



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERE YÖNELİK YÜKSEK KAPASİTELİ
BATARYA PAKETİNİN KONFİGÜRASYONU VE İZLENMESİ

Funda SEYİTOĞLU

DANIŞMAN
Doç. Dr. Erkan ATMACA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma, 29.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

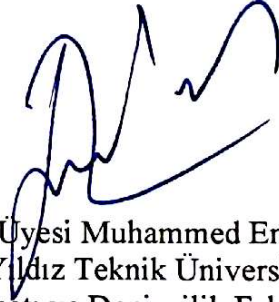
Tez Jürisi



Doç. Dr. Erkan ATMACA(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Gülten GÜRDAĞ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin BAŞAK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, çağımızın en büyük eğilimlerinden olan elektrikli araç batarya sistemleri, elektrikli bir otobüs için tasarlanmıştır. Elektrikli otobüslerin pazardaki konumundan, batarya sistemini oluşturan komponentlerin seçimine, uluslararası standartlar çerçevesinde güvenlik hesaplamalarının yapılmasına ve nihayetinde sistemin tasarlanmasına kadar olan süreçler yer almaktadır.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca gerek derslerde gerekse tez çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen, yardımları ve verdiği fikirler ile kariyer planımın oluşmasında büyük katkısı olan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Erkan ATMACA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her alanında olduğu gibi, bu zorlu süreçte de her zaman yanımda olan ve desteklerini benden esirgemeyen, motivasyonumu her zaman yüksek tutmam için beni teşvik eden sevgili aileme; anneme, babama, kız kardeşime ve eşime sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, AVL Türkiye Batarya Geliştirme Ekibinde yer alan kıymetli arkadaşlarımdan her birine saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2019

Funda SEYİTOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER.....	3
2.1.1. Şehir Otobüslerinin Sınıflandırılması.....	3
2.1.2. Elektrikli Otobüs Trendleri ve Pazar Araştırması	4
2.1.3. Elektrikli Otobüslerin Yük Dağılımları	5
2.1.4. Otobüsler İçin Sürüş Çevrimleri.....	6
2.2. BATARYA PAKETLERİNDE ELEKTRİKSEL GÜVENLİK.....	8
2.2.1. Elektrikli Araçlarda Gerilim Sınıfları.....	8
2.2.2. Elektriksel Güvenlik Standartları	8
2.2.3. Elektriksel Yalıtım.....	9
2.2.3.1. Yalıtım Direnci	10
2.2.3.2. Yalıtım Koordinasyonu.....	11
2.3. BATARYA PAKETLERİNDE FONKSİYONEL GÜVENLİK.....	13
2.4. BATARYA PAKETLERİNİN MİMARİSİ	15
2.4.1. Batarya Paketlerinin Elektrik/Elektronik Üniteleri	16
2.4.1.1. Kontaktörler	16
2.4.1.2. Sigorta	17
2.4.1.3. Akım Sensörleri	18
2.4.1.4. Ön Şarj Devresi.....	20
2.4.1.5. EMC Filtre Devresi.....	22
2.4.1.6. Konnektörler.....	24
2.4.2. Batarya Yönetim Sistemleri.....	25

2.4.2.1.	<i>Batarya Yönetim Sistemlerinin Fonksiyonel Gereksinimleri</i>	25
2.4.2.2.	<i>Batarya Yönetim Sistemlerinin Donanım Topolojileri</i>	28
3.	MALZEME VE YÖNTEM	30
3.1.	HEDEFLenen KONSEPT TASARIMI	30
3.1.1.	Modül Konfigürasyonu ve Batarya Paketi Tasarımı	30
3.1.2.	Batarya Paketlerinin Yerleşimi, Stabilitesi ve Dinamiği.....	32
3.1.3.	AVL Sürüş Çevrimi ile Sistemin Modellenmesi.....	35
3.2.	TASARLANAN KONSEPT İÇİN ELEKTRİKSEL GÜVENLİK	37
3.3.	BATARYA ELEKTRİK/ELEKTRONİK ÜNİTESİNİN TASARIMI VE GÜVENLİK STRATEJİSİ.....	41
3.3.1.	Elektrik/Elektronik Ünitesinin Tasarımı	41
3.3.2.	Komponent Seçimi	43
3.3.3.	Ön Şarj Devresinin Simülasyonu	44
3.3.4.	Batarya Paketinin Kısa Devre Hesabı	48
3.3.5.	Batarya Paketlerinin Açma Stratejisi: Batarya Koruma Elemanlarının Koordinasyonu.....	53
3.4.	TASARLANAN KONSEPT İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ.....	57
4.	BULGULAR	62
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: 12 metre uzunluktaki elektrikli otobüslerin yük paydaşları.....	6
Şekil 2.2: SORT3 sürüş çevrimi.....	7
Şekil 2.3: Havadan ve yüzeyden boşluk mesafeleri.....	11
Şekil 2.4: YG batarya paketi mimarisi.....	15
Şekil 2.5: TE EVC500 kontaktör örneği [26].....	17
Şekil 2.6: Bussmann sigorta örnekleri [28].....	18
Şekil 2.7: Murata DMS Şönt sensör örneği [30].....	19
Şekil 2.8: LEM DHAB S/137 Hall sensör örneği [31].....	19
Şekil 2.9: Batarya paketi için ön şarj devresi yapısı [33].....	21
Şekil 2.10: RARA ön şarj direnci örnekleri [34].....	21
Şekil 2.11: LSIS ön şarj kontaktörü örneği [36].....	22
Şekil 2.12: EMC Filtre Devresi.....	22
Şekil 2.13: TE yüksek gerilim otomotiv konnektörü örneği [39].....	24
Şekil 3.1: 6S3P modül devre şeması.....	31
Şekil 3.2: Batarya paketi devre şeması.....	32
Şekil 3.3: 12 metre alçak giriş otobüslerde batarya paketleri için ayrılabilir alanlar.....	32
Şekil 3.4: Konsept tasarımında kullanılması düşünülen batarya paketi konumları.....	34
Şekil 3.5: 6 adet batarya paketinin otobüse yerleşimi.....	34
Şekil 3.6: AVL sürüş çevrimi.....	35
Şekil 3.7: Cruise M sistem modeli.....	36
Şekil 3.8: PDU şematığı.....	42
Şekil 3.9: Batarya paketi şematığı.....	42
Şekil 3.10: Eşdeğer ön şarj devresi.....	45

Şekil 3.11: Ön şarj devresi simülasyonu.	46
Şekil 3.12: Ön şarj anında DC Link kapasitörü üzerindeki gerilim değişimi.....	47
Şekil 3.13: Ön şarj anında ön şarj kontaktörü üzerindeki akım değişimi.....	47
Şekil 3.14: Ön şarj süresi boyunca +Kontaktör üzerindeki akım değişimi.	48
Şekil 3.15: Batarya paketine ait bileşenlerin iç direnç şematiği.....	50
Şekil 3.16: Batarya paketinin çalışma bölgeleri.	53
Şekil 3.17: Ana kontaktörlerin çalışma bölgeleri.	55
Şekil 3.18: Paket ana sigortasının çalışma bölgeleri.	56
Şekil 3.19: Sistemin çalışma bölgeleri.	57
Şekil 3.20: Modül düzeyinde MCU bağlantı yapısı.	58
Şekil 3.21: Paket düzeyinde MCU-BCU bağlantı yapısı.	59
Şekil 3.22: Paket düzeyinde E/E Ünitesi-BCU bağlantı yapısı.	60
Şekil 3.23: Sistem düzeyinde BMS bağlantı yapısı.....	61
Şekil 4.1: Tasarlanan batarya paketi.....	62

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: M1, M2 ve M3 kategorileri.....	3
Tablo 2.2: M2 ve M3 kategorilerine ait sınıflar.....	3
Tablo 2.3: Sınıf A ve Sınıf B araçlar.....	4
Tablo 2.4: Piyasadaki büyük elektrikli otobüs üreticileri.....	5
Tablo 2.5: Otobüsler için farklı otoritelere sürüş çevrimleri [11].....	6
Tablo 2.6: ISO 6469-3 standardına göre gerilim sınıfları.....	8
Tablo 2.7: ISO 6469-3 standardına göre minimum yalıtım direnci değerleri.....	10
Tablo 2.8: X sınıfı kapasitörlerin alt grupları.....	23
Tablo 2.9: Y sınıfı kapasitörlerin alt grupları.....	23
Tablo 3.1: Hücreye ait sistem özellikleri.....	31
Tablo 3.2: Modül ve pakete ait sistem özellikleri.....	32
Tablo 3.3: Olası batarya paketi konumlarının karşılaştırılması.....	33
Tablo 3.4: AVL sürüş çevrimi ana karakteristikleri.....	35
Tablo 3.5: Cruise M sistem modeli parametreleri.....	36
Tablo 3.6: Tasarlanan konsept için elektriksel ve çevresel parametreler.....	37
Tablo 3.7: Anma darbe geriliminin bulunması [15].....	38
Tablo 3.8: Minimum havadan boşluk değeri [15].....	38
Tablo 3.9: Havadan boşluk mesafesi için düzeltme faktörü [15].....	39
Tablo 3.10: Minimum yüzeyden boşluk değeri [15].....	39
Tablo 3.11: Batarya paketinin hesaplanan yalıtım koordinasyonu parametreleri.....	40
Tablo 3.12: Batarya sisteminin elektriksel parametreleri.....	41
Tablo 3.13: Batarya sistemine ait komponent listesi.....	44
Tablo 3.14: Batarya paketi bileşenlerine ait iç dirençler.....	49

Tablo 3.15: Batarya paketleri ve PDU arasındaki kablağ bilgisi.	51
Tablo 3.16: 6 paketli ve 2 paketli batarya sistemlerinin iç direnç değeri.....	51
Tablo 3.17: 2 paketli sistem için farklı standartlara göre kısa devre akımları.	52
Tablo 3.18: 6 paketli sistem için farklı standartlara göre kısa devre akımları.	52
Tablo 3.19: Paket ana kontaktörlerinin akım taşıma karakteristikleri.....	54
Tablo 3.20: Paket ana sigortasının akım taşıma karakteristiğı.	55



KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
ASIL	: Automotive Safety Integrity Level (Otomotiv Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi)
BCU	: Battery Control Unit (Batarya Kontrol Ünitesi)
BMS	: Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)
CTI	: Comparative Tracking Index (Karşılaştırmalı Yüzelsel Boşalma İndeksi)
E/E	: Elektrik/Elektronik
EMC	: Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
MCU	: Module Control Unit (Modül Kontrol Ünitesi)
SoC	: State of Charge (Şarj Durumu)
SoH	: State of Health (Sağlık Durumu)
SORT	: Standardised On-Road Test cycles (Standartlaştırılmış Karayolu Test çevrimleri)
PDU	: Power Disconnect Unit (Güç Kesme Ünitesi)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERE YÖNELİK YÜKSEK KAPASİTELİ BATARYA PAKETİNİN KONFIGÜRASYONU ve İZLENMESİ

Funda SEYİTOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Erkan ATMACA

Bu tezde, öncelikle elektrikli otobüslerin pazar durumu ve teknoloji eğilimi incelenmektedir. İnceleme sonuçları elektrikli otobüslerin menzil hedeflerini sağlayabilmeleri için yüksek kapasiteli bataryalara gereksinim duyduklarını göstermektedir. Bu noktadan hareketle, yekpare bir batarya paketi yerine aracın farklı noktalarına dağıtılmış bir yapı önerilmektedir. Birbiriyle özdeş, 6 adete kadar paketin araç tavan ve zeminine yerleşimine olanak tanıyacak bir sistem tasarlanmaktadır. Tasarlanan paketler otobüsün ağırlık dağılımı gözetilerek yerleştirilmektedir. Böylece, mekanik yük dağılımı optimize edilerek ağırlık merkezi aşağı çekilmektedir. Bunun sonucunda otobüsün manevra kabiliyeti artırılarak devrilme nedenli kaza riski azaltılmaktadır. Diğer yandan elektriksel güvenlik standartları incelenerek, sistem seviyesinde çözümler önerilmektedir.

Mayıs 2019, 83. sayfa.

Anahtar kelimeler: Elektrikli otobüs, yüksek kapasiteli batarya paketi, dağıtılmış batarya sistemi, batarya paketi boyut optimizasyonu

SUMMARY

M.Sc. THESIS

CONFIGURATION and MONITORIZATION of HIGH CAPACITY BATTERY PACKAGE INTENDED for ELECTRIC BUSES

Funda SEYİTOĞLU

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Erkan ATMACA

In this thesis, primarily, the market situation and technology tendency of electric buses are examined. The examination shows that electric buses require high capacity batteries in order to provide their range targets. From this point of view, instead of a monolithic pack, a structure is proposed which is distributed at different points of the vehicle. A system is designed to allow the installation of up to 6 identical battery packs to the vehicle roof and floor. Designed packs are placed considering the weight distribution of the bus. Thus, the center of gravity is pulled down by optimizing the mechanical load distribution. As a consequence, the maneuverability of the bus is increased and the risk of accidents caused by rollover is reduced. On the other side, electrical safety standards are examined and system level solutions are recommended.

May 2019, 83 pages.

Keywords: Electric buses, high capacity battery package, distributed battery system, battery package size optimization

1. GİRİŞ

İklim değişikliği sonucunda artan çevre baskıları, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve emisyonların azaltılması yönünde önlemler alınmasını gerektirmektedir. Bu önlemler kapsamında, çevre kirliliği ve sağlık sorunlarına getireceği çözümler dikkate alındığında elektrikli araç pazarı, genişleyerek büyüyen bir pazar olarak anılmaktadır.

Elektrikli araç pazarında büyümeye yol açan bir diğer faktör ise batarya fiyatları da dahil olmak üzere elektrikli aktarma organlarının fiyatlarında görülen iyileşmelerdir. Sözü edilen iyileşmeler elektrikli araç piyasasının seri üretime uygun hale getirilmesine katkı sağlamış ve büyümeyi desteklemiştir. Bu pazarda, elektrikli otomobillerdeki gelişimler göz önünde olsa da toplu taşımadaki önemi dolayısıyla elektrikli otobüsler de özellikle son yıllarda adından söz ettirmektedir. Fosil yakıt tüketerek çalışan otobüslerle karşılaştırıldığında, çevre dostu teknolojisi sayesinde yaşam kalitesine katkısı, yüksek enerji verimliliği, daha az mekanik aksam ve daha az bakım maliyeti, elektrikli otobüs pazarını daha cazip hale getirmiştir.

Elektrikli otobüslerin güç gereksinimleri ve ihtiyaç duyulan menziller değerlendirildiğinde, elektrikli otobüsler için tasarlanacak batarya sistemlerinin yüksek kapasiteli olması beklenmektedir. Bu yüksek kapasiteli bataryaların, binek araçların aksine, tek bir birimde toplanarak tasarlanması zordur. Dağıtılmış batarya sistemi konseptinde, yüksek gerilimli batarya sistemindeki farklı batarya paketlerinin farklı konumlara yerleştirilebileceği bir tasarım hedeflenmiştir. Dağıtılmış bir batarya sisteminin tasarlanması, uygulamaya göre farklı sayıda batarya paketinin kullanılmasına da olanak tanımıştır. Böylelikle, farklı dingil açıklıkları ve gereksinimleri olan otobüsler için bile tek bir tasarımla çözüm üretilebilmektedir.

Tez çalışmasının Genel Kısımlar bölümünde, öncelikle elektrikli otobüsler hakkında genel bilgiler verilecek ve elektrikli otobüs trendleri aktarılacaktır. Yüksek kapasiteli batarya sistemi tasarımının temel unsurlarından olan elektrikli güvenlik standartları ve batarya sistemleri için geleneksel mimariler incelenecektir.

Malzeme ve Yöntem bölümünde, elektrikli otobüslere yönelik yüksek kapasiteli batarya sisteminin konsept tasarımı ayrıntılı bir şekilde anlatılacak, Genel Kısımlar bölümünde sözü

edilen standartlara uygun hesaplamalar sistem için uygulanacak, mimariye uygun yüksek gerilim komponentlerinin seçimi yapılacaktır.

Bulgular bölümünde tez çalışması boyunca elde edilen çıkarımlar aktarılırken, son olarak Tartışma ve Sonuç bölümünde, tasarlanan sistemin özellikleri ortaya konulacak, elde edilen sonuçlar ile birlikte sağladığı faydalar anlatılacaktır. Çeşitli öneriler paylaşılarak, sonraki çalışmalara yol gösterilmeye çalışılacaktır.



2. GENEL KISIMLAR

Tez çalışmasının bu bölümünde, hedeflenen batarya sistemi konsepti ayrıntılı bir şekilde anlatılmadan önce elektrikli otobüsler hakkında genel bilgiler ve trendler aktarılacak, otobüslere yönelik batarya sistemleri tasarlanırken dikkat edilmesi gereken konulara değinilecektir.

2.1. ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER

2.1.1. Şehir Otobüslerinin Sınıflandırılması

UNECE regülasyonlarına göre, kara taşıtları farklı kategorilerde sınıflandırılmaktadır [1]. Bu kategorizasyonda M, en az 4 tekerleği olan ve yolcu taşımacılığı için kullanılan araçları ifade etmektedir. M1, M2 ve M3 olmak üzere 3 ayrı kategoriye sahiptir. Bu kategoriler Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: M1, M2 ve M3 kategorileri.

M1 Kategorisi	Yolcu taşımacılığı için kullanılan ve sürücü koltuğuna ek olarak en fazla 8 koltuğu bulunan motorlu araçlar kategorisi.
M2 Kategorisi	Yolcu taşımacılığı için kullanılan, sürücü koltuğuna ek olarak 8’den fazla koltuğu bulunan ve azami ağırlığı 5 tonu aşmayan motorlu araçlar kategorisi.
M3 Kategorisi	Yolcu taşımacılığı için kullanılan, sürücü koltuğuna ek olarak 8’den fazla koltuğu bulunan ve azami ağırlığı 5 tondan fazla olan motorlu araçlar kategorisi.

22 yolcudan fazla yolcunun bulunduğu M kategoriler (M2 ve M3), yapı ve kullanımına göre sınıflara ayrılmaktadır.

M2 ve M3 kategorilerine ait sınıflar Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2: M2 ve M3 kategorilerine ait sınıflar.

Sınıf-I	Sürekli yolcu hareketine izin vermek için, ayakta duran yolcular için yapılmış araçlar.
Sınıf-II	Temel olarak oturan yolcuları taşımak için yapılmış, ayakta yolcuların geçit yolunda ve/veya iki koltuk için sağlanan alanı aşmayan bir alanda taşınmasına da izin verecek şekilde tasarlanan araçlar.
Sınıf-III	Sadece oturan yolcuları taşımak için yapılmış araçlar.

Bir araç birden fazla sınıfa ait olarak kabul edilebilmektedir. Böyle bir durumda, araç, karşılık geldiği her sınıf için onaylanmış olabilir. M kategorisindeki araçlarda, şoföre ek olarak, 22 yolcuyu aşmayan kapasiteye sahip araçlar için iki araç sınıfı vardır: Sınıf A ve Sınıf B (Tablo 2.3).

Tablo 2.3: Sınıf A ve Sınıf B araçlar.

Sınıf-A	Yolcular için koltuk ve ayakta durma yeri içeren, ayakta yolcu taşımak ve sık yolcu hareketine izin vermek için tasarlanmış araçlar.
Sınıf-B	Ayakta yolcu taşımak için tasarlanmamış, ayaktaki yolcular için hükmü olmayan araçlar.

Bu sınıflandırmaların dışında, tasarımlarına göre; alçak giriş, alçak taban, yüksek taban otobüs sınıfları, kullanımına göre ise; minibüs, midibüs, tek katlı otobüs, çok katlı otobüs gibi sınıflar mevcuttur. Bu çalışmada, şehir otobüslerinde yaygın kullanımı olan; M3, Sınıf-I, tek katlı ve alçak giriş elektrikli otobüs için batarya paketi tasarlanmıştır.

2.1.2. Elektrikli Otobüs Trendleri ve Pazar Araştırması

Elektrikli otobüslere olan yönelim ile birlikte, Avrupa ülkeleri ve Çin'deki yerel yönetimler, belediye otobüsü filolarını değiştirme konusundaki çabalarını artırmışlardır. Batarya paketindeki maliyetlerin de günden güne azalıyor olması, bu değişimi ekonomik hale getirmektedir. Birim satışlar bazında elektrikli otobüs üreticileri incelediğinde, Çinli üreticilerin küresel piyasalara hâkim olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, Avrupa ülkeleri ve Amerika Birleşik Devletleri'nde de Çinli üreticilerle rekabet oluşturacak elektrikli otobüs üreticileri bulunmaktadır [2].

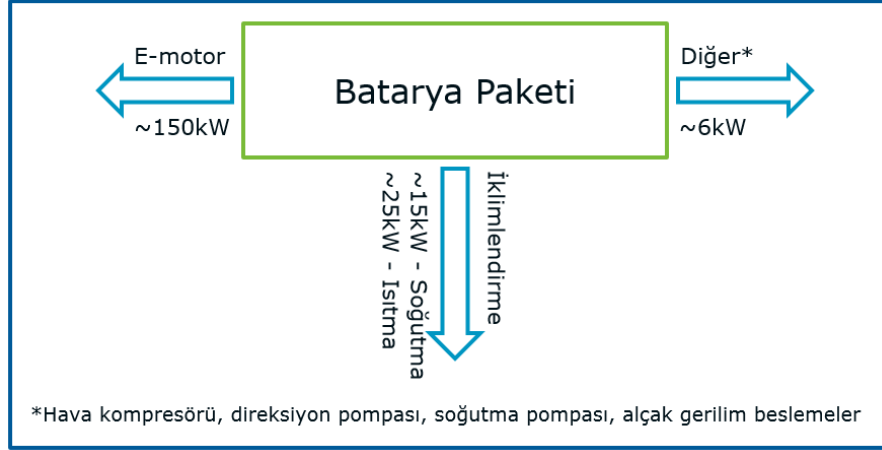
Piyasadaki büyük elektrikli otobüs üreticileri araştırılmış ve bu üreticilere ait bazı otobüs modellerinin menzili, tüketim ve toplam enerji kapasiteleri Tablo 2.4'te listelenmiştir.

Tablo 2.4: Piyasadaki büyük elektrikli otobüs üreticileri.

Üretici	Model	Menzil [km]	Tüketim [kWh/km]	Toplam Enerji Kapasitesi [kWh]
Alexander Dennis Ltd. [3]	Enviro 200EV	250	-	324
Bozankaya A.Ş. [4]	Sileo S12	260	0,7-0,8	230
BYD Auto Industry Co. Ltd. [5]	BYD 12m	250	1,3	324
Caetano Bus [6]	e.City Gold	200	-	250
Ebusco B.V. [7], [8]	Ebusco 2.1 HV LF-311-2/3	300	0.75-1.1	311
Heuliez Bus [2]	Heuliez Bus GX 337 Elec	200	-	349
Solaris [2]	Solaris Urbino 12 Electric	266	-	240
Temsa Global San. ve Tic. A.Ş. [9]	Temsa Avenue EV	60	-	70
Volvo Bus Corporation [10]	Volvo 7900 Electric	96	-	76

2.1.3. Elektrikli Otobüslerin Yük Dağılımları

Elektrikli otobüsler için yapılan pazar araştırması sonucunda elde edilen bilgilere göre, otobüslerin nominal motor güçleri yaklaşık 100-150 kW olarak gözlemlenmiştir. Elektrikli otobüslerin yük dağılımlarının incelenebilmesi için, motor yükü dışında yardımcı yüklerin de göz önünde bulundurulması gerekir. Bu yardımcı yükler; iklimlendirme sistemi, hava kompresörü, direksiyon pompası ve benzeri yüklerdir. İklimlendirme sistemleri anlık güç talebi en fazla olan yardımcı sistemdir. Aerodinamik nedenler ve tasarım parametreleri göz önüne alındığında, modern araçlar eğimli, büyük pencerelerle donatılmaktadır. Bu durum ısıtma ve soğutma talebini artırmaktadır. 12 metre uzunluğa sahip bir otobüs için, iklimlendirme sisteminin, 25-30 kW'a kadar anlık güç talebi olduğu söylenebilir. Diğer yardımcı yüklerin (hava kompresörü, direksiyon pompası, soğutma pompası ve alçak gerilim beslemeler) anlık güç taleplerinin yaklaşık 6 kW olduğu söylenebilir. 12 metre uzunluktaki bir otobüsün yük paydaşları, Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: 12 metre uzunluktaki elektrikli otobüslerin yük paydaşları.

2.1.4. Otobüsler İçin Sürüş Çevrimleri

Sürüş çevrimleri, temel anlamda hız ve zaman verileri üzerine inşa edilerek, araçların performanslarının öngörülmesinde kullanılmaktadır. Farklı ülkeler, kurumlar ve otoriteler tarafından, farklı sürüş çevrimleri hazırlanmakta ve kullanılmaktadır. Otobüslere yönelik hazırlanmış bazı sürüş çevrimleri ve bu sürüş çevrimlerine ait ana karakteristikler Tablo 2.5'te verilmiştir.

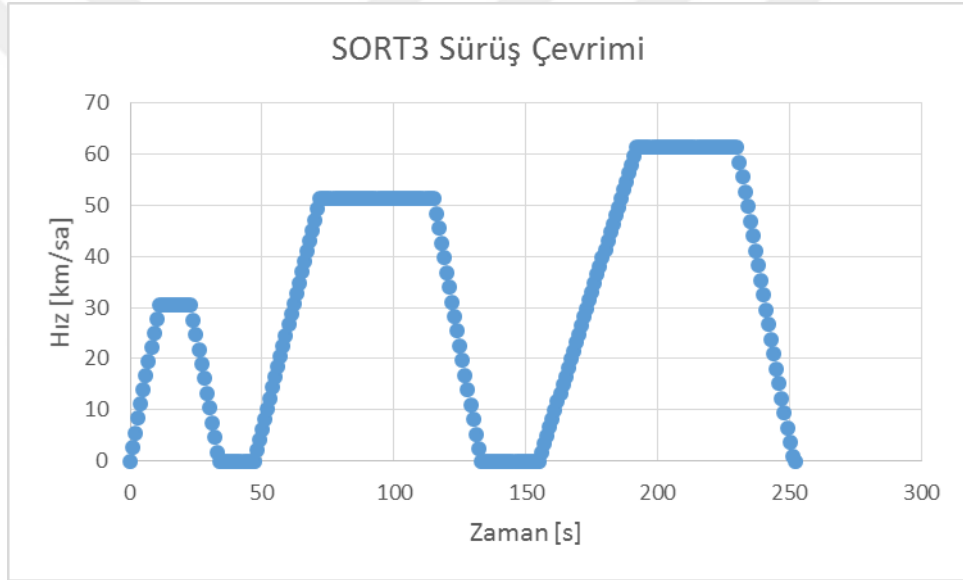
Tablo 2.5: Otobüsler için farklı otoritelere sürüş çevrimleri [11].

Program Adı	Çevrim adı	Mesafe (m)	Süre (s)	Ort. Hız (km/sa)
EU Driving Cycles	Braunschweig City Driving Cycle	10900	1740	22.6
US Cycles	Transit Coach Operating Duty Cycle-All (BAC cycle)	22633	2830	28.8
US Cycles	New York Bus Cycle	996	600s	6.0
TRAMAQ UG214	UG214 Bus03: cycle-lane	5652	1080	18.8
Millbrook	Millbrook Westminster London Bus: inner London	2509	901	10.0
BP Bus Cycle	BP Bus Cycle	5556	903	22.2
TNO Bus Cycle	TNO Bus Cycle	5248	898	21.0

Farklı kurumlar ve otoriteler tarafından hazırlanmış çok sayıda sürüş çevrimi olması dolayısıyla, Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (International Organisation for Public Transport-UITP) standartlaştırılmış sürüş çevrimi hazırlanmasına karar vermiştir. Bu doğrultuda, UITP tarafından SORT (Standardised On-Road Test cycles) adı altında bir protokol oluşturulmuştur. Farklı görev profilleri için tanımlanmış 3 tip SORT bulunmaktadır [12].

- SORT 1: Yoğun şehir trafiği / ortalama 12km/sa
- SORT 2: Normal şehir trafiği / ortalama 18km/sa
- SORT 3: Banliyö trafiği / ortalama 25km/sa

SORT3'e ait sürüş çevrimi grafiği Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: SORT3 sürüş çevrimi.

SORT, geleneksel otobüsler için hazırlanmış bir protokol olmakla beraber, sektörün değişen ihtiyaçlarına cevap vermek amacıyla kapsamını genişletmiş ve elektrikli otobüslerde sürüş çevrimi olarak kullanılmak üzere E-SORT test protokolü de oluşturulmuştur. Bu protokol tam elektrikli ve plug-in hibrit olmak üzere, iki tip otobüslere uygulanmaktadır [13].

2.2. BATARYA PAKETLERİNDE ELEKTRİKSEL GÜVENLİK

Elektrikli araçların batarya paketleri, yüksek gerilim taşıyan komponentlerden oluşmaktadır. Yüksek gerilimli komponentlerle temas tehlikesi, elektrik çarpması riskine neden olabilecek elektriksel arızalar ve bu arızaların tespiti için alınacak tüm önlemler, elektrikli bir araç için elektriksel güvenliği ifade etmektedir. Elektriksel güvenliğin sağlanması için uygulanan uluslararası standartlar ve elektriksel güvenlik hesaplamalarına ilişkin tanımlamalar bu bölümde anlatılacaktır.

2.2.1. Elektrikli Araçlarda Gerilim Sınıfları

Otomotiv endüstrisinde bir elektrikli komponent ya da devre, maksimum çalışma gerilimine bağlı olarak, A ya da B gerilim sınıfına aittir. ISO 6469 standardının 3. kısmında gerilim sınıfları Tablo 2.6'daki gibi ifade edilmektedir [14].

Tablo 2.6: ISO 6469-3 standardına göre gerilim sınıfları.

Gerilim Sınıfları	Maksimum Çalışma Gerilimi (U)	
	V (DC)	V (AC) rms değer
A	$0 < U \leq 60$	$0 < U \leq 30$
B	$60 < U \leq 1500$	$30 < U \leq 1000$

2.2.2. Elektriksel Güvenlik Standartları

Elektrikli araçlara olan taleplerin artmasıyla birlikte, elektrikli araçların güvenliğinin sağlanması için, çeşitli otoriteler tarafından ulusal ve uluslararası standartlar yayımlanmıştır. Bu standartlar, temel anlamda koruyucu önlemlere ilişkin gereksinimleri içermektedir. Çalışma kapsamında elektriksel güvenlik için uluslararası standartlardan IEC 60664-1 ve ISO 6469 incelenmiş ve uygulanmıştır.

- IEC 60664-1: Alçak gerilim sistemlerindeki ekipmanlar için yalıtım koordinasyonu – Prensipler, gereksinimler ve testler [15]

IEC (The International Electrotechnical Commission, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) tarafından yayımlanan IEC 60664-1 standardı, 1000VAC veya 1500VDC'ye kadar olan alçak gerilim sistemlerindeki ekipmanlar için yalıtım koordinasyonu gereksinimlerini ele almaktadır.

Deniz seviyesinden 2000 m yüksekliğe kadar olan ekipmanlara uygulanmaktadır. Bu standart, ekipmanlar için performans kriterlerine göre katı yalıtım gereksinimleri, havadan ve yüzeyden atlama mesafeleri belirlemektedir.

- ISO 6469: Elektrikle çalışan karayolu taşıtları için güvenlik özellikleri

ISO (International Organization for Standardization, Uluslararası Standardizasyon Örgütü) tarafından yayımlanan ISO 6469 standardı, elektrikli araçların içindeki ve dışındaki kişiler için güvenlik gereksinimlerini ele almaktadır ve 3 kısımdan oluşmaktadır. Kısım 1, elektrikle çalışan kara taşıtlarının, dahili şarj edilebilir enerji depolama sistemleri için güvenlik gereksinimlerini belirtmektedir [16]. Kısım 2, operasyonel güvenlik araçları için gereksinimleri kapsamaktadır. Ayrıca, araç ortamının ve aracın içindeki ve dışındaki kişilerin korunması için, elektrikli yol taşıtlarına özgü tehlikelerle ilgili arızalara karşı korumayı kapsamaktadır [17]. Kısım 3, elektrikli araçlarda, araç içindeki ve dışındaki kişilerin elektrik çarpmasına karşı korunması için gereksinimleri belirtmektedir [14].

2.2.3. Elektriksel Yalıtım

Elektriksel yalıtım, güvenlik konusunda önemli rol oynayan, iki devre arasında ya da bir devre ve ulaşılabilir bir ekipman arasındaki yalıtım olarak tanımlanmaktadır. Yalıtım performansının yeteri kadar iyi olmaması, ilgili sistemin arızalanması, elektrik çarpması ve yangın tehlikesi risklerini taşımaktadır. Taşıdığı bu riskler bakımından, elektriksel yalıtım konusu uluslararası düzeyde önem kazanmış ve standart ve regülasyonlarda yer kazanmıştır.

IEC 60664-1 standardı kapsamında yalıtım dereceleri tanımlanmaktadır [15]:

- Fonksiyonel yalıtım: Ekipmanın yalnızca fonksiyonunu yerine getirebilmesi için gerekli olan yalıtım derecesidir.
- Temel yalıtım: Ekipmanın yalnızca fonksiyonunu yerine getirmesi amacı dışında temel koruma sağlayan, tehlikeli canlı parçaların yalıtımını kapsayan yalıtım derecesidir.
- Tamamlayıcı yalıtım: Hatalara karşı koruma sağlamak için temel yalıtıma ek olarak uygulanan bağımsız yalıtım derecesidir.
- İkili yalıtım: Hem temel hem de tamamlayıcı yalıtımı içeren ikili yalıtım derecesidir.
- Zorlanmış yalıtım: Elektrik çarpmasına karşı koruma derecesi sağlayan, ikili yalıtıma eşdeğer olan tehlikeli canlı parçaların yalıtımını kapsayan yalıtım derecesidir.

Batarya sistemlerinde, uygulamanın kritiklik seviyesine göre yalıtım derecesi belirlenmekte ve uygulanmaktadır.

2.2.3.1. Yalıtım Direnci

Yalıtım direnci, bir devreden akan kaçak akımın bir göstergesi olarak ifade edilmektedir. Elektrikli araçlarda, yüksek gerilim sistemi ile araç zemini (örn. şasi) arasındaki yalıtım direnci aracın güvenlik durumunu göstermektedir [18]. Yalıtım direnci, yüksek gerilim güvenlik durumunun değerlendirilmesinde anahtar parametredir [19]. Yalıtım direnci kritik bir değerin altına düştüğünde, yolcular tehlikeli gerilim seviyelerine maruz kalabilmektedir. Bu nedenle ISO 6469-3 [14] standardında, ekipmanın tüm çalışma koşullarında ve tüm servis ömrü boyunca sağlanması gereken minimum yalıtım direnci değerleri ifade edilmektedir. Şebekeye iletken olarak doğrudan bağlanmayan B gerilim sınıfı elektrik devreleri için minimum yalıtım direnci değerleri Tablo 2.7’de gösterilmiştir.

Tablo 2.7: ISO 6469-3 standardına göre minimum yalıtım direnci değerleri.

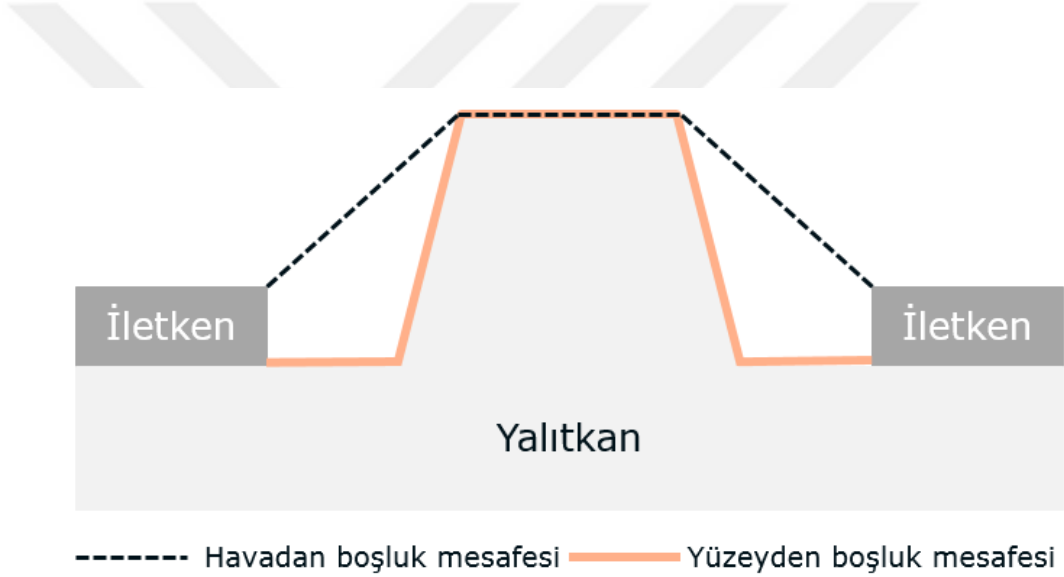
Maksimum Çalışma Gerilimi (U)	
V DC	V AC
100 Ω/V	500 Ω/V

Sistemin, dolayısıyla araç kullanıcılarının güvenliğini sağlamak için, yalıtım tasarımı sırasında yalıtım direnci değeri, maksimum çalışma gerilimi için volt başına 500 Ω 'dan daha büyük bir değer olarak tercih edilmektedir. Bataryanın toprağa göre yalıtım direnci değerinin, araçların ömrü boyunca -yaklaşık 10 yıl- uluslararası standartlarla belirlenen sınırlar dahilinde kalması beklenmektedir. Bu nedenle, yalıtım direncinin izlenmesi gerekmektedir. Bataryanın herhangi bir noktasındaki yalıtım direncindeki bir düşüş, izlenen değeri önemli ölçüde etkilemektedir. Yalıtım direnci; elektrik stresi, mekanik stres, sıcaklık stresi ve ayrıca aşırı nem veya kirlilik gibi çevresel koşullar ile değişiklik gösterebilmektedir. Bu gibi durumlar, BMS (Battery Management System, Batarya Yönetim Sistemi) tarafından bir yalıtım arızası olarak tespit edilebilmektedir. Yalıtım tasarımı sırasında bu etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir [18].

2.2.3.2. Yalıtım Koordinasyonu

Yalıtım koordinasyonu, ekipmanın elektriksel yalıtım özelliklerinin, uygulamaya ve çevresel faktörlere uygun olarak seçilmesini ifade etmektedir. Yalıtım koordinasyonu, ancak ekipmanın tasarımı beklenen ömrü boyunca maruz kalması muhtemel baskılara dayanıyorsa sağlanabilmektedir [15].

Elektriksel atlama olmaması ve elektrik çarpması tehlikesinin önlenmesi için, iki iletken parça arasında bulunması gereken minimum mesafeler yalıtım koordinasyonu ile tanımlanmaktadır. ‘Havadan’ boşluk mesafesi (clearance) ve katı yalıtkan boyunca ‘yüzeyden’ boşluk mesafesi (creepage), Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Havadan ve yüzeyden boşluk mesafeleri.

Yalıtım koordinasyonunun sağlanabilmesi için, havadan ve yüzeyden boşluk mesafelerinin minimum değerleri hesaplanarak yüksek gerilimli batarya paketinin komponent yerleşimi yapılmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken; aşırı gerilim kategorisi, kirlilik derecesi ve yalıtım materyalinin özellikleri gibi bazı parametreler hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir.

- Aşırı gerilim kategorisi

Teknik komiteler, ekipmanı yalıtım koordinasyonuna göre boyutlandırmak amacıyla, bağlanması amaçlanan sistemin özelliklerini dikkate alarak ekipmanın beklenen kullanımına göre aşırı gerilim kategorisi belirlemektedir.

Aşırı gerilim kategorisi IV, tesisatın kaynağında kullanıldığı durumlar için geçerli olan kategoridir. Bu tür ekipmanlara örnek olarak elektrik sayaçları ve birincil aşırı akım koruma ekipmanı verilebilir.

Aşırı gerilim kategorisi III, sabit tesisatlardaki ve ekipmanın güvenilirliğinin ve kullanılabilirliğinin özel gereksinimlere tabi olduğu durumlar için geçerli olan kategoridir. Bu tür ekipmanların örnekleri, sabit kurulumdaki anahtarlar ve sabit kurulumla kalıcı bağlantısı olan endüstriyel kullanım ekipmanlarıdır.

Aşırı gerilim kategorisi II, sabit tesisattan temin edilecek enerjiyi tüketen ekipmanlar için geçerli olan kategoridir. Ev aletleri, taşınabilir aletler ve benzeri yükler bu tür ekipmanlara örnektir.

Aşırı gerilim kategorisi I, geçici aşırı gerilimleri uygun şekilde düşük bir seviyede sınırlamak amacıyla önlemler alınan devrelerin bağlantı ekipmanları için geçerli olan kategoridir.

- Kirlilik

Sistemlerde oluşan kirlilik, nemin etkisiyle iletken hale gelebilmektedir [15]. Bu nedenle, nem gibi çevresel koşulların, elektrikli araçlardaki batarya paketlerine ve paket içindeki komponentlere olan etkilerini en aza indirmek için, batarya paketleri ve bileşenleri yüksek koruma sınıfına sahip kapalı muhafazalarla korunurlar [18]. IEC 60664-1 standardında, ortamdaki kuru kirlilikler ve yoğunlaşmalar kirlilik derecelerine göre sınıflandırılmaktadır [15].

Kirlilik derecesi 1, kirliliğin olmadığı ya da yalnızca kuru, iletken olmayan kirliliğin olduğu kirlilik derecesidir.

Kirlilik derecesi 2, zaman zaman yoğunlaşmadan kaynaklanan geçici bir iletkenliğin beklendiği kirlilik hariç, sadece iletken olmayan kirliliğin olduğu kirlilik derecesidir.

Kirlilik derecesi 3, iletken kirliliğin olduğu, ya da kuru, iletken olmayan kirliliğin yoğunlaşmadan dolayı iletken hale geldiği kirlilik derecesidir.

Kirlilik derecesi 4, toz, yağmur ve diğer ıslak koşulların neden olduğu sürekli kirlilik derecesidir.

- Yalıtım Materyali

Yalıtım materyalleri, üretildikleri malzemelerin özelliklerine bağlı olarak, farklı kirlilik koşulları ve gerilim altında karmaşık davranışlar sergilemektedir. Yalıtım malzemesinin maruz kaldığı elektriksel stres ve elektrolitik iletken kirlenmenin etkileri nedeniyle, yalıtım malzemesinin yüzeyinde kademeli olarak iletken yollar oluşabilmektedir [15].

Yalıtım malzemesinin dayanıklılığı ve direnci hakkında bilgi edinmek amacıyla, yalıtım malzemesine CTI (Comperative tracking index, Karşılaştırmalı Yüzeysel Boşalma İndeksi) testi uygulanmaktadır. Bu test ile, yalıtım malzemesinin bozulma aşamaları hızlı bir şekilde gerçekleştirilmekte ve yalıtım materyaline uygulanmaktadır [20]. CTI testi IEC 60112 standardına göre uygulanmaktadır. CTI değerleri, yalıtkanları, belirli test koşulları altında yüzeyi boyunca akım iletme kabiliyetine göre sıralamaktadır. IEC 60664-1 standardı, yalıtım malzemelerini CTI değerlerine göre 4 gruba ayırmaktadır. Bu gruplar aşağıda sıralanmıştır [15].

- Materyal grubu I: $600 \leq \text{CTI}$;
- Materyal grubu II: $400 \leq \text{CTI} < 600$;
- Materyal grubu IIIa: $175 \leq \text{CTI} < 400$;
- Materyal grubu IIIb: $100 \leq \text{CTI} < 175$.

Yalıtım koordinasyonunun oluşturulmasında, kullanılan yalıtım malzemesinin CTI değerine göre materyal grubu belirlenmeli ve yüzeyden boşluk mesafesi bu gruba uygun olacak şekilde hesaplanmalıdır.

2.3. BATARYA PAKETLERİNDE FONKSİYONEL GÜVENLİK

Tüm batarya sistemlerinde olduğu gibi, elektrikli araç bataryalarında da yeni ve gelişen teknolojilerde güvenlik özel bir öneme sahiptir ve sistem tasarımı aşamasında dikkate alınmalıdır. Artan teknolojik karmaşıklık, yazılım içeriği ve mekatronik uygulama eğilimi ile, sistematik arızalardan ve rastgele donanım arızalarından kaynaklanan riskler artmaktadır. Bataryalarda, operasyon sırasında meydana gelebilecek bazı önemli güvenlik tehlikeleri arasında yangın, patlama, ısı ve duman bulunmaktadır. Bu tehlikelere yol açabilecek olaylardan bazıları; aşırı şarj, aşırı deşarj, aşırı sıcaklık, mekanik hasarlar ve imalat sürecinde sisteme metalik toz vb. girmesidir.

Elektrikli araçların güvenliğinin sağlanması için ISO ve SAE (Society of Automotive Engineers) gibi otoritelere ait birden fazla güvenlik standardı bulunmaktadır. ISO 12405, ISO 6469, SAE J2929, SAE J246 gibi standartlar genellikle batarya paketlerinin korunması için gereksinimleri barındırırlar ve batarya kontrol ünitesinin ve araç sisteminin elektronik aksaklıklarını ele almazlar [21]. Bu konudaki açıkların giderilmesi amacıyla ISO tarafından ISO 26262 standardı yayımlanmıştır.

- ISO 26262: Karayolu Taşıtları – İşlevsel Güvenlik

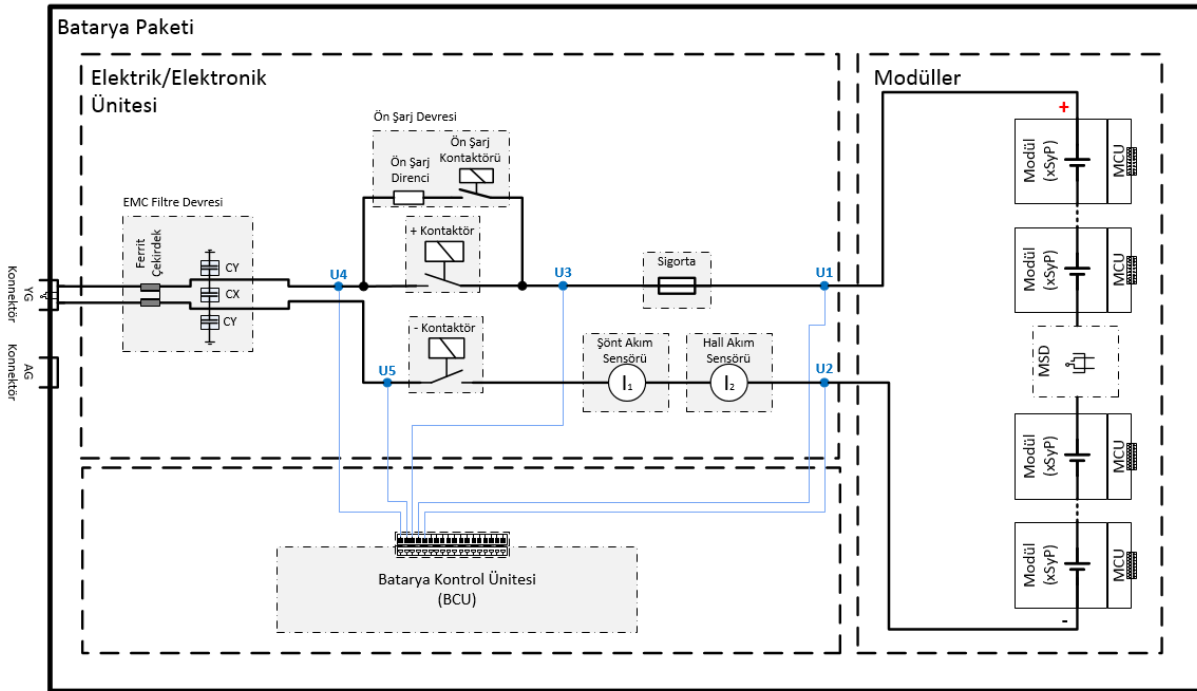
ISO tarafından yayımlanan ISO 26262 standardı, araçtaki tüm E/E (Elektrik/Elektronik) sistemlerin arıza yapma davranışından kaynaklanan olası tehlikeleri ele almakla beraber, büyük ölçekli batarya paketleri için sistem güvenliğinin sağlanmasını amaçlamaktadır. ISO 26262 standardı, tehlike hali E/E güvenlikle ilgili sistemlerin hatalı çalışma davranışından kaynaklanmadığı sürece, elektrik çarpması, yangın, duman, korozyon ve benzeri tehlikeler gibi doğrudan tehlikeleri ele almamaktadır. ISO 26262 standardı hem donanım hem de yazılım arızalarına yönelik gereksinimleri kapsamaktadır. ISO26262 standardı 10 kısımdan oluşmaktadır. Kısım 1, ISO 26262'nin tüm bölümlerinde yer alan terimleri, tanımları ve kısaltılmış terimleri belirtir. Kısım 2, otomotiv uygulamalarında fonksiyonel güvenlik yönetimi için gereksinimleri belirtir. Kısım 3, otomotiv uygulamaları için konsept fazına ait gereksinimleri belirtir. Kısım 4, otomotiv uygulamaları için ürün geliştirme gereksinimlerini sistem seviyesinde belirtir. Kısım 5, otomotiv uygulamaları için ürün geliştirme gereksinimlerini donanım seviyesinde belirtir. Kısım 6, otomotiv uygulamaları için ürün geliştirme gereksinimlerini yazılım seviyesinde belirtir. Kısım 7, üretim, operasyon, servis vb. ile ilgili gereksinimleri belirtir. Kısım 8, doğrulama, dokümantasyon gibi destek süreçlerini belirtir. Kısım 9, ASIL (Automotive Safety Integrity Level, Otomotiv Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi) ve güvenlik odaklı analizler için gereksinimleri belirler. Kısım 10 ise ISO 26262 standardına genel bir bakış sağlamak ve standarda kılavuzluk etmek amacıyla kullanılır.

ISO 26262, bir veya daha fazla E/E sistemi içeren ve maksimum 3500 kg'a kadar maksimum brüt araç kütlesi olan, seri üretim binek otomobilleri için güvenlikle ilgili sistemlere uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. ISO 26262 standardının henüz ticari araçlara uygulanabilir versiyonu bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında fonksiyonel güvenlik konusuna yalnızca bu bölümde değinilmiş, sonraki bölümlerde fonksiyonel güvenlik ile ilgili çalışma yapılmamıştır.

2.4. BATARYA PAKETLERİNİN MİMARİSİ

Elektrikli araçların yüksek gerimli batarya paketleri; birbirine seri ve paralel bağlı hücrelerden oluşan modüller, batarya paketinin güvenliğini sağlayan E/E üniteleri ve batarya paketinin kontrol edilmesini ve izlenmesini sağlayan BMS'ten oluşmaktadır. Geleneksel yapıdaki bir batarya paketine ait mimari Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Modüller, bağlanan seri ve paralel hücre sayısına göre konfigürize edilmektedir. Örnek olarak; 6 adet seri, 3 adet paralel bağlı hücreden oluşan modül konfigürasyonu 6S3P olarak adlandırılmaktadır. Hücrelerin seri bağlanmasıyla çıkış geriliminin yükseltilmesi, paralel bağlanmasıyla çıkış akımı ve kapasitenin yükseltilmesi hedeflenmektedir. Batarya paketinin sürekli izlenmesi için modüllerden aktif olarak alınan sıcaklık ve gerilim ölçümleri, MCU (Module Control Unit, Modül Kontrol Ünitesi) tarafından BCU (Battery Control Unit, Batarya Kontrol Ünitesi)'ya iletilir.



Şekil 2.4: YG batarya paketi mimarisi.

BCU; batarya paketinin SoC (State-of-Charge, Şarj durumu), maksimum şarj veya deşarj gücü gibi önemli ve güvenlikle ilgili elektriksel parametrelerini hesaplamaktadır. Modüllerin pozitif ve negatif çıkışlarında bulunan ana kontaktörler (+Kontaktör ve -Kontaktör), BCU tarafından kontrol edilmekte ve batarya paketini açık/kapalı konuma getirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Batarya modüllerinin hemen çıkışında yer alan sigorta, kısa devre gibi durumlarda aşırı akım koruması için kullanılmaktadır. Batarya paketinin akım ölçümünün yapılması ve yapılan ölçümün doğrulanması amacıyla genellikle iki adet akım sensörü kullanılmaktadır. İnverterin, filtre kapasitansından kaynaklanan ani akımların sınırlanması için, direnç ve kontaktörden oluşan ön şarj birimi kullanılmaktadır. Batarya paketinde oluşacak EMC (Electromagnetic Compatibility, Elektromanyetik Uyumluluk) sorunlarını önlemek için, batarya paketinin hemen çıkışında (batarya paketinden invertere olan girişin hemen önünde) EMC Filtre devresi adı verilen alçak geçiren filtre kullanılmaktadır. U1'den U5'e kadar gösterilen gerilim noktaları, batarya paketinin gerilimini ölçmek, kontaktörlerin açık/kapalı durumlarını denetlemek ve sigortanın atıp atmadığını izlemek amacıyla kullanılmaktadır. Batarya paketine, servis için müdahale edecek servis personelinin batarya paketini açmadan önce yüksek gerilim yolunu kesmesine izin verecek şekilde, paket dışından erişilebilir olan MSD (Manual Service Disconnect, Manuel Servis Ayırma) konumlandırılmaktadır.

2.4.1. Batarya Paketlerinin Elektrik/Elektronik Üniteleri

Bu bölümde, batarya paketlerinin E/E ünitelerinde yer alan komponentler yer almaktadır.

2.4.1.1. Kontaktörler

Batarya paketleri, elektrikli araçlardaki diğer aktarma organlarından, iki kutupta da bulunan kontaktörler aracılığı ile ayrılmaktadır [22]. Dolayısıyla batarya paketlerinde bulunan kontaktörlerin temel işlevi, batarya paketini aktarma organlarından ayırmak ve aktarma organlarına bağlamak olarak tanımlanmaktadır. ISO 26262 standardına göre, galvanik izolasyonun sağlanması ve yedekleme amacıyla pozitif ve negatif kontaktör kullanılmaktadır [23]. Kontaktörler normalde açıktır (NO-normally open) ve sistemin güvenli halini temsil etmektedir. Araç çalıştırıldığında kontaktörler BCU'dan gelen komut ile birlikte kontaklarını kapatmaktadır. Sürüş esnasında kontaktörler kapalıdır ve güç aktarımı gerçekleşmektedir.

Batarya paketi tasarımı esnasında kontaktörlerin mekanik ömür, hacim, ağırlık ve güç kaybı gibi özellikleri göz önüne alınarak kontaktör seçim yapılmaktadır. Kontaktörlerin anahtar karakteristikleri ise mevcut taşıma kapasiteleri, maksimum gerilimleri ve mümkün olan yük koşulları altında açma/kapama kapasiteleri olarak adlandırılmaktadır [24]. Arıza akımlarının çok yüksek olmadığı durumlarda, devreleri açmak için kontaktörlerin kullanılması, sigortaların

kullanılmasından daha uygun olmaktadır [25]. Şekil 2.5'te, elektrikli araç uygulamalarında kullanılan TE Connectivity markasına ait kontaktör örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.5: TE EVC500 kontaktör örneği [26].

2.4.1.2. Sigorta

Batarya sisteminin, kontaktörlerin güvenli bir şekilde kapanma yapmadığı akım seviyelerine karşı korunması gerekmektedir. Aşırı akımlar ve kısa devre akımlarına karşı batarya paketinin korunması, tanımlanan normal çalışma şartları dışındaki büyük hata akımlarını kesen bir sigorta ile sağlanmaktadır [27]. Kontaktörlerin aksine, sigortalar tek kullanımlık komponentlerdir ve attıktan sonra değiştirilmesi gerekmektedir [25].

Batarya paketinde kullanılacak olan sigortanın seçiminin doğru yapılabilmesi için, sigortanın DC yetenekleri, kritik devre parametreleri ve sigortanın çalışması beklenen aşırı akım koşullarının bilinmesi gerekmektedir [25]. Batarya sisteminin normal çalışması sırasında, sigortanın, çalışma akımını yaşlanma veya erken tetikleme olmadan taşıması beklenmektedir. Şekil 2.6'da elektrikli araç uygulamalarında kullanılan Bussmann markasına ait sigorta örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Bussmann sigorta örnekleri [28]

2.4.1.3. Akım Sensörleri

Batarya paketlerinin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak, izlemek ve durumunu tahmin etmek için BMS'e ihtiyaç duyulmaktadır. Batarya sisteminde bulunan akım ölçüm devresi, BMS'in SoC tahmini konusunda önem kazanmaktadır. Batarya paketinde, akımın algılanması için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları göz önüne alınarak batarya paketi için uygun olan ölçüm stratejisi geliştirilmektedir [29].

Elektrikli araçların batarya paketi uygulamalarında yaygın olarak Şönt sensörler ve Hall (Alan Etkili) sensörler kullanılmaktadır. Şönt sensörler Ohm yasasını temel olarak ölçüm yapan sensörlerdir. Şönt sensörler, genellikle mW seviyelerinde ve küçük sıcaklık katsayısına sahip bir direnç üzerindeki gerilim düşümünün ölçülmesi prensibiyle çalışmaktadır. Şönt sensörden okunan akım değeri, Ohm yasası gereği, direnç üzerindeki gerilim düşümü değeriyle lineer olarak değişmektedir. Ucuz olmaları ve uygulama kolaylığı önemli avantajları olarak kabul edilirken, direnç üzerinde harcanan güç bu tip sensörlerin dezavantajı olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.7'de Murata markasına ait Şönt sensör gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Murata DMS Şönt sensör örneği [30]

Hall etkili sensörler ise manyetik etki ile çalışan sensörlerdir. Ölçümü yapılmak istenen bir iletkendeki akımın oluşturduğu manyetik akıyı ölçerek, galvanik izolasyon sağlamaktadır. Şönt sensörlerdeki direnç mantığı olmadığından güç kayıplarının olmadığı kabul edilebilmektedir. Yüksek hassasiyete sahip olan Hall sensörlerin yüksek maliyete sahip olmaları önemli dezavantajları olarak kabul edilmektedir. Fonksiyonel güvenlik kapsamında ISO 26262'ye göre istenilen güvenlik seviyesini elde etmek ve ölçüm doğruluğunu maksimum seviyeye taşınması için akım genellikle her iki prensip ile de ölçülmektedir. Şekil 2.8'de LEM markasına ait Hall sensör örneği gösterilmiştir.



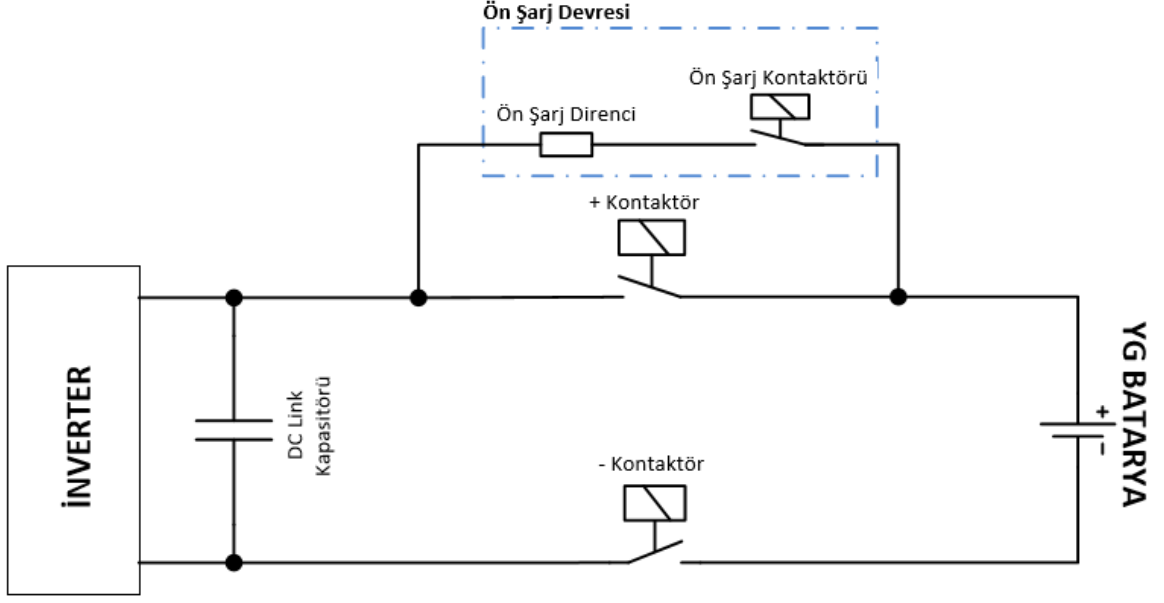
Şekil 2.8: LEM DHAB S/137 Hall sensör örneği [31].

2.4.1.4. Ön Şarj Devresi

Elektrikli araçlarda batarya paketlerinin çıkışı, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren inverterlere bağlanmaktadır. Bu inverterler, batarya ve dönüştürücü arasında arayüz oluşturan ana DC barası için DC link kapasitörü barındırmaktadır. Batarya paketi ve inverter arasındaki ana kontaktörler, batarya sisteminin açık/kapalı duruma getirilmesi için kullanılmaktadır. Kontaktörler DC link kapasitörleri deşarj durumundayken kapatılırsa, yüksek gerilimli düşük empedanslı batarya paketinden DC baraya çok yüksek ani akımlar akabilmektedir. Bu akımlar sınırlanmazsa, ana kontaktörler ve diğer komponentler zarar görebilmektedir. Ana kontaktörler kapatılmadan önce, DC link kapasitörlerinin, bir direnç ve dirence seri bağlı bir ön şarj kontaktöründen oluşan bir ön şarj devresi tarafından, önceden belirlenmiş bir gerilim seviyesine şarj edilmesi gerekmektedir. Ön şarj kontaktörü bataryayı DC linke bağlar ve başlangıç akımı ön şarj direnci ile sınırlandırılmaktadır [32].

Seri bağlı direnç ve kontaktörden oluşan ön şarj devresi, tipik olarak pozitif ana kontaktöre paralel olarak bağlanmaktadır. Şekil 2.9'da batarya paketinde kullanılan ön şarj devresinin yapısı gösterilmiştir. Kapasitör, tanımlanmış bir gerilim seviyesine kadar şarj edildikten sonra, ana kontaktörler kapatılarak ön şarj kontaktörü, ön şarj devresinin bağlantısını kesmek için açılmaktadır.

Sürücü kontağı çalıştırdığında öncelikle negatif kontaktör kapatılmaktadır. Hemen arkasından DC link kapasitörünün ön şarj devresi aracılığıyla şarj edilmesi için ön şarj kontaktörü kapatılmaktadır. DC link kapasitörünün tanımlanmış gerilim seviyesine kadar şarj edilmesiyle birlikte pozitif kontaktör devreye alınmaktadır. Ana kontaktörler kapatıldığında, ön şarj direncinin bağlantısının kesilmesi ve direnç üzerinde aşırı ısı sebebiyle güç kaybının önlenmesi amacıyla ön şarj kontaktörü açılmaktadır. Ön şarj işleminin süresi milisaniyeler mertebesinde, dolayısıyla sürücüler tarafından fark edilemeyecek kadar kısa bir zaman zarfı içinde ön şarj işlemi tamamlanmaktadır [33].



Şekil 2.9: Batarya paketi için ön şarj devresi yapısı [33].

Ön şarj dirençlerinin, ön şarj esnasında yüksek ani akımlara dayanıklı olması beklenmektedir. Şekil 2.10'da Rara markasına ait ön şarj direnci örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.10: RARA ön şarj direnci örnekleri [34].

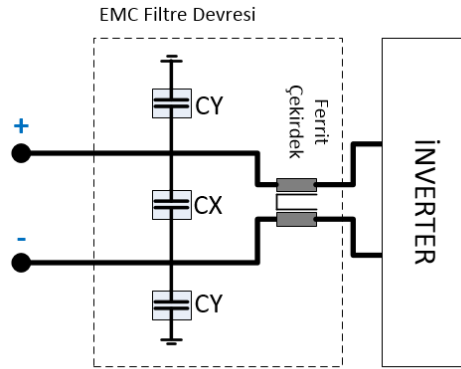
Ön şarj kontaktörlerinin, otomotiv uyumlu kontaktörler olmasının yanı sıra batarya sisteminin gerilim değerine uygun olması beklenmektedir. Akım, direnç tarafından sınırlandırıldığından, birkaç 10A aralığındaki küçük nominal akım değerleri için seçilebilmektedir. Ancak, kısa süreli ani akımlara dayanıklı olacak şekilde ön şarj kontaktörü seçimi yapılmaktadır [35]. Şekil 2.11'de LSIS markasına ait ön şarj kontaktörü örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.11: LSIS ön şarj kontaktörü örneği [36].

2.4.1.5. EMC Filtre Devresi

Güç dönüştürücülerdeki anahtarlama işlemleri, buldukları sistemlerde gerilim dalgalanmalarına neden olmaktadır. Sistemin çalışmasını etkileyen bu dalgalanmalar, bastırılması gereken gürültüler olarak karşımıza çıkmaktadır. Örnek olarak inverterler, elektrik motorlarını talep edilen güç ve hızda kontrol edebilmek için, darbe genişlik modülasyonu (PWM, Pulse With Modulation) ile çalışmaktadır. Darbelerin yükselen kenarları, inverterlerin girişlerinde ve çıkışlarında EMC problemine neden olmaktadır. Elektrikli araçların batarya sistemleri tasarlanırken, batarya paketi ile inverter arasına EMC filtre devresi adı verilen düşük geçişli bir filtre eklenerek, EMC problemlerinin önlenmesi hedeflenmektedir. EMC filtre devresi Şekil 2.12’de gösterilmiştir. EMC problemlerine karşı alınması gereken tedbirlerin, sistem tasarımı esnasında düşünülmesi ve bu tedbirlerin uygulanması, zaman ve maliyet yönünden önemlidir.



Şekil 2.12: EMC Filtre Devresi.

EMC Filtre Devresinde kullanılan komponentler EMI (Electromagnetic Interference, Elektromanyetik Girişim) bastırma kapasitörleri ve ferrit çekirdektir. EMI bastırma

kapasitörleri, cihazın giriş empedansını azaltarak elektronik bir cihazdan gelen gürültüyü bastırmak için kullanılır. Bu kapasitörler, X ve Y olmak üzere 2 sınıfa ayrılır. X sınıfı kapasitörler, hatta bağlanan kapasitörlerdir ve kapasitörün arızalanması durumunda elektrik çarpması potansiyeli yoktur. X kapasitörleri ayrıca X1, X2 ve X3 olmak üzere üç alt kategoriye ayrılmıştır. Kapasitör üzerindeki tepe gerilim değerine göre kategorize edilen X kapasitörlerden en yaygın olanı X2 kapasitörlerdir. X sınıfı kapasitörlerin alt grupları Tablo 2.8’de gösterilmiştir. Y sınıfı kapasitörler hat ve toprak arasına bağlanan kapasitörlerdir. Genellikle kapasitans değerleri çok düşüktür. Y kapasitörünün arızalanması durumunda elektrik çarpması potansiyeli vardır. Y kapasitörleri de Y1, Y2, Y3 ve Y4 olmak üzere dört alt kategoriye ayrılmıştır. X kapasitörlerde olduğu gibi, Y kapasitörler de kapasitör üzerindeki tepe gerilim değerine göre kategorize edilirler ve en yaygın olanı Y2 kapasitörlerdir [37]. Y sınıfı kapasitörlerin alt grupları Tablo 2.9’da gösterilmiştir.

Tablo 2.8: X sınıfı kapasitörlerin alt grupları.

Alt grup	Tepe gerilimi
X1	$> 2500V$ $\leq 4000 V$
X2	$\leq 2500V$
X3	$\leq 1200V$

Tablo 2.9: Y sınıfı kapasitörlerin alt grupları.

Alt grup	Tepe gerilimi
Y1	$\leq 500 V$
Y2	$\geq 150V$ $< 300 V$
Y3	$\leq 250 V$
Y4	$\leq 150 V$

Batarya sistemlerinde kullanılan EMC filtre devresinin diğer bir komponenti ise ferrit çekirdeklerdir. Ferrit çekirdekler, manyetiklik özelliklerini kullanarak gürültü filtreleme görevini üstlenirler. Batarya sistemlerinde ferrit çekirdekler, yüksek frekanslı gürültü seviyelerini bastırmak için, yüksek gerilim baralarının içlerinden geçecek şekilde paket içinde konumlandırılırlar [38].

2.4.1.6. Konnektörler

Batarya paketi içinde alçak gerilim ve yüksek gerilim konnektörler kullanılmaktadır. Alçak gerilim konnektörler, BMS ve E/E ünitesi arasında arayüz oluşturduğu gibi, batarya paketinin araç ile olan alçak gerilim bağlantısını da sağlamaktadır. Alçak gerilim konnektörlerin seçiminde; pin sayısı, belirlenen gerilim ve akım değerlerine dayanıklılık gibi kriterler göz önünde bulundurulmaktadır. Yüksek gerilim konnektörler ve bu konnektörlere ait terminaller ise, batarya paketinin içindeki yüksek gerilim bileşenlerini birbirine bağlamaktadır. Bunun yanı sıra yüksek gerilim konnektörler, batarya paketinin inverter gibi bileşenlerle bağlanması için arayüz oluşturmaktadır. Batarya paketinin tasarımına göre 2 ya da 3 kutuplu, 90° ya da 180° yüksek gerilim konnektörler tercih edilebilmektedir. ISO 6469-3 standardına göre yüksek gerilim konnektörler turuncu renkle işaretlenmektedir [14]. Batarya paketleri için yüksek gerilim konnektör seçiminde; konnektörlerin istenilen nominal gerilim ve akım değerlerini karşılaması, tepe akımlara ve kısa devre akımlarına karşı dayanıklı olması, HVIL özelliğinin bulunması gibi kriterler önem taşımaktadır. Şekil 2.13'te TE markasına ait yüksek gerilim konnektör örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.13: TE yüksek gerilim otomotiv konnektörü örneği [39].

2.4.2. Batarya Yönetim Sistemleri

Elektrikli araçların en önemli komponentlerinden olan bataryaların, iyi bir BMS'e sahip olması, batarya ömrünü ve araç performansını doğrudan etkileyen faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir.

Günümüzde, lityum-iyon bataryalar; yüksek çalışma gerilimi, yüksek kapasite, uzun çevrim ömrü, iç dirençlerinin küçük olması ve hafıza etkisi olmaması gibi nedenlerle tercih edilen batarya teknolojilerinin başında gelmektedir [40]. Lityum-iyon kimyası, bataryaya zarar verebilecek, kullanım ömrünü kısaltabilecek ve hatta tehlikeli durumlara neden olabilecek aşırı şarj ve derin deşarja karşı çok hassastır. Bu hassasiyet, bataryanın her bir hücresini güvenli çalışma aralığında tutmak için uygun bir BMS'in benimsenmesini gerektirmektedir [41].

Farklı topolojilere sahip olsalar dahi, bir BMS'in diğer önemli fonksiyonları ölçüm, hesaplama ve dengelemedir. Ölçüm fonksiyonları gerilim, sıcaklık ve akım ölçümlerini kapsamaktadır. Hesaplama fonksiyonları ise batarya durumunun ve kapasitesinin hesaplanmasını kapsamaktadır. Bataryanın mevcut durumu, alınan ölçümlerle hesaplanarak tahmin edilmektedir. Elektrikli araçlardaki SoC'nin tahmini, tüketimin takibi açısından önemli rol oynamaktadır. Her bir hücrenin SoC değerine göre, paketteki hücreler arasındaki performans farklılıkları tanımlanabilir, böylelikle batarya paketinin ömrünü uzatmak ve hücre enerji verimliliğini optimize etmek için şarj ve deşarjdaki dengeleme sorunsuz bir şekilde yapılabilmektedir [40].

2.4.2.1. Batarya Yönetim Sistemlerinin Fonksiyonel Gereksinimleri

BMS'lerin, karşılaması beklenen fonksiyonel gereksinimler bu bölümde detaylandırılmıştır.

- *Hücrelerden ve yüksek gerilim noktalarından gerilimlerin elde edilmesi*

Batarya paketinin şarjı ve deşarjı sırasında, hücre gerilimini güvenli aralıkta tutmak, hücreler arası gerilim farklılıklarını tespit etmek ve bataryanın kalan kapasitesini hesaplamak amacıyla hücre gerilimleri sürekli olarak okunmalıdır [42]. Hücre gerilimlerinin okunması MCU'lar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. E/E ünitesi üzerindeki yüksek gerilim ölçüm noktalarından ise, paket geriliminin takibi ve kontaktörlerin durumlarının kontrol edilmesi amacıyla BCU tarafından ölçümler alınmakta ve işlenmektedir.

- *Modül ve paketlere ait akım değerlerinin elde edilmesi*

Batarya paketlerinden alınabilecek maksimum anlık ve sürekli akım değerleri, hücre tipine ve kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Akım limiti değerleri aşıldığında hücreler ısınabilir, patlayabilir veya bataryanın hizmet ömrünü kısaltabilir. Dolayısıyla şarj ve deşarj sırasında akım değeri sürekli okunur. Akım değerlerinin güvenli bölgeden çıkması durumunda BMS şarjı ya da deşarjı sonlandırmalıdır [42].

- *Modül ve paket seviyesinde sıcaklık yönetimi*

Hücrelerin aşırı ısınması, hücre kimyası üzerinde değişikliklere neden olmaktadır. Bu nedenle batarya sıcaklığı, operasyon sırasında BMS tarafından sürekli okunmakta ve kritik seviyelere ulaşması durumunda batarya paketinin güvenli çalışma aralığında kalması sağlanmalıdır. Genel olarak, sıcaklık gereksinimi 3 kullanım durumunda dikkate alınmalıdır: şarj, deşarj ve saklama koşulları. Bu kullanım koşullarındaki sıcaklık değerleri üreticiler tarafından sağlanmaktadır. Sıcaklığın kapasite tahmini üzerinde de etkisi bulunmaktadır. Hücreye ait gerilim-kapasite grafiği, farklı sıcaklık değerlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle bataryanın kalan kapasitesi hesaplanırken, hücre sıcaklığı da göz önüne alınmaktadır. Batarya modülleri ve paketi içinde kullanılacak sıcaklık sensörlerinin seçimi kadar nerede konumlandırılacağı da önemli bir faktördür. Genellikle, modül ve paket seviyesinde yapılan termal analizler ile en çok ısınan noktalar belirlenir ve sıcaklık sensörleri yerleştirilir [43], [42].

- *Batarya durumunun tahmin edilmesi*

BMS'ler, ölçüm fonksiyonlarıyla elde ettiği gerilim, sıcaklık ve akım verilerini kullanarak çeşitli hesaplamalar yapma ve batarya paketinin durumunu tahmin etme yeteneğine sahiptir. Batarya performansının optimize edilmesi ve güvenli operasyonun sağlanması için, bataryanın SoC tahmini ve SoH (State-of-Health, Sağlık durumu)'in izlenmesi, BMS'in oldukça önemli iki görevidir. Hem SoC hem de SoH, hücrelerin karmaşık kimyasal proseslerine bağlı olarak değişiklik gösteren, tipik sensörlerle ölçülemeyen durumlardır. Bu nedenle, SoC ve SoH tahmini için gelişmiş algoritmalar kullanılmaktadır [44]. SoC tahmini için kullanılan algoritmalar genel olarak 5 kategoride incelenmektedir: Geleneksel yöntem (conventional method), Adaptif filtre algoritması (adaptive filter algorithm), Öğrenme algoritması (learning algorithm), Lineer olmayan gözlemci (non-linear observer), Hibrit algoritma (hybrid algorithm) [45].

Bir batarya sisteminde SoC tahminin doğruluğu oldukça önemlidir. Elektrikli araç bataryaları için, doğruluğu yüksek olan bir SoC tahmini, bataryanın aşırı şarj ve deşarj olmasını önleyebilir ve böylelikle batarya sisteminin güvenliğini sağlayabilir. Özellikle aracın sürüş mesafesinin kesin olarak hesaplanmasını destekleyerek, daha iyi bir şarj deşarj stratejisi sağlayabilir. Bununla beraber, sınırlı olan enerjinin kullanımı optimize edilir ve batarya ömrü uzar.

- *Dengeleme işleminin yapılması.*

Batarya paketini oluşturan seri olarak bağlanmış hücreler, çeşitli nedenlerle farklı gerilim değerlerine sahip olabilmektedir. Sözü edilen farklılık üretim ve/veya kullanım kaynaklıdır. Özdeş üretilseler dahi, hücrelerde üretim aşamasındaki farklılıklar ve empedans farklılıkları meydana gelebilmektedir. Batarya modülleri içerisinde buldukları konum dolayısıyla fazla ısının oluştuğu bölgelerdeki hücrelerde de gerilim farklılıkları gözlemlenebilmektedir. Batarya paketlerinin uzun ömürlü olmaları, sistem performansları ve güvenilirliklerinin etkilenmemesi hücreler arasındaki gerilim farklılıklarının çok düşük tutulmasıyla mümkün olmaktadır.

Bataryanın şarj işlemi sırasında, toplam batarya paketi geriliminde bir sorun olmamasına rağmen, hücre başına gerilimlerin bazıları kritik gerilim seviyesine ulaşmış olabilir. Bu nedenle, batarya paketi şarj edildiğinde, tüm hücrelerin gerilimleri ayrı ayrı ölçülmeli ve gerektiğinde hücre gerilimleri dengelenmelidir. Hücrelerden biri, gerekli toplam gerilim seviyesine ulaşılmadan yüksek gerilime ulaştığında, şarj işlemi durur ve dengeleme işlemi başlatılır. Yüksek gerilimli hücre, gerilim seviyesi normale dönene kadar boşaltma direnci üzerinden boşaltılır. Gerilim seviyesi diğer hücrelerle aynı seviyeye ulaştığında, dengeleme durdurulur ve şarj işlemi devam eder [42]. Bu dengeleme yöntemi pasif dengeleme yöntemi olarak anılmaktadır. Bir diğer dengeleme yöntemi olan aktif dengeleme yönteminde ise, enerji seviyesi fazla olan hücrelerden, enerji seviyesi düşük olan hücreye enerji transferi söz konusudur [46]. Aktif dengeleme birden fazla şekilde uygulanabilmektedir. Kapasitör, indüktör gibi komponentlerin kullanılmasıyla enerji transferi gerçekleştirilir.

- *Haberleşme*

BMS, genellikle bataryanın mevcut durumunun bilgisini sürücüyeye sağlamak, talimatları ve parametreleri almak için tüm sistemle iletişim kurmalıdır. Bu iletişim araç kontrol birimi (VCU, Vehicle Control Unit) ile BCU arasında gerçekleşir. BMS'in haberleşme fonksiyonu için

sistemin hangi iletişim araçlarını sağladığını ya da gerektirdiğini düşünmek gerekir. Ek olarak, gerekli iletişim hızı, sağlamlık ve güvenilirlik kontrol edilmelidir [43].

BMS'in diğer önemli fonksiyonel gereksinimleri; paket içinde bulunan ana kontaktörlerin ve ön şarj kontaktörünün kontrol edilmesi, yalıtım direncinin ölçülmesi ve paket içindeki tanı olaylarının ele alınması olarak ifade edilebilir. Kullanıcı tarafından araç çalıştırıldığında batarya paketinin devreye alınması, araç kapatıldığında ya da sisteminin güvenli çalışma aralığından çıktığı durumlarda bataryanın sistemden ayrılması, bataryanın ön şarj işleminin gerçekleştirilmesi gibi fonksiyonlar, BMS'in kontaktör kontrolü fonksiyonuyla gerçekleştirilmektedir.

2.4.2.2. Batarya Yönetim Sistemlerinin Donanım Topolojileri

Batarya paketini oluşturan hücrelerin ve modüllerin, ihtiyaç duyulan elektriksel gereksinimleri karşılayabilmek adına farklı konfigürasyonlarda bağlanabildiği, önceki bölümlerde anlatılmıştı. Farklı bağlantı konfigürasyonları, farklı BMS topolojilerinin oluşturulması ve kullanılmasına olanak tanımıştır. BMS donanımında 3 temel topoloji kullanılmaktadır [47].

- **Merkezi Topoloji (Centralized Topology)**

Merkezi topolojide, merkezi bir ana kontrol ünitesi batarya paketinin her bir hücresine doğrudan bağlanır. Ana kontrol ünitesi, BMS fonksiyonlarını sağlarken tüm hücreleri korur ve dengeler. Bu topolojinin avantajı, tek bir kontrol ünitesi olması dolayısıyla sadeliği olarak gösterilebilir. Buna karşın, tek bir devre üzerinden dengeleme ve kontrol işleminin yapılması, aşırı ısıya sebebiyet verebileceği gibi, farklı yerlerde konumlanan hücrelerin merkezi bir noktaya kablolar aracılığıyla bağlanması topolojinin dezavantajı olarak anılır.

- **Dağıtılmış Topoloji (Distributed Topology)**

Dağıtılmış topolojide, her bir hücrenin kendi üzerinde yer alan gerilim monitörleri ve dengeleyicileri bulunur. Bütün bu veriler, ana bir kontrol ünitesine gönderilir. Bu topoloji kolay uygulanabilir ve güvenilirliği yüksek bir topolojidir. Öte yandan, her bir hücre için donanım gereksinimi bu topolojinin dezavantajıdır.

- Modüler Topoloji (Modular Topology)

Modüler topolojide, her bir hücre bloğu için ölçüm ve izleme devresi kullanılır. Her bir hücre için ayrı bir devre kullanılmaması topolojinin avantajı olarak ifade edilebilirken, ana kontrol ünitesi ile hücre bloklarının kontrol ünitelerinin izoleli bir şekilde haberleşme ihtiyacı, bu topolojinin dezavantajı olarak gösterilmektedir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bölüm 2’de elektrikli otobüslere yönelik batarya sistemi tasarlanırken dikkat edilmesi gereken hususlar, uygulanması gereken standartlar ve regülasyonlar anlatılmıştı. Tez çalışmasının bu bölümünde ise, sistem tasarımının detayları, karşılaşılan zorluklar ve bu zorluklara getirilen çözümler anlatılacaktır. Bölüm 2’de sözü edilen hesaplamalar sistem için uygulanacak ve elektrikli bir otobüse yönelik batarya sistem tasarımı tamamlanacaktır.

3.1. HEDEFLENEN KONSEPT TASARIMI

Elektrikli otobüsler için, farklı kullanım durumlarına ilişkin geniş kapsamlı gereksinimlerden söz etmek mümkündür. Sürüş rotasına göre farklı menzillerde (50-400km) tasarlanabilen elektrikli otobüsler için gereksinimler; batarya kapasitesine, batarya ağırlığına, nominal ve tepe güç talebine, gereken şarj gücüne bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Yapılan pazar araştırmasına göre, elektrikli otobüslerin enerji tüketimleri, 120-140kWh/100km arasında kabul edilebilmektedir. Kullanılacak sürüş çevrimi, enerji tüketimi değerinin hesaplanması için önemli bir faktördür. Dur-kalk ve ani hızlanma süresinin yüksek olması beklendiğinden, bu değer gerçek yol modellerinde şehir otobüsleri için çok daha yüksek olacaktır.

Tez çalışmasında hedeflenen, gerçekçi bir sürüş çevrimi kullanılarak elektrikli bir otobüsün şehir içindeki tüketimlerinin hesaplanması ve sonrasında piyasadaki otobüslerden farklı olarak, modüler ve ölçeklenebilir bir batarya sistemi konseptinin tasarlanmasıdır. Ölçeklenebilirliğin yanı sıra, tasarlanan bu konsept için elektrikselsel güvenliğin standartlara uyumlu olarak konfigürize edilmesi hedeflenmektedir.

3.1.1. Modül Konfigürasyonu ve Batarya Paketi Tasarımı

Hedeflenen yüksek gerilim batarya sistemi, ölçeklenebilir olması amacıyla birbiriyle paralel çalışan özdeş batarya paketlerine sahiptir. Bu batarya sistemi, en az 2 adet ve en fazla 6 adet batarya paketinin birlikte çalışabileceği şekilde tasarlanmıştır. Batarya sistemindeki paketlerin en küçük birimi hücrelerdir.

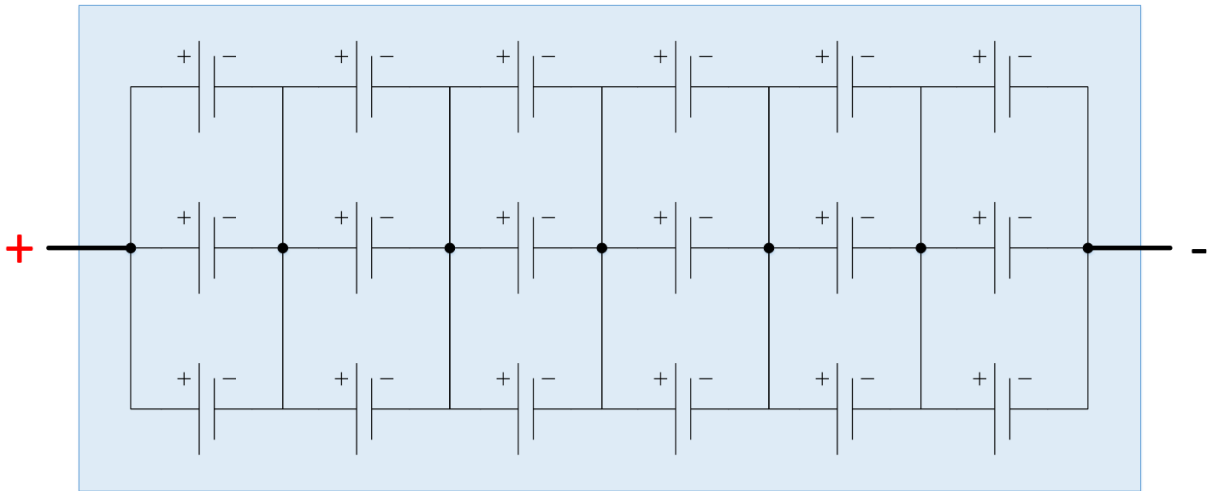
Batarya sistemi için belirlenen hücrenin özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Hücreye ait sistem özellikleri.

Nominal hücre gerilimi (V)	3,7	Maksimum hücre gerilimi (V)	4,2
Hücre kapasitesi (Ah)	36,5	Hücre enerjisi (Wh)	135
Hücre hacmi (L)	0,175	Hücre ağırlığı (g)	490
Hücre spesifik enerjisi (Wh/kg)	275	Hücre enerji yoğunluğu (Wh/L)	775

Bölüm 2’de anlatıldığı gibi, batarya paketinin gerilim ve kapasite değerlerinin artırılması için hücreler seri ve paralel bağlanmıştır. Hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla batarya paketinin modülleri oluşturulmuştur. Her bir modül 6S3P modül konfigürasyonuna sahiptir. Dolayısıyla her bir modül; 6 adet seri, 3 adet paralel bağlı hücreden oluşmaktadır.

Önerilen batarya modülünün devre şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: 6S3P modül devre şeması.

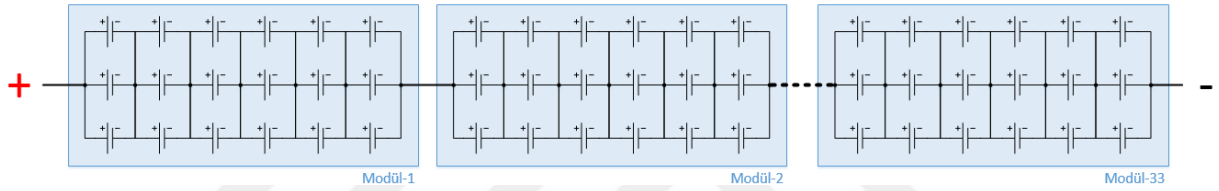
Her bir batarya paketi, yerleşim ve tasarım kolaylığı açısından, birbiriyle seri bağlı, özdeş yapıda 33 modüle sahiptir. Batarya paketinde yer alan modüllerin birbirleriyle olan bağlantıları bakır baralar aracılığıyla sağlanmıştır. Bakır baraların kesit alanları, mm² başına yaklaşık 3A olacak şekilde belirlenmiştir. Maksimum 102 A paket akımının taşınabilmesi için kesit alanı 36 mm² ve uzunlukları modüllerin uzaklıklarına göre belirlenen 3 tip bakır bara kullanılmıştır.

Batarya sistemi için tasarlanan modülün ve batarya paketinin özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Modül ve pakete ait sistem özellikleri.

Modül konfigürasyonu	6S3P	Modül sayısı	33
Nominal paket gerilimi (V)	732,6	Maksimum paket gerilimi (V)	831,6
Paket kapasitesi (Ah)	109.5	Paket enerjisi (kWh)	80,2
Toplam hücre sayısı / paket	594	Toplam hücre ağırlığı / paket (kg)	291,1
Paket ağırlığı (kg)	554,4	Paket kütle oranı	53%
Nominal akım / paket (A)	102	Tepe akım / paket (A)	171

Önerilen batarya paketinin devre şeması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Batarya paketi devre şeması.

3.1.2. Batarya Paketlerinin Yerleşimi, Stabilitesi ve Dinamiği

Elektrikli otobüslerde, batarya paketlerinin yerleştirilebileceği başlıca yerler; tavan, zemin ve motor bloğu olarak adlandırılan otobüsün arka bölümüdür. 12 metre alçak giriş otobüslerde batarya paketleri için ayrılacak alanlar Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Tavan (Uzunluk x Genişlik x Yükseklik)	Zemin (Uzunluk x Genişlik x Yükseklik)	Arka (Uzunluk x Genişlik x Yükseklik)
6m x 2m x 0.3m	3.5m x 1m x 0.1m	1m x 2m x 0.5m

Şekil 3.3: 12 metre alçak giriş otobüslerde batarya paketleri için ayrılacak alanlar.

Batarya paketlerinin yerleşimi uygun alan açısından incelendiğinde, zemine yerleşimin dingil alan mesafesiyle, tavana yerleşimin iklimlendirme ünitesiyle sınırlı olduğu ve arka bölüme yerleşimin ise motor hacmine bağlı olduğu gözlemlenmektedir. Paketlerin yerleşimi, paketlerin otobüse montajı ve sonrasında yapılacak servis müdahalesi açısından incelendiğinde; zemine yapılacak montajın merdiven gibi özel ekipman gerektirmeyeceği dolayısıyla tavana yapılacak montajdan daha kolay olduğu, ancak otobüsün arka kısmı ile kıyaslandığında arka bölüme yapılacak montajın en iyi opsiyon olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Hypermesh programında hazırlanan çarpışma ve ağırlık analizi modelleri Optistruct yazılımında çözdürülmüş ve Abaqus programı yardımıyla sıcaklık dağılımı analizleri yapılarak farklı paket konumlarındaki diğer özellikler incelenmiştir [48] (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Olası batarya paketi konumlarının karşılaştırılması.

Özellik/Konum	Zemin	Tavan	Arka
Mekanik yük dağılımı	+++	++	+
Çarpışma güvenliği	++	+	+++
Gövde modifikasyonu gereksinimi	+	++	+++
Isıl yönetim	+++	+	++
Batarya enerjisi	+	+++	++
Farklı modellerle uyum	+	+++	++
Kablo demeti yoğunluğu	+	++	+++
Haberleşme	++	++	+++

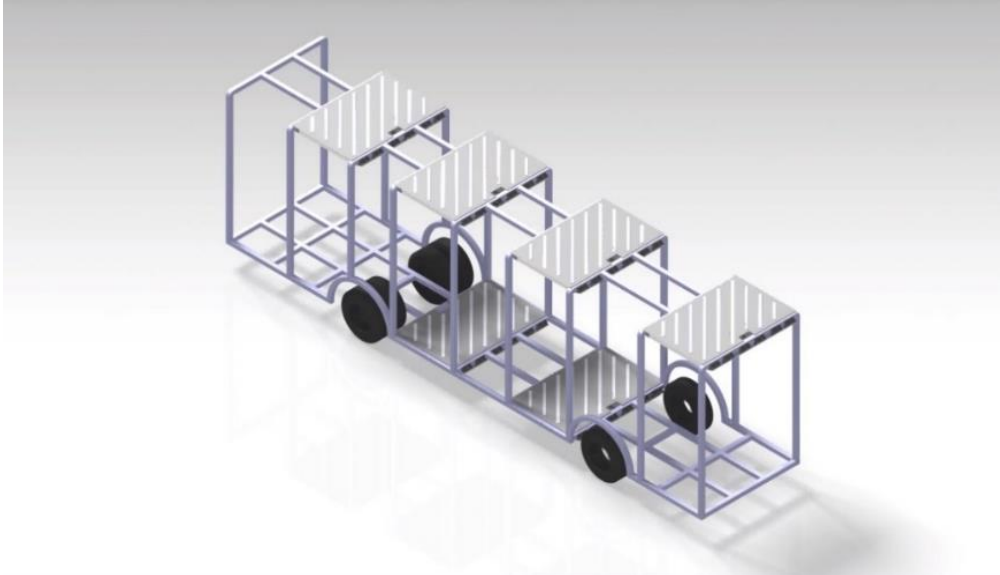
Elektrikli sisteme uyarlanan ve elektrikli olarak tasarlanan otobüslerin büyük bir kısmında, batarya paketi tavana monte edilmektedir. Birkaç örnekte, otobüsün arka kısmı batarya paketi için kullanılmaktadır. Zemin ve tavan uygulamaları, yük dağılımının eşitsizliği, ağırlık merkezi ve otobüsün sürülebilirlik problemlerini azaltan kilit çözümler için bir adım öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, otobüsün arka tarafının kullanılmasının birçok avantaja sahip olmasıyla birlikte yük dengesizliği yaratarak yük dağılımını bozacağı öngörüsüne dayanılarak, batarya paketleri otobüsün arka kısmında konumlandırılmamıştır. Zemin ve tavan yerleşimleri, yük dağılımı açısından daha avantajlıdır ve aracın ağırlık merkezi de bu seçeneklerle optimize edilebilmektedir. Bu parametreler göz önüne alınarak, batarya paketlerinin otobüsün zeminine ve tavanına yerleştirilmesi kararlaştırılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Konsept tasarımında kullanılması düşünülen batarya paketi konumları.

En fazla sayıda batarya paketi kullanıldığı durumda 4 batarya paketi tavana, 2 batarya paketi zemine yerleştirilecek şekilde otobüs tasarlanmıştır (Şekil 3.5). En az sayıda batarya paketinin kullanılacağı durumda ise ağırlık merkezinin korunması adına sadece otobüsün zemin kısmı kullanılacak ve 2 paket de zemine yerleştirilecektir.



Şekil 3.5: 6 adet batarya paketinin otobüse yerleşimi.

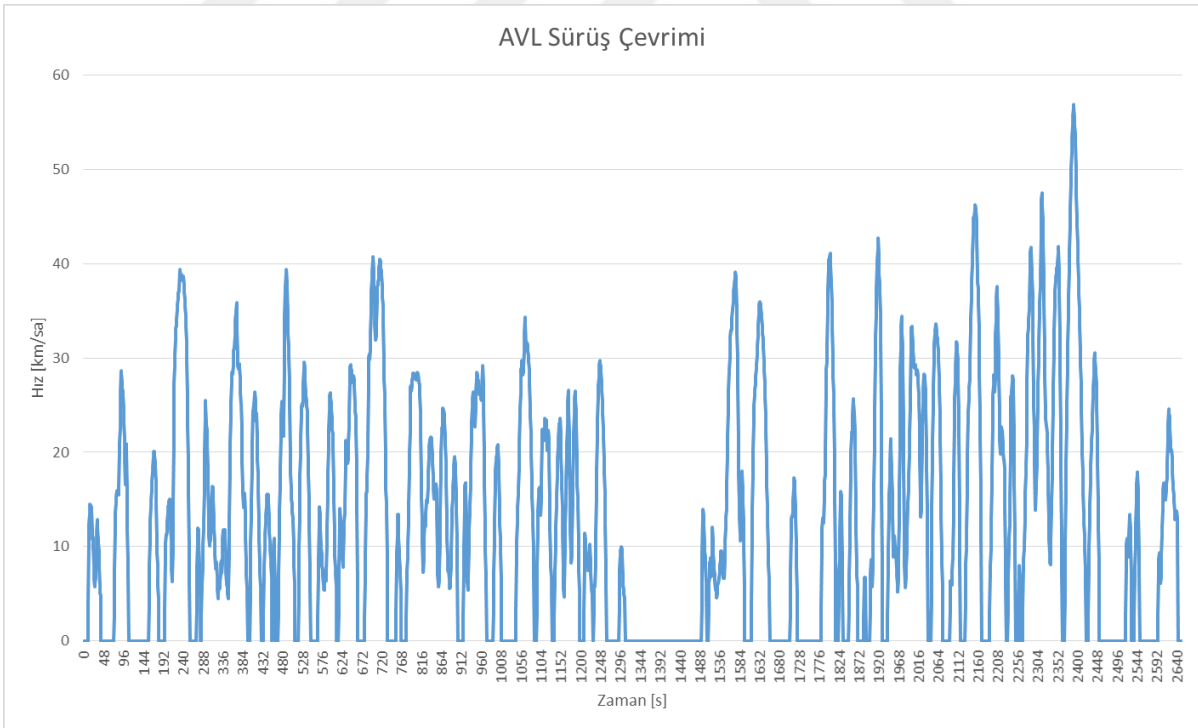
3.1.3.AVL Sürüş Çevrimi ile Sistemin Modellenmesi

Otobüslere yönelik hazırlanmış bazı sürüş çevrimleri ve bu sürüş çevrimlerine ait ana karakteristikler Bölüm 2’de gösterilmiştir. Hedeflenen konsept tasarımında, SORT3 çevrimi ve AVL firmasının topladığı verilerle elde ettiği, şehir otobüslerine yönelik çevrim kullanılarak elektrikli otobüsün şehir içi koşullardaki tüketimleri hesaplanmıştır. Tüketimin hesaplanması için AVL firmasına ait Cruise M yazılımı kullanılmış ve sistem modellenmesi yapılmıştır.

Şehir otobüslerine yönelik AVL sürüş çevriminin ana karakteristikleri Tablo 3.4’te, sürüş çevrimine ait Hız/Zaman grafiği ise Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.4: AVL sürüş çevrimi ana karakteristikleri.

Karakteristikler	Değerler
Mesafe (m)	9300
Süre (s)	2628
Ort. Hız (km/sa)	12.6



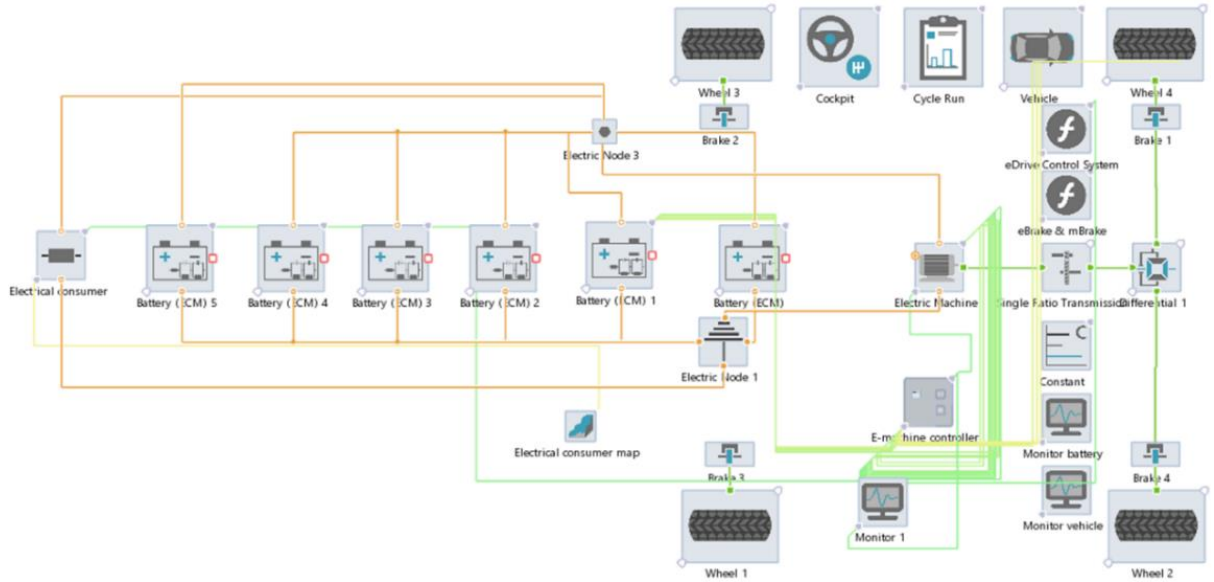
Şekil 3.6: AVL sürüş çevrimi.

Elektrikli otobüsün tüketim değerinin hesaplanması için Cruise M yazılımı içinde bulunan bir elektrikli araç modeli temel alınmış ve modelden güvenilir veri toplamak amaçlanmıştır. Sistem modeli geliştirilirken, bazı parametrelerin tanımlanması ve girdi olarak sisteme tanıtılması gerekmektedir. Bu parametreler, Tablo 3.5’te sıralanmıştır ve piyasadaki araçlardan elde edilen bilgilerle ilgili varsayımları temsil etmektedir.

Tablo 3.5: Cruise M sistem modeli parametreleri.

Parametre	Değer
Brüt ağırlık [kg]	19000
Akstan ön dingile kadar olan mesafe [mm]	9280
Ön alan [m ²]	7.5
Sürüklenme katsayısı	0.55
Sıcaklık [°C]	20
Hava yoğunluğu [kg/m ³]	1.19
Sürüş çevriminde eğim	Yok

Elektrikli otobüs modeli, sürüş çevrimi ve ilgili parametrelerin tanımlanmasının ardından Şekil 3.7’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.7: Cruise M sistem modeli.

Batarya sistemi, 37 Ah hücre özelliklerine ve 6 adet paralel çalışan paket konfigürasyonuna göre modellenmiştir. Ayrıca başlangıç durumunda %95 SoC, nominal gerilim 732.6 V ve maksimum gerilim 831.6 V olacak şekilde tanımlanmıştır. Simülasyon için gerekli bütün veriler tanımlandıktan sonra model çalıştırılmıştır. Simülasyon sonucuna göre, araçtan talep edilen en yüksek güç değeri 108.7 kW ve enerji tüketimi 20.34 kWh olarak elde edilmiştir. Bu değerlere göre 100 km'deki tüketim 218.7 kWh olarak hesaplanmıştır. 100 km'deki tüketim, SORT3 çevriminde 100 kWh olarak hesaplanmıştır [49]. AVL sürüş çevrimi, şehir içi otobüsler için kullanılan sürüş çevrimi olması dolayısıyla, piyasa analizinden daha yüksek bir tüketim değerinin elde edilmesine sebep olmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde otobüsün kullanım durumuna göre 220 km ile 480 km arasında menzile sahip olduğu söylenebilir. Bu çalışma kapsamında tasarlanan elektrikli otobüs için, 150kW nominal ve 250kW tepe güç değerine sahip olacak şekilde batarya sistemi geliştirilecektir.

3.2. TASARLANAN KONSEPT İÇİN ELEKTRİKSEL GÜVENLİK

Tasarlanan konsept için elektriksel güvenlik hesaplamaları, IEC 60664-1 ve ISO 6469-3 standartlarını temel almaktadır. Elektriksel güvenlik hesaplamalarıyla, batarya paketi için yalıtım koordinasyonunu oluşturacak olan havadan ve yüzeyden boşluk mesafeleri, yalıtım derecesi ve direnci belirlenmiştir.

IEC 60664-1 standardına göre, elektriksel güvenlik hesaplamalarının yapılabilmesi için bazı giriş parametrelerinin önceden tanımlanmış olması gerekmektedir. Bu parametreler Tablo 3.6'da sıralanmıştır.

Tablo 3.6: Tasarlanan konsept için elektriksel ve çevresel parametreler.

Parametre	Değer	Birim
Maksimum çalışma gerilimi – Batarya Paketi	831.6	V
Maksimum çalışma gerilimi – Modül	25.2	V
Aşırı gerilim kategorisi	II	-
Anma darbe gerilimi	2500	Vdc
Kirlilik derecesi	2	-
Yalıtım derecesi	Temel yalıtım	-
Maksimum rakım	3000	m

Seçilen hücrenin maksimum gerilim değeri kullanılarak modül ve batarya paketi için maksimum çalışma gerilimi değerleri hesaplanmıştır. IEC 60664-1 standardına göre, batarya paketlerinin sabit tesisattan temin edilen enerjiyi tüketen ekipmanlar olması dolayısıyla aşırı gerilim kategorisi 'II' olarak belirlenmiştir. Anma darbe gerilimi, IEC 60664-1 standardında yer alan Tablo F1'e göre, aşırı gerilim kategorisi II ve 230/400 V üç fazlı besleme sistemi için 2500 Volttur (Tablo 3.7). Elektrikli araç bataryaları, nem gibi çevresel faktörlere karşı korunması amacıyla yüksek koruma sınıflarına sahiptirler. Bu nedenle, batarya uygulamalarında kirlilik derecesi 2 ya da 3 olarak öngörülmektedir. Bu çalışma için kirlilik derecesi 2 olarak belirlenmiştir. Paket yalıtımı için temel yalıtım derecesi öngörülmuş ve otobüsün çalışacağı maksimum rakım değeri 3000 metre olarak düşünülmüştür.

Tablo 3.7: Anma darbe geriliminin bulunması [15].

IEC 60038'e göre besleme sisteminin nominal gerilimi	Anma Darbe Gerilimi			
	Aşırı Gerilim Kategorisi			
Üç Faz [V]	I [V]	II [V]	III [V]	IV [V]
230/400	1500	2500	4000	6000

- Havadan boşluk mesafesi: IEC 60664-1 standardına göre kirlilik derecesi, maksimum rakım değerine bağlı olarak atmosferik basınç değeri ve anma darbe gerilimi değerine göre havadan boşluk mesafesi hesaplanabilmektedir.

Tablo 3.8: Minimum havadan boşluk değeri [15].

Anma darbe gerilimi [kV]	Minimum havadan boşluk mesafesi değeri (2000metrenin üzerindeki rakım için)		
	Kirlilik Derecesi		
	I [mm]	II [mm]	III [mm]
1	0,15	0,2	0,8
2	1,0	1,0	1,0
2.5	1,5	1,5	1,5
3	2,0	2,0	2,0

Tablo 3.8’de IEC 60664 standardında yer alan Tablo F.2’nin bir kısmı gösterilmiştir. Anma darbe gerilimi 2500 V olan ve kirlilik derecesi II olarak belirlenen sistem için minimum havadan boşluk mesafesi değeri 1.5 mm olarak bulunmuştur. 2000 metrenin üzerindeki rakım değerleri için hava basıncındaki değişiklik nedeniyle, komponentler arasındaki havadan boşluk mesafesinin daha büyük olması gereklidir. Bu nedenle, IEC 60664-1 Tablo F.2’de bulunan değerle çarpılmak üzere 2000 metre rakımın üzerindeki değerler için bir düzeltme faktörü kullanılmaktadır. Tablo 3.9’da IEC 60664-1 standardı Tablo A.2’de yer alan ve 2000 metrenin üzerindeki rakım değerlerinde geçerli olan düzeltme faktörlerinin bir kısmı gösterilmiştir.

Tablo 3.9: Havadan boşluk mesafesi için düzeltme faktörü [15].

Rakım [m]	Normal barometrik basınç [kPa]	Faktör
2000	80,0	1,0
3000	70,0	1,14
4000	62,0	1,19

Dolayısıyla, Tablo 3.8’de bulunan 1,5 mm mesafe ile Tablo 3.9’da 3000 metre rakım değerinin karşılığı olan 1.14 katsayısı çarpılarak, minimum havadan boşluk mesafesi ~1.8mm olarak hesaplanmıştır.

- Yüzeiden boşluk mesafesi: IEC 60664-1 standardına göre kirlilik derecesi, yalıtım materyalinin malzeme özelliğine bağlı olarak materyal grubu ve batarya paketinin maksimum çalışma gerilimi değerine göre yüzeiden boşluk mesafesi hesaplanabilmektedir.

Tablo 3.10: Minimum yüzeiden boşluk değeri [15].

Batarya Paketi Gerilimi [V]	Minimum yüzeiden boşluk mesafesi değeri						
	Kirlilik Derecesi						
	I	II			III		
Bütün materyal grupları için [mm]	Materyal Grup I [mm]	Materyal Grup II [mm]	Materyal Grup III [mm]	Materyal Grup I [mm]	Materyal Grup II [mm]	Materyal Grup III [mm]	
630	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0
800	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11,0	12,5
1000	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14,0	16,0

Tablo 3.10’da IEC 60664-1 standardında yer alan Tablo F.4’ün bir kısmı gösterilmiştir. Maksimum çalışma gerilimi 831.6 V olan ve kirlilik derecesi II olarak belirlenen sistem için minimum yüzeyden boşluk mesafeleri, ilgili gerilim değerinin karşılıkları tabloda yer almadığı için, 800V ve 1000V arasındaki değerlerde interpolasyon yapılarak hesaplanmıştır. Materyal grubu I için ~4.1 mm, materyal grubu II için ~5.8 mm ve materyal grubu III için ~8.3 mm olarak hesaplanmıştır.

- Yalıtım direnci: ISO 6469-3 standardında DC sistemler, batarya ömrü boyunca ölçülmesi beklenen minimum yalıtım direnci, 1 Volt başına 100 Ω olacak şekilde belirtilmiştir. Güvenlik stratejisi gereği, batarya uygulamalarında 1V başına 500 Ω olacak şekilde sistemin yalıtım direnci hesaplanmaktadır. Batarya sisteminin yalıtım direnci, maksimum çalışma gerilimi 831,6 V üzerinden hesaplandığında 415.8 k Ω olarak bulunmaktadır. ISO6469-3 gereği, batarya sistemi içindeki yüksek gerilimli bileşenlerin yalıtım direnci, sistemin yalıtım direncinden büyük olmalıdır. Batarya sistemini oluşturan seri bağlı 33 adet modülün, toprağa göre bağlantıları paralel olacağından modül seviyesinde yalıtım direnci, sistem yalıtım direncinin 33 katı kadar, 13.7 M Ω olacaktır.

Elektriksel güvenliğin sağlanması için, yalıtım koordinasyonuna ait yapılan hesaplamaların özeti Tablo 3.11’de gösterilmiştir.

Tablo 3.11: Batarya paketinin hesaplanan yalıtım koordinasyonu parametreleri.

Hesaplanan Parametreler	Değer	Birim
Havadan boşluk mesafesi	1.8	mm
Yüzeyden boşluk mesafesi, Materyal grubu I	4.1	mm
Yüzeyden boşluk mesafesi, Materyal grubu II	5.8	mm
Yüzeyden boşluk mesafesi, Materyal grubu III	8.3	mm
Yalıtım direnci	Sistem seviyesinde:	k Ω
	415.8	
	Modül seviyesinde	M Ω
	13.7	

3.3. BATARYA ELEKTRİK/ELEKTRONİK ÜNİTESİNİN TASARIMI VE GÜVENLİK STRATEJİSİ

3.3.1. Elektrik/Elektronik Ünitesinin Tasarımı

Hedeflenen elektrikli otobüs konseptine ait batarya sistemi, Bölüm 3.1.1’de belirtildiği gibi, en fazla 6 adet batarya paketinin paralel çalışmasını destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Batarya sistemine ait elektriksel parametreler Tablo 3.12’de gösterilmiştir.

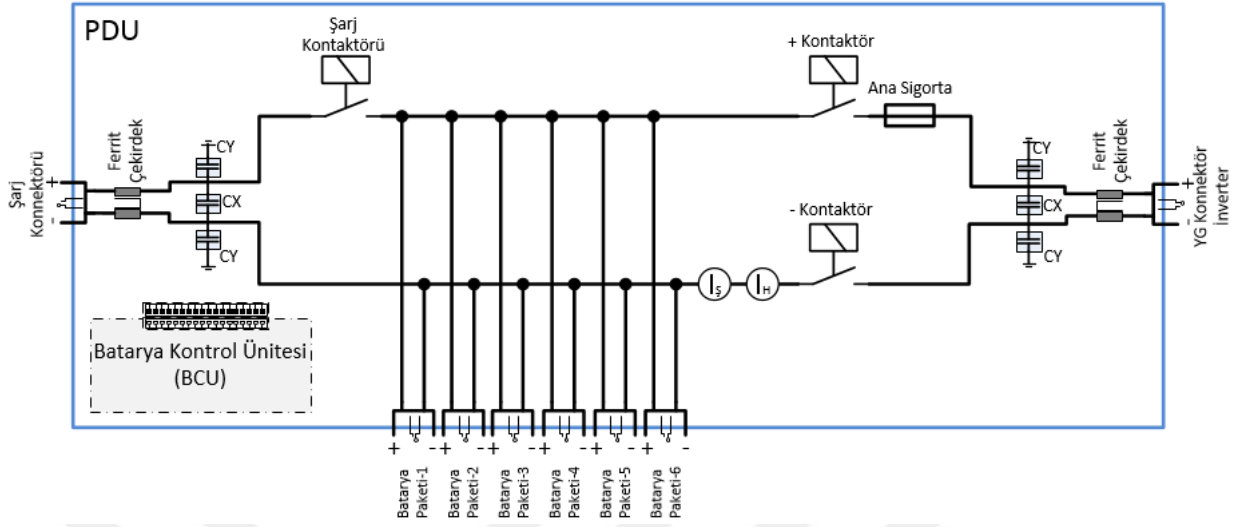
Tablo 3.12: Batarya sisteminin elektriksel parametreleri.

Maksimum paket gerilimi	831.6 V
Paket nominal akımı*	102 A
Paket tepe akımı*	171 A (10 saniye boyunca)
Nominal çekiş akımı	204 A
Tepe çekiş akımı	342 A (10 saniye boyunca)
Paket nominal şarj akımı	162 A
Paket tepe şarj akımı	528 A (10 saniye boyunca)
Kısa devre akımı**	5200 A
Paketler arası olası maksimum gerilim farkı	60 V

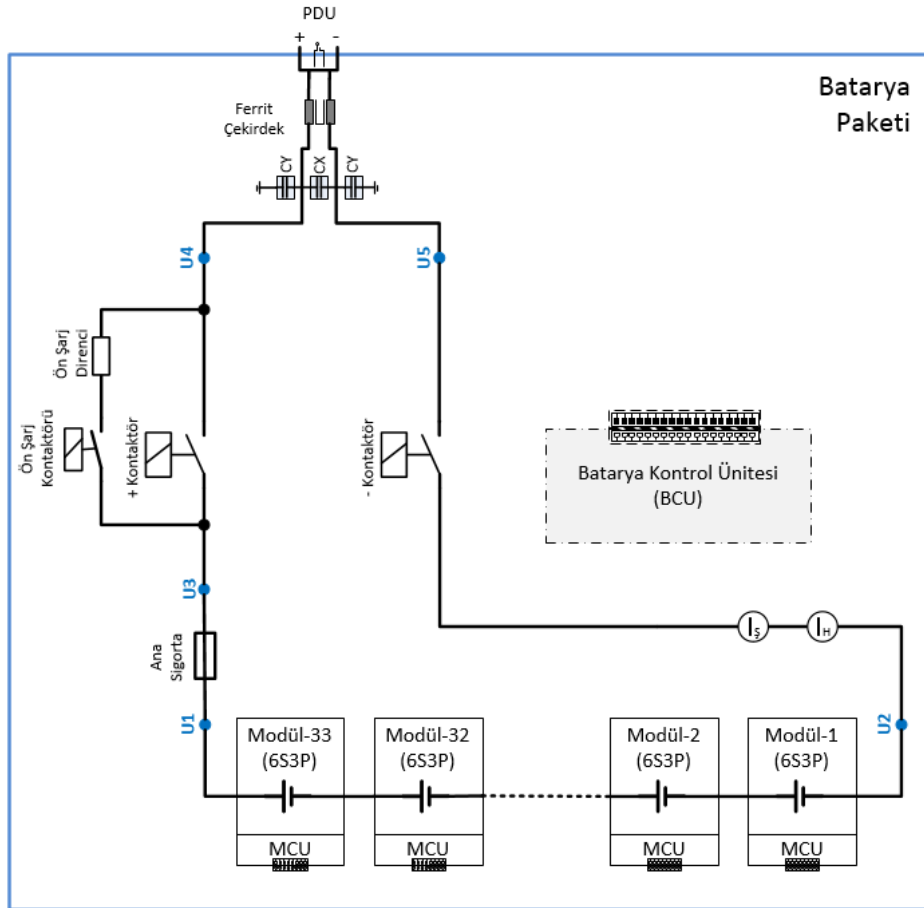
*Kötü durum senaryosunda: 2 paketli senaryo

**Sonraki bölümde hesaplama detayı gösterilmiştir.

Her bir batarya paketi E/E ünitesine sahiptir. Bununla birlikte, bütün sistemin kontrolünün sağlanması amacıyla bütün paketlerin bağlı olduğu merkezi bir PDU (Power Disconnect Unit, Güç Kesme Ünitesi) bulunmaktadır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9, sırasıyla PDU ve paketlerde yer alan E/E ünitesinin şematiklerini göstermektedir.



Şekil 3.8: PDU şematığı.



Şekil 3.9: Batarya paketi şematığı.

3.3.2. Komponent Seçimi

PDU’da ve batarya paketinde bulunan komponentler; gerilim, akım, çalışma sıcaklığı, mekanik dayanım ve işlevsellik gibi birtakım gereksinimlerin limitleri dahilinde seçilmiştir. Seçimi yapılan komponentler için kriterler aşağıda listelenmiştir:

- Ana kontaktör ve şarj kontaktörü: Batarya paketinde bulunan ana kontaktörler (+Kontaktör ve -Kontaktör), PDU’da bulunan şarj kontaktörü ve ana kontaktörler; maksimum çalışma gerilimi, nominal akım, tepe akımı, şarj akımı, kısa devre akımı ve mekanik ömür gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilmiştir.
- Ana sigorta: Batarya paketinde ve PDU’da bulunan ana sigorta, maksimum çalışma gerilimi ve minimum kesme akımı gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilmiştir. Ek olarak sigortanın I-T grafiği de dikkate alınmıştır.
- Akım sensörleri: Batarya paketinde ve PDU’da bulunan Şönt ve Hall etkili akım sensörleri, sistemin akım değerlerine göre seçilmiştir.
- Konnektörler: Batarya paketinde ve PDU’da bulunan konnektörler, gerilim ve akım taşıma kapasitelerine göre seçilmiştir.
- Filtre kapasitörleri: EMC filtre devresinde bulunan filtre kapasitörleri ISO6469-3 standardına göre hesaplanmıştır. Bu standarda göre depolanan toplam enerji değeri 0,2 Joule’den küçük olmalıdır [14]. Ayrıca, kapasitörlerin dayanım gerilimleri ve mekanik limitleri de göz önüne alınmıştır.
- Ferrit çekirdek: EMC filtre devrelerinde bulunan ferrit çekirdekler, materyal özellikleri ve doyma akımı dikkate alınarak seçilmiştir. Ayrıca, mekanik limitleri de göz önüne alınmıştır.

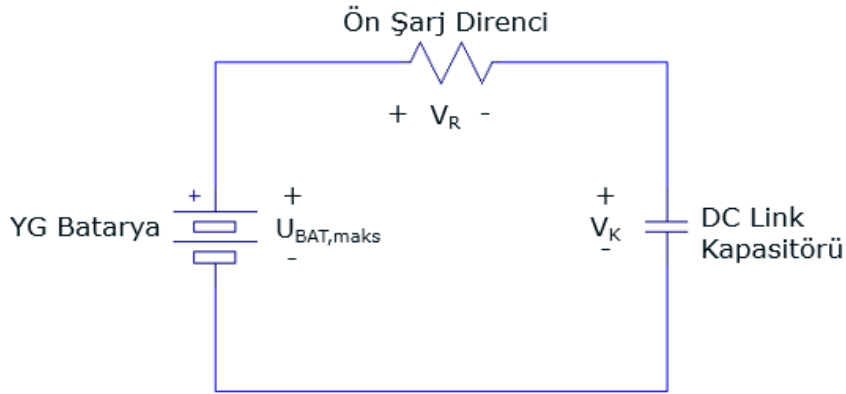
E/E ünitesinde ve PDU’da yer alan komponentler, yukarıda sözü edilen gereksinimler dikkate alınarak seçilmiş ve sistem tasarımına eklenmiştir. Seçilen bütün komponentler, otomotiv uygulamalarında sıklıkla kullanılan, mekanik titreşimlere dayanıklı otomotiv sınıfı komponentlerdir. Tablo 3.13’te seçimi yapılan komponentlerin bir listesi bulunmaktadır. Burada ön şarj devresi için komponentlerin seçimi yapılmamıştır. Ön şarj devresine ait komponentlerin seçimleri yapılırken, gereksinimlerin yanı sıra birtakım hesaplamaların da yapılması gerekmektedir. Bir sonraki bölümde ön şarj devresinin komponentleri için bu hesaplamalar yapılacak ve komponent seçimi sistem için tamamlanacaktır.

Tablo 3.13: Batarya sistemine ait komponent listesi.

Komponentler	Üretici & Model
Paket Ana Kontaktör	Panasonic 250A Gen5 [50]
PDU Ana Kontaktör	Panasonic 250A Gen5
PDU Şarj Kontaktör	Gigavac GXV600 [51]
Paket Ana Sigorta	Mersen MEV100A200-4 [52]
PDU Ana Sigorta	Mersen MEV100J400-4 [52]
Paket Şönt Akım Sensörü	Isabellenhütte IVT S300 [53]
PDU Şönt Akım Sensörü	Isabellenhütte IVT S500 [53]
Paket Hall Akım Sensörü	LEM CAB1000 [54]
PDU Hall Akım Sensörü	LEM CAB1000
Paket – PDU YG Konnektör	Amphenol Powerlok 2 - 200A [55]
PDU İnverter YG Konnektör	Amphenol Powerlok 1 - 500A
Paket ve PDU X-Kapasitörü	Wima 0.47 μ F [56]
Paket ve PDU Y-Kapasitörü	Wima 0.47 μ F
Paket Ferrit Çekirdek	Vacuumschmelze T60006-L2030-W358-03 [57]
PDU Ferrit Çekirdek	Vacuumschmelze T60006-L2040- W424-04 [58]

3.3.3. Ön Şarj Devresinin Simülasyonu

Ön şarj devresinin kullanım amacı Bölüm 2’de anlatılmıştı. Ön şarj devresine ait komponentlerin seçimi ve devrenin simülasyonu için öncelikle ön şarj direncinin değeri hesaplanmalıdır. Ön şarj kontaktörü kapandığında, ön şarj devresi ön şarj direnci ve DC Link kapasitöründen oluşan bir RC devresi gibi davranacaktır. Basit haliyle, eşdeğer ön şarj devresi Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Eşdeğer ön şarj devresi.

$$-U_{BAT,maks} + V_R + V_K = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{dV_K}{dt} = -\frac{1}{R.C}V_K + \frac{1}{R.C}U_{BAT,max} \quad (3.2)$$

Başlangıç koşulları '0' olarak kabul edilirse, kapasitörün gerilimi;

$$V_K = U_{BAT,max} \left(1 - e^{-\frac{t}{R.C}}\right) \quad (3.3)$$

olarak bulunur. Böylelikle denklem (3.3)'ten direnç değeri elde edilebilir.

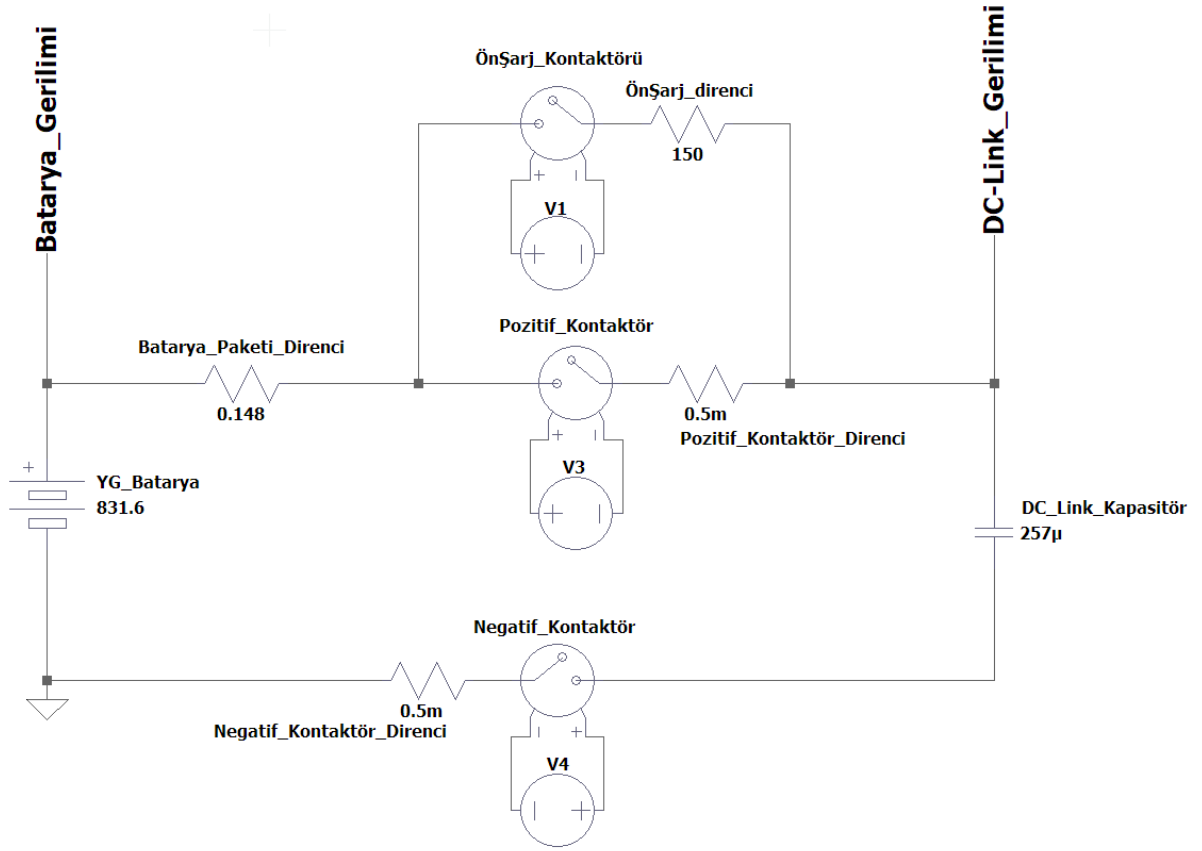
$$\frac{U_{BAT,max} - V_K}{U_{BAT,max}} = e^{-\frac{t}{R.C}} \quad , \quad \Delta U = U_{BAT,max} - V_K \quad (3.4)$$

$$R = -\frac{t_{pre}}{C * \ln\left(\frac{\Delta U}{U_{Bat,mak}}\right)} \quad (3.5)$$

Pratik olarak DC Link kapasitörleri, elektrikli araç uygulamalarında ön şarj ile batarya geriliminin 5V altında olacak şekilde şarj edilir. Dolayısıyla (3.4)'te bulunan ΔU gerilim farkı 5 V olarak kabul edilmiştir. Yine ön şarj süresi, t_{pre} , yaklaşık olarak 200ms kabul edilmiştir. DC Link kapasitesi, C , 257 μF kabul edilmiştir. Sonuç olarak ön şarj direnci:

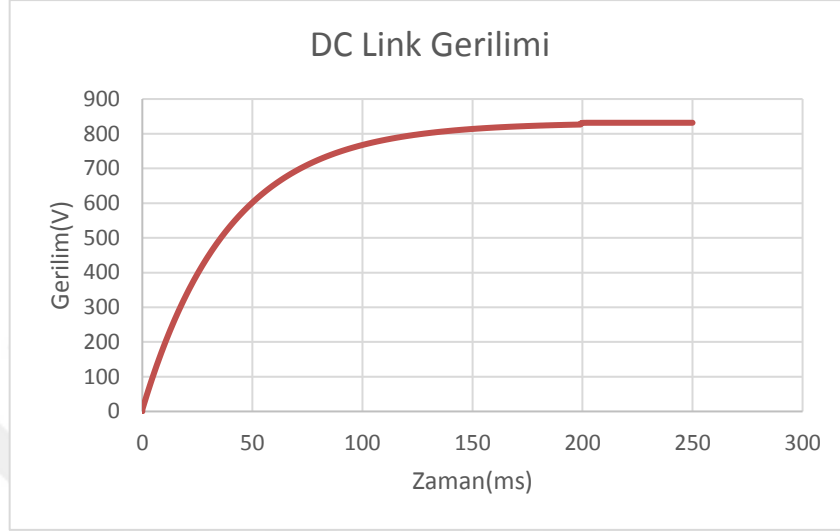
$$R = -\frac{200 * 10^{-3}}{257 * 10^{-6} * \ln\left(\frac{5}{831.6}\right)} \cong 150\Omega \quad (3.6)$$

olarak hesaplanmıştır. Tüm bu değerler kullanılarak ön şarj devresinin simülasyonu yapılmıştır (Şekil 3.11). Bu simülasyon ile DC Link kapasitörünün gerilimi, +Kontaktör ve ön şarj kontaktörünün ön şarj anında taşıdıkları akımlar izlenmiştir.



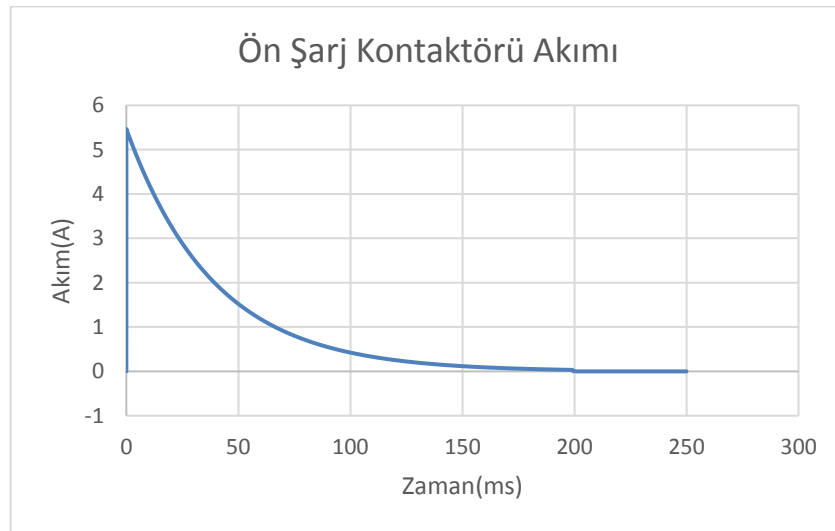
Şekil 3.11: Ön şarj devresi simülasyonu.

Ön şarj süresi boyunca DC Link kapasitörü, belirlenen gerilim değerine kadar şarj olmaktadır. Ön şarj devresi tamamlandıktan sonra, DC Link kapasitörü üzerinde batarya gerilimi görülmektedir. Şekil 3.12’de DC Link geriliminin zamana göre değişimi gösterilmektedir.



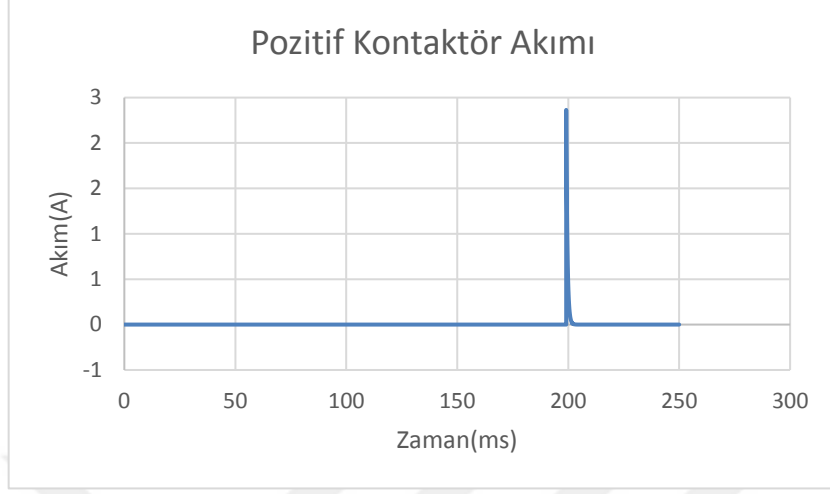
Şekil 3.12: Ön şarj anında DC Link kapasitörü üzerindeki gerilim değişimi.

Ön şarj kontaktörü kapatıldığında, kontaktörün taşıdığı ön şarj akımının zamana göre değişimi Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Ön şarj anında ön şarj kontaktörü üzerindeki akım değişimi.

Ön şarj süresi boyunca +Kontaktör açık olduğundan taşıdığı akım '0'dır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Ön şarj süresi boyunca +Kontaktör üzerindeki akım değişimi.

3.3.4. Batarya Paketinin Kısa Devre Hesabı

Elektrikli otobüs için tasarlanan batarya sisteminde, 6 adete kadar paralel bağlanabilen özdeş batarya paketi ve PDU'nun bulunduğu değinilmiştir. Sistem içindeki bütün batarya paketleri, yüksek gerilim kabloları aracılığıyla PDU'ya bağlanmaktadır. Sistemde meydana gelebilecek kısa devre durumunda akabilecek kısa devre akımının hesaplanması için, paket içindeki yüksek gerilimli komponentlerin, komponentlerin birbirine bağlanması sağlayan yüksek gerilim baralarının iç dirençlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bir batarya paketine ait iç dirençler Tablo 3.14'te gösterilmiştir. Komponentlere ait iç direnç değerleri, ilgili komponentlerin veri sayfalarından elde edilmiştir. İç direnç değeri, veri sayfasında doğrudan yer almayan komponentler için ise verilen güç tüketimi değerleri kullanılarak türetilmiştir. Komponentlerin yüksek gerilim baralarıyla olan vidalı bağlantıları, bağlantı noktalarında kontak direncini oluşturmaktadır.

Tablo 3.14: Batarya paketi bileşenlerine ait iç dirençler.

Batarya Paketi Bileşenleri		İç direnç [mΩ]
E/E ünitesinin iç direnci	YG konnektör direnci	0.08
	+ Kontaktör iç direnci	0.5
	Sigorta iç direnci	0.74
	Şönt sensör iç direnci	0.1
	- Kontaktör iç direnci	0.5
	Bara dirençleri	0.750
	Kontak direnci (bağlantıdan kaynaklanan)	0.06
Modüllerden kaynaklanan iç direnç	33 adet seri bağlı modül direnci	142.362
	Modüller arası toplam bara direnci	2.809
Toplam paket iç direnci		147.901

Bara dirençleri, materyali dolayısıyla öz direnci bilinen baraların uzunluğu ve kesit alanları ölçülerek Denklem (3.7)'deki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.7)$$

Bir batarya paketine bileşenlerin oluşturduğu iç dirençlere ait şematik Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

Öncelikle otobüsün farklı noktalarında bulunan batarya paketlerinin PDU'ya olan mesafeleri ölçülmüştür. Ölçülen mesafeler için yeterli uzunlukta Huebner Suhner Radox 155 [59] kablolar kullanılarak, bu kabloların iç dirençleri hesaplanmış ve paket iç dirençlerine eklenmiştir.

Tablo 3.15: Batarya paketleri ve PDU arasındaki kablaj bilgisi.

Kablo bağlantısı	Kablo uzunluğu [m]	Kablo kesit alanı [mm ²]	Direnç Değeri [mΩ]
Paket 1 - PDU	4*2	35	4.216
Paket 2 - PDU	6.5*2	35	6.851
Paket 3 - PDU	7.9*2	35	8.327
Paket 4 - PDU	10.5*2	35	10.067
Paket 5 - PDU	12*2	35	12.628
Paket 6 - PDU	13.4*2	35	14.124

Kısa devre hesabı için incelenen konfigürasyonlar, batarya sisteminde en fazla ve en az sayıda batarya paketinin bulunması durumudur. Bir batarya paketine ait iç direnç Tablo 3.14'te 147.911 mΩ olarak hesaplanmıştı. Batarya paketi dirençlerine kablo bağlantılarının oluşturduğu iç dirençler eklenerek, sistemde 6 ve 2 adet batarya paketi bulunması durumları için toplam eş değer dirençler Tablo 3.16'da gösterilmiştir.

Tablo 3.16: 6 paketli ve 2 paketli batarya sistemlerinin iç direnç değerleri.

	6 Paketli Konfigürasyonun Direnç Değeri [mΩ]	2 Paketli Konfigürasyonun Direnç Değeri [mΩ]
$R_{\text{Paket1}} + R_{\text{Paket1-PDU_Kablo}}$	152.117	152.117
$R_{\text{Paket2}} + R_{\text{Paket2-PDU_Kablo}}$	154.752	154.752
$R_{\text{Paket3}} + R_{\text{Paket3-PDU_Kablo}}$	156.227	-
$R_{\text{Paket4}} + R_{\text{Paket4-PDU_Kablo}}$	158.968	-
$R_{\text{Paket5}} + R_{\text{Paket5-PDU_Kablo}}$	160.549	-
$R_{\text{Paket6}} + R_{\text{Paket6-PDU_Kablo}}$	162.024	-
R_{Sistem}	26.228	76.711

Sistemde en fazla ve en az sayıda batarya paketi bulunması durumları için iç dirençler hesaplanmıştır. Batarya sistemlerinde kısa devre akımı hesaplanırken, batarya paketindeki bileşenlerin iç dirençlerine ek olarak harici kısa devre direnci sisteme seri olarak eklenmektedir. Ulusal ve uluslararası birçok otorite, elektrikli araç bataryalarının güvenlikleri için yayımladıkları standart ve regülasyonlarda bu direnç değerini, kısa devre testi senaryolarında belirtmektedir. Standart ve regülasyonlarda, harici kısa devre direnci farklı büyüklüklerde olabilmektedir. Örnek olarak; ECE-R100’de harici kısa devre direnci 5 m Ω ’dan az olmamak üzere, ISO12405’te 10 m Ω ’dan az olmamak üzere, UL2271 ve UL2580’de 20 m Ω ’dan az olmamak üzere, UN38.3 ve EN62281’de ise 100 m Ω ’dan az olmamak üzere tanımlanmıştır. Bu nedenle, Tablo 3.17’de 2 adet batarya paketi içeren ve Tablo 3.18’de 6 adet batarya paketi içeren konfigürasyonlar için kısa devre akımı farklı standartlara göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tablo 3.17: 2 paketli sistem için farklı standartlara göre kısa devre akımları.

	Direnç [m Ω]	ECE-R100 [kA]	ISO12405 [kA]	UL2271, UL2580 [kA]	UN38.3, EN62281 [kA]
Paket1	152.117	5.132	4.836	4.336	2.373
Paket2	154.752	5.045	4.754	4.262	2.333
Sistem	76.712	10.177	9.590	8.599	4.706

Tablo 3.18: 6 paketli sistem için farklı standartlara göre kısa devre akımları.

	Direnç [m Ω]	ECE-R100 [kA]	ISO12405 [kA]	UL2271, UL2580 [kA]	UN38.3, EN62281 [kA]
Paket1	162.024	4.311	3.716	2.912	1.066
Paket2	160.549	4.350	3.750	2.939	1.076
Paket3	158.968	4.394	3.787	2.968	1.087
Paket4	156.227	4.471	3.854	3.020	1.106
Paket5	154.752	4.513	3.890	3.049	1.117
Paket6	152.117	4.592	3.958	3.102	1.136
Sistem	26.228	26.630	22.955	17.989	6.588

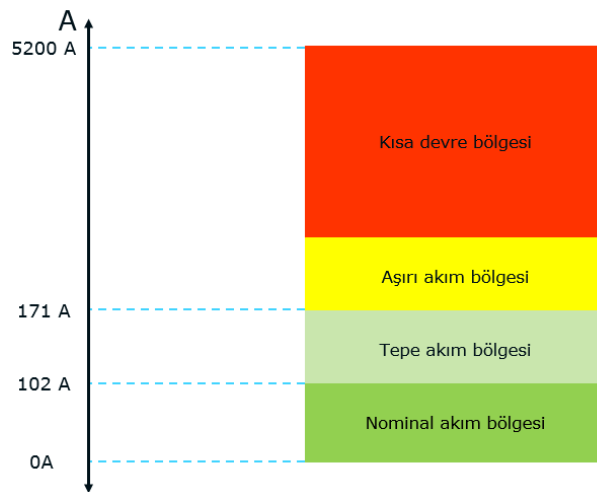
Tablo 3.17 ve Tablo 3.18’deki değerler karşılaştırıldığında, kısa devre anında bir paketten akması muhtemel en yüksek kısa devre akımı, batarya sisteminde 2 adet batarya paketinin paralel bulunması durumunda ve ECE-R100 standardı uygulandığında ortaya çıkmaktadır.

Batarya sisteminin elektriksel tasarımı, en kötü koşullar altındaki durum değerlendirilerek yapılacağı için, bir batarya paketi için karşılaşılabilecek en yüksek kısa devre akımı yaklaşık 5200 A olarak kabul edilmiştir.

3.3.5. Batarya Paketlerinin Açma Stratejisi: Batarya Koruma Elemanlarının Koordinasyonu

Batarya sistemi konfigürasyonunda en önemli parametrelerden biri, açma stratejisinin doğru bir şekilde oluşturulmasıdır. Güvenli açma stratejisinin çekirdeğini, paket içinde yer alan ana kontaktörler ve sigortanın çalışma koordinasyonu oluşturmaktadır. Batarya paketinin E/E ünitesinde yer alan kontaktörler, sigortanın zarar görebileceği küçük akım seviyelerinde sistemi açabilmelidir. Kontaktörün taşıyabildiği ancak açma yapmadığı yüksek akım seviyelerinde ise sigorta batarya sistemini kesebilmelidir. BMS, akım sensörlerinden sürekli okunan akım değerleri ile bu koordinasyonun sağlanmasında görevlidir. Hangi akım değerlerinde kontaktörün, hangi akım değerlerinde sigortanın görev yapması gerektiği, açma stratejisi kapsamında hesaplanacak ve stratejik açma noktası belirlenecektir. Bu veriye göre BMS, gerekiyorsa kontaktörler aracılığıyla sistemi açacak ya da kontaktörleri kapalı tutarak sistemi sigorta ile kesecektir. Stratejik açma noktasının belirlenmesi için, batarya paketinin çalışma bölgeleri ve paketlerde yer alan ana kontaktör ve sigortaya ait akım taşıma karakteristikleri, ilgili komponentlerin veri sayfasından okunarak çizelgeler hazırlanmıştır.

Batarya çalışma bölgelerini gösteren çizelge Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16: Batarya paketinin çalışma bölgeleri.

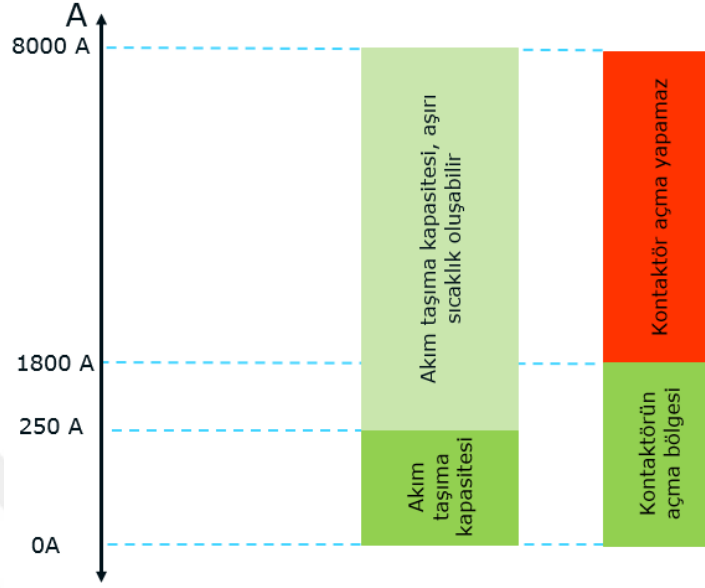
Nominal akım bölgesi, batarya sisteminin normal kullanım durumunda ve komponent yaşlanmasının normal seviyelerde olduğu, aşırı ısınma, hasar ve fonksiyon kaybının beklenmediği çalışma bölgesidir. Sistemin gereksinimi olan ve hücrelerin sağladığı nominal akım bu bölgede ifade edilmektedir. Tepe akımı bölgesi, normal kullanım durumunda kısa süreler için meydana gelmesi mümkün olan ancak hasar, fonksiyon kaybı ve aşırı ısınma riski gibi durumların beklenmediği bölgeyi tanımlamaktadır. Uzun süreli olması durumu güvenlik stratejileriyle engellenmelidir. Aksi halde komponentlerin hızlı yaşlanmasına sebep olabilir. Yük profiline göre tanımlanmış süre için sistemin zarar görmeden dayanması gereken tepe akım değeri belirlenmektedir. Aşırı akım bölgesi, normal çalışma durumu dışında sadece arıza durumunda ortaya çıkması mümkün olan akım bölgesidir. Aşırı ısınma, hızlı yaşlanma ve sistemin zarar görmesi gibi durumlara sebep olmaktadır. Batarya sistemi, güvenlik stratejisi ile korunmalıdır. Aşırı akım bölgesi, tepe akım değeri ile başlar ve belirlenecek olan stratejik açma noktası ile sona erer. Kısa devre bölgesi, batarya sistemi için en kötü senaryoyu temsil eden bölgedir. Sistemin kısa devre akımına karşı korunması gerekmektedir. Belirlenen stratejik açma noktası ile başlar ve hesaplanan kısa devre akımı değerine kadar ulaşır.

Batarya paketinin ana kontaktörlerine ait akım taşıma karakteristikleri Tablo 3.19'da listelenmiştir. Batarya sistemlerinde güvenlik stratejisi gereği, sistem için seçilen kontaktörlerin nominal ve tepe akım bölgelerinde, ısınma ve hasar olmadan akımı taşıması beklenmektedir. Aşırı akım bölgesinde, tanımlanan kısa süreler için akım taşıma kapasitesi bulunmalıdır. Ayrıca kısa devre bölgesinde bulunan bir akım seviyesini en az bir kere açabilmelidir. Seçilen kontaktör, özellikleri bakımından gereksinimleri karşılamaktadır.

Tablo 3.19: Paket ana kontaktörlerinin akım taşıma karakteristikleri.

Panasonic 250A Gen5	Zaman	Akım
Anma akımı	Sürekli	250A
Akım taşıma	100s	700A
Akım taşıma	10s	2000A
Maksimum açma akımı	-	1800A
Kısa devre akımı	>5ms	8000A

Şekil 3.17’de ana kontaktörlerin çalışma bölgelerinin gösterildiği çizelge yer almaktadır.



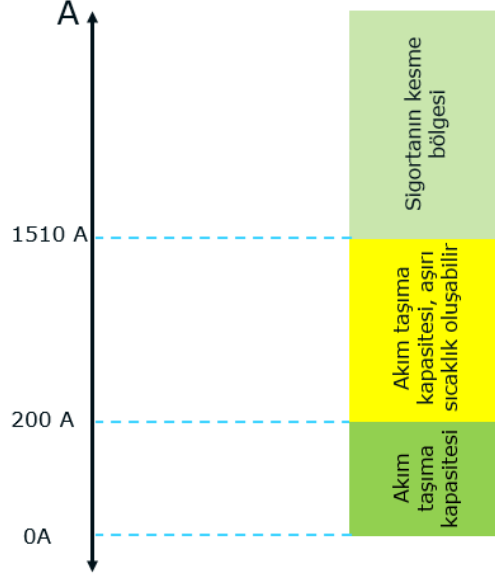
Şekil 3.17: Ana kontaktörlerin çalışma bölgeleri.

Batarya paketinin ana sigortasına ait akım taşıma karakteristikleri Tablo 3.20’de listelenmiştir. Ana kontaktörlerde olduğu gibi, sigortalar da nominal ve tepe akımlarını hasarsız ve hızlı yaşlanma olmadan taşıyabilmelidir. Nominal ve tepe akımı bölgeleri dışında da sigortalar, ana kontaktörlerin taşıdığı akım seviyelerinde aşırı ısınma olmadan ve hasar meydana gelmeden aşırı akım bölgesindeki akımları taşıyabilmelidir. Tanımlanan stratejik açma noktası seviyesine kadar sigortanın zarar görmesini engellemek amacıyla kontaktörler devreyi açma görevini yürütmelidir.

Tablo 3.20: Paket ana sigortasının akım taşıma karakteristiği.

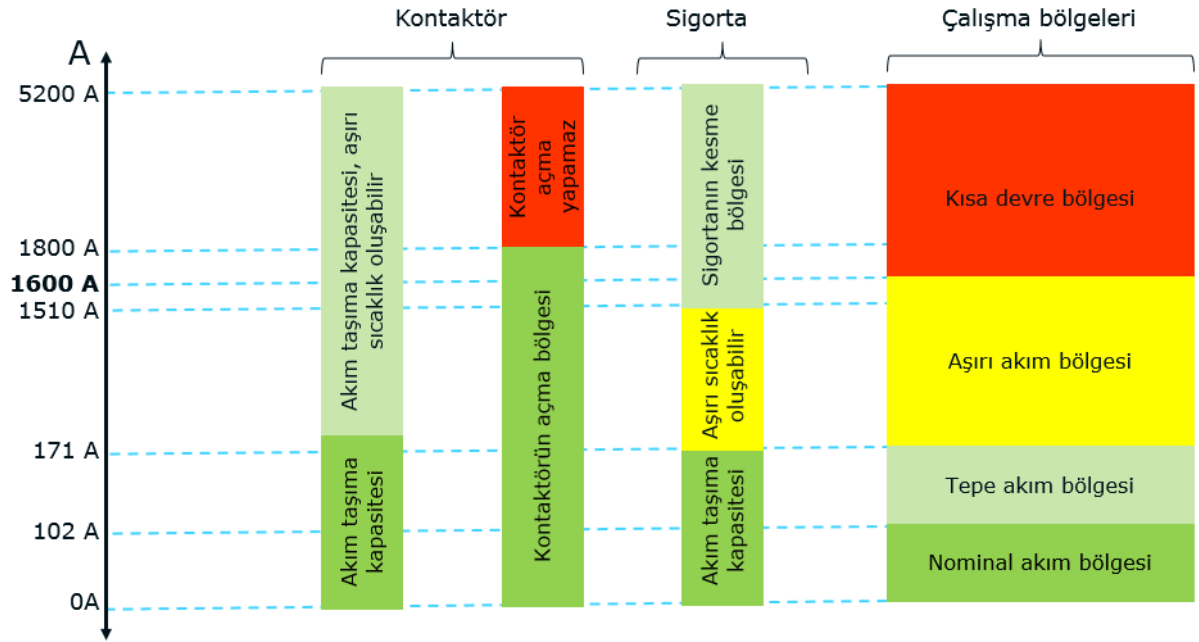
MERSEN MEV100A200-4	Zaman	Akım
Anma akımı	Sürekli	200A
Minimum kesme akımı	-	1510A

Şekil 3.18’de paket ana sigortasının çalışma bölgelerinin gösterildiği çizelge yer almaktadır.



Şekil 3.18: Paket ana sigortasının çalışma bölgeleri.

Sistem parametrelerinden, ana kontaktörler ve sigortadan elde edilen akım değerleri bir araya getirilerek sistemin çalışma bölgeleri için değerler tanımlanmış ve stratejik açma noktası belirlenmiştir. Şekil 3.19’da sistemin çalışma bölgeleri çizelgesi gösterilmiştir. Ana kontaktör veri sayfasından elde edilen bilgilere göre, seçilen kontaktör maksimum 1800A seviyesine kadar açma yapabilmektedir. Seçilen sigorta ise 1510A seviyesinden sonra kesme yapabilmektedir. Stratejik açma noktası, ana kontaktörün maksimum açma akımı ve ana sigortanın minimum kesme akımının arasında kalacak şekilde belirlenmektedir. Güvenlik açığı oluşmaması adına, sigortanın minimum kesme akımının yaklaşık %10 toleransı göz önüne alınarak stratejik açma noktası 1600A olarak belirlenmiştir. Stratejik açma noktasına kadar meydana gelecek aşırı akım durumlarında sigortanın zarar görmemesi adına sistem kontaktör ile açılacak, stratejik açma noktasının üstünde kalan akım değerlerinde kesme işlemi sigorta ile yapılacaktır.



Şekil 3.19: Sistemin çalışma bölgeleri.

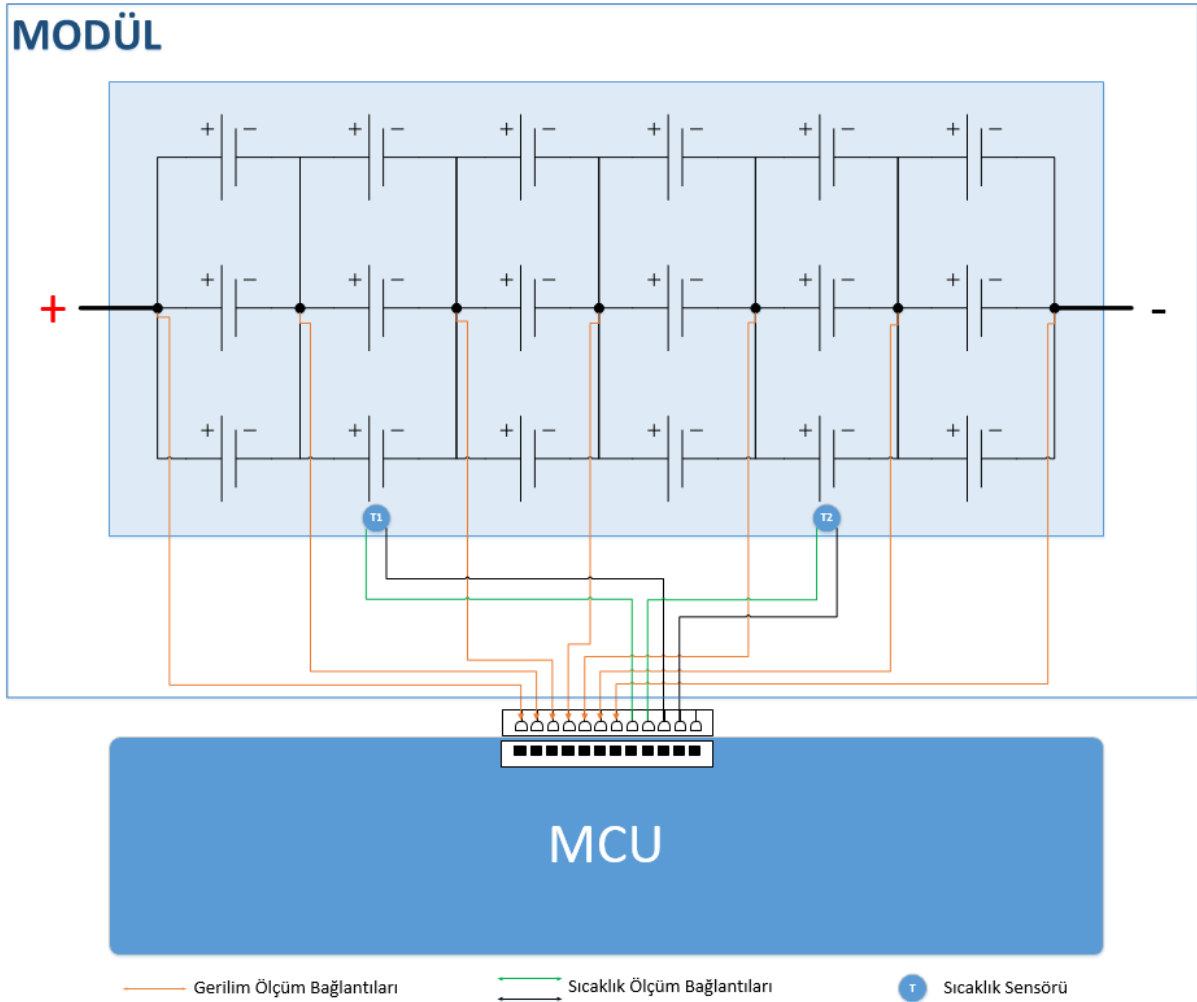
3.4. TASARLANAN KONSEPT İÇİN BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ

BMS'in fonksiyonel gereksinimleri ve donanım topolojilerine Bölüm 2'de değinilmiştir. Elektrikli otobüslere yönelik tasarlanan batarya sistemi için AVL firmasına ait BMS kullanılmıştır [60]. AVL Batarya Yönetim Sistemleri, farklı araç tipleri ile entegrasyonu sağlayan ve merkezi olmayan donanım topolojisi ile esneklik sağlayan bir yönetim sistemidir. Her bir batarya paketi içinde bulunan modüllerden gerilim ve sıcaklık bilgileri MCU'lar aracılığıyla okunurken, sistemde bulunan BCU'lar ise, MCU'lardan aldığı bu verilerin işlenmesi görevini üstlenir. Sistemde yer alan BCU'ların diğer fonksiyonları aşağıda listelenmiştir:

- Bataryanın durum tahminlerinin yapılması (SoC, SoH)
- Hücre dengeleme işlemi
- Hücredeki olası hataların algılanması
- Kontaktör kontrolü
- Ön-şarj fonksiyonu
- Yalıtım direncinin ölçülmesi
- Tanı olayları
- Hata yönetimi vb.

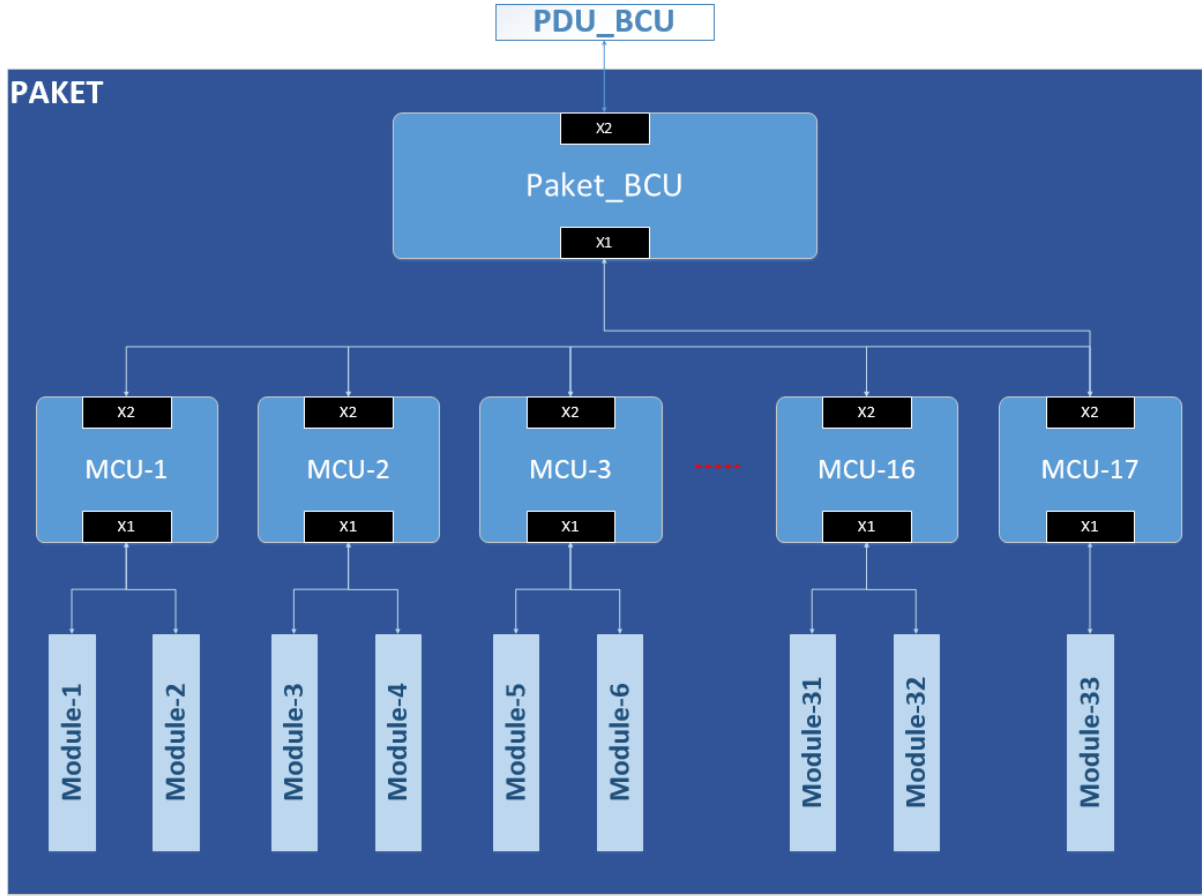
Temel özellikleri yukarıda belirtildiği gibi olan AVL Batarya Yönetim Sistemi, tasarlanan batarya sistemine entegre edilmiştir.

Batarya paketi içinde esnekliğin sağlanması amacıyla seri ve paralel bağlı hücrelerden oluşan modüllerin, 6S3P konfigürasyona sahip olduğu önceki bölümlerde anlatılmıştı. Paralel bağlı hücre gerilimlerinin, doğal yollarla eşitleneceği açıktır. Buna karşın seri hücrelerde meydana gelebilecek gerilim farklılıklarının izlenmesi gerekmektedir. Bu farklılıkların izlenmesi ve pasif dengeleme işleminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla gerilim ölçümleri alınmaktadır. Önemli bir diğer parametre olan modül içi sıcaklık, modüller içinde yer alan sıcaklık sensörleri aracılığıyla takip edilebilmektedir. Bu bilgiler ışığında her bir modül içinde 2 sıcaklık sensörü konumlandırılmış ve bu sensörlerden ölçüm bilgisi MCU'lar aracılığıyla alınmaktadır.



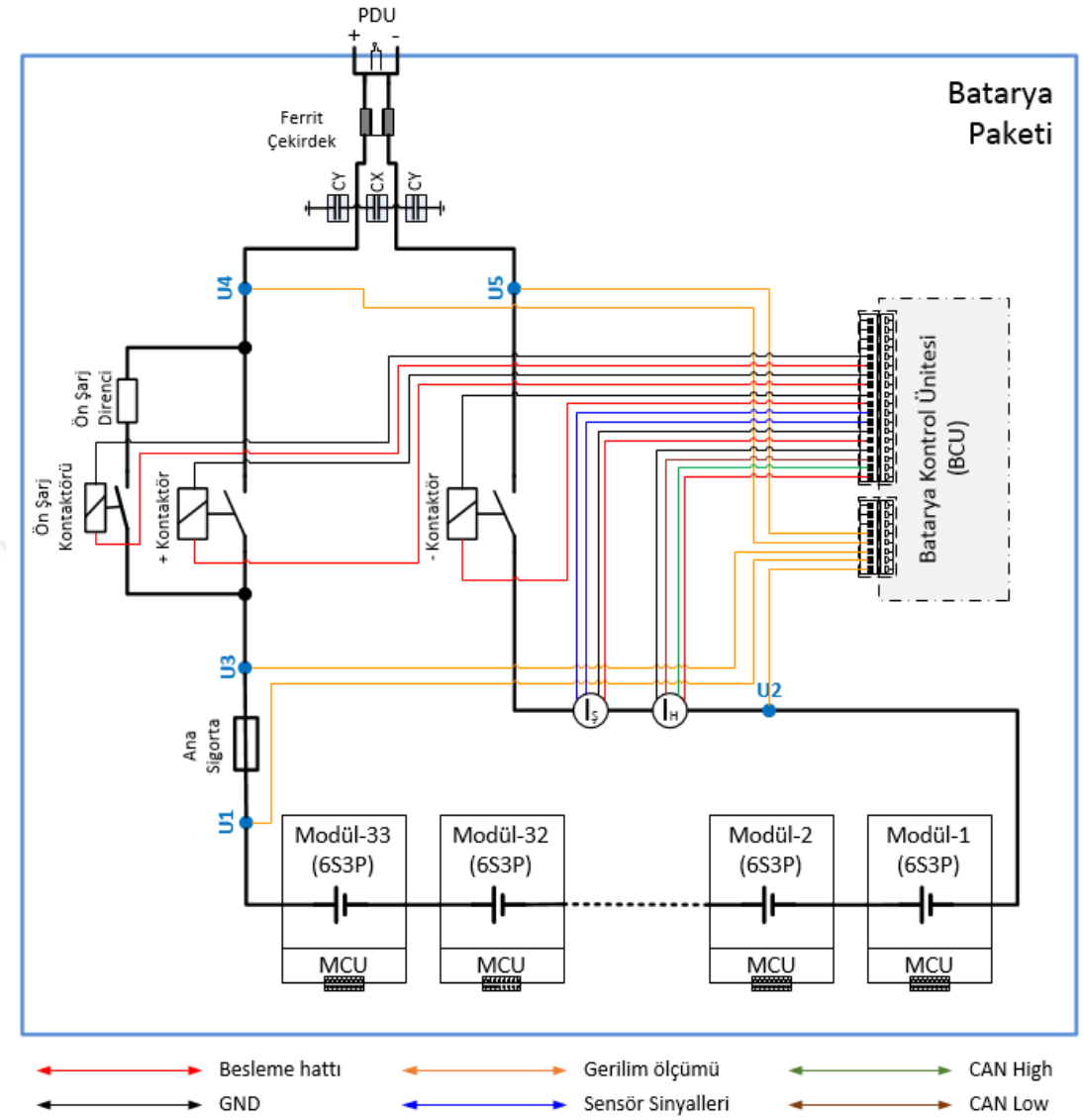
Şekil 3.20: Modül düzeyinde MCU bağlantı yapısı.

AVL BMS'inin bir adet MCU ile 2 modüle ait gerilim ve sıcaklık bilgisini okuyabilecek yetkinlikte olduğu gözlemlenmiştir. Maliyet ve komponent sayısından doğacak karmaşıklıklar da göz önüne alınarak, sistemde bulunan her iki modül bir MCU'ya bağlanmıştır. Sistemin 33 adet modül içermesi dolayısıyla toplamda her bir paket için 17 adet MCU kullanılmıştır. Batarya paketi içinde yer alan modüllerin MCU ile bağlantısı ve MCU'ların pakette yer alan BCU ile bağlantısı Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



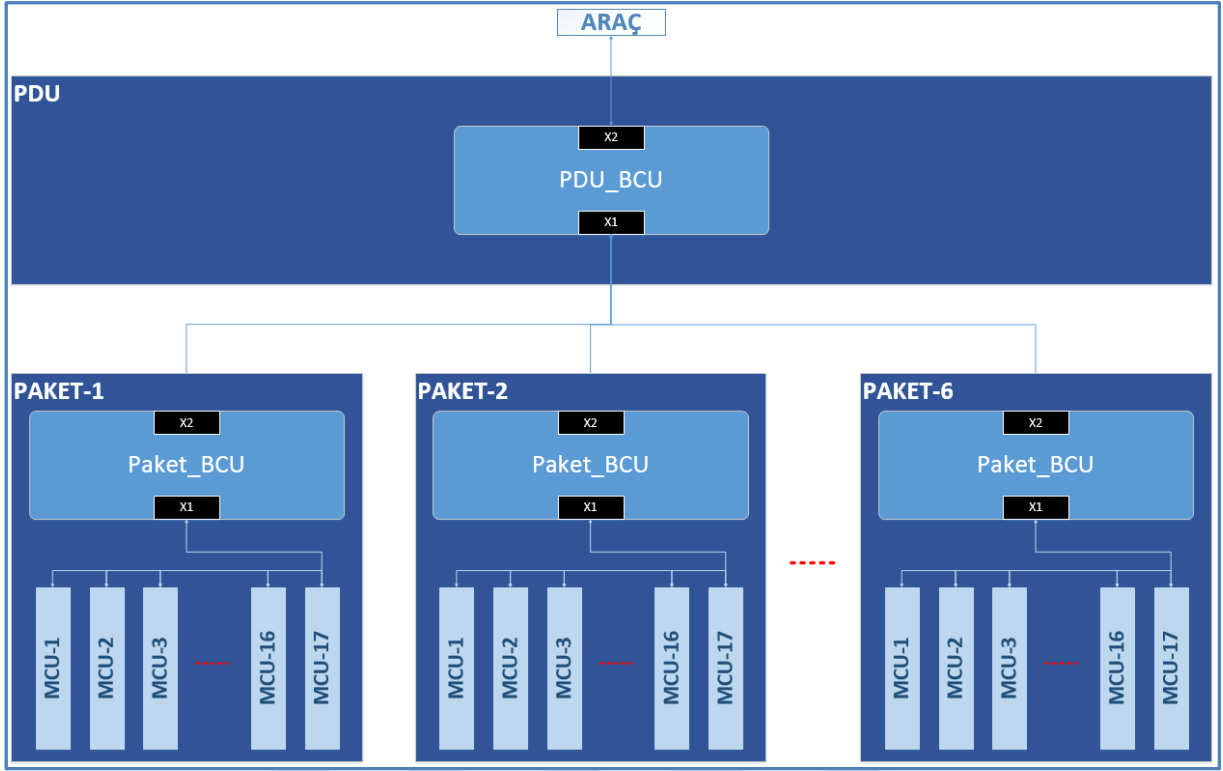
Şekil 3.21: Paket düzeyinde MCU-BCU bağlantı yapısı.

Paket düzeyinde yer alan BCU'ların, MCU'lar ile haberleşme görevi dışında görevlere sahip olduğu Bölüm 2'de anlatılmıştı. Bu görevlerin yerine getirilmesi amacıyla BCU'nun E/E ünitesindeki komponentler ile de bağlantısı bulunmaktadır. Şekil 3.22'de gösterildiği gibi, BCU'lar aracılığıyla E/E ünitesi üzerinde yer alan yüksek gerilim noktalarından gerilim ölçümleri alınmaktadır. E/E ünitesinde yer alan kontaktör ve akım sensörlerinin beslemesi ve kontrolü de yine BCU bağlantıları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.22: Paket düzeyinde E/E Ünitesi-BCU bağlantı yapısı.

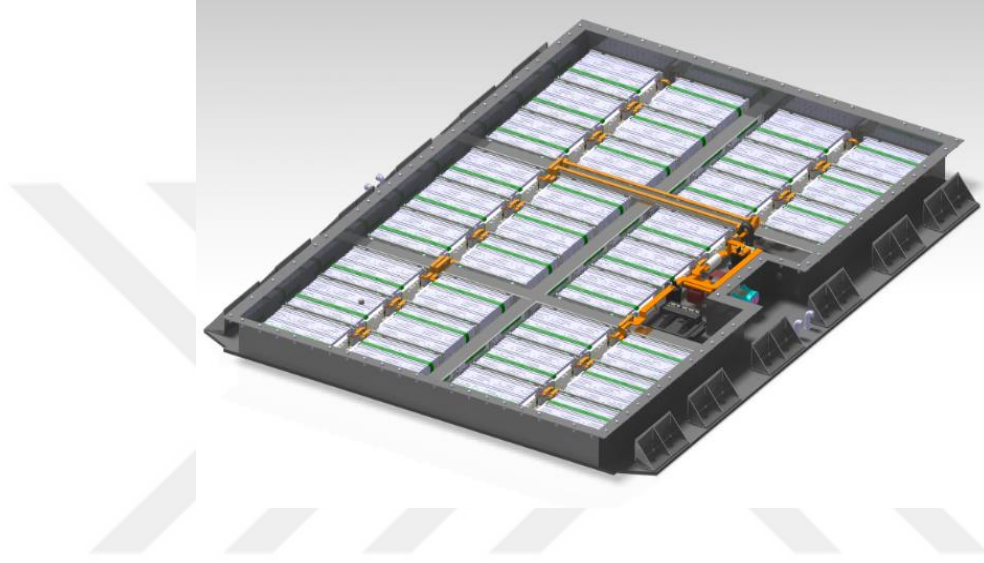
Batarya sistemi düzeyindeki BMS bağlantıları ise Şekil 3.23'te gösterilmiştir. Her bir pakette yer alan BCU'lar, PDU'da bulunan BCU ile haberleşmektedir. PDU'da bulunan BCU, batarya paketlerinden toplandığı verileri araç sistemine dolayısıyla sürücüye aktarmakla görevlidir.



Şekil 3.23: Sistem düzeyinde BMS bağlantı yapısı.

4. BULGULAR

Tez kapsamında şehir içinde yaygın kullanıma sahip bir otobüs kategorisi ele alınmış ve piyasadaki elektrikli otobüslerin enerji tüketimleri göz önüne alınarak dağıtılmış batarya sistemi tasarlanmıştır. 6 adet paketin paralel çalışmasına olanak tanıyan sistemde her bir batarya paketi, uluslararası standartları karşılayacak komponentler kullanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 4.1: Tasarlanan batarya paketi.

Yüksek kapasite gereksiniminin karşılanması adına otobüste batarya paketi yerleşimine elverişli alanlar incelenmiştir. Piyasadaki otobüslerin aksine, otobüsün tavanıyla birlikte zeminine de batarya paketleri yerleştirilerek mekanik yük dağılımı problemi giderilmiş ve yüksek kapasite gereksinimi karşılanmıştır.

Öncelikle gereksinimleri belirlenen batarya sistemi için, uluslararası elektriksel güvenlik standartları uygulanarak yalıtım koordinasyonu parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametrelere uygun olacak şekilde batarya paketlerine ve PDU'ya ait E/E üniteleri tasarlanarak elektrikli otobüs batarya sistemine yönelik yüksek gerilim donanımı tamamlanmıştır. Modül ve paket konfigürasyonu yapılan yüksek gerilim batarya sisteminin BMS'ine ait fonksiyonlar belirlenmiştir. Tasarlanan batarya sistemi için kullanılan BMS, yalnızca batarya paketlerinin değil, bütün batarya sisteminin güvenli çalışma aralığında sağlıklı bir şekilde operasyonunu sürdürmesi görevini yürütmektedir. Bütün bu yönleri ile incelendiğinde tez çalışması boyunca aktarılan yöntem, yüksek kapasiteli batarya sistemi hazırlanmasında önemli bir yol göstericidir.

Elektrikli otobüs için tasarlanan batarya sisteminin sahip olduğu esneklik, ticari anlamda da büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Piyasadaki mevcut sistemlerin aksine, tam kapasiteyle satın alınmayan otobüsler için talep edilmesi halinde hiçbir donanım değişikliğine gidilmeden yalnızca yazılım değişikliği ile yeni batarya paketleri sisteme eklenebilmektedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez kapsamında tasarlanan elektrikli otobüslere yönelik yüksek kapasiteli batarya sisteminin, birden fazla batarya paketi içeren ölçeklenebilir bir sistem olması amaçlanmıştır. Batarya paketlerinin özdeş olması herhangi bir paketin birincil (master) olarak seçilmemesine, dolayısıyla herhangi bir pakette meydana gelebilecek bir hata durumunda sistemin çalışmasını sürdürmesine olanak tanımaktadır.

Şehir içi kullanıma uygun olan otobüs sınıfı belirlendikten sonra, otobüslere yönelik sürüş çevrimleri incelenmiş ve en gerçekçi sonuçların elde edilmesi amacıyla AVL firması tarafından oluşturulan sürüş çevrimi kullanılmıştır. AVL Cruise-M simülasyon programı aracılığıyla, elektrikli araçlara ve batarya paketlerine ait parametreler tanımlanarak, seçilen sürüş çevrimi için şehir içi kullanıma uygun elektrikli otobüsün enerji tüketimi simüle edilmiştir. Simülasyon programında elde edile çıktılar, piyasadaki elektrikli otobüslerin enerji tüketimleriyle benzerlik göstermiştir.

Uluslararası elektriksel güvenlik standartları incelenerek batarya sistemi için yalıtım koordinasyonu oluşturulmuştur. Yalıtım koordinasyonu ile elektrikli otobüse yönelik batarya sisteminin, canlı komponentleri arasında havadan ve yüzeyden boşluk mesafeleri belirlenmiş, sistemin ömrünü tamamladığında olması gereken minimum yalıtım direnci değeri yine uluslararası standartlar çerçevesinde hesaplanmıştır.

Sistemin güvenli bir şekilde güç aktarma organlarına bağlanması ve güç aktarım organlarından ayrılmasından sorumlu olan EE ünitesinin mimarisi çizilmiş ve komponentleri seçilmiştir. Komponent seçimlerinde batarya sistemine ait gereksinimler ve elde edilen tüketim değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Ön şarj devresi için yapılan simülasyonlar aracılığı ile ön şarj devresinin komponentleri boyutlandırılmıştır. Sigorta, kontaktör gibi ön seçimi yapılan koruma elemanlarının, açma stratejisi yardımıyla koordinasyonu incelenmiştir.

Genel Kısımlar bölümünde değinilen ve her BMS'in sahip olması beklenen fonksiyonlar göz önüne alınarak, sistem gereksinimlerini karşılayabilecek düzeyde bir BMS seçilmiştir. Hedeflenen esnek batarya sisteminde uygulanması kolay ve düşük maliyetli BMS'in özellikleri tanıtılmış ve sisteme entegrasyonu sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında önerilen, elektrikli otobüslere yönelik modüler ve ölçeklenebilir batarya sistem tasarımı, farklı gereksinimler için çözümler sunmaktadır. Esnek sistem tasarımı sayesinde, güç aktarım sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmadan, farklı menzil ve kapasite gereksinimlerine cevap veren elektrikli otobüs batarya sistemi ortaya konulmuştur. Sayılan avantajların yanı sıra, geliştirilen dağıtılmış batarya sisteminin, mekanik yük dağılımı ve elektriksel bağlantı gibi zorlukları da beraberinde getirdiği gözlemlenmiştir. Sistem gereksinimlerinin, sistemin en küçük konfigürasyonlarında bile karşılanma zorunluluğu ve her bir paketin farklı empedanslara sahip olması nedeniyle, elektriksel yük dağılımlarında oluşan eşitsizlikler karşılaşılabilecek diğer zorluklardır.

Günümüzde elektrikli araçlara olan ilginin ve akademik çalışmaların arttığı bu yıllarda, elektrikli otobüs alanındaki eğilimlere dikkat çekmek, bu yöndeki çalışmalara bakış açısı sağlamak ve karşılaşılan zorluklara çözüm getirmek, bu tez çalışmasının en büyük motivasyonunu oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] United Nations Inland Transport Committee, 2017, ‘Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3)’, Revision 6.
- [2] Bloomberg New Energy Finance, March 29, 2018, ‘Electric Buses in Cities’.
- [3] <https://www.alexander-dennis.com/media/83810/enviro200ev-brochure.pdf>, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [4] http://www.bozankaya.com.tr/wp-content/uploads/2018/10/Sileo_Katalog_S12_TR.pdf, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [5] <http://en.byd.com/ap/ebus.html>, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [6] <http://caetanobus.pt/en/buses/e-city-gold/#especificacoes>, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [7] <https://ebusco.eu/electric-buses/>, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [8] https://www.elektromobilitaet.nrw.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/Veranstaltungen/2016_Workshop_E-Busse_Vortr%C3%A4ge/Busworkshop_20161005_Busproduzent_EBUSCO.pdf, [Ziyaret tarihi: 8 Şubat 2019].
- [9] http://temsa.azizoglu.com.tr/pdf/AVENUE_EV_TR.pdf, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [10] <https://www.volvobuses.com/>, [Ziyaret tarihi: 7 Ocak 2019].
- [11] Barlow, T.J., Latham, S., McCrae, I.S. and Boulter, P.G., 2009, A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, Version 3, Department for Transport, Cleaner Fuels&Vehicles 4.
- [12] Goethem, S.v., Koornneef, G. and Spronkmans, S., 2013, Performance of Battery Electric Buses in Practice: Energy Consumption and Range, TNO.
- [13] Rosenberger, R., 2017, UITP SORT Brochure: New Addendum on Electric Buses, <https://www.uitp.org/news/E-SORT-addendum>, [Ziyaret tarihi: 11 Ocak 2019].
- [14] International Organization for Standardization, 2011, ISO 6469-3: Electrically propelled road vehicles - Safety specifications – Part 3: Protection of persons against electric shock.
- [15] The International Electrotechnical Commission, 2007, IEC 60664-1: Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests.
- [16] International Organization for Standardization, 2009, ISO 6469-1: Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 1: On-board rechargeable energy storage system (RESS).

- [17] International Organization for Standardization, 2009, ISO 6469-2: Electrically propelled road vehicles - Safety specifications – Part 2: Vehicle operational safety means and protection against failures.
- [18] Memari, M.H. and Nakanwagi, V.J., 2014, *Electrical Insulation in a 400V Battery Module for Hybrid Vehicles*, Thesis (MSc), Chalmers University of Technology.
- [19] Jiayi, Q., Lin, Y., Jianhui, H. and Qisheng, Z., 2013, A Novel Series Connected Batteries State of High Voltage Safety Monitor System for Electric Vehicle Application, *The Scientific World Journal*, Article ID 261212.
- [20] İspirli, M.M., Ersoy, A., 2016, Epoksi reçinede iz oluşumu ve 3 farklı deşarj seviyesi için yineleme haritaları analizi, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı-ELECO 2016*, 1-3 Aralık 2016 Bursa, Türkiye, ss. 1-5.
- [21] Taylor, W., Krithivasan, G. And Nelson, J.J., 2012, System safety and ISO 26262 compliance for automotive lithium-ion batteries, *IEEE Symposium on Product Compliance Engineering Proceedings*, 5-7 Nov. 2012, Portland, OR, USA.
- [22] Rothgang, S., Lunz, B., Laresgoiti, I., Geulen, G., Homann, J., Töpler, F., Gehrmann, S., Eckstein, L. And Sauer, D.U., 2012, HV Traction Battery: From Layout and Realization, *World Electric Vehicle Journal*, Vol.5, 350-359.
- [23] International Organization for Standardization, 2011, ISO 26262-9: Road Vehicles – Functional Safety – Part 9: Automotive Safety Integrity Level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses.
- [24] Zwei-German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, 2013, Voltage Classes for Electric Mobility, <https://www.zvei.org>, [Ziyaret tarihi: 13 Ocak 2019].
- [25] Stenberg, V., 2016, *Control Unit for Disconnection of Traction Battery in Electric Vehicle*, Thesis (BSc), Chalmers University of Technology.
- [26] https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FEVC500-X0000-A001%7F0217%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_EVC500-X0000-A001_0217.pdf%7F2098372-1, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].
- [27] Cline, H.C., 1995, Fuse Protection of DC Systems, *American Power Conference*, April 18, 1995.
- [28] <http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/bussmann/Electrical/Resources/product-datasheets-b/bus-ele-ds-10563-ev-power.pdf>, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].
- [29] Vaish, S.A., 2015, *Development of a Current Measuring Circuit for Battery Management Systems*, Thesis (MSc), Technische Universität München.
- [30] https://www.murata-ps.com/data/meters/dpm_shunts.pdf, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].
- [31] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/dhab_s_137.pdf, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].

- [32] Messah-Brown, A.K., Hashim, H.R., Blakemore, B.C. and Gale, A.R., 2015, *Capacitor precharging and capacitance/resistance measurement in electric vehicle drive system*, US Patent 20150251542A1.
- [33] <https://www.aecensors.com/images/stories/pdfs/Ed-AEC-HOW-and-WHY-Electric-Vehicle-Contactors-Overcome-Damaging-Electrical-Arcs.pdf>, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].
- [34] http://www.rcmicro.es/PDF/Rara/RARA_WIRE_WOUND_RESISTOR.pdf, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].
- [35] <http://liionbms.com/php/precharge.php>, [Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2019].
- [36] <http://xn--ls-2p9c528hkuy56m.com/pdf/EV.PDF>, [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2019].
- [37] https://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/EMI_RFI_suppression_capacitors.pdf [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2019].
- [38] <http://kgs-ind.com/products/emc/emi-ferrite-emi-ferrite-cores/>, [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2019].
- [39] <https://te.com/usa-en/products/connectors/automotive-connectors/intersection/amp-high-current-connector-system-hvp-800.html?tab=pgp-story>, [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2019].
- [40] Xu, J., Gao, M., He, Z., Yao, J. and Xu, H., 2009, Design and Study on the State of Charge Estimation for Lithium-ion Battery Pack in Electric Vehicle, *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009*.
- [41] Brandl, M., Gall, H., Wenger, M., Lorentz, V., Giegerich, M., Baronti, F., Fantechi, G., Fanucci, L., Roncella, R., Saletti, R., Saponara, S., Thaler, A., Cifrain, M. and Prochazka, W., 2012, Batteries and Battery Management Systems for Electric Vehicles, *Design, Automation&Test in Europe Conference & Exhibition, 2012*.
- [42] Kilic, A., Koroglu, S., Demircali, A., Kesler, S. Oner, Y., Karakas, E and Sergeant, P., 2017, Design of Master and Slave Modules on Battery Management System for Electric Vehicles, *6th International Conference on Advance Technology & Sciences*, Sep 12-15, 2017, Riga, Latvia.
- [43] Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H. and Sauer, D.U., 2018, Battery Management System Hardware Concepts: An Overview, *Applied Sciences 2018*, 8(4), 534.
- [44] Shen, P., Ouyang, M., Lu, L., Li, J. and Feng, X., 2017, The Co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium Batteries in Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.67, 92-103, Jan 2018.
- [45] Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., Wang, H. and Wang, W., 2018, State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles, *Energies*, 11 July 2018.

- [46] Karadeniz, M., Sezenoğlu, C. ve Balıkçı, A., 2012, Elektrikli Araç Batarya Sistemleri için Aktif Hücre Dengeleme Sistemi, *ELECO '2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa.
- [47] Hu, R, 2011, *Battery Management System for Electric Vehicle Applications*, Thesis (MSc), University of Windsor.
- [48] AVL List GmbH., '*e-Bus Analysis Report*', 2019.
- [49] AVL List GmbH., '*e-Bus Consumption Report*, 2018.
- [50] <https://na.industrial.panasonic.com/products/relays-contactors/contactors>, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [51] http://www.gigavac.com/sites/default/files/catalog/spec_sheet/gxv600.pdf, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [52] <https://ep-us.mersen.com/fileadmin/catalog/Products/DC-Protection-for-Electric-Vehicle-Battery-Applications/Battery-Fuses/Battery-Pack-Fuses/EVpack-fuse-MEV100-1000-VDC-Max-L-R-1-ms-8-600A/DS-EVpack-fuse-MEV100-1000VDC-EN.pdf>, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [53] https://www.isabellenhuetten.de/fileadmin/Daten/Praezisionsmesstechnik/Datasheet_IVT_S.pdf, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [54] <https://www.lem.com/en>, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [55] <http://www.amphenol-industrial.com/c/images/catalogs/PowerLok.pdf>, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [56] https://www.wima.de/wp-content/uploads/media/e_WIMA_MKS_4.pdf, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [57] https://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/Medienbibliothek_2010/Produkte/Kerne_und_Bauelemente/Anwendungen/Kerne/Kerne_SKDs_Kunststoff/W358.pdf, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [58] https://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/Medienbibliothek_2010/Produkte/Kerne_und_Bauelemente/Anwendungen/Kerne/Kerne_SKDs_Kunststoff/W424.pdf, [Ziyaret tarihi: 17 Ocak 2019].
- [59] <https://www.hubersuhner.com/en/products/low-and-high-voltage/signal-power-cables/single-core-cables/radox-155>, [Ziyaret tarihi: 18 Ocak 2019].
- [60] https://www.avl.com/documents/10138/8122354/GL_PTE_Brochure_PA3050E+V1_Battery_07.15.pdf, [Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2019].

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Funda Seyitoğlu
Doğum Yeri	Osmangazi/BURSA
Doğum Tarihi	06.07.1991
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	+90(216) 498 7950
E-Posta Adresi	funda.aydin@ogr.iu.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Makale ve Bildiriler	