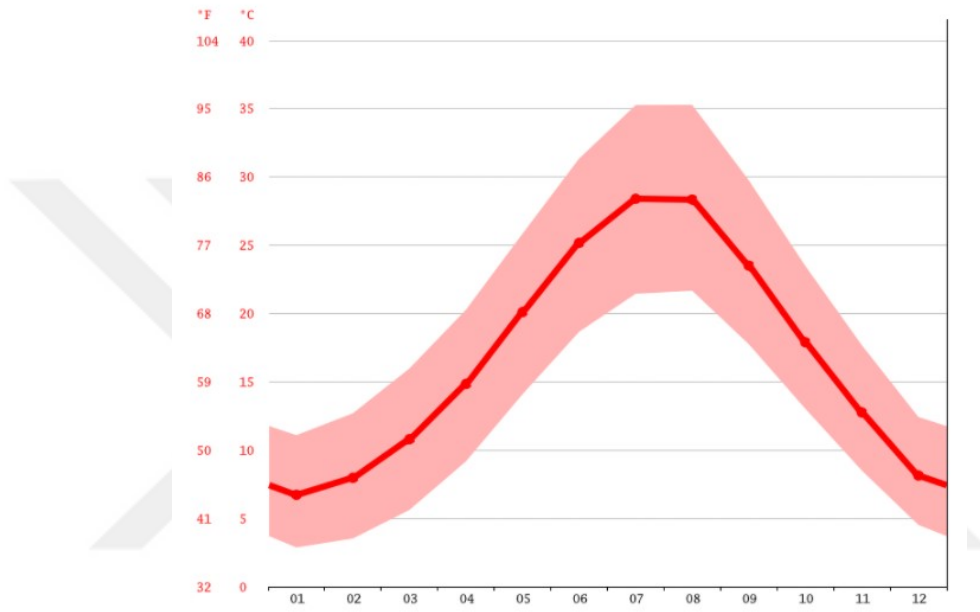
güvenlik amaçlı özel konnektör seçimlerine gerek yoktur. Bu nedenle, Harting firmasından kullanılacak olan IP67 sınıfı sızdırmazlığı sağlayacak, kablo rakoru kullanılacaktır. Kablo rakoru ile sağlanacak olan güç çıkışında, tüketici olan elektrikli araç parçasının konnektör tipine göre kabloların düzenlenmesi gerekmektedir.



**Şekil 3.14** Batarya paketinin güç çıkışında kullanılacak olan rakor bağlantısı parçaları

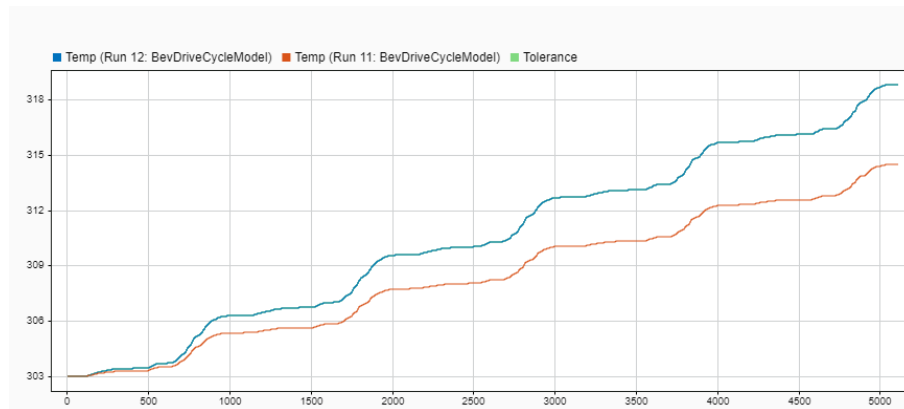
### 3.2.3.1 Isıl Yönetim

Batarya paketi tasarımında ısı yönetim sistemi gerekliliği çevresel koşullara ve performans isterlerine bağlı olarak şekillenir. Türkiye'deki en kalabalık şehirler sırasıyla İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa olması nedeniyle; aracın bu 4 şehirde de herhangi bir performans ve ömür sorunu olmaması hedeflenmektedir. Soğutma sistemi tasarımında incelenmesi en önemli şehir olarak, sıcaklıklar nedeniyle İzmir şehrinin Şekil 3.15'de gösterilmiş olan en sıcak dönemi olan Temmuz ve Ağustos ayları referans alınarak değerlendirme yapılmıştır.



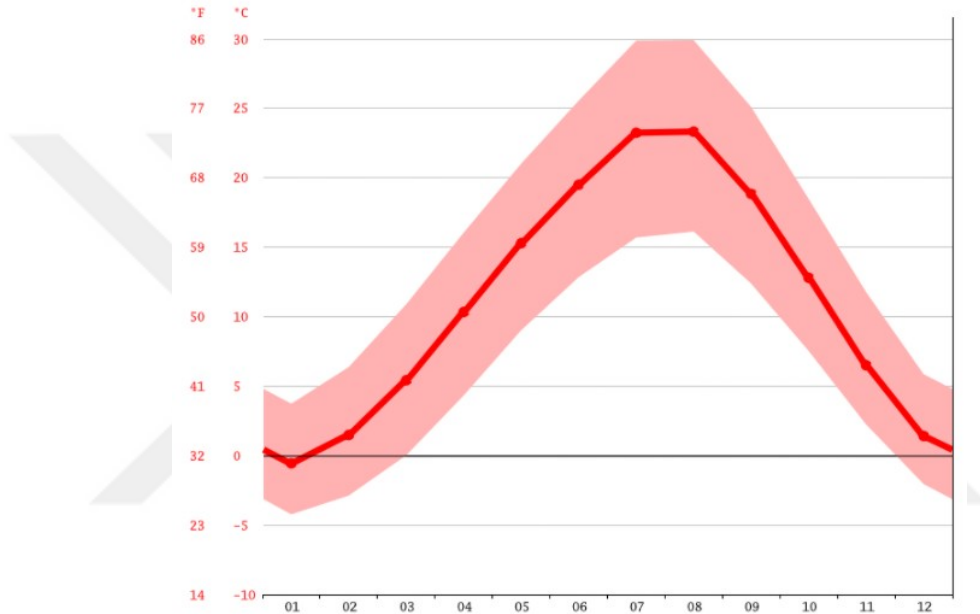
Şekil 3.15 İzmir şehrinin aylık bazda bir yıllık sıcaklık dağılımları grafiği

Hücrelerden elde edilen akımlar dikkate alınarak MATLAB üzerinde yapılan 1B ısı analizler sonunda herhangi bir soğutma sistemi içermeyen batarya paketinde Şekil 3.16'da paylaşılan sıcaklık artışları görülmüştür.



Şekil 3.16 5 defa art arda WLTP sürüş çevrimi sırasında batarya hücre sıcaklıkları

Batarya paketinin kapasitesi ve 5 defa art arda koşturulmuş olan WLTP sürüş çevrimi sürüş çevrimi sonundaki sıcaklık artışları dikkate alındığında batarya paketi en sıcak şehirlerden olan İzmir’de dahi kritik sıcaklık değerlerine ulaşmaması nedeniyle özel bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmayacağına karar verilmiştir. Isıl yönetim sisteminin bir diğer görevi de batarya paketini, düşük sıcaklıklarda şarja hazırlamaktır. 0 °C altındaki sıcaklıklarda şarj olamayan LiFePO<sub>4</sub> hücreler için; ısıtma sistemi gereklidir. Isıtma sisteminin şehirlerde analizi, Türkiye’nin büyük şehirleri referans alındığında Ankara için yapılacaktır. Ankara şehri yıl içinde en soğuk dönemini Ocak ayında geçirmektedir ve sıcaklıklar -5 °C seviyesine kadar inmektedir.



**Şekil 3.17** Ankara şehrinin aylık bazda bir yıllık sıcaklık dağılımları grafiği

Hücresinin ısı özellikleri araştırıldığında; benzer kimyaya sahip LiFePo<sub>4</sub> hücre ile yapılan çalışmalarda  $935 \text{ J}/(\text{kg} * \text{K})$  referans olarak alınmıştır. Hücre ağırlığı olan 2.8 kilogram ve paket başına 2 paralel ve 14 seri bağlantı nedeniyle toplam hücre adeti olan 28 ile hesaplama yapıldığında, ısı dirençler ve ataletler hesaba katılmadığı takdirde 600 W değerinde bir ısıtıcının yaklaşık -15 °C sıcaklığındaki bir batarya paketini şarj olabilir duruma getirmesi yaklaşık 30 dakika sürmektedir. Ankara şehrinin ortalamada en soğuk gününün -5 °C civarında olacağı Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Böylece 600 W değerindeki bir PTC ısıtıcı paketi en kötü hava koşullarında 10 dakika içinde şarj olabilir duruma getirmektedir. Şarj girişine bağlanacak olan güç, Araç Kontrol Ünitesi tarafından öncelikle hücrelere değil; PTC ısıtıcılara yönlendirilecek ve hücrelerin asgari sıcaklığı 0 °C olana kadar ısıtma işlemi devam edecektir. Hücreler belirlenen sıcaklığa ulaştığında batarya paketi kontaktörlerini kapatarak şarj akımına izin vermelidir.

## 4 SONUÇ VE ÖNERİLER

---

Çalışmada, L7e sınıfında bir aracın motor, hücre seçimleri ve batarya paketinin tasarımı çalışılmıştır. Böylece, çalışmada incelenen değerler ışığında çıkarımlar aşağıdaki maddeler ile sunulabilir:

-Menzil, sürüş çevrimine ve sürüş çevriminin eğimine bağlıdır. Elektrikli araçlarda, rejeneratif frenlemenin de devreye alınabilmesi neticesinde eğimli yollarda tahriğe harcanan enerjinin ciddi bir kısmı elektrik motorunun jeneratör olarak çalışması ile geri kazanılabilir.

-şehir içindeki hız profilleri elektrikli araçların tüketiminde ciddi bir değişiklik yapmamaktadır. Şehir içerisinde kullanılacak olan elektrikli araçlarda, tahrik için tüketilecek olan enerji rejeneratif frenleme ile geri kazanılabilir. Ancak yüksek hızlardaki tüketim değeri ciddi olarak artmaktadır ve elektrikli motorun veriminin yüksek devirlerde düşmesi nedeniyle yüksek hızlarda tüketim yüksek ve geri kazanım azdır.

-Lityum iyon hücrelerle üretilecek olan batarya paketlerinin maliyeti yüksek olması ve güvenlik endişeleri nedeniyle, L7e sınıfı elektrikli araçlarda kullanılması LiFePO<sub>4</sub> hücre kimyası kadar tercih edilebilir değildir. Gerilim seviyeleri ve akım seviyeleri yüksek olan LiFePO<sub>4</sub> hücreler, elektrikli güç isterlerini kolaylıkla karşılayabilmektedir.

-Batarya paketinin elektrik bağlantı konfigürasyonu, elektrikli motorun çalıştırılması ve akım seviyeleri ile nedeni ile çok önemlidir. Seri bağlantıda elde edilecek olan çıkış gerilimi motorun çalışma aralığında olmalıdır.

-Sıcaklık seviyeleri L7e sınıfı batarya paketi için önemli değildir. L7e sınıfı elektrikli araçlar, küçük kapasiteli batarya paketleri nedeniyle hızlı şarja ihtiyaç duymazlar, ayrıca ağırlıkları ve azami hız sınırlamaları nedeniyle de talep edilecek olan akım değerleri de nispeten küçüktür. Bu nedenle, hesaplamaların da gösterdiği üzere ayrı bir soğutma sistemi ihtiyacı bulunmamaktadır. Ancak, negatif sıcaklıklarda batarya paketi içerisindeki hücrelerin kimyasal kısıtlamaları nedeniyle şarj olmaları mümkün değildir. Bu nedenle batarya paketinin içerisinde ayrı bir PTC ısıtıcının olması, batarya paketini soğuk havalarda şarj edilebilir kılması nedeniyle önemlidir.



- [1] A. Lega, M. Pennese, "Concept design and performance assessment of an electric powertrain for a 17e category vehicle," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe)*, IEEE, 2019, P-1.
- [2] C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.
- [3] G. Cipriani, V. Di Dio, R. Miceli, G. R. Galluzzo, M. Russo, "Evaluation of performance and efficiency and type approval of an electrically assisted bicycle drive," in *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, IEEE, 2013, pp. 1163–1168.
- [4] T. Liu, S. Ge, X.-G. Yang, C.-Y. Wang, "Effect of thermal environments on fast charging li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 511, p. 230 466, 2021.
- [5] D. A. H. McCleary, "Three dimensional computational modeling of electrochemical performance and heat generation in spirally and prismatically wound configurations," 2012.
- [6] M. K. Eren, İ. Eymen, A. Kadir, T. Gücükoğlu, K. Erhan, "Effects of cell and module configuration on battery system in electric vehicles," *International Journal of Engineering Technologies IJET*, vol. 4, no. 4, pp. 143–152, 2018.
- [7] A. Väyrynen, J. Salminen, "Modular li-ion battery systems for electric and hybrid powertrains," in *6th AVL International Commercial Powertrain Conference. Graz, Austria: AVL List GmbH*, 2011.
- [8] TE, *Te evc 500 automotive contactor*, <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet>.
- [9] —, *Bussman hv fuse*, <https://www.sensata.com/products/electrical-protection/high-voltage-fuse-hvf>.
- [10] P. G. Pereirinha, J. P. Trovão, "Standardization in electric vehicles," in *12th Portuguese-Spanish Conference on Electrical Engineering, XIICLEEE, Ponta Delgada, Portugal*, 2011.
- [11] M. Brandl *et al.*, "Batteries and battery management systems for electric vehicles," in *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, IEEE, 2012, pp. 971–976.
- [12] A. Kilic *et al.*, "Design of master and slave modules on battery management system for electric vehicles," in *6th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'Riga)*, vol. 1, 2017, pp. 161–166.

- [13] Y. Gao, M. Ehsani, J. M. Miller, "Hybrid electric vehicle: Overview and state of the art," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005.*, IEEE, vol. 1, 2005, pp. 307–316.
- [14] K. Rajashekara, "Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 3–10, 2013.
- [15] Y. Gürbüz, A. A. KULAKSIZ, "Elektrikli araçlar ile klasik içten yanmalı motorlu araçların çeşitli yönlerden karşılaştırılması," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 117–125, 2016.
- [16] C. P. Jose, S. Meikandasivam, "A review on the trends and developments in hybrid electric vehicles," in *Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, Springer, 2017, pp. 211–229.
- [17] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, M. Krishnamurthy, "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for ev and hev applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, 2015.
- [18] L. Qinghua, "Analysis, design and control of permanent magnet synchronous motors for wide-speed operation," 2005.
- [19] B. T. B. E. V. M. Westenhaus, *The best electric vehicle motor*, <https://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2010/02/09/the-best-electric-vehicle-motor/>.
- [20] R. BOSCH, *BOSCH AUTOMOTIVE HANDBOOK*. SAE SOC OF AUTOMOTIVE ENG, 2018.
- [21] M. et cie, *The tyre: rolling resistance and fuel savings*. Société de technologie Michelin, 2003.
- [22] M. Yoong *et al.*, "Studies of regenerative braking in electric vehicle," in *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, IEEE, 2010, pp. 40–45.
- [23] X. Nian, F. Peng, H. Zhang, "Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless dc motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5798–5808, 2014.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

İletişim Bilgileri: oguzsoydas@gmail.com

### Konferans Bildirisi

1. L7E CLASS ELECTRIC VEHICLE POWER CALCULATIONS AND BATTERY DESIGN / 2nd International Modern Scientific Research Congress, Istanbul

Ad Soyad: Ömer Oğuz Soydaş

Doğum Tarihi:

Uyruk: TC

Meslek: Makina Mühendisliği

İkamet : İstanbul

Mesleki Deneyim:

2017 - 2018 : Altınay Enerji

2018 - 2019 : AVL Türkiye

2019- : Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu

