



**TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN ELEKTRİKLİ
OTOBÜSLERİN YÜKLÜ VE YÜKSÜZ AĞIRLIKLİ SÜRÜŞ
KOŞULLARINDA BATARYA PAKETİNİN FİZİKSEL
VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Muhammet Sefa ODABAŞI



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN YÜKLÜ
VE YÜKSÜZ AĞIRLIKLİ SÜRÜŞ KOŞULLARINDA BATARYA PAKETİNİN
FİZİKSEL VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Muhammet Sefa ODABAŞI
ORC-ID: 0000-0002-8834-8196

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN
ORC-ID: 0000-0002-7746-2014

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HİBRİD VE ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOPLU TAŞIMADA KULLANILAN ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN YÜKLÜ VE YÜKSÜZ AĞIRLIKLI SÜRÜŞ KOŞULLARINDA BATARYA PAKETİNİN FİZİKSEL VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Muhammet Sefa ODABAŞI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Hibrid ve Elektrikli Araçlar Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN

Bu çalışmada 12 metre bir bataryalı elektrikli şehir içi toplu taşıma otobüsüne ait batarya sıcaklığı, bataryadan çekilen akımlar, bataryadan çekilen güçler, batarya şarj durumu (SOC) gibi batarya verileri aracın yolcu doluluğu baz alınarak karşılaştırılmıştır. Bu teze konu olan çalışma aracın optimum çalışma koşulları ile en zorlayıcı çalışma koşullarını karşılaştırmaktadır ve batarya ısı yönetim sisteminin performansı değerlendirmektedir. Verilerin karşılaştırılması için iki farklı test senaryosu hazırlanmış ve araç test rotasında sürülürken CAN Bus hattından veri toplanmıştır. Toplanan veriler sinyal işleme yöntemleri ile analiz edilmiştir. Yüklü senaryoda bataryalardan harcanan enerji ortalama olarak, yolcu yüksüz senaryodan %45 daha fazla olduğu saptanmıştır. Analizlerden elde edilen sayısal sonuçlar, çalışma öncesindeki öngörülerini karşılamaktadır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli Otobüs, Batarya yönetimi, CAN Bus, Sürüş çevrimi, Şarj -Deşarj akımı, SoC, Batarya Sıcaklığı

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARISON OF BATTERY PACK PHYSICAL DATA OF ELECTRIC BUSES USED IN PUBLIC TRANSPORTATION UNDER LOADED AND UNLOADED WEIGHTED DRIVING CONDITIONS

Muhammet Sefa ODABAŞI

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Hybrid and Electric Vehicles

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN

In this study, battery data such as battery temperature, currents drawn from the battery, powers drawn from the battery, battery state of charge (SOC) of a 12 meter battery electric urban public transport bus are compared based on the passenger occupancy of the vehicle. The study in this thesis compares the optimum operating conditions of the vehicle with the most challenging operating conditions and evaluates the performance of the battery thermal management system. To compare the data, two different test scenarios were prepared and data was collected from the CAN Bus line while the vehicle was driven on the test route. The collected data was analyzed with signal processing methods. On average, the consumed energy from the batteries in the loaded scenario was found to be 45% higher than the passenger unloaded scenario. The numerical results obtained from the analysis meet the predictions made prior to the study.

Key words: Battery Electric Bus, Battery management, CAN Bus, Driving cycle, charging-discharging current, SoC, Battery temperature

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli katkılarıyla bana destek olan ve “Toplu Taşımada Kullanılan Elektrikli Otobüslerin Yüklü ve Yüksüz Ağırlıklı Sürüş Koşullarında Batarya Paketinin Fiziksel Verilerinin Karşılaştırılması” başlıklı çalışmamda bana yol gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN’e, çalışmalarım için gereken şartları sağlayan Ar-Ge mühendisi olarak bir parçası olduğum Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş.’ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bu günlere gelmemdeki tüm emeklerinden dolayı sevgili aileme, varlıklarıyla bana destek olan kıymetli arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Muhammet Sefa ODABAŞI

30/10/2024



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Lityum-İyon Batarya Teknolojisi	4
2.2. Lityum-İyon Bataryalarda Isıl Güvenlik	6
2.3. Batarya Termal Yönetimi	8
2.4. BTYS Çalışma Prensipleri	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
3.1. Elektrikli Otobüsler	10
3.2. CAN Bus Protokolü.....	17
3.3. Li-Ion Bataryalarda Soğutma Metotları	20
3.4. Test Senaryoları.....	23
3.5. Test Parametreleri.....	25
3.6. Yol Testleri ve Veri Toplama.....	26
3.7. Veri Analizleri ve Karşılaştırmalar	29
4. BULGULAR.....	31
4.1. Yüksüz Test Sonuçları.....	33
4.2. Yüklü Test Sonuçları.....	40
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	48
KAYNAKÇA.....	50
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
C	Karbon
C ₁	Sığa
Co	Kobalt
CO ₂	Karbondioksit
e ⁻	Elektron
Li	Lityum
Li ⁺	Lityum iyonu
NO _x	Azot Oksit
O ₂	Oksijen molekülü
T _x	Transmit Mesajı
R ₀	Direnç
R ₁	Direnç
R _x	Receive Mesajı
Vocv	Açık devre voltajı

Kısaltmalar	Açıklama
BCM	Battery Controller Module
BMS	Battery Management System
BTYS	Batarya Termal Yönetim Sistemi
CAN	Control Area Network
DP	Data Page Selector
EBS	Electronic Brake System
EHPS	Electro Hydraulic Power Steering
ELC	Electronic Levelling Controller
EOF	End Of Frame
FDM	Faz Değiştiren Materyal
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
ISC	Internal Short Circuit
LIB	Lithium-Ion Battery
NMC	Nickel Manganese Cobalt
SOC	State Of Charge
SOF	Start Of Frame
PDU	Protocol Data Unit
PF	PDU Format
PGN	Parameter Group Number
PS	PDU Specific
SA	Source Address

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bir LIB hücresinin temel yapısının şematik diyagramı (Chen vd.,2021).....	4
Şekil 2.2. Termokuplların bataryaya göre konumlandırılması da dahil olmak üzere koni kalorimetreyi içeren deney sisteminin şeması (Liu vd., 2022).....	7
Şekil 3.1. Birinci derece eşdeğer RC devresi(Reshma & Manohar, 2023)...	11
Şekil 3.2. Bir elektrikli otobüsün sistem mimarisi (Battery Electric Buses Theory of Operation N o v 2 , 2022).....	13
Şekil 3.3. Batarya paketi yüksek voltaj bağlantıları.....	14
Şekil 3.4. Bir batarya modülünün hücre dizilimi.....	15
Şekil 3.5. Batarya Modülü.....	15
Şekil 3.6. Test aracının tahrik sistemi mimarisi.....	16
Şekil 3.7. Test edilen elektrikli otobüsün CAN mimarisi.....	17
Şekil 3.8. CAN Veri yolu ve düğümlerin şematik gösterimi (Samancı B, 2010).....	18
Şekil 3.9. CAN mesajının yapısı.....	19
Şekil 3.10. CAN mesajlarının iletimi(Samancı B, 2010).....	20
Şekil 3.11. Test Rotası(Google maps, 2024).....	24
Şekil 3.12. J1939 veri tabanı görüntüsü.....	25
Şekil 3.13. Test Aracı.....	27
Şekil 3.14. Test esnasında araç ve test güzergahı.....	28
Şekil 3.15. Test aracının yüksüz hali.....	28
Şekil 4.1. Batarya şarj durumu (SOC) karşılaştırması.....	31
Şekil 4.2. Yüklü ve yüksüz testteki enerji tüketim karşılaştırması.....	32
Şekil 4.3. Yüksüz testte batarya paketi 1.modülün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	33
Şekil 4.4. Yüksüz testte batarya paketi 2.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	34
Şekil 4.5. Yüksüz testte batarya paketi 3.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	34
Şekil 4.6. Yüksüz testte batarya paketi 4.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	35
Şekil 4.7. Yüksüz testte batarya paketi 5.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	35
Şekil 4.8. Yüksüz testte batarya paketi 6.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	36
Şekil 4.9. Yüksüz testte batarya paketi 7.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	36
Şekil 4.10. Yüksüz testte batarya paketi 8.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	37
Şekil 4.11. Yüksüz testte batarya paketi 9.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	37
Şekil 4.12. Yüksüz testte batarya paketi 10.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	38
Şekil 4.13. Yüksüz testte batarya voltajı.....	38

Şekil 4.14.	Yüksüz testte bataryadan çekilen akım ve batarya şarj akımı.....	39
Şekil 4.15.	Yüksüz testte bataryadan çekilen güçler.....	40
Şekil 4.16.	Yüklü testte batarya paketi 1.modülün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	40
Şekil 4.17.	Yüklü testte batarya paketi 2. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	41
Şekil 4.18.	Yüklü testte batarya paketi 3. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	41
Şekil 4.19.	Yüklü testte batarya paketi 4. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	42
Şekil 4.20.	Yüklü testte batarya paketi 5. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	42
Şekil 4.21.	Yüklü testte batarya paketi 6. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	43
Şekil 4.22.	Yüklü testte batarya paketi 7. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	43
Şekil 4.23.	Yüklü testte batarya paketi 8. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	44
Şekil 4.24.	Yüklü testte batarya paketi 9. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	44
Şekil 4.25.	Yüklü testte batarya paketi 10. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları.....	45
Şekil 4.26.	Yüklü testte batarya voltajı.....	45
Şekil 4.27.	Yüklü teste bataryadan çekilen akımlar ve batarya şarj akımları...	46
Şekil 4.28.	Yüklü testte bataryadan çekilen güçler.....	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Türkiye’de üretimi yapılan elektrikli otobüsler.....	12
Çizelge 3.2 Test edilen elektrikli otobüs özellikleri.....	13
Çizelge 3.3 Araç batarya paketi modülünün özellikleri.....	14
Çizelge 3.4 Tahrik motoru özellikleri.....	14
Çizelge 3.5 Batarya soğutma sistemlerinin karşılaştırması (Menak vd., 2021).....	22
Çizelge 3.6 Veri toplama cihazı özellikleri (Vector Informatik GmbH, 2024).....	25



1. GİRİŞ

Şehri içi toplu taşıma araçları, kent yaşamının vazgeçilmez bir unsuru olarak geçmişten günümüze kadar önemini artırarak gelmektedir. Yüksek altyapı maliyeti gerektirmemesi ve hatlarının yerleşim birimlerine kolaylıkla entegre edilebilmesi bakımından en yaygın toplu ulaşım araçlarından biri şehir içi yolcu otobüsleridir. Şehir içi yolcu otobüsleri gerek boş araç ağırlığının gerekse yüklü ağırlığının standart bir otomobile kıyasla ok daha fazla olması sebebiyle hareket edebilmek ve yolcu taşıyabilmek için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duymaktadırlar. Bu enerji ihtiyacı konvansiyonel olarak içten yanmalı motorlar tarafından karşılanmaktadır. Geleneksel içten yanmalı motorlar çevreye olan zararlı egzoz gazı emisyonları nedeniyle sıkı regülasyonlar ve normlar ile daha çevreci olmaya zorlanmaktadır. Tam bu noktada şehir içi yolcu otobüslerinin sıfır emisyon trendine uyması kapsamında otobüslerin elektrikle tahrik edilmesi fikri ortaya çıkmış ve hızla yayılarak günümüze kadar ilerlemiştir. Şehir içi yolcu otobüslerinin ihtiyaç duyduğu gücü fosil yakıtlar yerine elektrik enerjisinden sağlaması NO_x ve CO₂ emisyonlarını ciddi oranda düşürmektedir(Xu vd., 2023). Buradan hareketle şehir içi toplu taşımada elektrifikasyonun önemi daha iyi anlaşılmaktadır.

Elektrikli araçların hızla yayılmaya başladığı günümüz koşullarında şehir içi otobüslerinin elektrikle tahrik edilmesi hususi otomobillere kıyasla daha uygulanabilir ve menzil, batarya ısı yönetimi gibi kısıtlayıcı faktörlerden görece az etkilenmektedir. Çünkü otobüs regülasyonları daha serbest ve üretim toleransları otomobile nispetle daha yüksektir. Bunun sonunca bataryaların yerleşimi konusunda tasarımcılar daha az kısıt altında çalışmaktadır. Elektrikli araçlardaki bir diğer husus ise menzil sorunudur. Elektrikli otobüslerde menzil sorunu, yolcu duraklarında veya aktarma merkezlerinde hızlı şarj istasyonlarının kurulması gibi çalışmalarla aşılmaya çalışılmaktadır. Literatürde otobüs duraklarında kablosuz hızlı şarj istasyonları kurmaya yönelik çalışmalar mevcuttur(Yöntem vd., 2021). Şarj altyapıları dahil elektrikli otobüslerin operasyon ve satın alma maliyetlerini, konvansiyonel içten yanmalı motora sahip otobüslerin işletme ve ilk yatırım maliyetleri ile kıyaslayan çalışmalar yapılmaktadır. Elektrikli otobüslerin, dizel ve hibrit elektrikli varyasyonları ile yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda ilk yatırım maliyeti ve enerji tüketimlerini de kapsayan işletme maliyetleri kıyaslanmıştır(İnce ve Başlamışlı, 2021).

Elektrikli otobüslerde de tıpkı otomobillerde olduğu gibi bataryalar en kritik bileşenlerden biridir. Bataryalar, kimyasal olarak enerji depolayan ve bu enerjiyi elektrik olarak sağlayan bileşenlerdir. Farklı batarya sistemleri geçmişten günümüze kullanılmış olsa da son yıllarda en fazla gelişim ve araştırma çalışması yapılan teknoloji lityum iyon bataryalarıdır. Lityum iyon bataryalarının performansı çeşitli faktörlerden etkilenir, bunların en önemlilerinden biri de sıcaklık faktörüdür(Liu vd., 2022). Araştırmalar belirtmektedir ki bataryalar için ideal çalışma sıcaklığı 15°- 35°C aralığındadır(Bamrah vd., 2022). Batarya sıcaklığının bu aralıkta korunması, en iyi taşıt menziline sağlanması için önemlidir. Taşıt menziline etkileyen faktörler arasında batarya kapasitesi, akım çekimi, rota topografisi, trafik durumu, yük taşıma durumu, sürücü alışkanlıkları ve yol koşulları da bulunmaktadır. (Önçağ vd., 2021)'nin araştırmasında, aynı güzergahtaki elektrikli otobüsler ile dizel otobüsleri çeşitli açılardan karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar elektrikli otobüslerin maliyet ve enerji tüketimi açısından dizel otobüslere göre avantajlı yönlerini ortaya koymaktadır. Sürüş rotasının topografik özelliklerinin etkisini daha iyi anlamak için belirli sürüş döngüleri belirlenmektedir. Bazı çalışmalardan elde edilen verilerle sürüş rotasının coğrafi özelliklerinin enerji tüketiminin etkisini anlamak için rota topografyasının önemini vurgulanmış ve Hong Kong'a özgü bir sürüş döngüsü oluşturulmuştur(Tong ve Ng, 2023). Elektrikli otobüslerin enerji tüketimini, alt sistemleri (iklimlendirme, tahrik, yardımcı sistemler vb.) de dahil ederek tek bir model kurarak incelenen çalışmalar sonucunda kurulan modelin farklı elektrikli otobüs konfigürasyonlarına uyarlanabilmesi model tabanlı sistem simülasyonlarının önemini ortaya koymaktadır(Basma vd., 2020).

Elektrikli otobüs verilerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi gibi çalışmalarda gerçek zamanlı veri kullanılması gerçek dünya koşullarının etkilerini incelemek bakımından önemlidir. Çalışmalarında elektrikli otobüslerden gerçek zamanlı veri toplayıp ve enerji tüketimini iki farklı ölçüt kullanarak hesaplayan araştırmacılar, yaptıkları çalışmada enerji tüketimini en çok etkileyen faktörün ortam sıcaklığı olduğunu belirlemişlerdir(Xu vd., 2023). Elektrikli otobüsün enerji tüketimi için yardımcı sistemleri de içeren bir model geliştiren bilim insanları yüksek enerji tüketiminin sebepleri arasında düşük ortam sıcaklığı ve duraklar arası mesafenin fazla olmasına dikkat çekmişler, yolcu doluluğun tüm enerji tüketimindeki payının %10 civarında olduğunu saptamışlardır(Szilassy ve Földes, 2022).

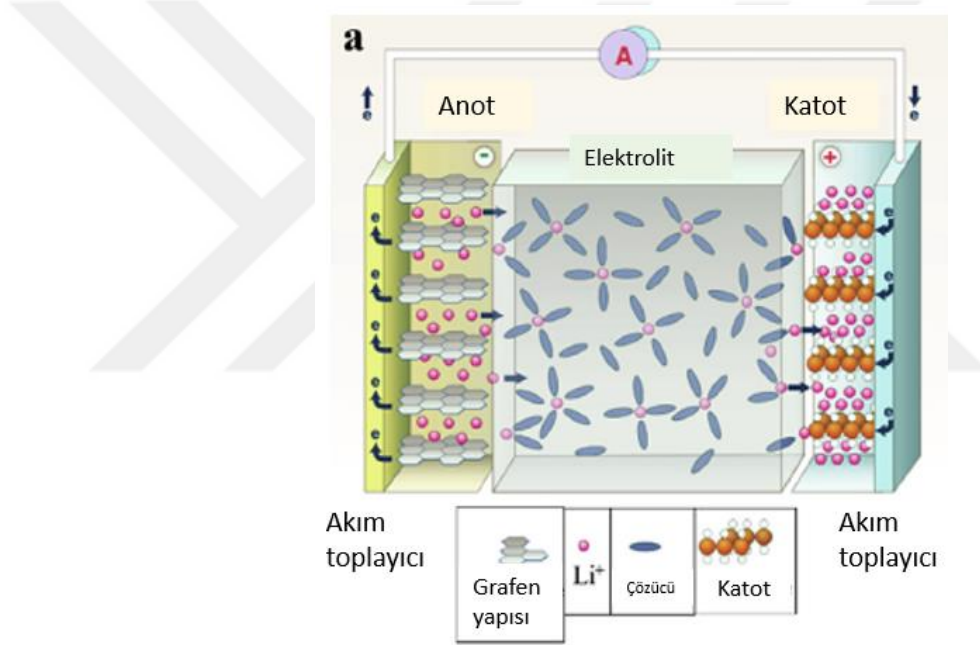
Katar’da yapılan bir çalışmada şehir içi ulaşımda kullanılan elektrikli otobüslerin farklı çalışma koşulları altında enerji tüketimlerini gerçek zamanlı veriler toplayarak incelenmiştir. Araç iklimlendirme sisteminin enerji tüketiminin, tüm aracın enerji ihtiyacının %30’una denk geldiğini ve bu nedenle de araç menziline azalmaya neden olduğu ortaya konmuştur(Alarrouqi vd., 2022). Elektrikli araçların enerji tüketimi açısından bir değerlendirme yaparak menzil artırmaya yönelik yapılan çalışmalar neticesinde hibrit bir ısı pompası matematiksel olarak modellenmiş ve modelin sonuçları literatürdeki deneysel verilerle uyum göstermiştir (Sevilgen vd., 2024).

Literatürde ele alınan konulardan anlaşıldığı kadarıyla elektrikli otobüslerin gerçek zamanlı çalışma koşulları, yolcu doluluğu esas alınarak incelenen ve en kötü senaryo ile ideal sürüş koşullarının kıyaslandığı çalışmalar yapılmalıdır. Bu alışmada Tacikistan’ın Duşanbe şehrinde yürütölen bir dizi test çalışması ve sonuçları analiz edilmiş, incelenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışma kapsamında bataryalı bir elektrikli aracın belirlenen bir test rotasında koşturulmuştur. Elektrikli otobüsün ideal çalışma koşulları ve en kötü durum senaryoları test edilmiş ve batarya verileri ile aracın diğer elektronik komponentlerinden sinyal toplanmıştır. Aracın enerji tüketimi ve batarya parametreleri yüklö ve yüksüz ağırlık koşullarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar deney öncesi öngörölerle uyuşmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lityum-İyon Batarya Teknolojisi

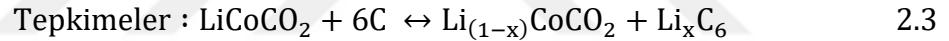
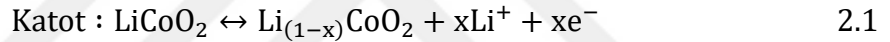
Lityum-iyon bataryalar, diğer tüm piller gibi pozitif-negatif elektrotlar ve bunları ayıran bir ayırıcı katmandan oluşan pillerdir. Pozitif elektroda katot, negatif elektroda ise anot adı verilmektedir. Katot materyali lityum metalinin farklı metal oksitlerinden oluşmaktadır. Anot materyali ise ekseriyetle karbon allotroplarından müteşekkildir. Şekil 2.1. bir lityum-iyon batarya hücrecini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2. 1. Bir LIB hücresinin temel yapısının şematik diyagramı (Chen vd.,2021)

LIB hücresinde şarj sırasında Li^+ iyonu katot malzemelerinden (örn: LiCoO_2) ayrışarak elektrolite yayılır ve anot malzemesine ulaşmak için membrandan geçer. Bu sırada elektronlar, elektro-nötrlüğü korumak için dış devre boyunca ters yönde hareket eder. Deşarj sırasında ise Li^+ iyonları anot tarafından katoda geri taşınır(Chen vd., 2021). Bu lityum iyon pillerin çalışma prensibidir. Lityum iyon pillerdeki katot ve anot tepkimeleri aşağıda denklem 2.1, denklem 2.2 ve denklem 2.3.'te gösterilmektedir (Chen vd., 2021).

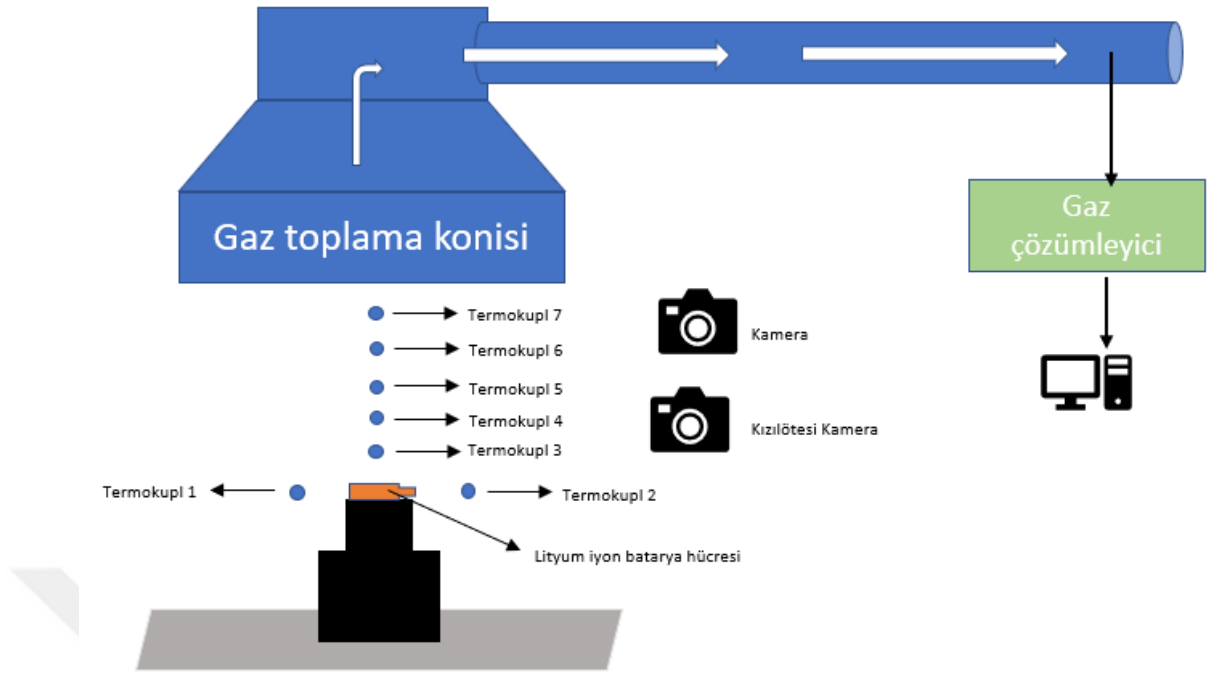
Batarya şarj/deşarj işlemleri sırasında lityum iyonlarının yer değiştirmesi, Joule ısı ve şarj/deşarj işleminin kimyasal enerjisinin bir sonucu olarak önemli miktarda ısı açığa çıkarır(Lu vd., 2007). Bu ısı salınımı batarya çalışmasının normal bir parçasıdır ancak üretilen ısı belirli şarj/deşarj durumlarında verimli bir şekilde sistemden uzaklaştırılmazsa batarya aşırı derecede ısınır ve bunun sonucunda batarya güvenliği ciddi şekilde tehlikeye girmektedir.(Amine vd., 2010). Lityum iyon bataryalar, güvenli çalışabildikleri bir sıcaklıkta oldukça verimli galvanik hücrelerdir. Burada dikkat edilmesi gereken husus bataryayı şarj vedeşarj sırasında güvenli bir şekilde çalışacağı sıcaklık aralığında tutmaktır. Batarya hücresinin şarj veyadeşarj işlemi sırasında kendi iç direncinin etkisiyle ürettiği ısı güvenli şekilde hücreden veya sistemden uzaklaştırılmazsa aşırı ısınma meydana gelir ve sonucunda bataryada ısı kaçak gelebilir. Bataryalarda ısı kaçak en kötü senaryodur ve başladığında durdurulamaz bir ısı parçalanma meydana gelir. Isı kaçak oluşmuş bir hücre kullanılamaz hale gelmektedir.



Normal çalışma koşullarında dahi bilhassa hava sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda veya büyük batarya paketlerinde, batarya tarafından üretilen ısıyı tamamen uzaklaştırmak mümkün değildir(Amine vd., 2010). Batarya sıcaklığının çok artması, istenmeyen parazitik reaksiyonları tetikleyebilmekte ve bu da batarya ısısının kontrol edilemediği bir termal kaçağa yol açabilmektedir(Wang vd., 2012). Bu sebeple, lityum iyon pil (LIB) performansının güvensiz koşullarda anlaşılması, daha güvenli hücrelerin üretimi için hayati öneme sahiptir(Chen vd., 2021). Farklı tip batarya hücreleri üzerine yapılan bir çalışmada ters kutup başlarına sahip yüksek enerji yoğunluklu kese tipi hücrelerin elektriksel termal özellikleri incelenerek literatüre kazandırılmıştır (Tahirağaoğlu vd., 2024). Başka bir çalışmada (Sevilgen vd., 2023), hibrit ısı pompası sisteminin elektrikli aracın menzilini %15 artırabileceğini yaptıkları deneysel çalışmalarla göstermişlerdir.

2.2. Lityum-İyon Bataryalarda Isıl Güvenlik

Lityum-iyon bataryaların kullanım alanı genişledikçe karşılaşılan güvenlik sorunları da çeşitlenmektedir. Başlıca sorunlardan biri ısı kaçak olayıdır. Isıl kaçak olayı lityum iyon hücrenin aşırı ısınması sonucunda engellenemeyen katastrofik olaylar zinciridir. Isıl kaçak araştırmacılar tarafından önlenmesine yönelik çalışmaların sürdüğü bir batarya hasar şeklidir(Wang vd., 2012). Bir lityum iyon batarya hücresinin sıcaklığı, içinde üretilen ısı ile dışarıya dağıtılan ısı arasındaki dengeye bağlı olarak ifade edilmektedir(Kumaresan vd., 2008)(Balakrishnan vd., 2006). Lityum-iyon piller, düşük çevre kirliliği, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür çevrimi ve kararlı voltaj gibi pek çok avantajından dolayı elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır(Tao vd., 2020). Bununla birlikte lityum-iyon pillerin sebep olduğu yangın ve patlamalar sıklıkla can ve mal kaybına yol açmaktadır(Lai vd., 2018). Meydana gelen yangın ve patlama gibi olayların sebebi kahir ekseriyetle pil hücresi içinde oluşan dahili kısa devrenin (ISC) yarattığı aşırı ısınmadır. Dahili kısa devre oluşmasında en büyük etkenlerden biri pilin aşırı şarj edilmesidir. Aşırı şarj, bir bataryanın maksimum voltajına veya şarj durumu (SOC) sınırına ulaşmasına rağmen şarj akımı bataryadan geçmeye devam ettiği durumda meydana gelir(Ouyang vd., 2015). Batarya hücresi uzun süre aşırı şarja maruz kaldığında batarya hücresinde lityum dendrit tabakası oluşmaya başlamaktadır. Aşırı şarj devam ettikçe dendrit gelişir ve ayırıcı tabakayı deforme ederek katot ile anodu birleştirir böylece hücre içinde dahili kısa devre meydana gelir. Kısa devre meydana geldiğinde bataryada depolanan enerji serbest kalır ve bataryada sıcaklığın hızlıca artmasına neden olur.(Deng vd., 2018) Bu da termal kaçağa neden olabilecek bir potansiyel oluşturmaktadır(Liu vd., 2022b). Lityum-iyon pillerin aşırı şarjından kaynaklanan termal kaçak davranışını araştırmak için pek çok çalışma yürütülmesine karşın yüksek şarj oranına sahip aşırı şarja maruz kalmış NCM lityum iyon pillerin termal kaçak davranışının ayrıntılı analizi konusunda literatürde yeterli araştırmanın olmaması sebebiyle (Liu vd., 2022b), yaptıkları çalışmada bir lityum-iyon bataryayı farklı C oranlarında aşırı şarja maruz bırakmışlar ve termal kaçak olayını kamera ve sensörlerle kaydetmişlerdir. Şekil 2.2 bu çalışmaya ait deney düzeneği şemasını göstermektedir.



Şekil 2. 2. Termokuplların bataryaya göre konumlandırılması da dahil olmak üzere koni kalorimetreyi içeren deney sisteminin şeması (Liu vd., 2022)

Şekil 2.2’de de şematik gösterimi verilen çalışmada bir silindirik pil hücresi, 1C, 2C ve 3C olmak üzere üç farklı C oranı ile aşırı şarj edilmiştir. Lityum-iyon hücre, termal kaçağa girinceye kadar aşırı şarj devam ettirilmiştir. Termal kaçak aşamaları, bataryadan değişen uzaklıklara konumlandırılmış termokupllar ile farklı konumlarda sıcaklıklar ölçülmüş ve kızılötesi ve video kameralar ile termal kaçak olayları gözlemlenmiştir. (Liu vd., 2022b) yaptıkları çalışmada ayrıca termal kaçak sırasında çıkan gazlardan örnekler toplamış ve analiz etmişlerdir.

Batarya termal kaçağın anlaşılması için yürütülen bu çalışmada yazarlar, lityum-iyon batarya yüksek akım hızında aşırı şarj etmiş ve iki farklı termal kaçak meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Termal kaçak reaksiyonu belirli bir düzenliliğe sahip olmasına rağmen lityum-iyon pillerin termal kaçak reaksiyonu oldukça belirsiz olduğu için aynı başlangıç koşulları farklı reaksiyon sonuçlarına yol açabileceği anlaşılmaktadır. (Liu vd., 2022b) yürüttükleri çalışmada lityum-iyon pillerin iç malzemelerindeki ve yapılarındaki farklılıklar nedeniyle lityum-iyon pillerin termal kaçak reaksiyonu belirsizdir sonucuna varmışlardır.

2.3. Batarya Termal Yönetimi

Elektrikli araçlarda bataryanın ısıl güvenliğinin öneminde bir önceki bölümde ayrıntılı bahsedilmiştir. Bu bölümde batarya ısıl güvenliğini sağlamak için batarya ısıl yönetim sistemlerinden ve bu sistemlerin öneminden bahsedilmekte ve ayrıca batarya ısıl yönetim konularında literatürde yapılmış çalışmalardan bahislere yer verilmektedir.

Elektrikli araçlarda, batarya hücrelerinden en üst düzeyde enerji ve kapasite elde etmek için hücreler seri ve paralel olarak birleştirilir. Bu birleştirme işlemi, hücreleri modüler bir yapıya, bu modüller ise birleştirilerek batarya paketleri haline getirilmektedir. Bu şekilde, hücre sayısının artmasıyla birlikte, modüller ve batarya gruplarındaki enerji yoğunluğu artırılır ve dolayısıyla aracın menzili uzatılmış olunur. Ancak, bataryaların çalışması esnasında iç ve dış etkenlerden kaynaklanan sıcaklık değişimleri, yüzlerce hatta binlerce hücreden oluşan sistemlerde sürüş güvenliğini ve aracın güvenliğini tehlikeye atabilecek sorunlara yol açabilmektedir(Menak vd., 2021). Elektrikli araç bataryalarının güvenli ve verimli çalışabileceği en uygun sıcaklık seviyesinin 15°C ila 35°C arasında olduğu belirtilmektedir(Han vd., 2019). Bataryaların gücü ve ortalama çevrim ömürleri, şarj ve deşarj işlemlerinin sonlarında yükselen sıcaklıklar ve artan iç dirençler neticesinde olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca bataryaların çok düşük sıcaklıklarda çalışması da istenmeyen durumlara neden olabilir. Bu denkleme özellikle soğukta şarj etme işlemi için bataryalar şarj edilmeden önce belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmalı, ardından şarj işlemine başlanmalıdır. Elektrikli araçlarda batarya sıcaklıklarını çok yüksek olduğunda soğutmak, çok soğuk şartlarda ise ısıtmak için bir batarya termal yönetim sistemi (BTYS) bulunmaktadır. Batarya modüllerinin ısı yönetimi, batarya hücrelerinin verimliliği, güvenliği ve ömrü açısından kritik bir öneme sahiptir (Sevilgen vd., 2023). Bu sistem, her hücre ve modül için optimum çalışma sıcaklığını muhafaza etmeli, aniden değişen sıcaklık koşullarında bataryaları korumalı, bataryada meydana gelmesi muhtemel gaz sızıntılarını güvenli tahliye edebilmeli ve bakımı kolay, güvenilir ve düşük maliyetli tercih edilmelidir(Thakur vd., 2020).

2.4. BTYS Çalışma Prensipleri

Batarya termal yönetim sistemleri iç ve dış yönetim olarak ikiye ayrılmaktadır. Bataryanın iç yüzeylerinin sıcaklıklarını kontrol eden yapıya iç soğutma ve ısıtma denirken dış yüzey sıcaklıklarının kontrol edildiği yönteme yönetim denmektedir. Uygulama bakımından dış yönetim daha kolay ve az maliyetli olduğundan tercih edilmesine karşın iç yönetimin çok daha etkili bir ısıl performansı olduğu yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur(Menak vd., 2021).

Yaptıkları çalışmaların sonuçlarına göre (Wu vd., 2019), iç termal yönetimin daha etkili olmasına rağmen pratikte daha zor uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır. Diğer taraftan dış termal yöntemlerde hava, sıvı ve FDM gibi araçların kullanıldığı belirtilmektedirler. Hava bazlı termal yönetimin ekonomik ve güvenli olmasına rağmen verimliliğinin düşük olduğu ifade edilmiştir. FDM yönteminin ise batarya grubunun istenilen sıcaklık aralığında tutulmasına olanak sağladığı ancak sızıntı problemleriyle ve düşük termal iletkenlikle karşılaşıldığı belirtilmiştir. Buna karşın, sıvı bazlı termal yönetimin, yüksek ısı transferi verimliliğine ve kompakt yapıya sahip olması nedeniyle ticari uygulamalarda daha yaygın olarak kullanıldığı ifade edilmiştir(Wu vd., 2019). Yapılan bir çalışmada batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkını en aza indirerek bataryaların çevrim ömrünü uzatmak ve basınç düşüşünü azaltarak elektrikli pompanın parazitik enerji tüketimini en aza indirecek bir soğutma sistemi tasarlayabilmek için altı adet paralel kanallı iki soğutucu plaka tasarlanmış, deneysel ve numerik analizlerle tasarımlar doğrulanmıştır (Bulut vd., 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

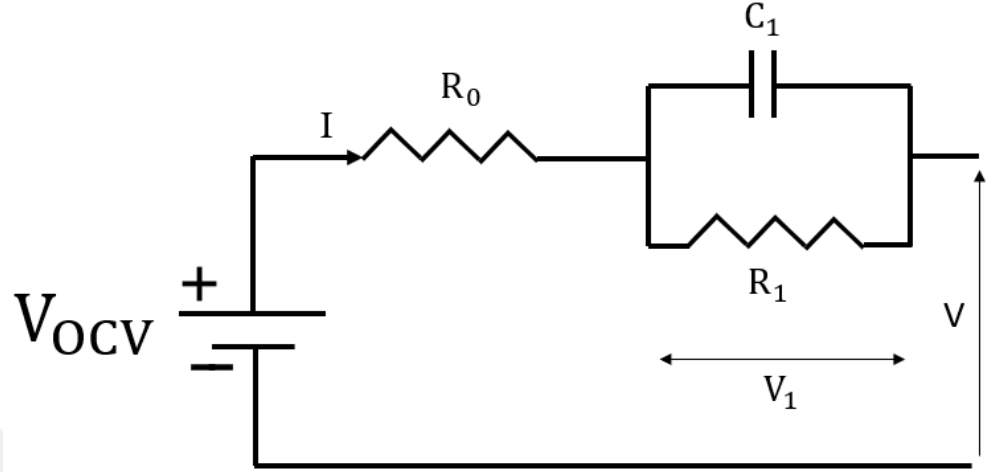
3.1. Elektrikli Otobüsler

Toplu ulaşım araçlarından olan şehir içi otobüsler, toplu taşımanın en önemli elemanlarından biridir. Otobüslerin kahir ekseriyeti konvansiyonel dizel motorlar ile tahrik edilmektedir. Fosil yakıt kullanan motorların sera gazı emisyonları ciddi bir çevresel tehdit olmakla birlikte küresel çevre örgütleri, hükümetler ve farklı bilimsel disiplinler tarafından takip edilen, azaltılması yönünde çalışmalar yapılan konuların başında gelmektedir. Bu bağlamda ulaşım araçlarının elektrikleştirilmesi, fosil yakıt bağımlılığına karşı cazip bir alternatiftir ve insan davranışını doğrudan değiştirmeye gerek kalmadan daha sürdürülebilir bir gelecek için bir fırsat sunmaktadır(Weiss vd., 2015) Dünya çapında yapılan araştırmalar, çalışma saatlerinin hususi otomobillere kıyasla daha fazla olmasından dolayı şehir içi otobüslerin elektrifikasyonunun sera gazı emisyonlarını azaltması bakımından elektrikli otobüsleri iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç haline getirmekte ve dünya genelinde toplumlar tarafından benimsenme oranlarının artmasına katkıda bulunduğu işaret etmektedir(Kapatsila vd., 2024).

Dizel motorlu otobüslerin yerine elektrikli otobüslerin şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılmasının, işletme maliyetlerinde iyileşme sağlaması beklenen faydalardan biridir. Fosil yakıt yerine elektrik enerjisi kullanılması, enerji kaynağı bakımından dışa bağımlılığı azaltıcı bir etkidir.

(Reshma & Manohar, 2023)bir elektrikli otobüs bataryası üzerinde yaptıkları çalışma ile batarya durumlarını incelemek için ortak bir tahmin yöntemi önermiştir. Lityum-iyon batarya başlangıçta birinci dereceden RC eşdeğer devresi aracılığıyla tasarlamışlar ve bataryanın modelleme parametrelerini optimize etmek için bu çalışmada geliştirilmiş bir remora optimizasyon algoritması önermişlerdir. Parametreler için optimum değerler tespit edildikten sonra SoC, çift uyarlamalı Kalman filtreleme algoritması ile değerlendirilerek SoH, bir bataryanın tahmin edilen SoC' sine dayalı olarak tahmin edilirken; SoP, batarya çalışması sırasında akım ve

voltaj kısıtlamaları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bundan sonra, bataryanın kalan faydalı ömrü tahmin edilen SoC' ye göre incelenir(Reshma ve Manohar, 2023). Şekil 3.1.'de birinci dereceden RC eşdeğer devrenin şeması görülmektedir.



Şekil 3. 1. Birinci derece eşdeğer RC devresi(Reshma ve Manohar, 2023)

RC eşdeğer devresi bataryayı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır ve durum tahmin modellerinin verimliliğini etkiler. Batarya parametrelerinin uygunsuz seçimi bataryanın durum tahminini bozar. Bu tür komplikasyonları önlemek için RC devresinin ideal tasarım parametrelerini araştıran optimizasyon tekniği kullanılmaktadır(Reshma ve Manohar, 2023).

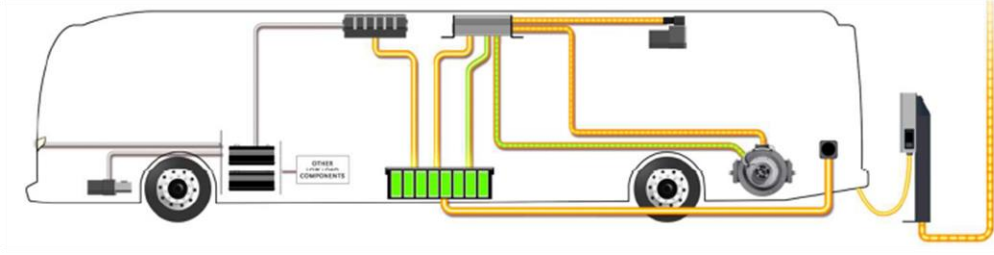
Türkiye’de toplu ulaşımda elektrikli araçların popülerleşmeye başlaması üzerine bu konuda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. 2019 yılında (TOPAL, 2019) yaptıkları çalışma ile İstanbul özelinde Türkiye ölçekli olarak toplu taşıma hizmetlerini analiz etmişler ve elektrikli araçların durumunu ortaya koymuşlardır. Yazarlar, konvansiyonel içten yanmalı araçlar ile kıyaslandığında elektrikli araçların oranı 2019 itibarı ile %16 civarında olduğunu belirtmektedirler. Ancak son 5 yılda İstanbul’da ve diğer illerde otobüs filolarındaki elektrifikasyonun arttığını göz önünde bulundurmakta fayda vardır. Elektrikli otobüslerin kullanımının yaygınlaşma hızını azaltan hususlar genellikle şarj, menzil ve batarya güvenliği problemleri olarak sayılabilir. Buna rağmen üreticilerin ve belediyelerin elektrikli otobüslere olan

teveccühü günden güne artmaktadır. Türkiye’de belli başlı üreticilerin ürün gamında bulunan elektrikli otobüsler çizelge 3.1.’de verilmektedir.

Çizelge 3. 1. Türkiye’de üretimi yapılan elektrikli otobüsler

ÜRETİCİ	MODEL	BATARYA KAPASİTESİ	AZAMİ GÜÇ	AZAMİ TORK
ULAŞIM (ULAŞIM A.Ş., 2024)	LF12 EV	350 kWh	240 kW	3.300 Nm
TEMSA(TEMSA, 2024)	AVENUE ELECTRON	240 kWh 300 kWh 360 kWh	250 kW	2.700 Nm
OTOKAR(OTOKAR, 2024)	E-KENT	210 kWh 280 kWh 350 kWh	410 kW	3.100 Nm
OTOKAR(OTOKAR, 2024)	E-KENT KÖRÜKLÜ	350 kWh 490 kWh 560 kWh	410 kW	3.100 Nm
KARSAN(KARSAN, 2024)	e-JEST	88 kWh 44 kWh	135 kW	290 Nm
KARSAN(KARSAN, 2024)	e-ATAK	220 kWh	230 kW	2.500 Nm
KARSAN(KARSAN, 2024)	e-ATA 12	449 kWh	250 kW	22.000 Nm
KARSAN(KARSAN, 2024)	e-ATA 10	396 kWh	250 kW	22.000 Nm
KARSAN(KARSAN, 2024)	e-ATA 18	599 kWh	500 kW	22.000 Nm
BMC(BMC, 2024)	NEOCITY	198 kWh	235 kW	3.000 Nm
BMC(BMC, 2024)	ELECTRIC PROCITY +EV	111,6 kWh	250 kW	2.700 Nm
ISUZU(ISUZU, 2024)	NOVOCITI VOLT	211 kWh 268 kWh	270 kW	2.500 Nm
ISUZU(ISUZU, 2024)	CITIVOLT 12	225 kWh 300 kWh 375 kWh 450 kWh	250 kW	22.000 Nm

Elektrikli otobüslerde tahrik sistemi elemanlarının yerleşimi her üretici için farklı bir mimari tasarımını gerektirmektedir. Bataryalı bir elektrikli otobüsün sistem mimarisinin şematik gösterimi şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 2. Bir elektrikli otobüsün sistem mimarisi (Battery Electric Buses Theory of Operation Nov 2 , 2022)

Bu teze konu olan çalışmada bataryalı bir elektrikli otobüsün gerçek zamanlı verileri kullanarak batarya paketinin fiziksel verileri, aracın yolculu ve yolcusuz koşullarına göre karşılaştırılmıştır. Doğrudan araç CAN hattından veriler toplanmış ve analiz edilmiştir. Aracın yolcu doluluğu kum torbası ve mankenler kullanılarak temsil edilmiştir. Verilerin toplanacağı test senaryoları en zorlu koşulları ve ideal sürüş koşullarını karşılaştıracak şekilde oluşturulmuştur. Araç konfigürasyonu, testlerden önce tahmin edilen öngörüler ve analiz sonuçları ilerleyen bölümlerde detaylıca anlatılmaktadır.

Test çalışmaları kapsamında CAN verileri toplanan ve analiz edilen Ulaşım LF12 aracına ait özellikler çizelge 3.2’de verilmektedir. Aracın güç sistemlerine enerji veren batarya paketi modülünün teknik verileri çizelge 3.3’te gösterilmektedir ve son olarak aracı tahrik eden elektrik motoru özellikleri çizelge 3.4’te görülmektedir.

Çizelge 3. 2. Test edilen elektrikli otobüs özellikleri

Araç özellikleri	
Marka / Model	Ulaşım LF12 Elektrikli Otobüs
Uzunluk	12.000 mm
Yükseklik	3.350 mm
Genişlik	2.540 mm
Yüksüz ağırlık	12.500 kg
Yüklü ağırlık	19.500 kg
Yolcu kapasitesi	92
Maksimum hız	80 km/h

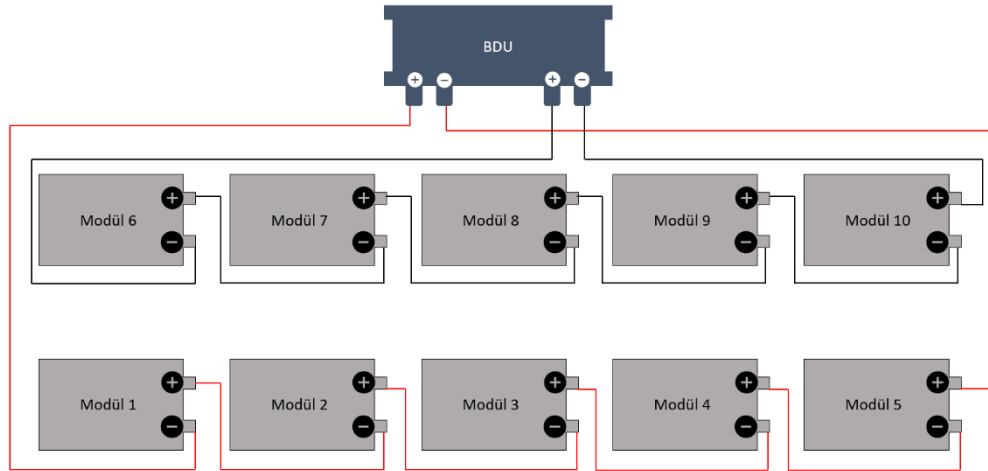
Çizelge 3. 3. Araç batarya paketi modülünün özellikleri

Batarya Paketi Modülünün Özellikleri	
Kapasite	302 Ah
Hücre konfigürasyonu	2P180S
Batarya kapasitesi	35 kWh
Nominal voltaj	115.92 V DC
Şarj akımı	228 A
Deşarj akımı	228 A
Bir paketin ağırlığı	217 kg
Termal yönetim sistemi	8kW, sıvı soğutma
Nominal Hücre Voltajı	3,22 V

Çizelge 3. 4. Tahrik motoru özellikleri

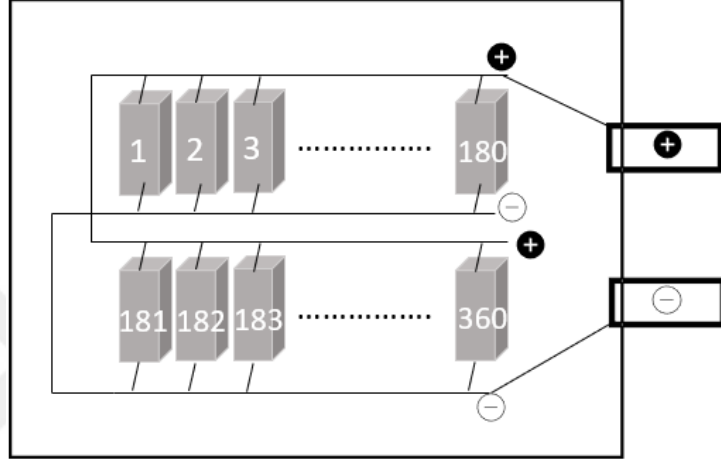
Elektrik motoru özellikleri	
Motor Modeli	CRRC MD2021
Maksimum Güç	240 kW
Sürekli Güç	160 kW
Maksimum Tork	3300 Nm

Çizelge 2.2’de yer alan elektrikli otobüslerden LF12 aracı testlerde kullanılan araçtır. Çizelge 3.2.’de yer alan modülden beş adet birbirine seri bağlı iki paralel kol bağlanarak batarya paketi mimarisi oluşturulmuştur. Toplamda 10 modül bir araya gelerek batarya paketini oluşturmaktadır. Test aracının batarya paketi konfigürasyonu ve batarya paketinin yüksek voltaj bağlantıları şekil 3.3’te gösterilmektedir.



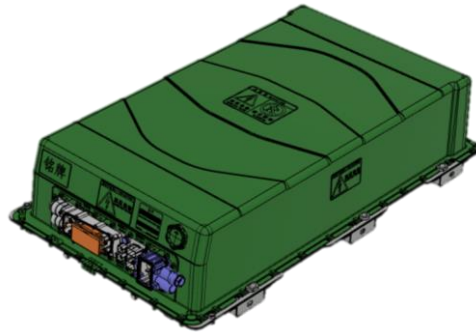
Şekil 3. 3. Batarya paketi yüksek voltaj bağlantıları

Her bir modül kapasiteler bakımından özdeştir ve tüm batarya paketini batarya dağıtım ünitesi ile araç kontrol ünitesi birlikte yönetmektedir. Modüllerin hücre dizilimini gösteren şekil 3.4, tüm modüller için aynıdır. İki paralel kolda 180'er adet seri bağlı hücre bulunmaktadır. Bir modülde toplam 360 hücre ve batarya paketinin tamamında 3600 adet prizmatik LFP lityum iyon batarya hücresi bulunmaktadır.

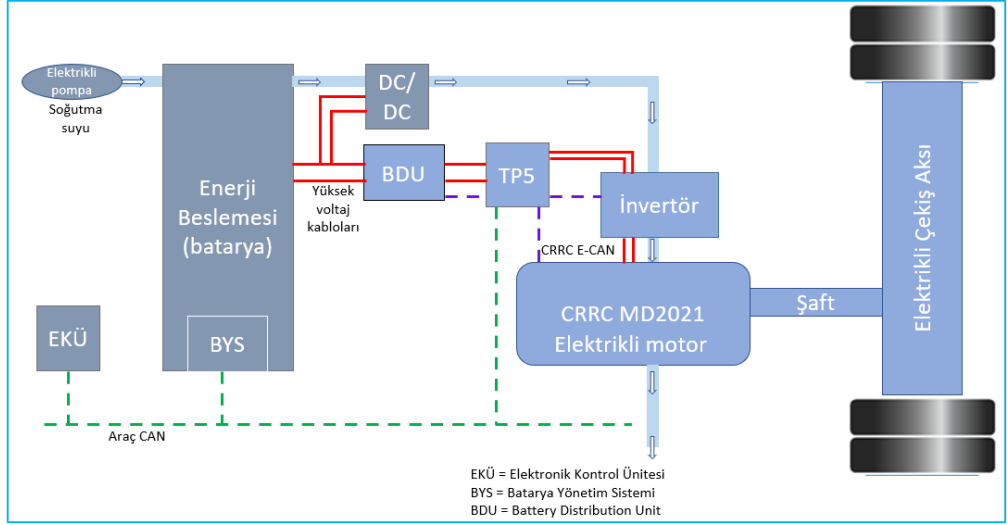


Şekil 3. 4. Bir batarya modülünün hücre dizilimi

LF12 elektrikli otobüsün tahrik sistemi merkezi elektrikli motorlu konfigürasyon usulüne göredir. Bataryalardan alınan elektrik enerjisi motorda hareket enerjisine dönüştürüldükten sonra şaft vasıtasıyla mekanik olarak elektrikli araçlar için özel olarak tasarlanmış çekiş aksını tahrik eder. Merkezi elektrik motorlu konfigürasyon, elektrikli otobüsler için maliyet ve uygulanabilirlik açısından en uygun çözümdür. Ancak Hub motorlu çekiş akslarına göre tork değerleri düşüktür. Buna rağmen içten yanmalı motorlara nazaran torku çok yüksek olmaktadır.

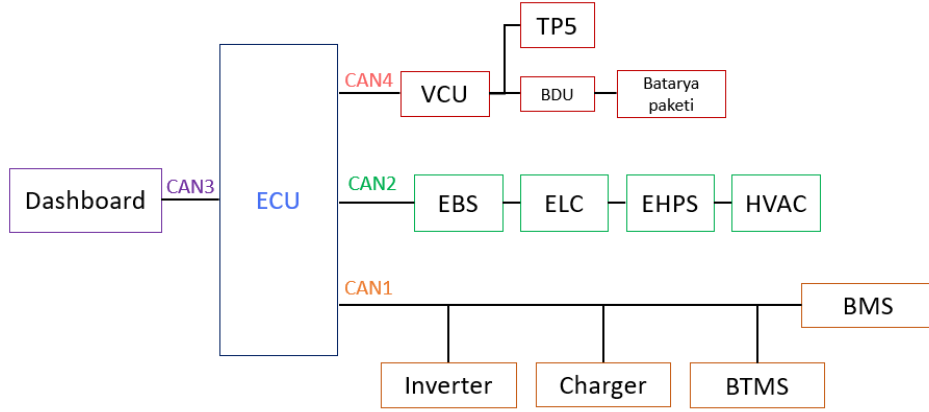


Şekil 3. 5. Batarya Modülü



Şekil 3. 6. Test aracının tahrik sistemi mimarisi

Elektrik motorlarını sürmek için gereken enerji bataryalardan çekilen elektrik enerjisidir. İnvertör bataryadan gelen DC akımı alternatif akıma çevirerek elektrik motorunu sürer. Alternatif akımla çalışan tüm elektrik motorları için birer invertör bulunur. Araç rejeneratif modda iken tahrik motoru jeneratör görevi görür ve elektrik enerjisi üretir. Bu enerji yine invertör üzerinden geçerek bataryaları şarj eder. Aracın tahrik sistemi kendi arasında özel bir CAN hattı ile haberleşmektedir ancak diğer komponentlerle araç CAN hattı üzerinden haberleşme sağlanmaktadır. Bataryalar ve diğer tüm yüksek voltajla çalışan bileşenler, operasyonlar sırasında ısı üretmektedir. Bu ısının sistemden uzaklaştırılması için batarya termal yönetim sistemi soğutucu akışkan bileşenlerin muhtelif bölgelerine yerleştirilmiş soğutma kanallarından dolaştırır. Batarya termal yönetim sistemi de bataryalar gibi aracın tavan bölgesinde konumlandırılmıştır. Böylece hareket halindeyken sistemden çekilen atık ısı hava akışı ile dış ortama verilmiş ve soğutucu akışkan tekrar sistemden ısı çekecek nitelik kazanır. Yukarıdaki çizelgelerde birtakım özellikleri verilen LF12 elektrikli otobüsün CAN mimarisi şekil 3.7’de görülmektedir.



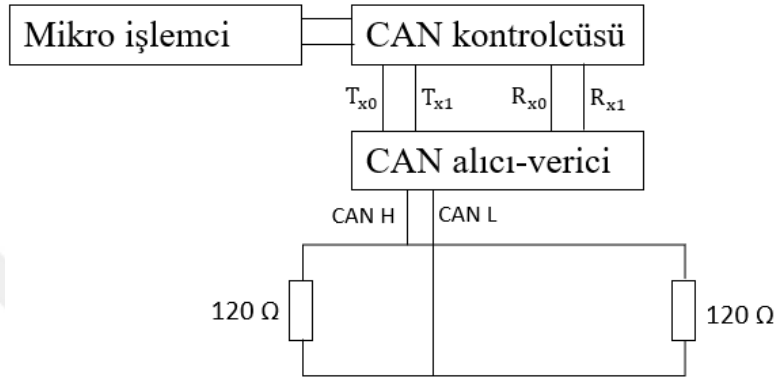
Şekil 3. 7. Test edilen elektrikli otobüsün CAN mimarisi

Şekil 3.7’de verilen şemada VCU, araç kontrol modülüdür ve kendisine bağlı olan diğer batarya paketlerini BDU vasıtasıyla yönetir. Ayrıca TP5 ünitesi motor sürücüdür. CAN4 hattı vasıtasıyla bataryalara ait verileri diğer elektronik kontrol ünitelerine iletir ve onlardan gelen mesajları değerlendirerek bataryaları sürer. CAN2 hattında yer alan bileşenler gövde kontrol sistemlerini yöneten kontrol üniteleridir. EBS elektronik fren sistemini, ELC elektronik seviyelendirme sistemlerini, EHPS elektrohidrolik direksiyon pompasını, HVAC ise iklimlendirme sistemlerini kontrol eden ünitelerdir. CAN1 hattında yer alan bileşenlerden BTMS, batarya termal yönetim sistemini, BMS ise batarya yönetim sistemini kontrol etmektedir. Diğer bileşenler bu hatta bulunan invertörler ve şarj sistemidir. Dashboard, sürücü gösterge panelini yönetir ve CAN3 hattı üzerinden tüm bu haberleşme sistemini kontrol eden ECU’ya bağlıdır.

3.2. CAN Bus Protokolü

CAN (Controller Area Network) Bus, elektronik sistemlerin birbiriyle haberleşmesini sağlayan bir protokoldür. Sistem, iki ucunda paralel bağlı 120 ohm (eşdeğer direnç 60 ohm’dur) dirençler bulunan iki telli bir fiziksel yapıya sahiptir. CAN sistemi 1983 yılında Bosch firması tarafından araçlardaki kablolanmanın azaltılması için çalışılmaya başlanmış ve 1986 yılında SEA konferansında tanıtılmıştır. CAN Bus sisteminin otomotivdeki ilk uygulaması 1988 yılında BMW 8 serisi araçlarda kullanılmıştır. Araçların elektronik kontrol ünitelerinden gönderilen veriler, CAN hattıyla ilgili kontrolcüye iletilmektedir. Yapılan istatistik

hesaplamalara göre CAN Bus sisteminin hata yapma olasılığı yüzyılda birdir. Aynı anda bir hatta maksimum 30 cihaz bağlanabilen CAN sistemi sayesinde araçlarda kablo kalabalığı önemli ölçüde azalmaktadır. CAN veri yolunu oluşturan, uçları 120 ohm dirençle sonlandırılmış iki kablodan 1.25V ila 2.5V arasında gerilime sahip olan CAN-Low; hat gerilimi 2.5V ila 3.75V arasında değişene ise CAN-High adı verilmektedir. CAN veri yolunun şematik gösterimi şekil 3.8.'de verilmektedir.

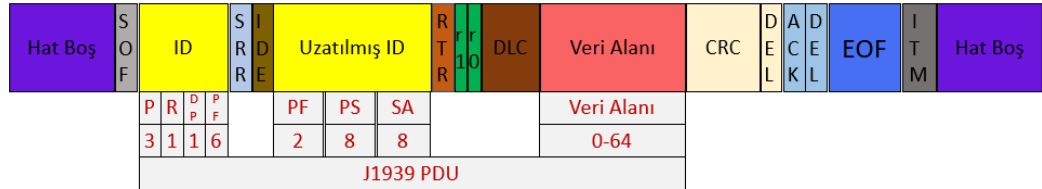


Şekil 3. 8. CAN Veri yolu ve düğümlerin şematik gösterimi (Samancı B, 2010)

Şekilde verilen şemada CAN veri yoluna CAN H ve CAN L kabloları ile bağlanmış bir düğüm görülmektedir. Bu yapıda CAN alıcı ve verici fiziksel olarak birbirinden ayrıdır. Ancak düğümlerin yapısı gereği gönderilen mesaj alıcıdan dinlenebilmektedir. Bu sayede veriyi gönderen işlemci gönderdiği veri ile okuduğu veriyi karşılaştırarak hata ve mesajların öncelik seviyelerine göre iletilmelerine olanak sağlar. Multimaster yapıda çalışabilen bu sistem için bu özellik önemlidir(Samancı B, 2010). T_{x0} ve T_{x1} mesajın, CAN kontrolcüsünden basılan mesaj olduğunu göstermektedir. R_{x0} ve R_{x1} ise mesajın CAN veri yolundan alınan mesaj olduğunu belirtmektedir.

Araca ait veriler, mesajların içinde tanımlı sinyaller ile taşınmaktadır. Her bir mesajın anlamlandırılacağı, on altılık sayı tabanına göre kodlanmış bir kimliği bulunur. CAN hattına mesaj basan ve mesaj alan kontrol ünitelerine düğüm adı verilir. Her düğüm belirli bir sıraya göre hatta mesaj basar. CAN hattına basılacak mesajların sıralaması, mesajın kimliğinde kodlanmış önceliğe göre yapılır. Önceliği en yüksek olan mesaj ilk önce basılır diğerleri önem sırasına göre basılır. CAN Bus

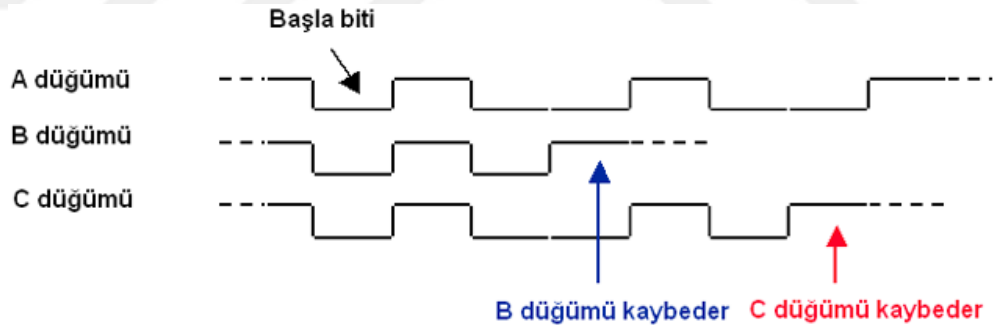
protokolünde otomotiv endüstrisi için farklı standartlar yer almaktadır. Örneğin; ağır vasıta ve ticari araçlar için SAE J1939 standardı yoğun olarak kullanılmaktadır. CAN Bus hattına basılan bir mesajın yapısı şekil 3.9.’da verilmektedir.



Şekil 3. 9. CAN mesajının yapısı

Her CAN mesajının başlangıcı SOF (Start of frame) kısmıdır ve değeri lojik 0 olan 1 bitlik veridir. ID alanının ilk 3 biti P (Priority) öncelik alanını ifade etmektedir. 0 en yüksek önceliği, 7 ise en düşük önceliği temsil etmektedir. R (Reserved), biti ileride kullanılabileceği ihtimali için rezerve edilmiştir. DP (Data Page Selector) ikinci bir sayfa PGN (Parameter Group Number) açmak için kullanılan tek bitlik veridir. PF (PDU Format), EF (239) sayısından büyük bir değer alırsa mesaj global veya PDU 2 tipinde bir mesajdır ve CAN Bus üzerindeki tüm cihazlar bu mesajı okuyabilir. Eğer PF, EF’ ye (239) eşit veya daha küçük ise bu mesaj alıcıya özel veya PDU 1 tipinde bir mesajdır ve PS alanındaki değer hangi alıcıya özel olduğunu belirtmektedir. PS (PDU Specific), PF alanında mesajın alıcıya özel olduğu belirtilmiş ise bu alan alıcının adresini veya ID’ sini gösterir. Eğer mesaj global ise bu alan mesajın hangi global mesaj olduğunu gösterir. SA (Source Address) alanı, mesajı gönderen cihazın adresi veya ID’ sidir. (00 her zaman motor kontrol ünitesinin on altılık tabandaki karşılığıdır.) PGN ise R, DP, PF ve PS alanlarının birleşimidir. Burada R biti rezerve ve her zaman lojik 0 değerini aldığı için bir sonraki bit olan DP’nin lojik 0 veya lojik 1 olması PF+PS sayısının 0’dan FFFF’ e bir liste olduğunu düşündüğümüzde, bize ikinci bir listeye geçme imkânı sağlar. Veri alanı mesajın içeriğini oluşturan ve gönderilmek istenen verilerin tutulduğu ve en fazla 64 bit yani 8 byte’ lık bir alandır. Bir CAN mesajının anlamlı olan ve kullanılabilir kısmı, PDU olarak ifade edilen alandır. Yani sırasıyla P R DP PF PS PA bitleri bize 29 bitlik mesaj ID’ sini, veri alanı ise 64 bite kadar kullanılabilen veri kısmını ifade etmektedir.

CAN hattına mesaj basılması işlemi (Samancı B, 2010) tarafından şu şekilde açıklanmaktadır: Bir düğüm tarafından mesaj gönderilmesi kararlaştırıldığında mesaj, veri yolu boşalana kadar bekletilir. Her düğüm, yolu devamlı izlemektedir. Yol boşaldıktan sonra düğüm yola başla işaretini vererek mesajı yollamaya başlamaktadır. Mesaj her düğüme ulaşmaktadır ve ilişkisi olan düğümler mesajı okuyup işlemektedirler. Eğer yol boşaldığında birden fazla düğüm yola mesaj yazmaya başlarsa düşük ID' li mesajı yazan düğüm yolu ele geçirir ve diğer düğümler aradan çekilerek tekrar göndermek üzere yolun boşalmasını beklerler. Bu mekanizma şu şekilde çalışır; Yazılan her bitin aynı anda okunduğundan bir düğüm veri yoluna mesaj yazarken 1 yazdığında 0 okuyorsa eğer, başka bir düğümünde yola mesaj yazdığını anlar ve onun önceliği yüksek olduğundan veri yolunu ona bırakır. Yol boşaldığında tekrar göndermeye çalışır. Örneğin yola aynı anda veri yazmaya çalışan A, B ve C adında 3 düğümümüz olduğu düşünülebilir. A düğümü yola 36 (100100), B düğümü 47 (101111) ve C düğümü 37 (100101) yazdığı varsayılabilir. Aşağıdaki şekilde bu durum gösterilmiştir. A düğümü mesajını gönderdikten sonra daha önemli bir mesaj yoksa C düğümü sonra da B düğümü mesajını gönderir.



Şekil 3.10. CAN mesajlarının iletimi(Samancı B, 2010)

3.3. Li-Ion Bataryalarda Soğutma Metotları

Bataryalarda ısıtmaya olan ihtiyacın hem çok kolay karşılanması hem de soğuk iklimlerde oldukça nadir şartlarda gerçekleşmesinden dolayı batarya termal yönetim sistemlerinin soğutma performansı, ısıtma performansına kıyasla çok daha fazla araştırma konusudur. Bu sebeple bataryaların soğutulmasında farklı teknikler ve materyaller kullanılmaktadır. Soğutma işlemi; iletim, taşınım ve konveksiyon gibi farklı ısı transferi modlarının birlikte kullanımıyla olmaktadır. Dolayısıyla fazla

ısının bataryadan uzaklaştırılmasında birtakım soğutucu akışkanlar sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin; hava ile soğutma doğal taşınım ile ısı transferi uygulaması maliyeti düşük ve nispeten düşük C oranlı şarj veya deşarj işlemleri sırasında bataryalar için etkili bir soğutma yöntemidir ancak artan C oranı gibi kullanım şartları ağırlaştıkça doğal taşınım ile hava soğutma yetersiz kalabilmektedir. Bu durumda zorlanmış taşınım ile hava soğutma uygulandığında termal yönetim sisteminin performansı artacaktır(Choudhari vd., 2020).

Sıvı akışkan kullanılan soğutma sistemleri, sıvıların yüksek ısı transferi katsayısından dolayı hava ile soğutmaya göre daha verimli çalışmaktadır. Sıvı ile soğutma direkt ve dolaylı olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Direkt soğutmada, soğutucu akışkan batarya modüllerine doğrudan eder. Bu akışkan kahir ekseriyetle dielektrik bir yapıya sahiptir. Batarya modülleri doğrudan sıvıya daldırılmış halde çalışmaktadır. Oldukça etkili bir soğutma sağlamasına karşın uygulanması zor ve yüksek maliyetlidir. Dolaylı soğutmada ise akışkan, doğrudan bataryalar ile temas halinde değildir. İçinde soğutma kanalları bulunduran soğutucu plakalar veya soğutucu borular bataryaların yüzeylerine temas edecek şekilde konumlandırılmakta ve soğutucu akışkan bu boru veya kanallardan geçirilerek bataryaların soğutulması sağlanmaktadır. Direkt yöntemle kıyasla daha az maliyetli ve pratik uygulanabilirliğe sahip olan dolaylı yöntem, direkt yöntem kadar etkili bir soğutma sağlamasa da hava ile soğutmaya kıyaslandığında daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri üzerine yapılan bir çalışmada soğutma kanallarının tasarımı ve optimizasyonu için yapay sinir ağları yöntemi kullanılmış ve elde edilen çözümde soğutma performansı sabit kalırken sıvıyı pompalayan pompanın elektrik tüketimi önemli ölçüde azalmıştır (Bulut vd., 2022).

Bir diğer soğutma metodu ise faz değiştiren materyaller (FDM) ile soğutmadır. FDM ile soğutmada malzeme tersinir bir faz değişim mekanizmasına göre çalışmaktadır. FDM, bataryaların ısını absorbe ederek erir ve faz değiştirir daha sonra aldığı ısı enerjisini sistemden uzaklaştırarak tekrar katı haline döner ve yine faz değiştirmiş olur. Bu tip soğutma sistemleri oldukça kompakt bir yapıya sahiptir

ve maliyeti düşüktür(Menak vd., 2021). Lityum iyon bataryalarda soğutma metotları aşağıdaki çizelge 3.5.'te özet şeklinde sunulmaktadır.

Çizelge 3. 5. Batarya soğutma sistemlerinin karşılaştırması (Menak vd., 2021)

Soğutma Metodu	Avantajlar	Dezavantajlar
Hava Soğutma (Pasif)	●Hafif ●Basit sistem ●Kolay bakım ●Pasif soğutma ●Başlangıç maliyet düşük ●Kolay uygulanabilirlik	●Verimlilik düşük ●Isı transfer katsayısı düşük ●Soğutma düzeyi düşük ●Sıcaklık dağılımı homojen değil ●Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar için uygun değil ● Sadece ortamda bulunan sıcaklığı kullanır
Hava Soğutma (Aktif)	● Bataryaya doğrudan temas ●Hafif ●Bakımı kolay ●Uzun ömürlü soğutma ●Başlangıç maliyeti düşük ●Farklı batarya tipleri için uygun ●Ticari anlamda yaygın	●Düşük ısı transfer katsayısı ●Ortam hava sıcaklığına bağlıdır ● Fan kullanıldığı için elektrik tüketimi vardır ●Sıcaklık dağılımı homojen değil ●Verimlilik düşük ●Gürültülü ●Alan kaplar ●Karmaşık ●Sızıntı riski vardır ●Başlangıç maliyeti yüksek ●İşletme maliyeti yüksek ●Pompa kullanıldığı için elektrik tüketimi vardır ●Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma
Sıvı Soğutma (Direkt)	●Yüksek ısı kapasitesi ●Bataryaya doğrudan temas ●Verim yüksek ●Sıcaklık dağılımı homojen	●Sıvı sızıntısı riski vardır ●Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma ●Gaz kaybı riski vardır
Sıvı Soğutma (Dolaylı)	●Bakımı kolay ●Pasif soğutma ●Başlangıç maliyeti düşük ●İşletme maliyeti düşük	●Sıvı sızıntısı riski vardır ●Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma ●Gaz kaybı riski vardır
FDM	●Pasif soğutma ●Maliyeti düşük ●Verimlilik yüksek ●Bakım az ●Kullanım ömrü uzun ●Sıcaklık dağılımı göreceli olarak homojen ●Daha kompakt ●Gizli ısıyı emer ●Yüksek sıcaklık koşullarında yüksek soğutma performansı	●Termal iletkenliği düşük ● Faz değişim esnasın hacim genişlemesi ●Malzeme eridikten sonra sızıntı riskinin olması ●Ağır olabilmektedir.

Bu tez kapsamında test edilen elektrikli otobüste sıvı soğutmalı bir batarya termal yönetim sistemi bulunmaktadır.

3.4. Test Senaryoları

Bu çalışmada 12 metre uzunluğunda Ulaşım LF12 elektrikli otobüs kullanılarak gerçek zamanlı sürüş verileri elde edilmiştir. Araç batarya paketinin SOC, bataryadan çekilen akım, batarya voltajı, batarya hücrelerinin maksimum ve minimum sıcaklıkları gibi doğrudan CAN hattından alınabilen veriler, farklı test senaryolarında araçtan toplanmış ve analiz edilmiştir. Yüklü ve yüksüz testler, ECE R100 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Bu standart, elektrikli araçların güvenlik, performans ve batarya yönetim sistemleri için belirlenen gereksinimleri kapsar. Testlerde, batarya sıcaklığı, akım, gerilim, enerji tüketimi ve batarya doluluk oranları gibi parametreleri incelenmektedir.

Yolcusuz ağırlık durumunun incelendiği senaryoda test rotası 30 km uzunluğundadır. Hızlanmalar, sürüş boyunca agresif olmayan bir profil ile gerçekleştirilmiştir. Frenleme prosedürü yolcu konforunu bozmayacak şekilde planlanmıştır. Test sürüşü boyunca iklimlendirme sistemi kapalı tutulmuştur. Tam yolcu yüklü durumun incelendiği senaryoda da 30 km uzunluğunda aynı test rotası takip edilmiştir. Şehir içi toplu taşıma koşullarını daha iyi canlandırmak için her iki senaryoda da belirli aralıklarla araç durdurulup 15 saniye boyunca kapılar açılarak yolcu iniş binişleri temsil edilmiştir. Yolcu doluluğunu temsil etmek için kum torbaları ve cansız mankenler kullanılmıştır. Daha sonra yüksüz durumda takip edilen hızlanma ve frenleme prosedürlerine birebir uygun olarak sürüşe devam edilmiştir. Elektrikli otobüslerde enerji tüketimi ve batarya sıcaklığını en çok etkileyen parametrelerden biri olan iklimlendirme sisteminin etkisini görebilmek için bu senaryoda araç iklimlendirme sistemi aktif olacak şekilde test edilmiştir. Böylece en kötü durumdaki senaryonun temsil edilmesi amaçlanmıştır.

Testin gerçekleştirildiği dış ortam sıcaklığı, durak sayısı, kapıların açık kalma süreleri, ortalama hız ve yolcu sayısı gibi değişkenler gerçek enerji tüketiminin

doğru tespit edilebilmesi için bu değişkenler her iki senaryoda da aynıdır. Testler Tacikistan'ın Duşanbe şehri ile Kurgantepe bölgesi arasındaki bir güzergahta koşturulmuştur. Test rotasını gösteren harita şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3. 11. Test Rotası(Google maps, 2024)

Testler boyunca aracın CAN Bus hattına ara yüz cihazları ile bağlanarak gerçek zamanlı veriler kaydedilmiştir. Bağlantı için kullanılan ara yüz cihazı Vector VN1610 OBDII ve kayıt ortamı Vector CANalyzer programıdır. Test kayıtları .blf formatında depolanmıştır. Test sonuçlarının analiz edilmesi ve grafik sonuçlar şeklinde raporlanması da yine Vector CANalyzer ortamında yürütülmüştür. Vector VN1610 cihazın ait bilgiler çizelge 3.6'da (Vector Informatik GmbH, 2024) verilmektedir. Kaydedilmiş veriler, CANalyzer ortamında yeniden koşturularak sayısal değerler elde edilmiştir.

Çizelge 3. 6. Veri toplama cihazı özellikleri (Vector Informatik GmbH, 2024)

Fonksiyon	Değer
Kanal Sayısı	2 kanal
Alıcı-Verici	2xCAN 1051cap
Haberleşme hızı	1-2 Mbit/s (kablolama ve alıcı-vericilere göre değişmektedir)
Hassasiyet	1 µs (tek cihaz ile) – 50 µs (çoklu cihazlar ile)
Bilgisayar arayüzü	USB 2.0
Harici besleme	Bus beslemelidir. Harici kaynağa ihtiyaç duymaz.
Çalışma sıcaklığı	-40 ila +70°C
Boyutlar	65x42x20 mm

Yolcu yüklü ve yüksüz durumlarda

- Enerji tüketimi
- Batarya SOC değerleri arasındaki fark
- Bataryadan çekilen akımlar
- Aracın test süresince senaryoya bağlı ortalama hızı
- Aracın elektrik motorları ve invertörlerin sıcaklıkları
- Batarya termal yönetim sistemine ait veriler (sıcaklık, voltaj, akım, soğutma yükü vb.)

Elektrikli aracın yüklü ve yüksüz durumlardaki test parametrelerinin değişimi irdelenmiştir.

3.6. Yol Testleri ve Veri Toplama

Ulaşım LF12 elektrikli otobüsün önceki bölümlerde anlatılan senaryolara göre yol testleri yapılmış ve araç verileri CAN hattından kaydedilmiştir. Bu bölümde yol testlerine ve veri toplama yöntemine dair hususlara yer verilmektedir. Yol testlerinin gerçekleştirildiği güzergâh boyunca yolun farklı eğimlere sahip olması SOC gibi birtakım batarya parametresi üzerinde etkili olmuştur. Bunun nedeni olarak rejeneratif frenlemeyle kazanılan enerjinin bataryaları şarj etmesi gösterilebilir. Bir diğer yandan testler boyunca batarya sağlığı değişmemiştir. Batarya termal yönetimi aracın sadece bataryalarını değil; şekil 3.2’de gösterilen elektrik motorları ve invertörler, elektrikli direksiyon pompası gibi tüm yüksek voltaj komponentlerinin de ürettiği atık ısıyı uzaklaştırmada etkili rol oynamıştır.

Aracın elektronik kontrol ünitesi, sahip olduğu algoritmalar sayesinde harcanan net enerji, bataryadan çekilen güçler gibi birtakım parametreleri hesaplayarak CAN hattına basmaktadır. Dolayısıyla bu veriler de CAN hattından toplanmış ve sinyal işleme metotlarıyla analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 13. Test aracı

Şekil 3.13'te test edilen elektrikli otobüs yer almaktadır. Elektrikli otobüse ait veriler çizelge 3.2, çizelge 3.3 ve çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Yolcu yükünü ve iniş binişleri temsil edebilmek için test senaryoları bölümünde açıklanan yöntem başarıyla uygulanmıştır. Burada yolcu ağırlığı için bir yetişkin yolcu başına 68 kg olarak hesaplanmış ve toplam 7.000 kg yükleme yapılmıştır. Yüklü testte araç tek seferde yüklenmiştir ve yolcuların iniş binişleri sadece zaman olarak kurgulanmıştır. Bunun sebebi yolcu yerine kullanılan kum torbası ve cansız mankenlerin gerçek bir yolcu sirkülasyonunu sağlayacak kadar efektif olmamasıdır. Yüklü testte yolcu sirkülasyonu bu sebeple tam manasıyla temsil edilememiştir. Dolayısıyla akslar arasındaki yük transferi sayısal hesaplamalara dahil edilmemiştir.



Şekil 3. 14. Test esnasında araç ve test güzergahı

Aracın yolcusuz ağırlıklı testinde araç net ağırlığı haricinde akslara binen herhangi bir yük olmadığından yolcu sirkülasyonunu temsil etmeye ihtiyaç da olmamıştır. Araç, tüm performans beklentilerini bu testte yerine getirmiştir. Üstelik iklimlendirme sistemi gibi ekstra güç tüketen sistemler de aktif olmadığı için enerji tüketimi, üretilen ısı, batarya sıcaklığı gibi parametrelerin düşük seviyelerde kalması sağlanmıştır. Aracın yüksüz testleri yapılırken iç ortamdan çekilen fotoğraflar şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3. 15. Test aracının yüksüz hali

Her iki durumda da veri toplama yönteminde herhangi bir fark olmamıştır. Aracın CAN hattına doğrudan diyagnostik ekipmanlar ile bağlantı yapılmış ve yazılımlar kullanılarak veri toplanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, aracın elektronik komponentlerinin yayımladığı mesajların farklı zaman adımlarına sahip olmasıdır. Araca ve sürüşe ait bilgiler içeren sinyaller ve mesajların belirli zaman aralıklarında toplanması verilerin hassasiyetini etkilemektedir. Örneğin; sıcaklık sensörleri termal yönetim sistemi soğutma sıvısının sıcaklığı bilgisini her 100 ms' de bir sinyal gönderecek şekilde üretilmişken, aracın konum bilgisini veren aygıtın yaydığı mesaj her saniyede 1 sinyal şeklindedir. Verileri sayısallaştırdıktan sonra zaman adımlarını ortaklaştırmak için birtakım formülasyonlar uygulanmıştır. Dijital veya analog sinyallerin taşıdığı veri sayısallaştırıldıktan sonra tabular hale dönüştürmek için yine CANalyzer programı kullanılmıştır. Sayısallaştırılmış ve tablolar halinde ifade edilen veriler artık matematiksel ifadelerde kullanılabilir.

İlerleyen bölümlerde bu çalışmaya ait analizler, karşılaştırmalı sonuçlar ve grafiksel anlatımlara yer verilmektedir.

3.7. Veri Analizleri ve Karşılaştırmalar

Elektrikli aracın testlerinden elde edilen verilerin analizi hakkında detaylı bilgiler ve matematiksel ifadeler bu bölümde detaylıca anlatılmaktadır.

Elektrik akımının geçtiği bir sistemde direnç ve akan akımın sebep olduğu bir ısı enerjisi açığa çıkar. Bu ısı elektrik enerjisinin atık ısıdır.

Bir lityum-iyon batarya hücresinin ürettiği ısı eşitlik 3.9 ile ifade edilmektedir (Li, 2022).

$$Q = I_L(E_0 - U_L) - I_L T \frac{dE_0}{dT} \quad 3.9$$

Yukarıdaki eşitlik 3.9’da Q , hücrenin ürettiği toplam ısıyı (W), I_L akımı (A), E_0 açık devre gerilimini (V), U_L gerilimi (V), T sıcaklığı (K) temsil etmektedir(Li, 2022).

Bataryanın polarizasyon iç direncinden dolayı ortaya çıkan ısı eşitlik 3.10’daki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$Q = R_{eq}I^2 \quad 3.10$$

Burada; R_{eq} ile ifade edilen açık devre voltajı yöntemine göre hesaplanan eşdeğer hücre direnci (Ohm), I ile ifade edilen değişken ise hücre akımıdır (A). Bataryalardan çekilen gücü watt biriminden hesaplamak için aşağıdaki ifade kullanılmıştır.

$$P = UI \quad 3.11$$

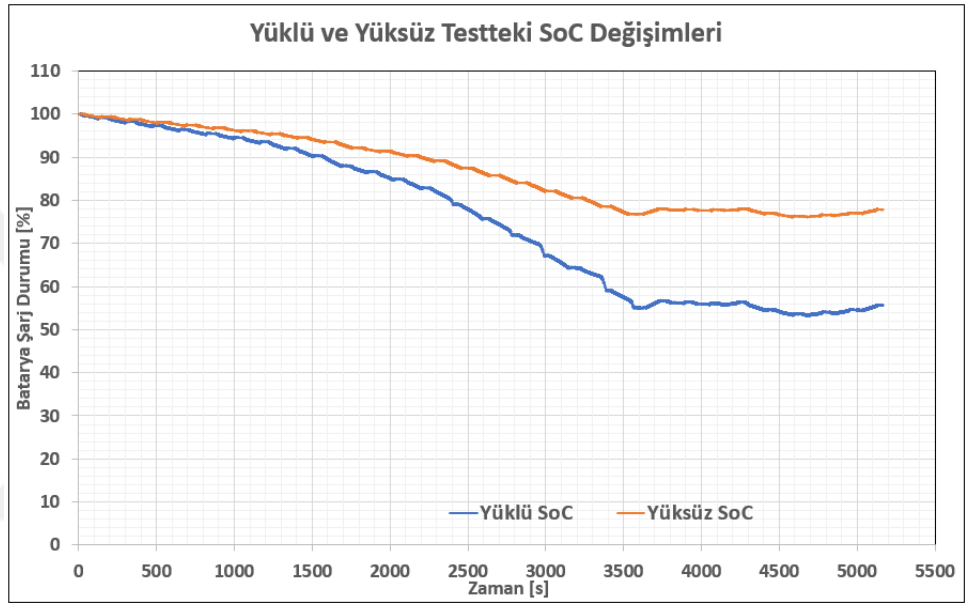
Eşitlik 3.11’deki U , volt biriminden batarya voltajıdır. I ise bataryadan çekilen anlık akımı (A) ifade etmektedir. Araç CAN verilerinin analizi sonucu elde edilen bazı grafiksel sonuçlar aşağıda verilmektedir.

$$\sum_{n=1}^n (|X_n| - |X_{n-1}|)\Delta t \quad 3.12$$

Eşitlik 3.12’de X_n , anlık güç tüketim değeridir ve Δt , örnekleme zamanıdır. Şekil 4.2’de verilen grafik değerleri eşitlik 3.12 vasıtasıyla hesaplanarak ortalama enerji tüketimi elde edilmiştir. Veri analizleri, CANalyzer programında sinyal analizi vasıtasıyla yapılmıştır. Sayısallaştırılan sinyal değerleri, yukarıdaki verilen denklemlerin excel ortamında tatbiki ile yüklü ve yüksüz durumlardaki veriler analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır.

4. BULGULAR

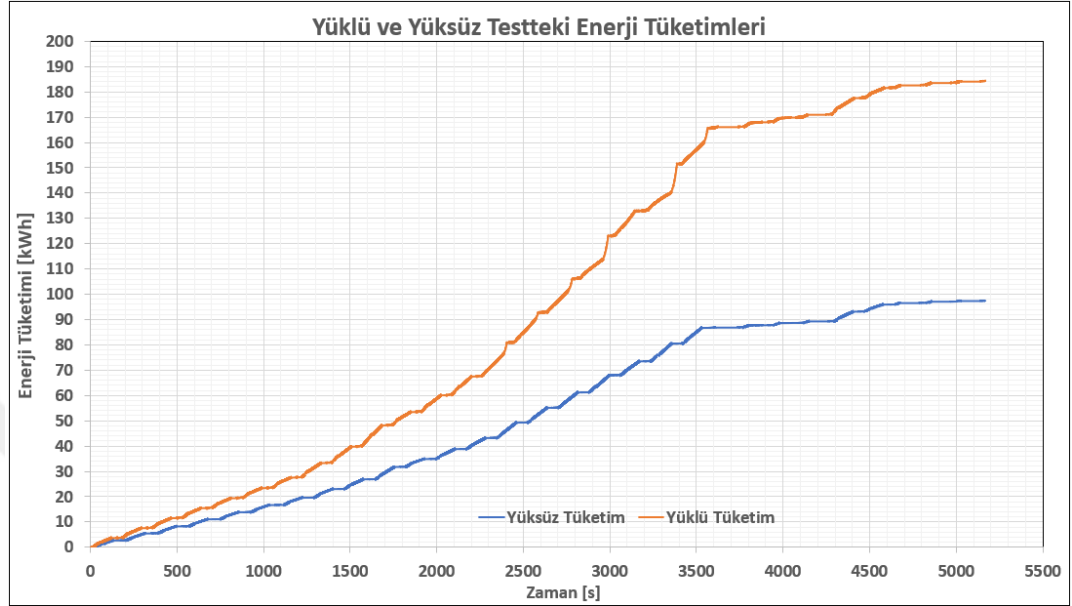
Bu tez çalışması kapsamında Ulaşım LF12 elektrikli otobüsün 50 km'lik test rotasında yüklü ve yüksüz ağırlıklı testlerinden elde edilen veriler CANalyzer programı ile analiz edildiğinde enerji tüketimi ve batarya sıcaklığı gibi birçok batarya fiziksel özellikleri elde edilmiştir.



Şekil 4. 1. Batarya şarj durumu (SOC) karşılaştırması.

Şekil 4.1'de elektrikli otobüsün yolcu yüklü ve yüksüz test senaryolarına ait batarya şarj durumunun değişimleri karşılaştırılmaktadır. Yaklaşık 3500 saniyelik bir sürüşten sonra, yüklü durumda SOC değerinin yüksüz duruma göre çok daha fazla düştüğü, görülmektedir. 30 km'lik test rotası her iki testte de aynı olduğundan batarya şarj durumu değişim karakteristiği benzerdir. 1500.saniyeden sonra araç yokuş tırmanmaya başlamış bu sebeple güç talebi artmıştır. Dolayısıyla SoC hızla azalma eğilimi göstermiştir. Daha sonra araç yokuş inme başlamış ve aşağı inerken geri kazanımlı frenleme modunda yavaşlama nedeniyle yer yer SOC değerinde artışlar gözlenmiştir. 3500 saniyelik sürüşün ardından aracın rotasındaki yükseklik değişimlerinin daha stabil olduğu görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere yüklü durumda elektrikli otobüsün SOC değeri, yol topolojisi, sürücü davranışı ve çevresel etmenler gibi faktörlerden, yüksüz duruma göre çok

daha hassas bir şekilde etkilenmektedir. Test sonunda yüksüz durumda SOC değeri %100 seviyesinden %77.8 seviyesine gerilerken yüklü durumda %100 seviyesinden %55.6 seviyesine gerilemiştir.

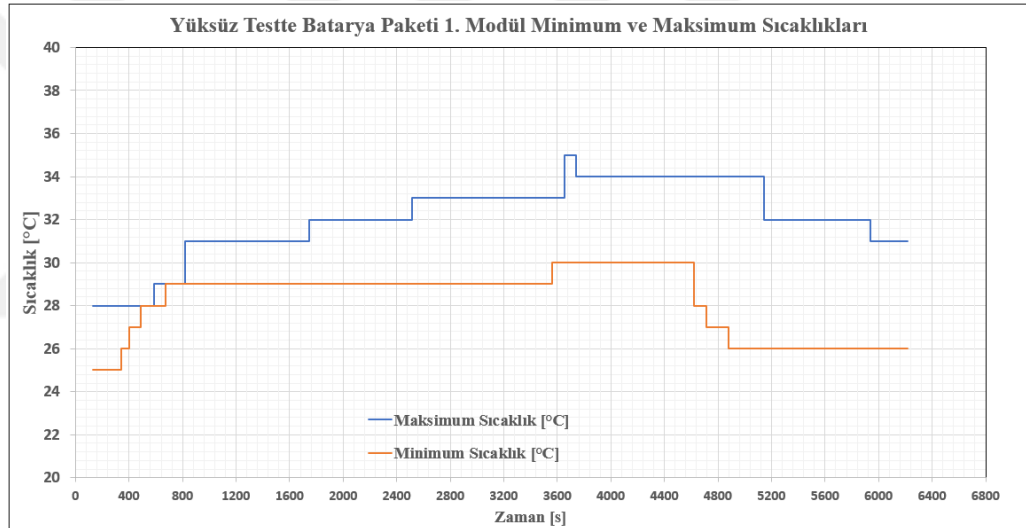


Şekil 4. 2. Yüklü ve yüksüz testteki enerji tüketim karşılaştırması

Şekil 4.2.'de yüklü ve yüksüz testteki enerji tüketimlerinin karşılaştırması verilmektedir. Yüksüz test, optimum koşulları temsil ettiğinden iklimlendirme sistemleri kapalı olacak şekilde test yürütülmüştür. Yüklü testte ise tüm iklimlendirme sistemleri ve aksesuar güçleri araç bataryalarından güç çekmektedir. Sonuçlara baktığımızda test süresince ortalama enerji tüketimi yüklü testte 96.217 kWh olarak bulunmuştur. Km başına hesap yapıldığında araç yüklü koşullarda 3.21 kWh enerji sarf etmiştir. Daha anlaşılır olması için 321kWh/100 km seviyelerinde bir tüketim verisi elde edilmektedir. Regeneratif frenleme etkisiyle şarj edilme durumu göz ardı edilirse bu tüketim batarya kapasitesinin %91'ine karşılık gelmektedir. Ancak regeneratif fren sayesinde bataryalar şarj edildiği için testin sonunda batarya kapasitesi %10 seviyelerine gerilememiştir. Yüklü testteki tüketim verisi kg başına verilmek istenirse 0.0049 kWh/kg olarak bulunmaktadır. Yolcu başına enerji tüketimi ise 1.414 kWh/kişi olarak bulunmuştur.

Yüksüz testteki tüketimlere bakacak olursak tüketim karakteristiği yüklü teste benzemektedir. Ancak değerler çok daha düşüktür. Çünkü yüksüz durumda aksesuar güçleri aktif değildir. Yardımcı sistemler bataryalardan güç çekmemektedir. Sayısal verilere baktığımızda yüksüz test boyunca ortalama enerji tüketimi 52.99 kWh olarak hesaplanmıştır. Km başına hesap yapıldığında yüksüz durumdaki tüketim 1.76 kWh/km olarak bulunmuştur. Bu değerin daha anlaşılır olması için 176 kWh/100 km olarak verilebilir. Ortalama tüketim yüksüz testte kg başına hesaplandığında 0.0042 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Yüksüz testte yolcu yükü olmadığından kişi başına tüketim hesaplanmamıştır.

4.1. Yüksüz Test Sonuçları

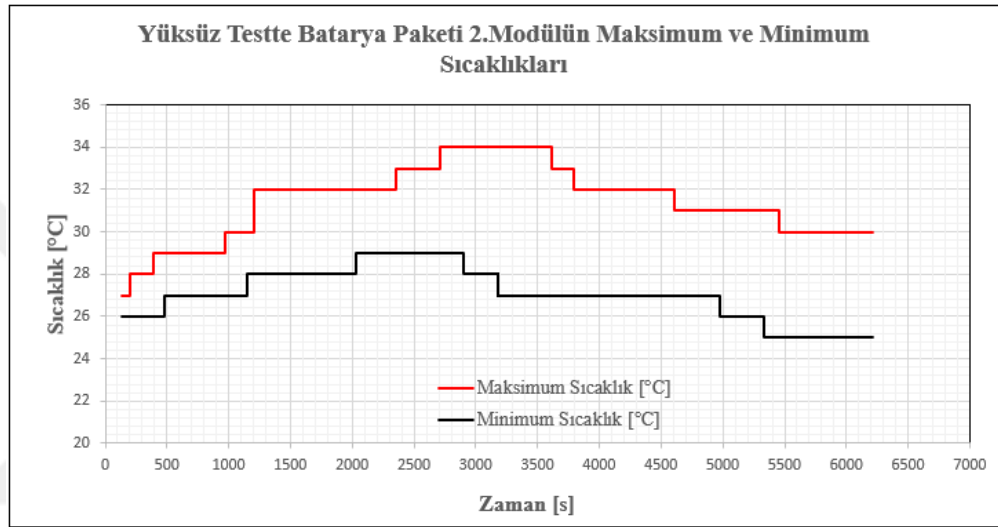


Şekil 4. 3. Yüksüz testte batarya paketi 1.modülün maksimum ve minimum sıcaklıkları

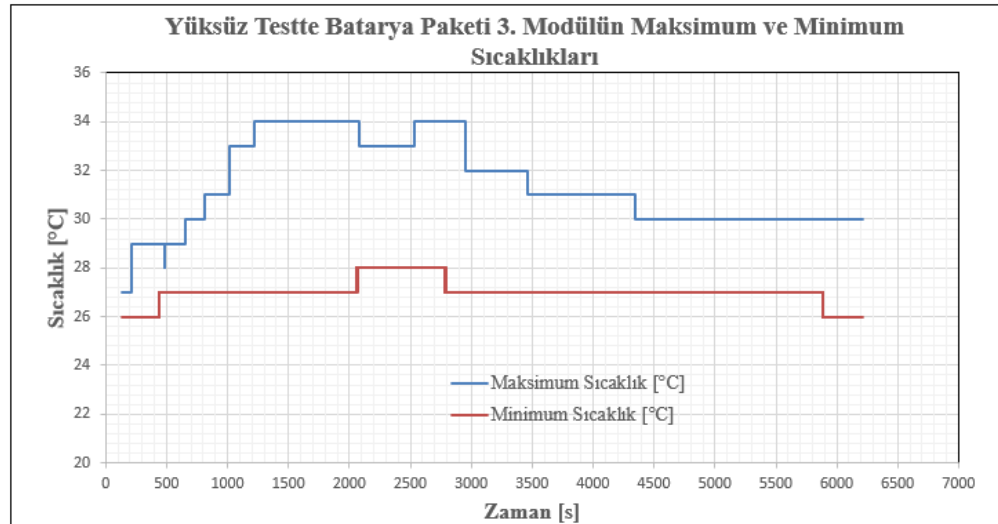
Batarya paketi 10 adet modülden oluşmaktadır. Modüller 5'er adet seri bağlı iki koldan oluşmaktadır ve her bir kol paralel bağlıdır. Bu 10 modülün tamamı özdeştir ve özellikleri çizelge 3.3.'te verilmiştir. Modüllerin yönetimi batarya dağıtım ünitesi adı verilen elektronik kontrolcü üzerinden yapılmaktadır. Modüllerdeki hücre sıcaklıkları maksimum ve minimum değerleri anlık olarak iki ayrı sinyal ile takip edilmektedir. Şekil 4.3'te 1.modülün yüksüz test boyunca maksimum ve minimum hücre sıcaklıkları görülmektedir. Batarya 1.modülünün maksimum hücre sıcaklığı 35°C'ye ulaşırken minimum hücre sıcaklığı 30°C olarak kaydedilmiştir. Elektrikli araçlarda bataryaların optimum çalışma aralığı

düşünüldüğünde batarya termal yönetim sisteminin, yüksüz çalışma şartlarında yeterli bir performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak testler ağustos ayında yürütüldüğünden bazı anlarda sıcaklık ani pikler yapabilmektedir.

Diğer modüllerin ayrı ayrı minimum ve maksimum hücre sıcaklıkları aşağıdaki şekil 4.4, şekil 4.5, şekil 4.6 ve şekil 4.7’de sırasıyla verilmektedir. Birinci modüldeki durumun aynısı diğer modüller için de geçerlidir.

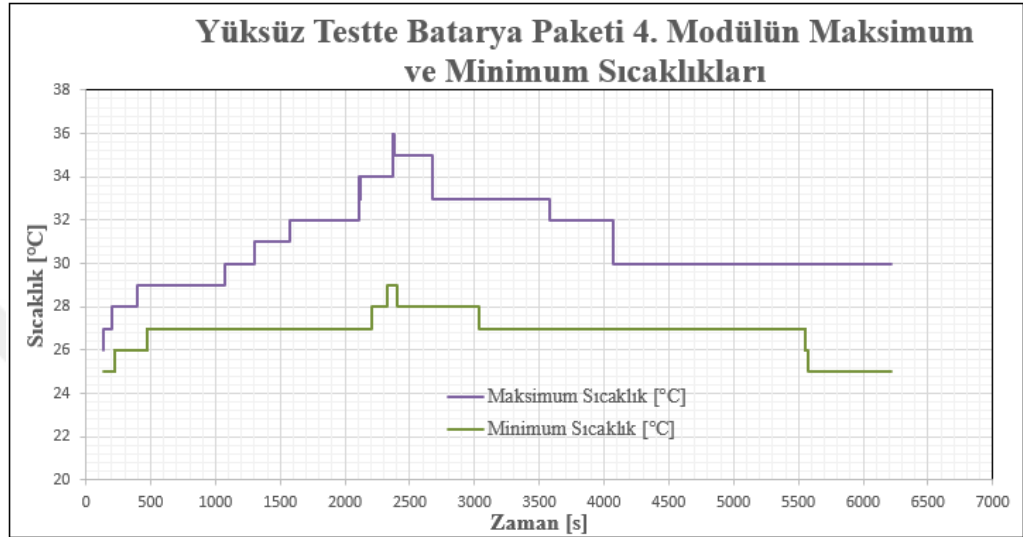


Şekil 4. 4. Yüksüz testte batarya paketi 2.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

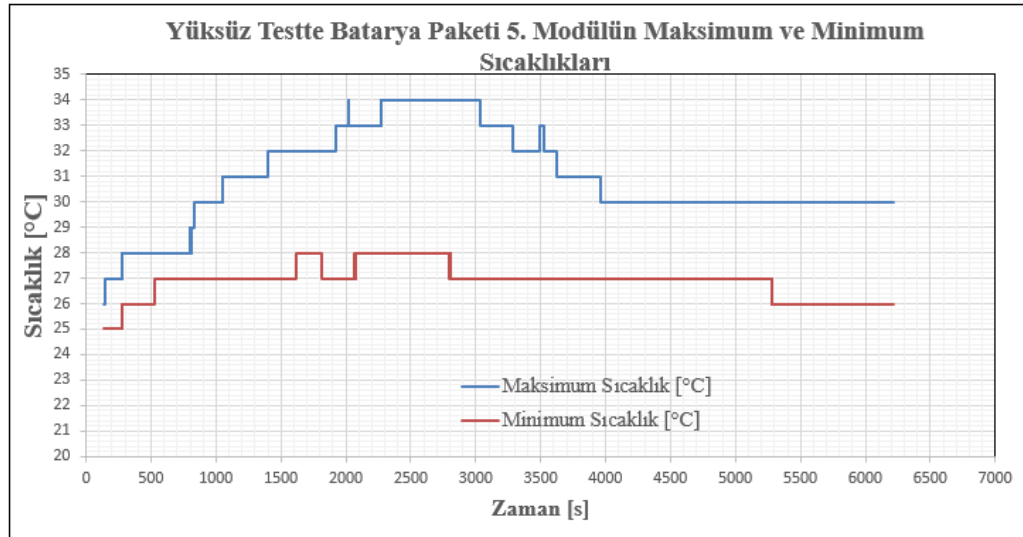


Şekil 4. 5. Yüksüz testte batarya paketi 3.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.4'te ikinci modülünün maksimum hücre sıcaklığı 34°C ve minimum hücre sıcaklığı 29°C olmuştur. Şekil 4.5'te üçüncü modülünün maksimum hücre sıcaklığı 34°C iken minimum hücre sıcaklığı 28°C olarak kaydedilmiştir. Sıcaklık bilgisi minimum ve maksimum olarak iki ayrı sinyalle iletildiğinden minimum sıcaklıkların pik değerleri, maksimum sıcaklıkların ise minimum değerleri vardır.

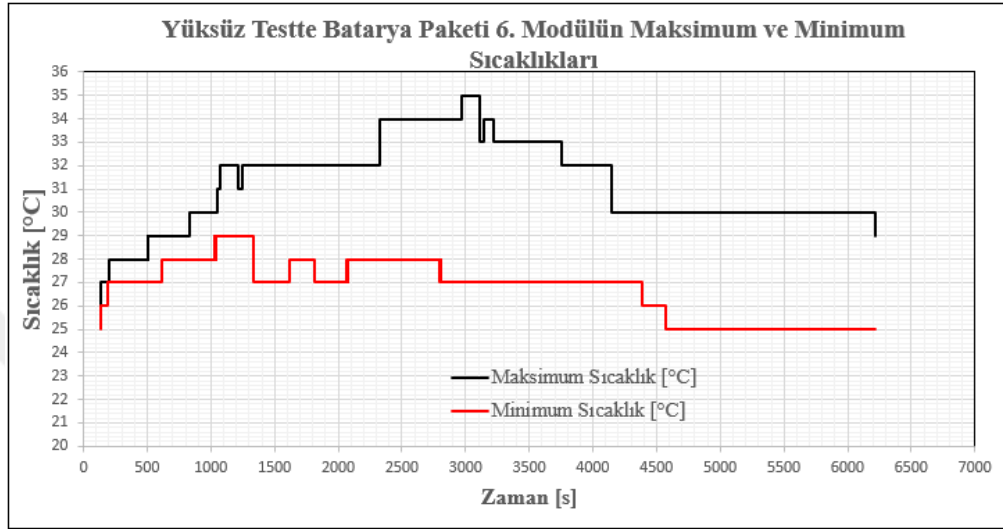


Şekil 4. 6. Yüksüz testte batarya paketi 4. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

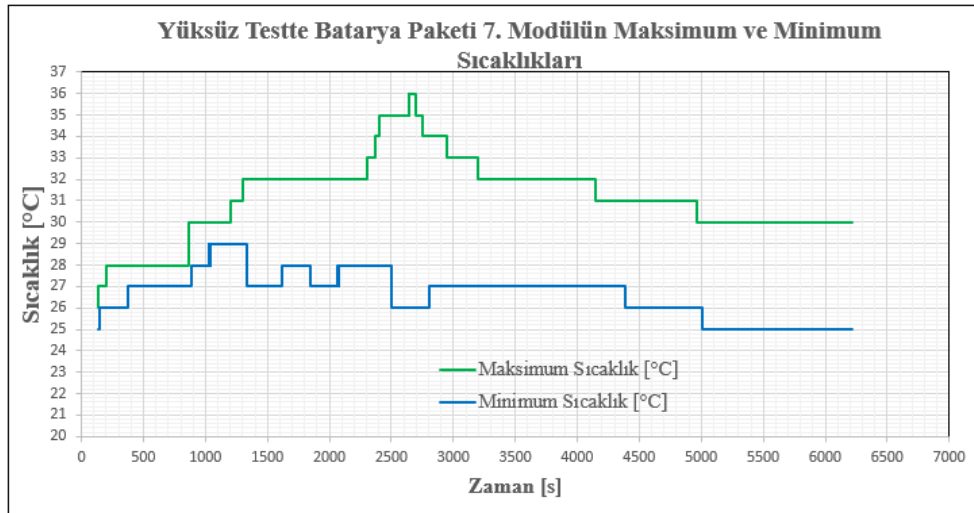


Şekil 4. 7. Yüksüz testte batarya paketi 5. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.6’da dördüncü modülün maksimum hücre sıcaklığı 36°C ve minimum hücre sıcaklığı 29°C olmuştur. Şekil 4.7’de beşinci modülün maksimum hücre sıcaklığı 34°C iken minimum hücre sıcaklığı 28°C olarak kaydedilmiştir. Sıcaklık bilgisi minimum ve maksimum olarak iki ayrı sinyalle iletildiğinden minimum sıcaklıkların pik değerleri, maksimum sıcaklıkların ise minimum değerleri vardır.



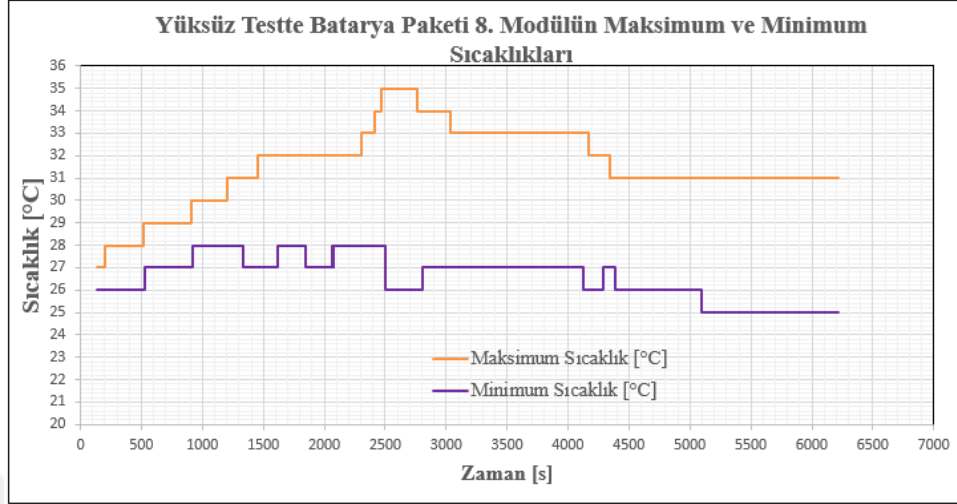
Şekil 4. 8. Yüksüz testte batarya paketi 6.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları



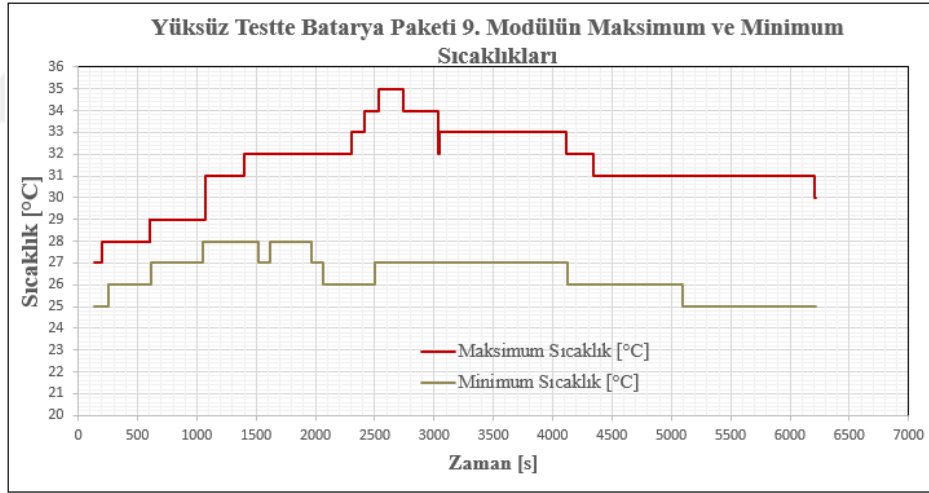
Şekil 4. 9. Yüksüz testte batarya paketi 7.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.8’de altıncı modülün maksimum hücre sıcaklığı 35°C ve minimum hücre sıcaklığı 29°C olmuştur. Şekil 4.9’da yedinci modülün maksimum hücre sıcaklığı

36°C iken minimum hücre sıcaklığı 29°C olarak kaydedilmiştir. Sıcaklık bilgisi minimum ve maksimum olarak iki ayrı sinyalle iletildiğinden minimum sıcaklıkların pik değerleri, maksimum sıcaklıkların ise minimum değerleri vardır.

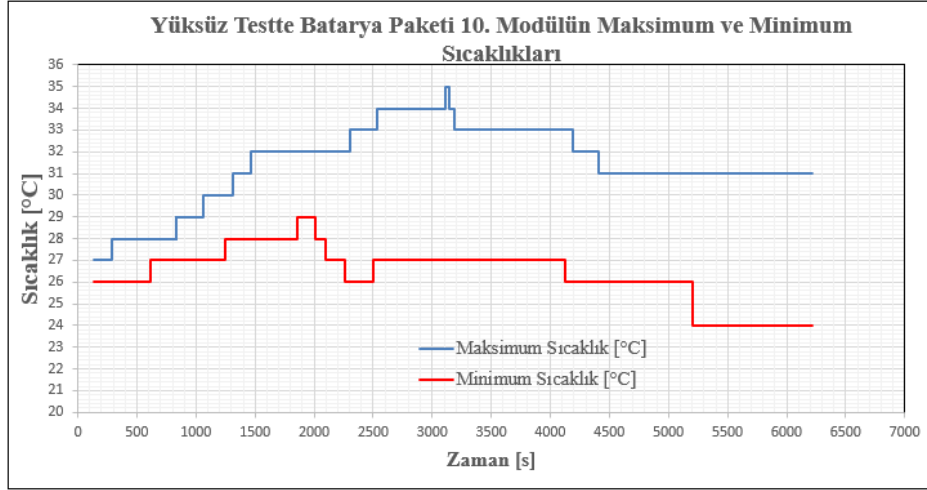


Şekil 4. 10. Yüksüz testte batarya paketi 8.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları



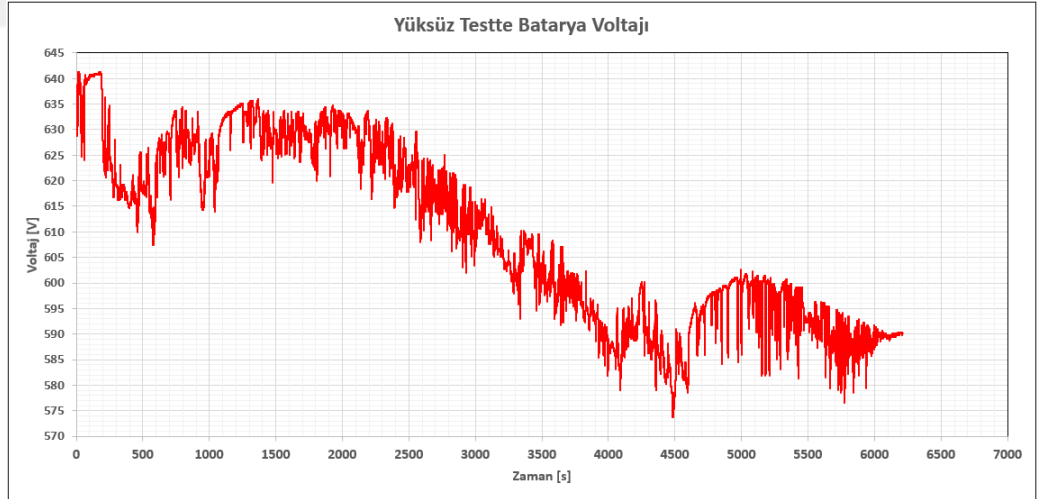
Şekil 4. 11. Yüksüz testte batarya paketi 9.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.10'da sekizinci modülün maksimum hücre sıcaklığı 35°C ve minimum hücre sıcaklığı 28°C olmuştur. Şekil 4.11'de dokuzuncu modülün maksimum hücre sıcaklığı 35°C iken minimum hücre sıcaklığı 28°C olarak kaydedilmiştir. Sıcaklık bilgisi minimum ve maksimum olarak iki ayrı sinyalle iletildiğinden minimum sıcaklıkların pik değerleri, maksimum sıcaklıkların ise minimum değerleri vardır.



Şekil 4. 12. Yüksüz testte batarya paketi 10.modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

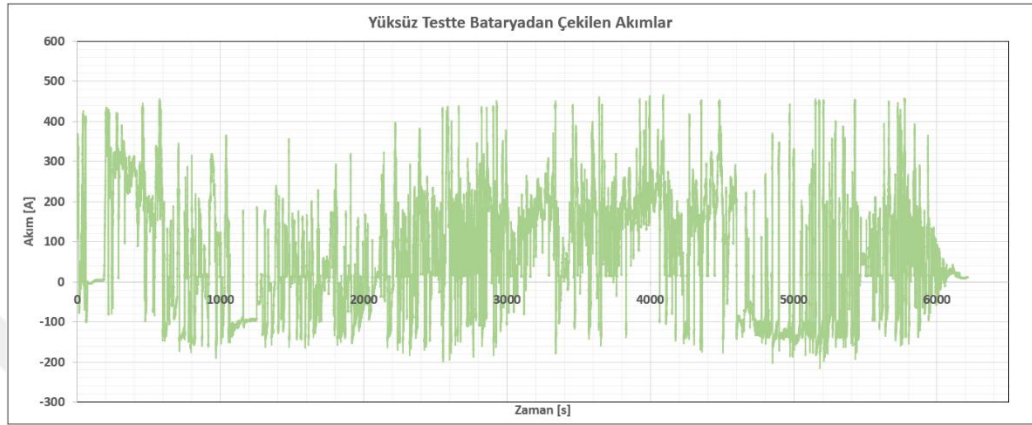
Şekil 4.12’de sekizinci modülün maksimum hücre sıcaklığı 35°C ve minimum hücre sıcaklığı 29°C olmuştur. Yüksüz durumda batarya modüllerinin sıcaklıkları, şekillerden de anlaşılacağı üzere termal yönetim sistemi sayesinde kararsızlık göstermemektedir. Test sırasında batarya voltajı şekil 4.13’te verilmektedir.



Şekil 4. 13. Yüksüz testte batarya voltajı

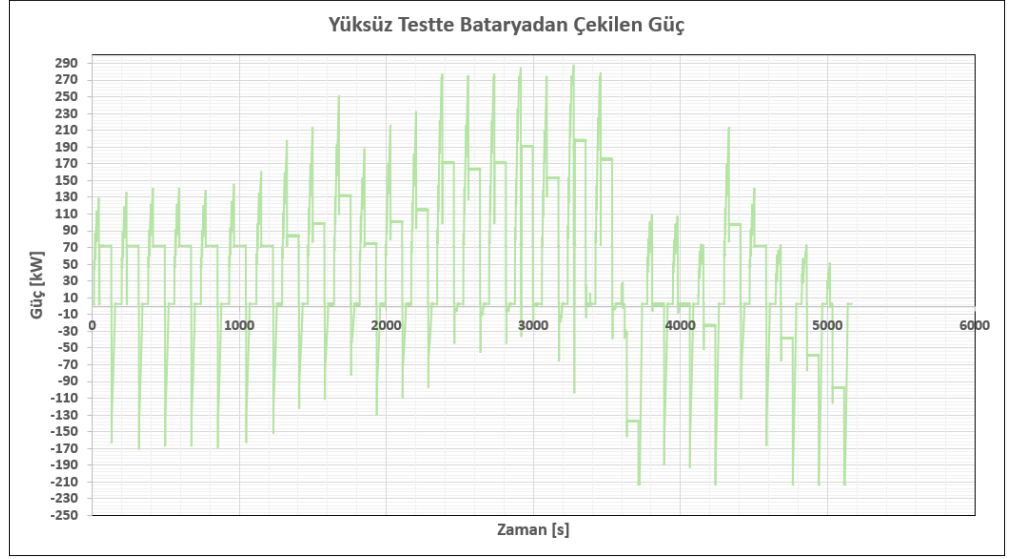
Batarya paketini oluşturan her bir modülün nominal voltajının 115.92 V olduğu bilinmektedir. Beşer adet seri bağlı modül iki paralel kolda bağlı olduğundan batarya paketinin nominal voltajı da 579.6 V’dur. Batarya paketinin operasyon voltajı ise 450 V ile 657 V arasındadır. Ancak şekil 4.13’te batarya operasyon voltajının 570 V ila 641 V arasında değişen değerler aldığı görülmektedir. Bunun

nedeni çalışma esnasında çekilen akım ve sistemin elektriksel yükündeki farklılıklardır. Ayrıca hücre bazında hesaplamalar yapıldığında bir batarya hücresinin minimum voltajı 3.18 V ve maksimum hücre voltajı ise 3.56 V olarak hesaplanmıştır. Bu durum bataryaların çalışma prensibi gereği beklenen bir durumdur.



Şekil 4.14. Yüksüz testte bataryadan çekilen akım ve batarya şarj akımı

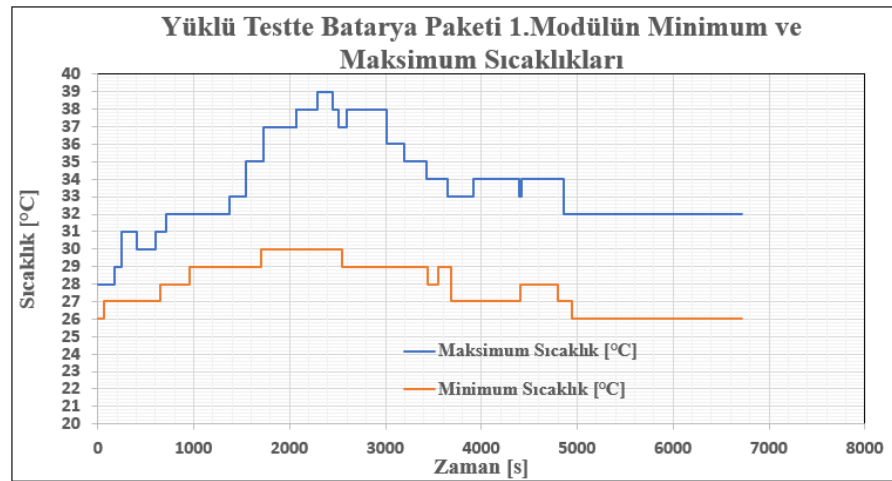
Şekil 4.14, batarya paketinden çekilendeşarj akımlarını ve geri kazanımlı frenlemeyle elde edilen şarj akımlarını göstermektedir. Burada akımların negatif değer alması bataryadan akım çekildiği anlamına gelmektedir. Bunun anlamı araçtan güç talebi olmasıdır. Bataryalardeşarj olurken akım negatif işaretle ifade edilir ancak hesaplamalar mutlak değer alınır. Batarya yüksüz testtedeşarj olurken çekilen maksimum akım 215.7 A, sızıntı akımları göz ardı ettiğimizde en düşük akım ise 5.4 A seviyelerindedir. Araç seyir halinde rejeneratif frenle şarj olurken maksimum şarj akımı 466 A olurken minimum şarj akımı 5.2 A seviyelerinde seyretmektedir. Bu akım değerleri tüm batarya paketine ait verilerdir. Çizelge 3.3'te verilen batarya paketi özellikleri 5 adet seri bağlı modülün iki kolda paralel bağlantıyla bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır. Paketi oluşturan her bir modül 180 adet seri ve 2 paralel konfigürasyonla prizmatik LFP hücrelerden meydana gelmektedir. Bataryadan çekilen akım ve batarya voltajı verileri, aracın enerji tüketimi hesabında kullanılmıştır.



Şekil 4. 15. Yüksüz testte bataryadan çekilen güçler

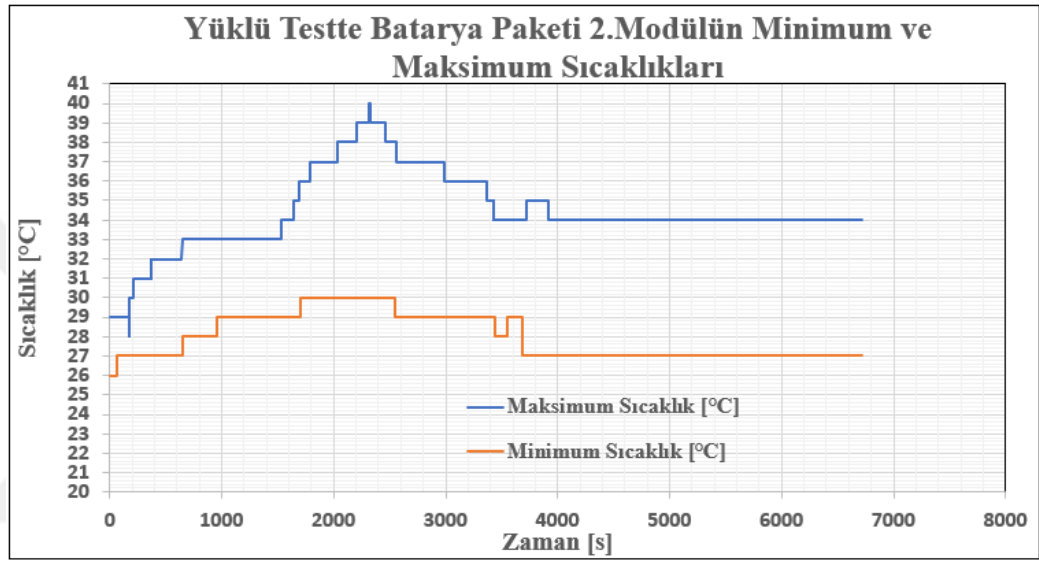
Aracın yüksüz testi esnasında batarya paketinden çekilen anlık güçler, anlık akım ve voltaj verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.15.'te bu hesaplanan güçler gösterilmektedir. Bataryayı rejeneratif frenle şarj eden maksimum güç 212.87 kW olarak bulunmuştur. Test sırasında ortalama şarj gücü 65.4 kW olarak bulunmuştur. Maksimum deşarj gücü 115.06 kW olarak hesaplanırken ortalama deşarj gücü 77.47 kW olarak saptanmıştır. Deşarj gücünün pik yaptığı anlarda araç yokuş tırmanmaktadır.

4.2. Yüklü Test Sonuçları

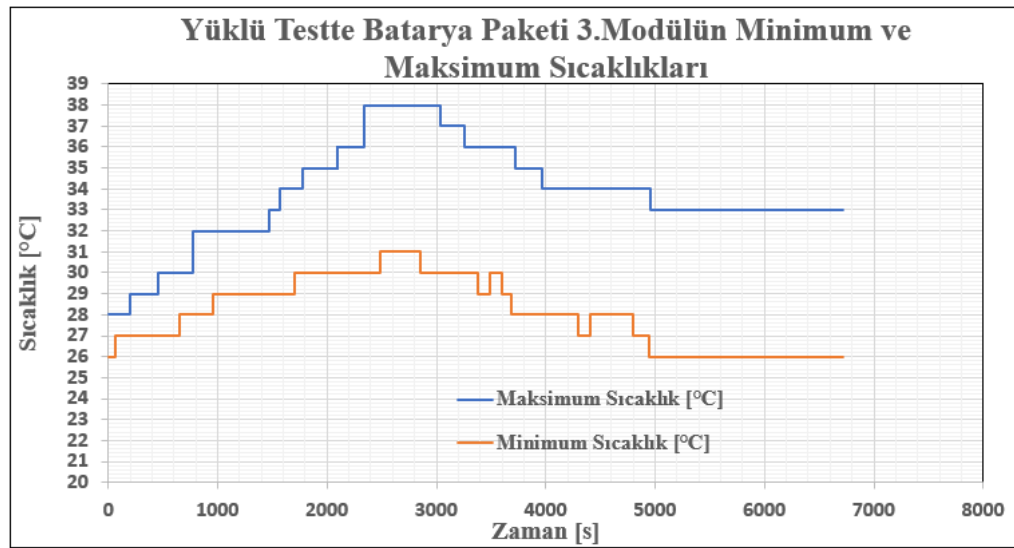


Şekil 4. 16. Yüklü testte batarya paketi 1.modülün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.16’da aracın yolcu yüklü senaryoda batarya paketi birinci modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere araç yüklü iken test boyunca modülün azami sıcaklığı 39°C ve en düşük sıcaklığı 30°C olarak kaydedilmiştir. Yüksüz test ile kıyaslandığında aradaki farkın $\pm 5^{\circ}\text{C}$ civarında olduğu anlaşılmaktadır. Buradan hareketle yüklü koşulların yüksüz koşullara göre batarya paketinde daha fazla ısının oluştuğu anlaşılmaktadır.

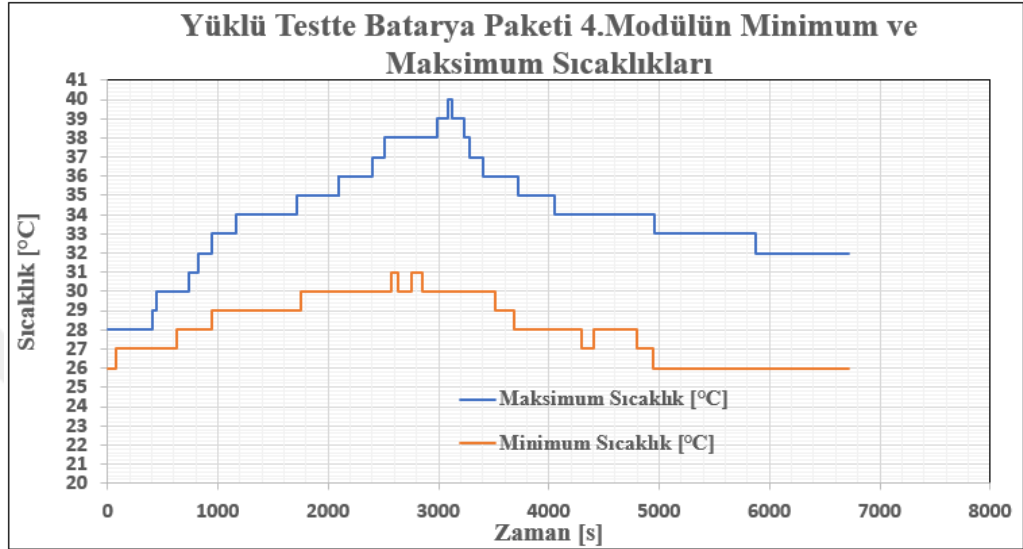


Şekil 4. 17. Yüklü testte batarya paketi 2. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

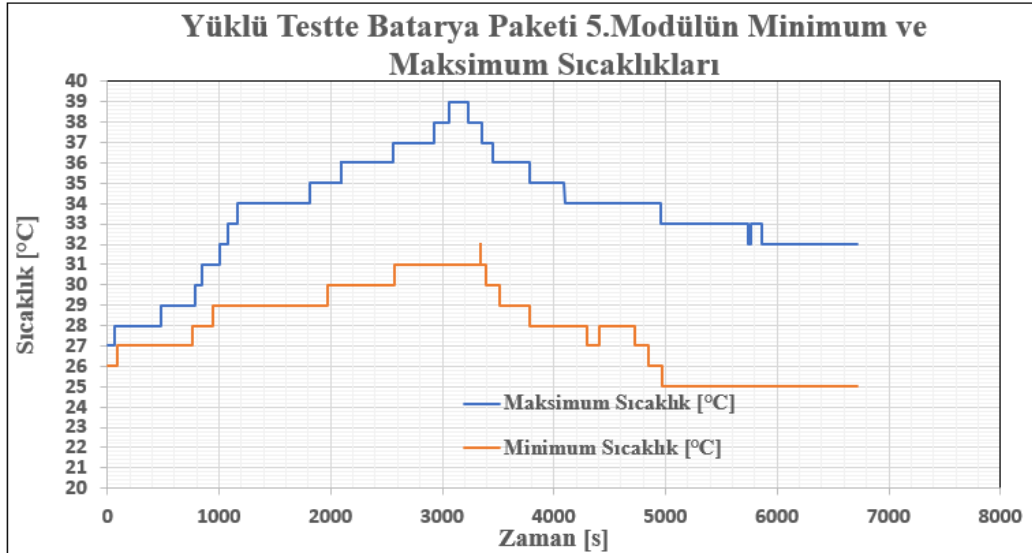


Şekil 4. 18. Yüklü testte batarya paketi 3. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.17.'de ikinci modülünün yüklü testte maksimum hücre sıcaklığı 40°C ve minimum hücre sıcaklığı 31°C olmuştur. Şekil 4.18.'deki üçüncü modülünün hücre sıcaklıklarının karakteristiği ikinci modüle bezerdir. Maksimum hücre sıcaklığı 38°C iken minimum hücre sıcaklığı 31°C olarak kaydedilmiştir.

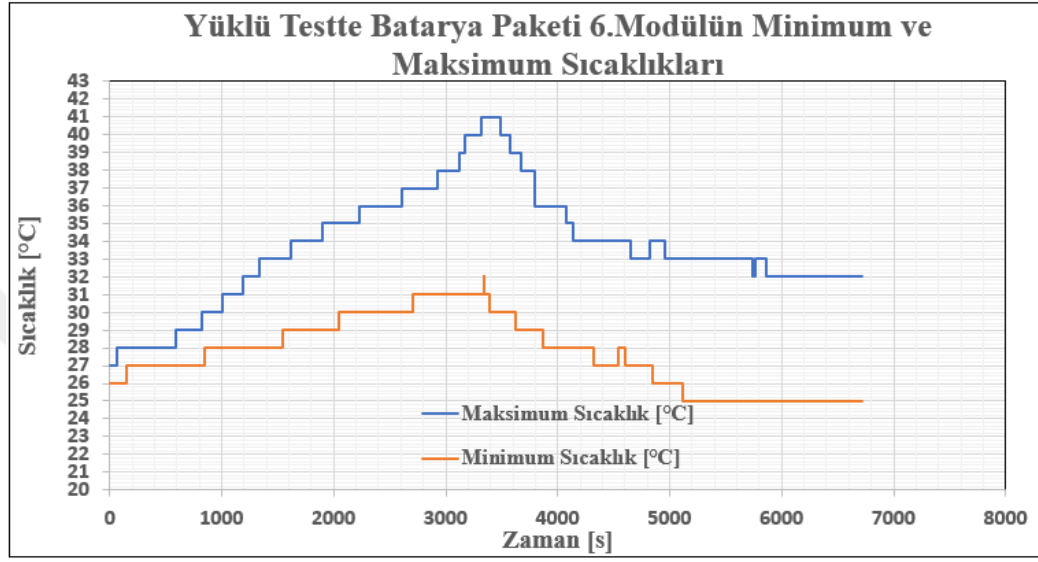


Şekil 4. 19. Yüklü testte batarya paketi 4. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

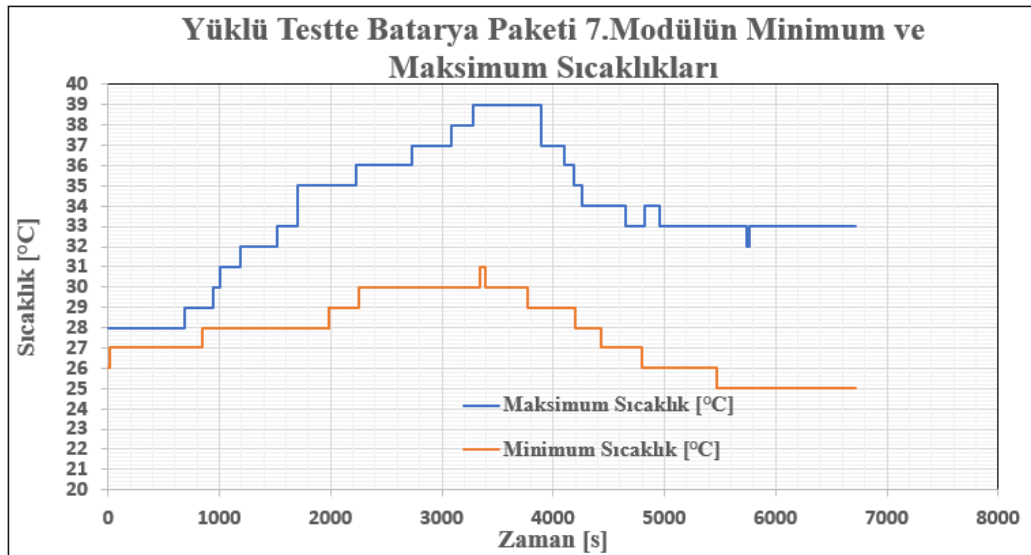


Şekil 4. 20. Yüklü testte batarya paketi 5. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.19’da dördüncü modülün maksimum hücre sıcaklığı 40°C ve minimum hücre sıcaklığı 31°C olmuştur. Şekil 4.20’de beşinci modülün maksimum hücre sıcaklığı 39°C iken minimum hücre sıcaklığı 32°C olarak kaydedilmiştir. Batarya modüllerinin sıcaklık karakteristikleri birbirlerine benzemektedir. Yüksüz test ile kıyaslandığında tüm modüllerin sıcaklıkları arasında $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ila $\pm 6^{\circ}\text{C}$ fark vardır.

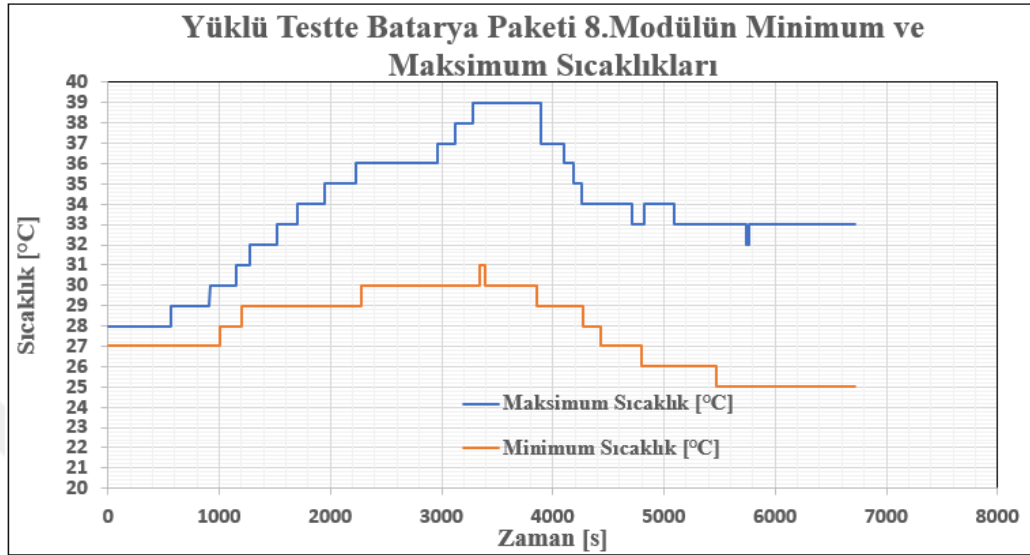


Şekil 4. 21. Yüklü testte batarya paketi 6. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

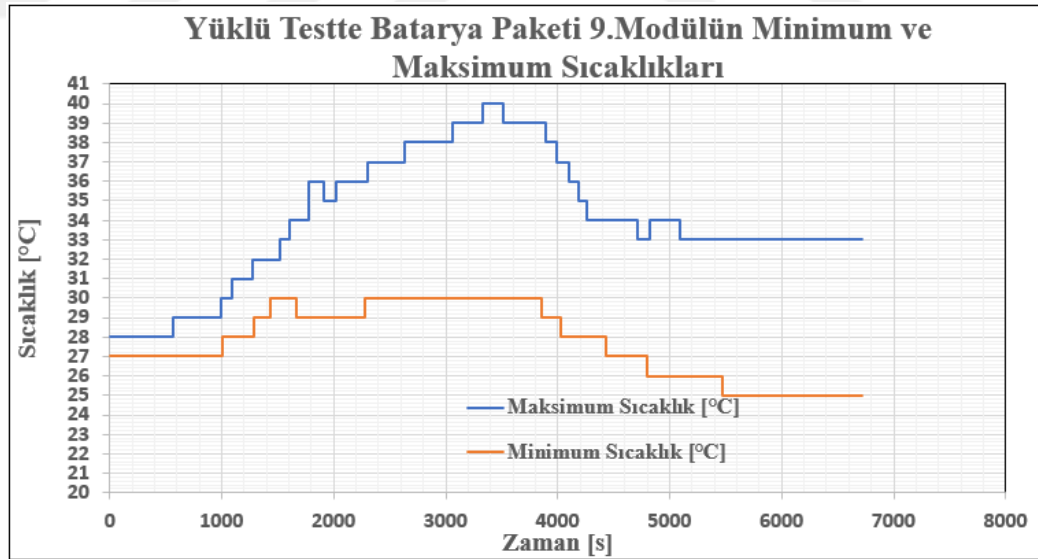


Şekil 4. 22. Yüklü testte batarya paketi 7. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.21’de altıncı modülün maksimum hücre sıcaklığı 41°C ve minimum hücre sıcaklığı 32°C olmuştur. Şekil 4.22’de yedinci modülün maksimum hücre sıcaklığı 39°C iken minimum hücre sıcaklığı 31°C olarak kaydedilmiştir.

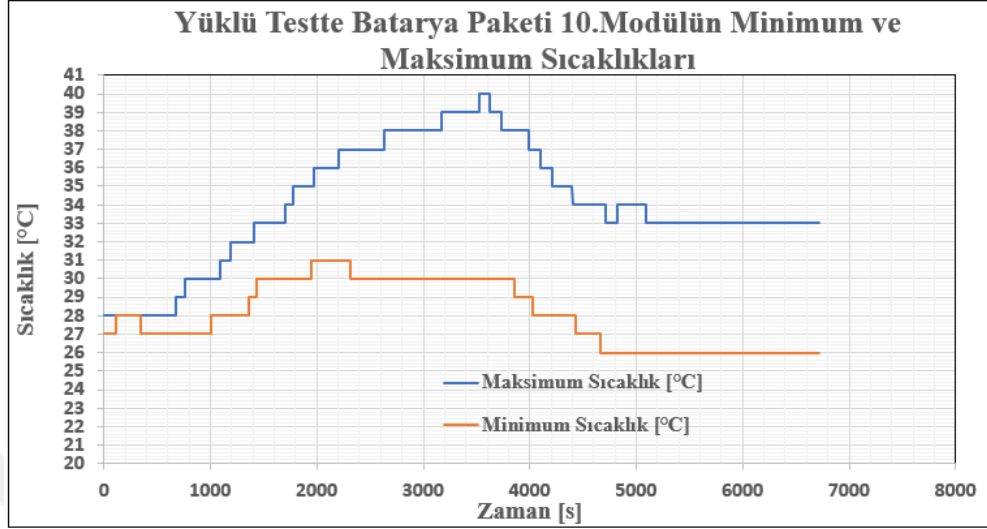


Şekil 4. 23. Yüklü testte batarya paketi 8. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları



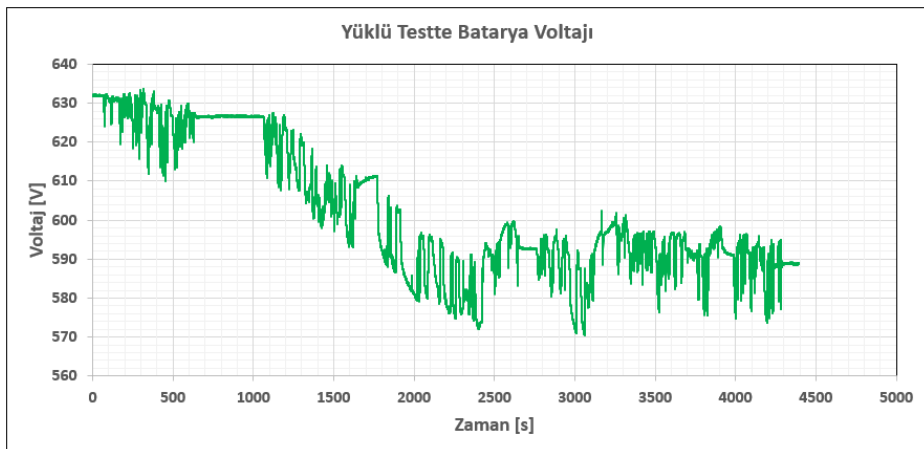
Şekil 4. 24. Yüklü testte batarya paketi 9. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.23'te sekizinci modülün maksimum hücre sıcaklığı 39°C ve minimum hücre sıcaklığı 31°C olmuştur. Şekil 4.24'te dokuzuncu modülün maksimum hücre sıcaklığı 40°C iken minimum hücre sıcaklığı 30°C olarak bulunmuştur.



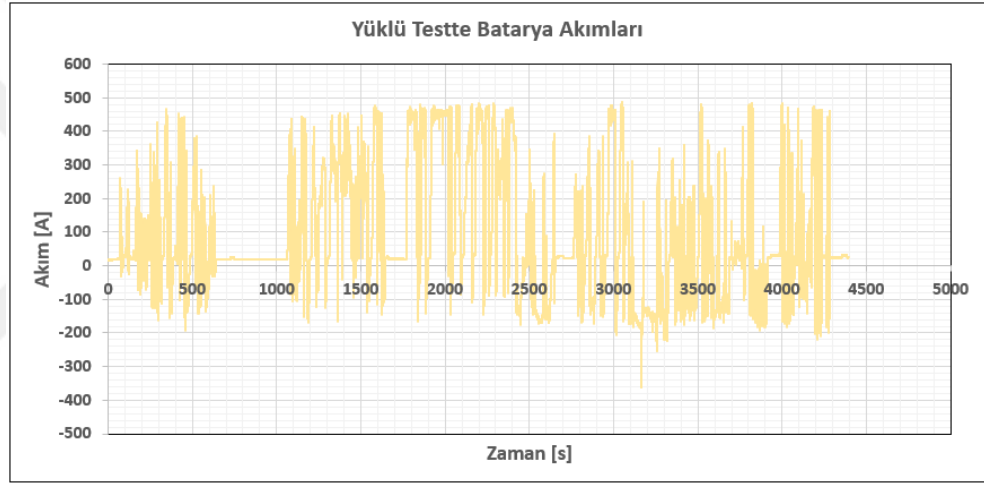
Şekil 4. 25. Yüklü testte batarya paketi 10. modülünün maksimum ve minimum sıcaklıkları

Şekil 4.25'te onuncu modülün maksimum hücre sıcaklığı 40°C ve minimum hücre sıcaklığı 31°C olmuştur. Yüklü ve yüksüz testlerin batarya sıcaklıklarından da anlaşılabileceği üzere yüklü koşullarda araç daha çok zorlandığından bataryalardan talep edilen gücün artması, batarya sıcaklıklarının da yüksüz testten daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Yüklü testte batarya voltajına ait değişimler şekil 4.26.'da verilmektedir.



Şekil 4. 26. Yüklü testte batarya voltajı

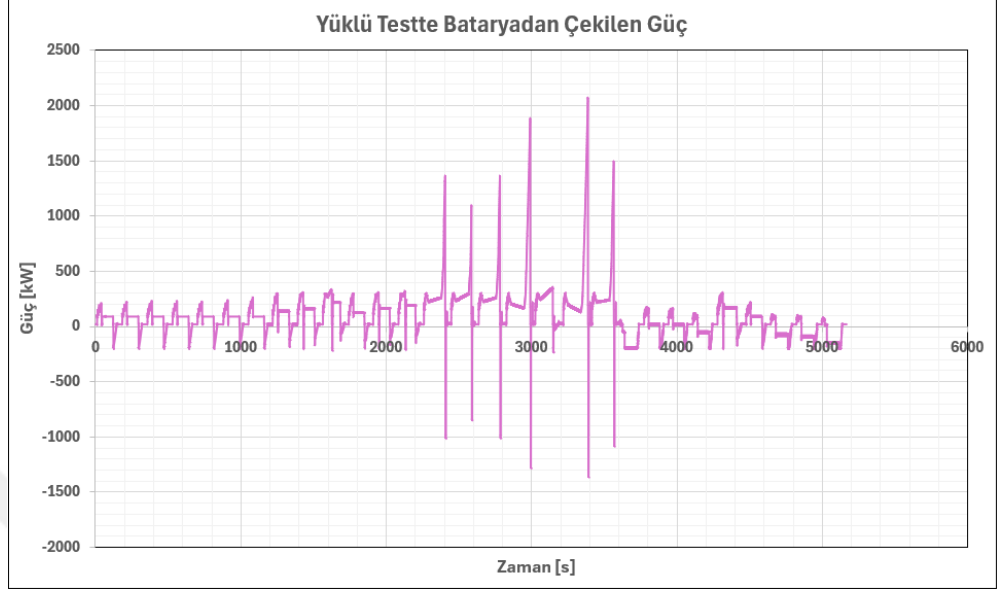
Aracın yüklü testinde ve yüksüz testinde batarya voltajı seviyeleri sayısal değerler bakımından benzerlik göstermektedir. Yüklü testte voltajın düşüş hızı aracın elektriksel yüküyle de orantılı olarak gerçekleşmiştir. Yüklü testte operasyon voltajı 633.66 V ile 570.45 V arasında değişkenlik göstermiştir. Batarya nominal voltajı 579.6 V'dir. Bu voltaj değerleri tüm batarya paketine ait voltaj değerleridir. Paketi oluşturan her bir modülün voltajı 115.92 V'dir. Batarya paketi 5 adet seri bağlı iki paralel kolda toplam 10 adet LFP modülden oluşmaktadır. Her modülde hücresel bazda 180 seri bağlı ve 2 paralel bağlı toplam 360 adet prizmatik LFP hücre bulunmaktadır. Toplamda pakette 3600 hücre bulunmaktadır.



Şekil 4. 27. Yüklü teste bataryadan çekilen akımlar ve batarya şarj akımları

Şekil 4.27.'de batarya paketinden çekilendeşarj akımlarını ve geri kazanımlı frenlemeyle elde edilen şarj akımları verilmektedir. Burada akımların negatif değer alması bataryadan akım çekildiği anlamına gelmektedir. Bataryadan akım çekilmesi araçtan güç talebi olmasıyla mümkündür. Bataryalardeşarj olurken akım negatif işaretle ifade edilir ancak hesaplamalarda mutlak değer alınır. Batarya yüklü testtedeşarj olurken çekilen maksimum akım 373.8 A, en düşük akım 15.2 A seviyelerindedir. Araç seyir halinde rejeneratif frenle şarj olurken maksimum şarj akımı 486.3 A olurken minimum şarj akımı 15 A seviyelerinde seyretmektedir. Bu akım değerleri tüm batarya paketine ait verilerdir. Sızıntı akımlar göz ardı edilmiştir. Bataryadan çekilen akım ve batarya voltajı verileri,

aracın yüklü testteki enerji tüketimi hesabında araç kontrol ünitesi tarafından kullanılmıştır.



Şekil 4. 28. Yüklü testte bataryadan çekilen güçler

Şekil 4.28.'de elektrikli otobüsün tam yolcu yüklü ve iklimlendirme sistemlerinin açık olarak test edildiği durumda batarya paketinden çekilen güçler verilmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere araç yüklü iken iklimlendirme sistemleri de açık olarak test edildiğinden bataryadan çekilen güçler yüksüz teste göre çok daha fazladır. Bataryayı rejeneratif frenle şarj eden maksimum güç 1362.41 kW olarak bulunmuştur. Test sırasında ortalama şarj gücü 111.95 kW olarak bulunmuştur. Maksimum deşarj gücü 2054.47 kW olarak hesaplanırken ortalama deşarj gücü 151.34 kW olarak saptanmıştır. Deşarj gücünün pik yaptığı anlarda araç yokuş tırmanmaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada LF12 elektrikli otobüsünün yüklü ve yüksüz çalışma koşullarında gerçek zamanlı verileri CAN Bus hattından toplanmış ve analiz edilerek batarya parametreleri ve enerji tüketim değerleri iki durum için ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar yüklü koşullarda bataryalardan çekilen gücün ve sürüş maliyetinin yüksüz durumdan daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Yüklü koşullarda araç bataryasından talep edilen güç daha fazla olduğundan bataryadan çekilen akıma ve artan iç dirence bağlı olarak bataryada daha fazla ısı üretildiği anlaşılmaktadır. Batarya sıcaklıkları incelendiğinde LF12 aracın batarya soğutma sisteminin hücreleri yüksüz durumda optimum çalışma sıcaklığında tutacak performansı gösterdiği anlaşılmıştır. Operasyonun güvenliği açısından batarya termal yönetim sistemi yüklü durumda optimum çalışma sıcaklığında tutmakta zorlandığı ancak güvenli aralıkta tuttuğu görülmektedir. Yüklü durum ile yüksüz durum batarya sıcaklıkları arasında 5°C ila 6°C fark olduğu anlaşılmaktadır.

Aynı yol şartları ve rotada yapılan çalışmalarda en kötü senaryoyu gerçekleyebilmek amacıyla iklimlendirme gibi yardımcı sistemler de dahil edilerek tam yolcu kapasitesinde sürüş ile iklimlendirme sistemlerinin kapalı olduğu yüksüz durum kıyaslandığında yüklü aracın yol topolojisi, çevresel etmenler ve sürücü davranışı gibi faktörlerden çok daha fazla etkilendiği anlaşılmıştır. Yüklü senaryoda aracın harcadığı enerji ortalama olarak, yolcu yüksüz senaryodan %45 daha fazladır. Batarya SOC değerleri arasındaki farktan da anlaşılacağı üzere SOC değişimi her iki senaryo için birbirinden oldukça farklıdır. Bataryadan çekilen akımların ortalaması yüklü senaryoda daha yüksek olmaktadır. Yüklü durumda batarya doluluk oranı %22.2 daha fazla düşmüştür.

Bu çalışmada ideal çalışma koşulları ile en kötü çalışma koşulları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda ısıtma, soğutma ve havalandırma gibi yardımcı sistemlerin, rotanın topografisi gibi coğrafi faktörlerin, sürücü davranışlarının, trafik yoğunluğunun ve diğer çevresel faktörlerin ayrı ayrı etkilerini incelemek için yapılan çalışmalar komponent bazlı yapılmalıdır.

Gelecek yıllarda yapılacak çalışmalarda elektrikli aracın batarya konfigürasyonun değiştirilip test senaryolarının çeşitlendirilmesi hem batarya termal yönetiminin hem de enerji sarfiyatlarının daha iyi anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Yapılacak olan çalışmalarda araç bataryalarından güç tüketen diğer elektronik komponentlerin etkilerini incelemek için her bileşenin yüklü yüksüz koşullardaki etkilerini ayrı ayrı incelemek faydalı olacaktır. Ayrıca testler şehir dışı bir rotada gerçekleştirildiği için durak simülasyonu her bir kilometrede araç durdurularak 15 saniye beklenmiştir. Bunun yerine şehir içinde gerçek hat güzergahında gerçek yolcularla yapılacak çalışmalar, yolcu doluluğu yüzdesinin etkilerinin incelenmesine de olanak sağlayacaktır.

Bu türden çalışmalar özel izinlerle ve daha fazla kaynakla yürütülebilir. Bu teze konu olan çalışma, elektrikli otobüslerin verimlilikleri ve sürdürülebilirliklerinin araştırılması alanlarında yapılacak çalışmalara yeni bir bakış açısı kazandıracaktır.

KAYNAKÇA

- Alarrouqi, R. A., Bayhan, S., & Al-Fagih, L. (2022). Battery Electric Buses Operating in Qatar: A Comprehensive Energy Consumption Analysis. *2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2022*, 1236-1241. <https://doi.org/10.1109/ITEC53557.2022.9813924>
- Amine, K., Belharouak, I., Chen, Z., Tran, T., Yumoto, H., Ota, N., Myung, S. T., & Sun, Y. K. (2010). Nanostructured anode material for high-power battery system in electric vehicles. *Advanced Materials*, 22(28), 3052-3057. <https://doi.org/10.1002/adma.201000441>
- Balakrishnan, P. G., Ramesh, R., & Prem Kumar, T. (2006). Safety mechanisms in lithium-ion batteries. İçinde *Journal of Power Sources* (C. 155, Sayı 2, ss. 401-414). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.002>
- Bamrah, P., Chauhan, M. K., & Sikarwar, B. S. (2022). CFD Analysis of Battery Thermal Management System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2178(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2178/1/012035>
- Basma, H., Mansour, C., Haddad, M., Nemer, M., & Stabat, P. (2020). Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. *Energy*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>
- BMC. (2024, Nisan 14). <https://www.bmc.com.tr/otobus>.
- Bulut, E., Albak, E. İ., Sevilgen, G., & Öztürk, F., (2022). Prediction and optimization of the design decisions of liquid cooling systems of battery modules using artificial neural networks. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH* , vol.46, no.6, 7293-7308. [10.1002/er.7637](https://doi.org/10.1002/er.7637)
- Bulut, E., Albak, E. İ., Sevilgen, G., & Öztürk, F., (2022). MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF LIQUID COOLING SYSTEM FOR A TWELVE-CELL BATTERY MODULE. *HEAT TRANSFER RESEARCH* , vol.53, no.4, 15-32.
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., & Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. İçinde *Journal of Energy Chemistry* (C. 59, ss. 83-99). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
- Choudhari, V. G., Dhoble, D. A. S., & Sathe, T. M. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery

used for electric vehicle. İçinde *Journal of Energy Storage* (C. 32). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101729>

Deng, Y., Ma, Z., Song, X., Cai, Z., Pang, P., Wang, Z., Zeng, R., Shu, D., & Nan, J. (2018). From the charge conditions and internal short-circuit strategy to analyze and improve the overcharge safety of LiCoO₂/graphite batteries. *Electrochimica Acta*, 282, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.06.081>

Google maps. (2024, Mayıs 12).

Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., & Ouyang, M. (2019). A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. İçinde *eTransportation* (C. 1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>

İnce, B., & Başlamışlı, S. Ç. (2021). Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 559-575. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.626431>

ISUZU. (2024, Nisan 14). <https://www.isuzu.com.tr/modeller/toplu-tasima>.

Kapatsila, B., Gris  , E., Crumley, M., & El-Geneidy, A. (2024). Empirical analysis of battery-electric bus transit operations in Portland, OR, USA. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104120>

KARSAN. (2024, Nisan 14). <https://www.karsan.com/tr/100-elektrikli>.

Kumaresan, K., Sikha, G., & White, R. E. (2008). Thermal Model for a Li-Ion Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(2), A164. <https://doi.org/10.1149/1.2817888>

Lai, X., Zheng, Y., Zhou, L., & Gao, W. (2018). Electrical behavior of overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion cells. *Electrochimica Acta*, 278, 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.05.048>

Li, J. (t.y.). *Modeling and Simulation of Lithium-ion Power Battery Thermal Management Key Technologies on New Energy Vehicles*. <https://link.springer.com/bookseries/16377>

Liu, Z., Guo, X., Meng, N., Yu, Z., & Yang, H. (2022a). Study of thermal runaway and the combustion behavior of lithium-ion batteries overcharged with high current rates. *Thermochimica Acta*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179276>

Liu, Z., Guo, X., Meng, N., Yu, Z., & Yang, H. (2022b). Study of thermal runaway and the combustion behavior of lithium-ion batteries overcharged with high current rates. *Thermochimica Acta*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179276>

Lu, W., Belharouak, I., Liu, J., & Amine, K. (2007). Thermal properties of Li₄/3Ti₅/3O₄/LiMn₂O₄ cell. *Journal of Power Sources*, 174(2), 673-677. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.199>

Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., & Tan, N. (2021). A Review Study on Battery Management Systems in Electric Vehicles. *Gazi University Journal of Science*, 8(2), 234-275. [https://doi.org/GU J Sci, Part A, 8\(2\): 234-275 \(2021\)](https://doi.org/GU J Sci, Part A, 8(2): 234-275 (2021))

OTOKAR. (2024, Nisan 14). <https://commercial.otokar.com.tr/otobus/sehir-ici-otobus>.

Ouyang, M., Ren, D., Lu, L., Li, J., Feng, X., Han, X., & Liu, G. (2015). Overcharge-induced capacity fading analysis for large format lithium-ion batteries with Li_yNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ + Li_yMn₂O₄ composite cathode. *Journal of Power Sources*, 279, 626-635. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.051>

Önçağ, A. Ç., Üzkat, H., Yeşil, Z. C., & Eliyi, U. (2021). A comparative evaluation on electric buses: Izmir city field analysis. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(1), 43-51. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.99582>

Reshma, P., & Manohar, V. J. (2023). Collaborative evaluation of SoC, SoP and SoH of lithium-ion battery in an electric bus through improved remora optimization algorithm and dual adaptive Kalman filtering algorithm. *Journal of Energy Storage*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107573>

Samancı, B. (2010, Eylül 12). *CAN Bus nedir? CAN protokolü incelemesi*. <http://www.barissamanci.net/Makale/15/can-bus-nedir-can-protokolu-incelemeesi/>.

Szilassy, P. Á., & Földes, D. (2022). Consumption estimation method for battery-electric buses using general line characteristics and temperature. *Energy*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125080>

Sevilgen, G., Bayram, H., & Tatari, D., (2024). The 1d Model of Hybrid Heat Pump System Designed and Prototyped for Electric Vehicles. *CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING*, vol.60, no.105050, 1-25. [10.1016/j.csite.2024.105050](https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105050)

Sevilgen, G., Dursun, H., & Kılıç, M., (2023). Experimental and Numerical Investigations on the Thermal Performance of Three Different Cold Plates

Designed for the Electrical Vehicle Battery Module. SUSTAINABILITY , vol.15, no.19. [10.3390/su151914162](https://doi.org/10.3390/su151914162)

Sevilgen, G., Kiliç, M., Bayram, H., Başak, E., & Dursun, H., (2023). The Investigation of the innovative Hybrid Heat Pump System Designed and Prototyped for Heating Process of Electric Vehicles. AEJ - ALEXANDRIA ENGINEERING JOURNAL , vol.68, 417-435. [10.1016/j.aej.2023.01.045](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.01.045)

Tahirağaoğlu, B., Sevilgen, G., & Hamut, H. S., (2024). The Numerical and Experimental Investigation of the Transient Behaviours of a Lithium-ion Pouch Battery Cell Under Dynamic Conditions. CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING , vol.62, no.105169, 1-21. [0.1016/j.csite.2024.105169](https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105169)

Tao, C., Ye, Q., Wang, C., Qian, Y., Wang, C., Zhou, T., & Tang, Z. (2020). An experimental investigation on the burning behaviors of lithium ion batteries after different immersion times. *Journal of Cleaner Production*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118539>

TEMSA. (2024, Nisan 14). <https://www.temsa.com/tr/tr/sehir-ici/avenue-electron>.

Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J. Y., & Saidur, R. (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. İçinde *Journal of Energy Storage* (C. 32). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771>

Tong, H. Y., & Ng, K. W. (2023). Developing electric bus driving cycles with significant road gradient changes: A case study in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104819>

TOPAL, O. (2019). TÜRKİYE TOPLU ULAŞIMINDA ELEKTRİKLİ OTOBÜSLER. *European Journal of Science and Technology*, 155-167. <https://doi.org/10.31590/ejosat.512606>

ULAŞIM A.Ş. (2024, Nisan 14). <https://www.ulasim-as.com/tr/>.

Vector Informatik GmbH. (2024, Mayıs). <https://www.vector.com/se/en/>.

Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. İçinde *Journal of Power Sources* (C. 208, ss. 210-224). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>

Weiss, M., Dekker, P., Moro, A., Scholz, H., & Patel, M. K. (2015). On the electrification of road transportation - A review of the environmental, economic,

and social performance of electric two-wheelers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 348-366. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.007>

Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. İçinde *Energy Conversion and Management* (C. 182, ss. 262-281). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>

Xu, Z., Wang, J., Lund, P. D., & Zhang, Y. (2023). Analysis of energy consumption for electric buses based on low-frequency real-world data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103857>

Yöntem, B., Eker, Ş., & Dündar, S. (t.y.). Türkiye İnşaat Mühendisliği 18. İçinde *Teknik Kongre ve Sergisi* (C. 2022).