



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



TAMAMEN ELEKTRİKLİ ARAÇ UYGULAMALARI İÇİN GÜÇ AKTARMA SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

İlker TURP

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

İzmir

2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**TAMAMEN ELEKTRİKLİ ARAÇ
UYGULAMALARI İÇİN GÜÇ AKTARMA
SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ**

İlker TURP

Danışman: Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Enerji Teknolojisi Yüksek Lisans Programı

İzmir

2023

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Tamamen Elektrikli Araç Uygulamaları İçin Güç Aktarma Sisteminin Performans Analizi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

03/07/2023

İlker TURP

ÖZET**TAMAMEN ELEKTRİKLİ ARAÇ UYGULAMALARI İÇİN GÜÇ
AKTARMA SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ**

TURP, İlker

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mete ÇUBUKÇU

Temmuz 2023, 154 sayfa

Tamamen elektrikli araçların (TEA) çevre dostu olması, bakım ve enerji maliyetlerinin düşük olması, yüksek performanslı sürüş desteği sağlaması ilgi çekici olsa da, sürüş menzili ile ilgili endişeler devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, elektrikli araç güç aktarma sistemi analiz edilerek, sürüş menziline etki eden faktörlerin anlaşılması ve sistem verimliliği ile bütünsel ilişkisinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Üreticiler detaylı performans verilerini paylaşmadığından, güç aktarma sistemi hakkında tatmin edici bilgiler elde etmek hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, iki tekerlekli TEA için “maxi scooter” BMW C Evolution verileri kullanılmıştır. “Python” yazılımı kullanılarak, WMTC sürüş çevriminde aracın enerji, güç, tork ve menzil değerleri hesaplanmış ve grafikler elde edilmiştir. Ağırlığın, sürüş yüzeyinin ve rüzgârın performansa olan etkisi incelenmiştir. Dört tekerlekli TEA için Volkswagen ID.3 verileri MATLAB/Simulink modelinde kullanılmış, araç performansı detaylı olarak incelenmiştir. WLTP, NEDC ve FTP-75 sürüş çevrimlerinde aracın enerji, güç, yakıt tüketimi ve sürüş menzili hesaplanmıştır. Farklı sürüş çevrimlerinin, yük ağırlıklarının, hava sıcaklığının ve sürüş yüzeylerinin enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Tamamen elektrikli araçlar, İki tekerlekli elektrikli araçlar, Güç aktarma organları.



ABSTRACT**PERFORMANCE ANALYSIS OF POWERTRAIN SYSTEM FOR
ALL ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS**

TURP, İlker

Master's Thesis in Solar Energy

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mete ÇUBUKÇU

July 2023, 154 pages

While it is interesting that all-electric vehicles (AEV) are environmentally friendly, have low maintenance and energy costs, and provide high-performance driving support, concerns about driving range remain. In this thesis, it is aimed to analyze the electric vehicle powertrain system, to understand the factors affecting the driving range and to reveal the holistic relationship with the system efficiency. Since manufacturers do not share detailed performance data, it is aimed to obtain satisfactory information about the powertrain.

In this study, “maxi scooter” BMW C Evolution data for two-wheeled AEV is used. By using the "Python" software, the energy, power, torque and range values of the vehicle were calculated in the WMTC driving cycle and graphics were obtained. The effects of weight, driving surface and wind on performance were investigated. Volkswagen ID.3 data for the four-wheeled AEV was used in the MATLAB/Simulink model, and vehicle performance was examined in detail. Energy, power, fuel consumption and driving range of the vehicle were calculated in WLTP, NEDC and FTP-75 driving cycles. The effects of different driving cycles, load weights, air temperature and driving surfaces on energy efficiency were investigated.

Keywords: All-electric vehicles, Two-wheeled electric vehicles, Powertrains.

ÖNSÖZ

Ülkemizde, Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG) 2019 yılı sonunda elektrikli otomobil modellerini tanıttığında, elektrikli araçlara olan ilgim üst seviyeye taşındı. Geleceğin araçlarının tamamen elektrikli olacağına inanıyorum. Karbon emisyonunun azaltılmasına katkısının yanı sıra, elektrik enerjisi depolama teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynadığını düşünüyorum. Bu çalışma sayesinde tamamen elektrikli bir aracın tüm bileşenlerini tanıma fırsatı buldum. Çalışmamın bu teknoloji hakkında kaynak olarak kullanılabileceğine inanıyorum. Üretici ülke olarak bu alanda istihdam edilecek iş gücü ihtiyacı sürekli artış gösterecek ve ülke ekonomisine ciddi kazanç sağlayacaktır.

İZMİR

03/07/2023

İlker TURP



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	i
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ.....	xxiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxvi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1 Tarihçe	8
2.2 Elektrikli Araç Güç Aktarma Mimarisi	13
2.3 Piller.....	15
2.3.1 Kurşun-Asit Piller	16
2.3.2 Nikel-Metal Hidrit Piller	19
2.3.3 Lityum-İyon Piller	21
2.3.4 Lityum-Hava Piller	24
2.3.5 Çinko-Hava Piller	28
2.3.6 Lityum-Sülfür Piller.....	30
2.4 Süper Kapasitörler	32
2.4.1 Kapasitörlerin Tarihçesi.....	32
2.4.2 Süper Kapasitörlerin Sınıflandırılması	36

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.5 Elektrikli Çekiş Motorları	40
2.6 Güç Elektroniği Sistemi	47
2.6.1 Gerilim Kaynağı Eviriciler.....	50
2.6.2 Akım Kaynağı Eviriciler.....	51
2.6.3 Z-Kaynağı Eviriciler	52
2.6.4 DA/DA Dönüştürücüler	53
2.6.4.1 Tek Yönlü DA/DA Dönüştürücü	54
2.6.4.2 Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü	56
2.7 Regeneratif Frenleme.....	57
3. MATERYAL VE YÖNTEM	60
3.1 Analiz Akış Şemaları	60
3.2 İki Tekerlekli Elektrikli “Maxi-Scooter” Bileşenleri.....	62
3.3 İki Tekerlekli Araç İçin Tanımlamalar ve Hesaplama Aşamaları	65
3.4 TEA Bileşenleri.....	68
3.5 Dört Tekerlekli TEA Referans Uygulaması.....	75
3.5.1 Sürüş Çevrimi Kaynağı (Drive Cycle Source).....	76
3.5.2 Çevre (Environment) Bloğu.....	77
3.5.3 Boylamsal Sürücü (Longitudinal Driver) Bloğu.....	77
3.5.4 Denetleyici (Controller) Bloğu	80
3.5.5 Binek Araç (Passenger Car) Bloğu	81
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	90
4.1 İki Tekerlekli TEA hesaplamaları.....	90
4.2 Dört Tekerlekli TEA Simülasyonu	102
4.2.1 Güç ve Enerji Analizi.....	112

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

4.2.2 Yüksüz Ağırlıkta Dört Tekerlekli TEA Performans Bilgileri	115
4.2.3 Dört Tekerlekli TEA Motor Parametreleri	118
4.2.4 Ağırlığın Enerji Tüketimine Etkisi	120
4.2.5 Sıcaklığın Enerji Tüketimine Etkisi.....	121
4.2.6 Çekiş Pili Akım ve Gerilim Değerleri	123
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	124
5.1 Sonuçlar	124
5.2 Öneriler	127
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	129
TEŞEKKÜR	153
ÖZGEÇMİŞ.....	154

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Araçların sınıflandırılması	6
Şekil 2.2. Tekerlek çekişli TEA'ların yapı türleri.....	7
Şekil 2.3. TEA temel bileşenleri	8
Şekil 2.4. Stratingh'in küçük elektrikli arabası	8
Şekil 2.5. Morrison'ın dört kişilik aracı.....	9
Şekil 2.6. Gaston Planté'nin 1883'te yayınladığı Elektrik Araştırması çizimleri ...	10
Şekil 2.7. Tesla Roadster.....	12
Şekil 2.8. Li-iyon tabanlı TEA'ların tarihçesi ve ilgili şarj yetenekleri.....	12
Şekil 2.9. Araç güç aktarma sistemi mimarisi	13
Şekil 2.10. Elektrikli tahrik sistem mimarisi.....	14
Şekil 2.11. EA tipik güç sistemi mimarisi	15
Şekil 2.12. Şarj edilebilir pillerin ve hidrojen yakıt hücrelerinin özellikleri	15
Şekil 2.13. Orta boy araç maliyeti ve araç menzilinin duyarlılık grafikleri.....	16
Şekil 2.14. Pb-asit pil kimyası	17
Şekil 2.15. Farklı elektrokimyasal sistemler için özgül enerji - özgül güç grafiği	19

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.16. NiMH pilin şematik diyagramı.....	19
Şekil 2.17. NiMH piller	20
Şekil 2.18. Li-iyon pillerin şarj ve deşarj mekanizması	21
Şekil 2.19. Bir Li-iyon pilin deşarj sırasında çalışması	22
Şekil 2.20. Bir Li-iyon pilin şarj sırasında çalışması	22
Şekil 2.21. 18650 (18 mm x 65 mm) LiCoO ₂ pilin şematik diyagramı	23
Şekil 2.22. 2016'da ve 2025'e kadar tahmin edilen, tüm önde gelen malzemelerin Li-iyon pil pazar paylarının kütle yüzdesi	23
Şekil 2.23. Dört tip Li hava pili için şematik yapılandırmalar	25
Şekil 2.24. Bir aprotik Li-O ₂ hücresinin şeması	26
Şekil 2.25. Farklı pil depolama teknolojileri için özgül enerji değerleri	27
Şekil 2.26. Zn-hava pilinin çalışma prensibi ve elektrotlardaki reaksiyonlar	28
Şekil 2.27. (a) İki elektrotlu, (b) Üç elektrotlu şarj edilebilir Zn-hava pilinin şematik yapılandırmaları	29
Şekil 2.28. (a) Li-S pil şeması, (b) Li-S pildeki katotun ve karşılık gelen (ara) ürünlerin şarj-deşarj gerilim profilleri	30
Şekil 2.29. Leyden kavanozu.....	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.30. (a) Eski radyolardan alınan mumlu kağıt ve folyo kapasitör örnekleri, (b) Eski mika kapasitörler	33
Şekil 2.31. Yakıt hücreleri ve yanma enerjisi dahil olmak üzere enerji depolama cihazlarının Ragon grafiği.....	35
Şekil 2.32. Süper kapasitör bankası	35
Şekil 2.33. Süper kapasitörlerin sınıflandırılması	36
Şekil 2.34. Çift katmanlı modellerin şematik gösterimi.	37
Şekil 2.35. EÇKS'nin şarj ve deşarj aşamaları	37
Şekil 2.36. Faradaik reaksiyonlar gösteren EÇKS	38
Şekil 2.37. Sözde kapasitörlerin sınıflandırılması	39
Şekil 2.38. Hibrit süper kapasitör şematik diyagramı	39
Şekil 2.39. Basit sabit mıknatıslı DA motorun çalışmasını açıklayan diyagram ...	40
Şekil 2.40. (a) Dâhilî sabit mıknatıslı senkron motor, (b) Asenkron motor, (c) Anahtarlama relüktans motor.....	42
Şekil 2.41. Dört kutuplu senkron relüktans motorun yapısı	43
Şekil 2.42. Bir EA'da kullanılan güç elektroniği.....	47
Şekil 2.43. Elektrikli bir araçta güç elektroniği arayüzleri	48
Şekil 2.44. Otomotiv endüstrisinde kullanılan standart evirici topolojileri	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.45. (a) Tek fazlı yarım köprü, (b) Tam köprü evirici	50
Şekil 2.46. (a) Gerilim kaynağı evirici devresi, (b) Girdi ve çıktı değişkenleri	51
Şekil 2.47. Tek fazlı akım kaynaklı evirici	52
Şekil 2.48. Z-kaynak eviricinin genel yapısı	52
Şekil 2.49. DA/DA dönüştürücülerin elektrikli araçlardaki uygulamaları	53
Şekil 2.50. Düşük yükseltme DA/DA çok kademeli güç dönüştürücüsünün veya türetilmiş iki aşamalı topolojilerin güç devresi	54
Şekil 2.51. Üç kollu yarım köprü çift yönlü DA/DA dönüştürücü.....	56
Şekil 2.52. EA'lar için enerji akışlarının yenilenmesi ve yönlendirilme.....	57
Şekil 3.1. İki tekerlekli TEA performans analiz aşamaları.....	61
Şekil 3.2. Dört tekerlekli TEA performans analiz aşamaları.....	61
Şekil 3.3. BMW C evolution	62
Şekil 3.4. Elektrifikasyon nedeniyle benzinli modele göre bileşen ve düzen farklılıkları	63
Şekil 3.5. (a) Aksesuarları sökülmüş BMW C Evo, (b) Pil modülü.....	63
Şekil 3.6. (a) Evirici bağlantı soketi, (b) motor statoru, (c) motor kasası	64
Şekil 3.7. BMW C Evolution evirici	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.8. Araca etki eden kuvvetler	65
Şekil 3.9. “Python” iki tekerlekli TEA hesaplamaları için kütüphane dosyalarının tanımlanması.	67
Şekil 3.10. Volkswagen ID.3 Pro.....	68
Şekil 3.11. Volkswagen ID.3 elektrikli tahrik sistemi	68
Şekil 3.12. Motor sürücü ünitesi	69
Şekil 3.13. Stator sargıları.....	69
Şekil 3.14. Motor kesiti.....	70
Şekil 3.15. Tek vitesli şanzıman 0MH/EQ310-1P	71
Şekil 3.16. Evirici demontajı.....	72
Şekil 3.17. Evirici blok şeması.....	73
Şekil 3.18. Yüksek voltaj DA/DA dönüştürücü.....	74
Şekil 3.19. Güç aktarma sistemi yapılandırması.....	75
Şekil 3.20. Sürüş Çevrimi Kaynağı.....	76
Şekil 3.21. Boylamsal Hız İzleme Denetleyicisi.....	78
Şekil 3.22. Boylamsal Sürücü Modeli blok parametreleri	79
Şekil 3.23. Denetleyici bloğu.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.24. 3 Serbestlik Derecesine Sahip Boylamsal Araç Gövdesi blok parametreleri	82
Şekil 3.25. Boylamsal Tekerlek bloğu.....	84
Şekil 3.26. TEA Simulink modeli	87
Şekil 4.1. İki tekerlekli TEA için araç veri tanımlamaları.....	90
Şekil 4.2. İki tekerlekli TEA hesaplamaları için WMTC sürüş çevrimi dosyası. .	90
Şekil 4.3. İki tekerlekli TEA hesaplamaları için WMTC Hız-Zaman grafiği	91
Şekil 4.4. BMW C Evolution arka lastik 160/60-R15 bilgileri	91
Şekil 4.5. Lastik çapı hesabı.	92
Şekil 4.6. BMW C Evolution ön yüzey ölçüleri.....	93
Şekil 4.7. Aerodinamik sürüklenme kuvveti hesabı.	93
Şekil 4.8. Yuvarlanma direnci kuvveti hesabı.	94
Şekil 4.9. (a) Tırmanma kuvveti hesabı, (b) Çekiş kuvveti grafiği	95
Şekil 4.10. (a) Çekiş torku hesabı, (b) Çekiş torku grafiği	96
Şekil 4.11. (a) Çekiş gücü hesabı, (b) Çekiş gücü grafiği	97
Şekil 4.12. Sürüş çevrimi boyunca toplam mesafe.....	97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.13. Araç pil değeri ve toplam sürüş menzili.	98
Şekil 4.14. Motor tepe torku hesabı.	98
Şekil 4.15. Motor torku grafiği.	99
Şekil 4.16. BMW C Evolution motor hız, tork ve güç grafiği	100
Şekil 4.17. Pil parametreleri.....	102
Şekil 4.18. Motor parametreleri.	105
Şekil 4.19. TEA Simulink modeli Elektrik Tesisi alt sistemi	105
Şekil 4.20. Boylamsal Sürücü bloğu parametreleri.....	107
Şekil 4.21. 3 Serbestlik Derecesine Sahip Boylamsal Araç Gövdesi blok parametreleri	108
Şekil 4.22. McPherson dikme süspansiyonu.....	109
Şekil 4.23. Kampanalı ve disk fren	110
Şekil 4.24. Tekerlekler ve Frenler bloğu parametreleri.	112
Şekil 4.25. TEA modeli canlı komut dosyası.....	113
Şekil 4.26. WLTP Class 3 için hız, pil SOC ve yakıt ekonomisi grafikleri.....	116
Şekil 4.27. (a) WLTP Class 3, (b) NEDC, (c) FTP-75 çevrimlerinde hız ve SOC grafikleri.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

Şekil 4.28. WLTP çevriminde motor hızı ve motor torku grafikleri..... 118

Şekil 4.29. Değişen araç ağırlıklarında motor torku..... 119

Şekil 4.30. Değişen araç ağırlıklarında pil akımı grafikleri..... 120

Şekil 4.31. Farklı sıcaklıklarda pil SOC grafiği 122

Şekil 4.32. Çekiş pili gerilim, akım ve güç grafikleri..... 123

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Kurşun asit pillerin avantajları ve dezavantajları	18
Tablo 2.2. Farklı NiMH pil ambalajı türlerinin karşılaştırması	21
Tablo 2.3. Üretici, araç ve pil malzemesi	24
Tablo 2.4. Çeşitli pil sistemleri için özgül enerji yoğunlukları.....	32
Tablo 2.5. Çekiş motoru performans değerlendirmesi.....	44
Tablo 2.6. Farklı motor tiplerinin avantajları, dezavantajları ve kullanımı	45
Tablo 2.7. Çok kademeli dönüştürücü uygulamalarında; güvenilirlik, maliyet, verimlilik, avantaj, dezavantajlar	55
Tablo 3.1. Araç bilgileri	62
Tablo 3.2. ID.3 çekiş pili bilgileri	70
Tablo 3.3. ID.3 diğer bilgiler	71
Tablo 3.4. “ZF” fren sistemi teknik özellikleri	75
Tablo 3.5. WLTP test çevrimleri	77
Tablo 3.6. Denetleyici bloğu.....	80
Tablo 3.7. Güç Aktarma Organları bloğu	82

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1. Yuvarlanma direnci katsayıları	94
Tablo 4.2. Değişen yolcu ağırlıklarında pil, motor ve menzil değerleri.....	100
Tablo 4.3. Değişen sürüş yüzeylerinde pil, motor ve menzil bilgileri.....	101
Tablo 4.4. Harekete zıt değişen rüzgâr hızının pil, motor ve menzile etkisi.	102
Tablo 4.5. Araç pil parametreleri.....	103
Tablo 4.7. Pnömatik lastikler için yaklaşık yuvarlanma direnci katsayıları.....	106
Tablo 4.8. Çekiş katsayısı.....	107
Tablo 4.9. Yol yüzeyine göre “Magic Formula” katsayıları	111
Tablo 4.10. Binek Araç bloğu için WLTP verimlilik ve enerji analizi	114
Tablo 4.11. WLTP Class 3 yüksüz araç simülasyon verileri.....	116
Tablo 4.12. WLTP, NEDC ve FTP-75 sürüş çevrimlerine ait veriler.	117
Tablo 4.13. WLTP çevriminde farklı yük ağırlıklarında enerji verimliliği.....	121

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	Amper
Ah	Amper Saat
Cd	Kadmiyum
CO ₂	Karbondiyoksit
e ⁻	Elektron
F	Farad
Fe	Demir
Gt	(Giga Ton – Milyar Ton)
H ₂ SO ₄	Sülfirik asit
H ₂ O	Su
kHz	Kilo Hertz
kW	Kilo Watt
kWh	Kilowatt saat
KOH	Potasyum Hidroksit
Li	Lityum
Li ₂ O ₂	Lityum Peroksit
mA	Mili Amper
Mhz	Mega Hertz
Na	Sodyum
Nm	Newton Metre
NdFeB	Neodimyum
NiMH	Nikel Metal Hidrit
OH	Hidro Oksit
Pb	Kurşun
PbO ₂	Kurşun Oksit
S	Sülfür
SmCo	Samaryum Kobalt

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devamı)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
SO ₄	Sülfat
TiS ₂	Titanyum Disülfid
V	Volt
Wh	Watt saat
Z	Empedans
Zn	Çinko
Zn(OH) ₂	Çinko Hidroksit
<u>Kısaltmalar</u>	
AA	Alternatif Akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
DA	Doğru Akım
DA/AA	Doğru Akım – Alternatif Akım
DA/DA	Doğru Akım – Doğru Akım
DOF	Degrees of Freedom – Serbestlik Derecesi
EA	Elektrikli Araç
EBB	Electronic Brake Booster - Elektronik Fren Güçlendirici
EÇKS	Elektrikli Çift Katmanlı Süper Kapasitörler
ESC	Electronic Stability Control - Elektronik Stabilitate Kontrol
FHEA	Fişli Hibrit Elektrikli Araç
FTP-75	Federal Test Procedure - Federal Test Prosedürü
GKO	Güç-Kütle Oranı
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
IEA	International Energy Agency – Uluslararası Enerji Ajansı
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
İYM	İçten Yanmalı Motor

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
JC08	Japan Cycle 08 - Japonya Çevrimi 08
KPMC	Complex Programmable Logic Device - Karmaşık Programlanabilir Mantık Cihazı
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Mangan Oksit
MKB	Microcontrol Unit – Mikrokontrol Birimi
NASICON	(Na) Super Ionic CONductor - Sodyum Süper İyonik İletken
NCA	Nikel-Kobalt-Alüminyum
NEDC	The New European Driving Cycle - Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi
NMC	Nikel-Manganez-Kobalt
PWM	Pulse Width Modulation - Darbe Genişlik Modülasyonu
SOC	State of Charge – Şarj Durumu
TEA	Tamamen Elektrikli Araç
TOGG	Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu Sanayi ve Ticaret A.Ş.
US06	Supplemental Federal Test Procedure - Tamamlayıcı Federal Test Prosedürü
VW	Volkswagen
WLTC	The Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle - Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Çevrimi
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure - Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Prosedürü
WMTC	World-wide Harmonised Motorcycle Emissions Certification Test Procedure - Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Motosiklet Emisyonları Sertifikasyonu Test Prosedürü
YHEA	Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlu (İYM) araçlara alternatif olarak gösterilen tamamen elektrikli araç (TEA) sektöründeki gelişim ve hızla yükselen satış grafiği, bu araç teknolojisinin ve bileşenlerinin iyi anlaşılması hususunda önem arz etmektedir. International Energy Agency'ye (2021) göre TEA'lar, 2020 yılına gelindiğinde diğer EA türlerini geride bırakarak, yeni tescillerde ve küresel stoklarda yaklaşık %66'lık paya sahip olmuştur. Çin en fazla sayıda elektrikli araca sahip olsa da, Avrupa 2020 yılında elektrikli araçlara ilginin odağı haline gelmiştir. Covid-19 salgınının 2020'nin ilk yarısındaki olumsuz etkileri, tüm araç satışlarının ciddi anlamda azalmasına neden olsa da EA'lar, yılın ikinci yarısında %70'lik artışla %4,6 gibi bir satış oranına ulaşmıştır. 2020 yılının sonlarına doğru ülkelerin iklim değişikliği ile mücadele politikalarının da etkisiyle Avrupa, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) EA satışları toparlanmış, 3 milyon yeni satışın yaklaşık yarısı Avrupa'da gerçekleşirken, Çin ve ABD satışlarda başı çeken ülkeler olmuştur.

2021 yılına gelindiğinde, ilk altı ayda bir önceki yıla göre yaklaşık %170 oranında artış ile 2,65 milyon elektrikli araç satılmıştır. Pandemi öncesi ivme yakalanamamış olsa da, EA'lara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde Tesla 386.000 satış rakamıyla liderliğini korumaktadır. TEA türünde, Model 3 ve Model Y popüler Tesla modelleridir. SAIC Motor, General Motors ve Liuzhou Wuling Motors Co Ltd. ortak üretimi Wuling HongGuang Mini 183.000 gibi çarpıcı rakamlara ulaşmıştır. Volkswagen ID.4 ve ID.3 modelleriyle en üst sıralarda yer alırken, Çin menşeli BYD Han, Renault Zoe, Hyundai Kona, Great Wall ORA R1 ve GAC Aion S küresel satışlarda ilk onda yer alan TEA'lardır (Roland, 2022).

Elektrikli araç (EA) teknolojisi her geçen gün gelişmektedir ve yaygınlaşmasının önündeki engeller ortadan kalkmaya başlamaktadır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması, ulaşım kaynaklı karbon emisyonunun önlenmesi gibi kritik kazanımları beraberinde getirecektir. TEA'larda kullanılan enerji depolama teknolojileri ve güç aktarma sistemleri üzerine çalışmalar devam etmektedir.

26/12/2019 tarihli ve 1945 sayılı Cumhurbaşkanı kararı ekinde, Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu Sanayi ve Ticaret A.Ş. (TOGG) tarafından yapılacak üretim tesisi ile 22 milyar TL yatırım, 300'ü nitelikli ve 4.323 ek istihdam sağlanacağı duyurulmuştur. 5 farklı model ve yıllık 175.000 araç kapasitesi ile 2023 yılında piyasaya çıkacak elektrikli otomobillerin küresel ölçekte marka yaratması beklenmektedir (1945 Sayılı Cumhurbaşkanı Kararı, 2019). TOGG tarafından üretilecek elektrikli otomobiller sayesinde, ülkemiz üretimde yeni bir döneme giriş yapacaktır. Mesleki ve Teknik Eğitimde, Motorlu Taşıtlar Teknolojisi Alanı'nda 72.267 öğrenci öğrenim görürken, bu sektörde 363.730 çalışan bulunmaktadır. TEA teknolojisi aynı zamanda elektrik-elektronik, bilişim, kimya ve yenilenebilir enerji teknolojilerini de içine alan geniş bir sektördür (Meslekî ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü, 2022).

TEA'lar son teknoloji araçlardır ve geleneksel İYM'li araçlardan farklı güç aktarma sistemine sahiptir. Bu araçlar enerji depolama, elektrikli motor ve kontrol yöntemleri, güç elektroniği, mikrodenetleyici ve yazılımda son teknolojileri kullanmaktadır (Kumar and Jain, 2014). TEA'ların maliyetinin düşürülmesi ve benimsenmesinin önündeki engellerin kaldırılmasında güç aktarma sistemi tasarımı önem kazanmaktadır. Maliyete etki eden en önemli bileşenlerden depolama teknolojileriyle, düşük maliyet ile yüksek özgül enerji şu an için mümkün görünmemektedir (Chau, 2015).

ABD Enerji Bakanlığı, EA'lar için 2025 hedeflerinde 100 kW (kilowatt) gücünde elektrikli çekiş gücü hedefi belirlemiştir. Elektrikli tahrik sisteminin hedeflenen güç yoğunluğuna ulaşabilmesindeki belirleyiciler; çekiş motoru, güç elektroniği devreleri ve çekiş gücü pilleridir. Güç yoğunluğunu ve menzili artırırken, maliyetlerin düşürülmesi güç aktarma sisteminin performansına bağlıdır (Husain et al., 2021).

Çin, fosil yakıta olan bağımlılığı azaltmak için EA teşvik politikası uygulamaktadır. Sera gazı salınımını azaltmak için Almanya, İngiltere, Fransa gibi ülkeler EA kullanımına yönelmiş ve İYM'li araç teknolojilerinin kısıtlanması hedefi koymuştur. ABD, EA kullanımını desteklemek için vergi indirimleri getirmiştir. Japonya teşvik ve indirim çözümleri ile EA kullanımını

desteklemektedir. Olumlu çevresel getirilerinin yanında fosil yakıt bağımlılığının azaltılması ülkelerin gelecek hedefleri arasında yer almaktadır (Sun et al., 2019).

EA'lar; çevresel gereklilik, ekonomik getiriler ve araçlarda fosil yakıt bağımlılığına çözüm gibi avantajlarına rağmen, tüketiciler üzerinde yeterli motivasyonu henüz sağlayamamaktadır. EA'ların, pil depolama teknolojilerinden kaynaklanan, uzun menzilli seyahatlerde karşılaşılan kısıtlamalar en önemli engellerdendir. Güç aktarma sisteminin yüksek verimli olması, çekiş pilinin optimum düzeyde kullanılmasını sağlayacak ve sürüş menzilinin artırılmasına katkıda bulunacaktır (Egbue and Long, 2012).

TEA'ların şarj süresinin fazla olması, İYM'li araç kullanıcılarının birkaç dakika içerisinde yakıt deposunu doldurarak sürüşe hazır olmalarının tam tersine dezavantajdır. Tüketici benimsemelerinin önündeki bu engel, gelişen pil teknolojileri ve elektronik devreler sayesinde çözüme kavuşturulmaya çalışılmaktadır (Yong and Park, 2017).

Kullanıcılarının araç tercihlerinde hedonik ve sembolik nitelikler önemlidir. Araç imajının tüketici üzerinde kimlik etkisi bulunmaktadır. Gelişmiş teknoloji ile dizayn edilmiş, güçlü aktarma sistemine sahip güçlü araçlar, benimseme ve yaygınlaşma hususunda oldukça belirleyici unsurlardır (Schuitema et al., 2013).

Elektrikli araçların popülerite, sürüş güvenliği, sürüş rahatlığı, bakım maliyetinin düşük olması ve elektrik motorlarının İYM'ler kadar bakım gereksinimi duymaması gibi avantajları bulunmaktadır. Araç yapısı İYM'li araçlara göre daha basittir. Elektrikli aracın en önemli bileşenlerinden olan güç aktarma sistemi ve bileşenleri, bu avantajların en önemli aktörleridir (Conserve Energy Future, 2022).

Araçlarda elektrifikasyona geçiş, geleneksel araç mimarisi üzerine bileşenlerin değiştirilmesi şeklinde başlamıştır. Tesla Roadster, Lotus Elise aracının elektrikli bir versiyonu olarak değiştirilmiştir. Ancak zaman ilerledikçe araç tasarımları özgün olmaya başlamıştır. Motor yerleşimi, pil takımının ağırlık merkezini belirlemesi, güç aktarma organlarının aerodinamik katkısı, Tesla'nın

yeni araç tasarımına yenilikçi değişimler getirmesini sağlamıştır. Cybertruck modeli ile yepyeni bir araç anlayışı ortaya çıkmıştır (Enge et al., 2021).

Araç teknolojilerinin gelişmesi ve taşıma sektörünün büyümesi, günümüz toplumunun ulaştığı refah seviyesinde oldukça önemlidir. Araç sektörünün ve sektöre hizmet eden diğer sektörlerin dünya ekonomisine katkısı her geçen gün artmaktadır. Bieker'e (2021) göre ulaşım sektöründe, üretim ve kullanım sebebiyle küresel ölçekte ortaya çıkan ve insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının dörtte birine karşılık gelen 12 Gt (milyar ton) CO₂ eşdeğeri emisyon oluşmaktadır. İYM teknolojisinin hava kirliliği ve sera gazı emisyonları nedeniyle yarattığı ciddi çevresel etkiler, önlenmesi güç bir hal almaktadır. Ulaşım kaynaklı emisyonların önüne geçilmesi için geliştirilen araç teknolojileri geleceğin ulaşımına yön verecektir (Ehsani et al., 2018).

Elektromobilite sayesinde fosil yakıtlı araçların çevre ve iklim üzerindeki olumsuz etkisi önlenebilecek ve bu teknoloji ile birlikte, yeni iş imkânlarının doğması mümkün olacaktır. EA'ların ulaşım ve taşımada kullanılması 1900'lü yıllara uzansa da, yaygınlaşması ve günümüz toplumunun elektrikli araçları benimsemesi bazı dezavantajlarının çözüme kavuşmasıyla hız kazanacaktır (Fornahl and Hülsmann, 2016).

Tezin amacı, iki tekerlekli ve dört tekerlekli EA'larda güç aktarma sistemini analiz ederek, menzil, performans ve enerji sarfiyatına ait verileri tahminlemektir. Çalışma "TEA için güç aktarma sistemi ve bileşenlerinin önemi nedir?" sorusuna, gerçek araç verileri üzerinden cevap bulmayı amaçlamaktadır. Simülasyon sonuçlarının gerçek araç performans verileriyle karşılaştırılarak, performansa etki eden faktörlerin anlaşılması amaçlanmaktadır. İlgili mesleki ve teknik eğitim alanları için Türkçe yardımcı bir kaynak oluşturmak, açık kaynak yazılım uygulaması sayesinde ücretsiz performans analiz desteği sağlamaktır.

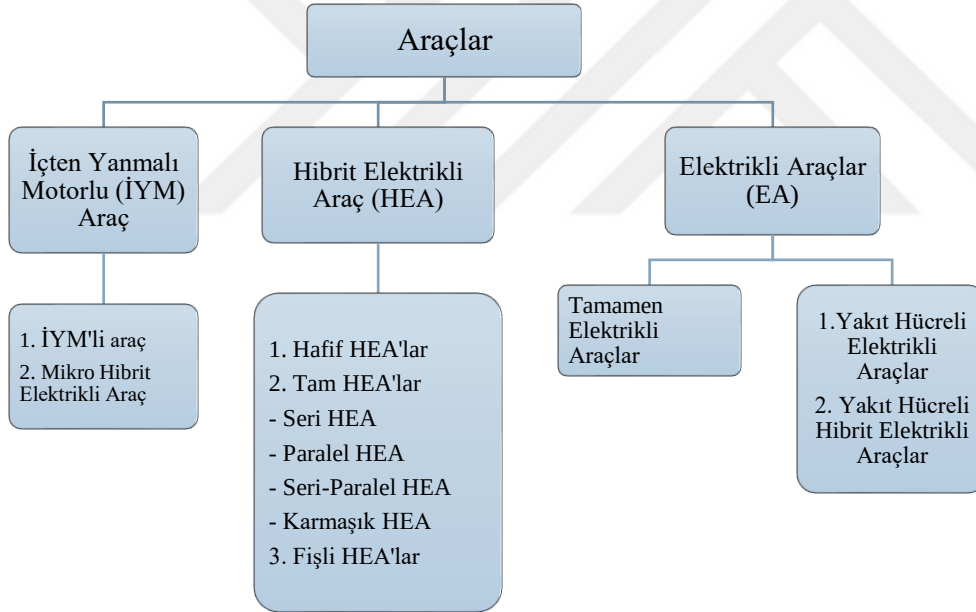
Tez kapsamında, "Python" yazılımı ve MATLAB/Simulink referans uygulaması ile performans analizi yapılmıştır. Menzil, enerji tüketimi, performans verileri ve bunlara ait grafikler elde edilmiştir. "Python" simülasyonu, program kodları ile hesaplamalar yapılmasını ve sonuçların elde edilmesini sağlar. Bunun

için bir kullanıcı ara yüzü oluşturulması amaçlanmamıştır. Ayrıca performans üzerinde önemli etkisi olan araç şarj teknolojileri ve şarj devrelerine ait elektronik devreler tezin kapsamı dışındadır. Bahsi geçen iki tip EA dışında kalan tüm EA'lar tezin konusu değildir.

Tezin 2. Bölümde TEA'lar hakkında genel bilgiler, kullanılan pil ve motor teknolojileri ile g elektronik devreleri bulunmaktadır. 3. Bölümde BMW C Evolution bileşenleri tanıtılmış ve “Python” yazılımı ile simülasyonu için tanımlamalar ve izlenecek akış anlatılmıştır. Devamında Volkswagen (VW) ID.3'n bileşenleri incelenerek, MATLAB/Simulink referans uygulaması üzerinden performans verilerinin nasıl elde edileceği aktarılmıştı. 4. Bölüm olan Bulgular ve Tartışma kısmında, önce iki tekerlekli TEA için hesaplamalar BMW C Evolution verileri kullanılarak yapılmış ve elde edilen güç, enerji, motor ve menzil verileri gerçek araç verileri ile karşılaştırılarak tartışılmıştır. Sonrasında dört tekerlekli TEA için MATLAB/Simulink referans uygulaması kullanılarak performans verileri elde edilmiş ve elde edilen değerler ve grafikler yorumlanmıştır. Son bölüm olan Sonuçlar ve önerilerde ise tez çalışması boyunca elde edilen verilerin sentezi yapılarak, çalışma özetlenmiştir. Çalışmanın kapsamını genişletecek ve geliştirilmesini sağlayabilecek öneriler de bu bölümde bulunmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

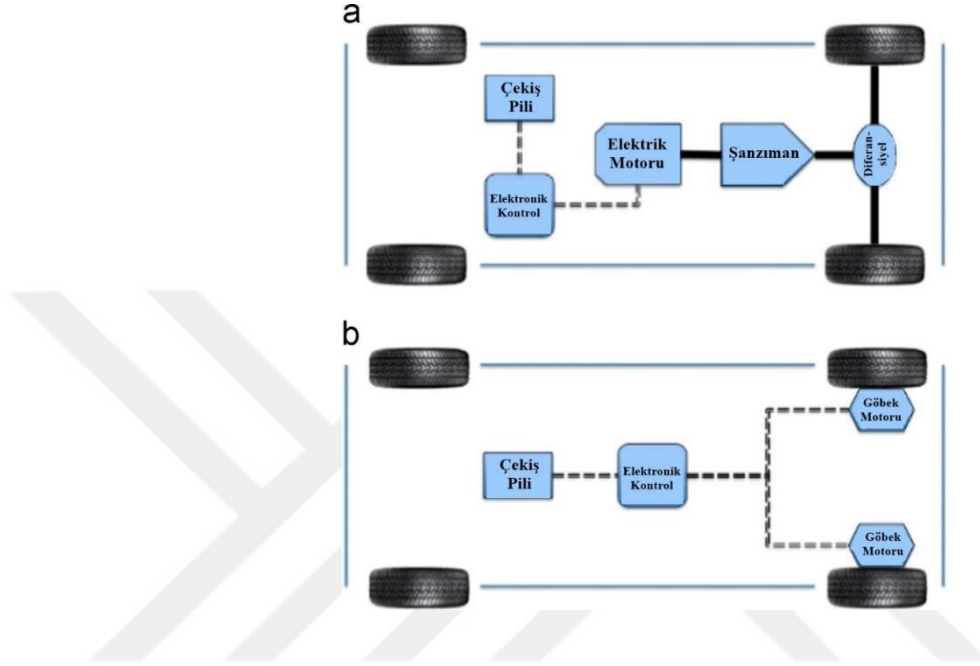
Araç topolojileri üç sınıfa ayrılmıştır. Günümüzde en yaygın kullanıma sahip olan, benzin ve dizel yakıt kullanan İYM'li araçlardır. İYM ve elektrikli motoru bir arada kullanarak yakıt tasarrufu amaçlayan hibrit elektrikli araçlar (HEA), iki motor teknolojisinin farklı bileşimlerini kullanarak tasarlanmıştır. TEA'lar ve yakıt hücresi elektrikli araçlar (YHEA), diğer iki araç türünden farklı olarak İYM kullanmazlar. Elektrikli çekiş motorunun tahrik gücünü kullanır. İhtiyaç duyduğu elektrik enerjisini TEA pil takımından elde ederken, YHEA ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini hidrojeninden sağlar. Bu araçlar karbon emisyonu üretmezler (Das et al., 2017).



Şekil 2.1. Araçların sınıflandırılması (Das et al., 2017).

Gürültüsüz çalışmaları, karbon emisyonlarının olmaması, konforlu sürüş sağlamaları gibi avantajlarının yanında; şarj altyapılarının yetersiz oluşu, menzil problemleri, maliyet gibi dezavantajları tartışma konusu olmaktadır (Manzetti and Mariasiu, 2015). TEA'lar yalnız elektrik ile çalıştığından karbon emisyonu üretmese de, araç ve enerji kaynağı olarak kullandığı pillerin üretimi ve geri

dönüşüm aşamaları emisyonu neden olur. HEA'lar ile karşılaştırıldığında İYM kullanmaması, sadece elektrik motoru ile hareketi sağlaması yapısının daha sade olmasını sağlar. Üretim ve bakım maliyetleri HEA'lara göre daha düşüktür. YHEA'ların yaygın olmaması, TEA'ların emisyonsuz araç olarak ön plana çıkmasını sağlamaktadır (Ding et al., 2017).

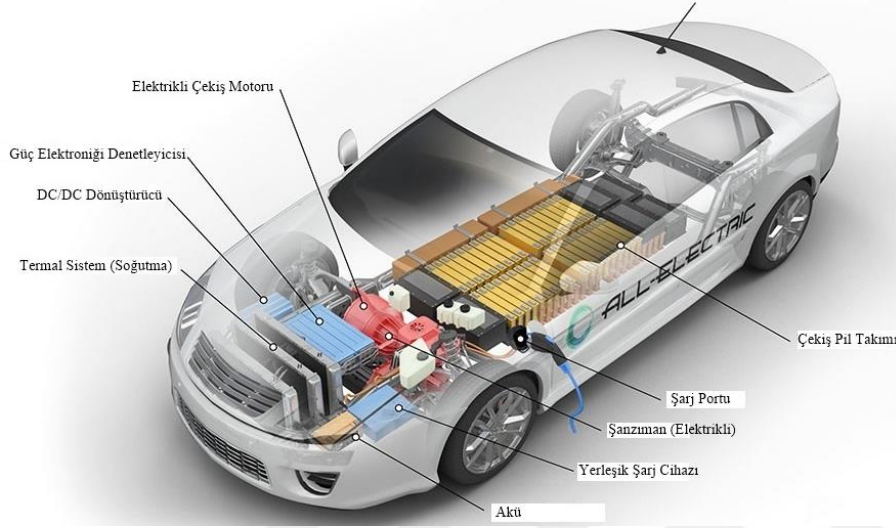


Şekil 2.2. Tekerlek çekişli TEA'ların yapı türleri (a) Tek elektrik motorlu, (b) Göbek motorlu (Manzetti and Mariasiu, 2015).

Şekil 2.2'de TEA'lar için iki farklı yapı bulunmaktadır. Şekil 2.2a'da güç elektroniği devresi elektrikli araç çekiş pilinden aldığı enerjiyi, çekiş motorunu kontrol etmek için kullanır. Tekerleklerin hareketi şanzıman sistemi üzerinden gerçekleştirilir. Şekil 2.2b'de ise küçük yapıli elektrikli araçlar için uygun olan, şanzıman kullanmayan ve tekerleklerin her birinin ayrı motor tarafından kontrol edildiği sistem gösterilmiştir (Manzetti and Mariasiu, 2015).

TEA'lar; HEA'lardan farklı olarak, İYM kullanmayan, yapısında bulunan pil paketi ile elektrikli çekiş motorunu besleyerek hareketi sağlayan araçlardır. TEA'larda aracın ihtiyaç duyduğu donanımsal elektrik enerjisini karşıladığı bir akü bulunur. Araç pil paketi, kablolu veya kablosuz olarak şarj edilebilir. Araçta bulunan şarj cihazı, alternatif akımı (AA) şarj girişinden alarak çekiş pil takımının ihtiyaç duyduğu doğru akıma (DA) çevirir. Elektrikli çekiş motoru, rejeneratif

frenleme adı verilen teknoloji sayesinde, frenleme esnasında ortaya çıkan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek sürüş menzilini artırmaya destek olur (Alternative Fuels Data Center, n.d.). TEA'lar kullandığı elektronik devreler sayesinde elektrikli çekiş motorunu kontrol eder (Faraz et al., 2021).



Şekil 2.3. TEA temel bileşenleri (Alternative Fuels Data Center, n.d.).

2.1 Tarihçe

İlk elektrikli model araç Ányos Jedelik tarafından 1828'de yapılmıştır. Sonrasında 1835 yılında elektrik motoru ile çalışan vagon, Robert Anderson tarafından tasarlanmıştır.

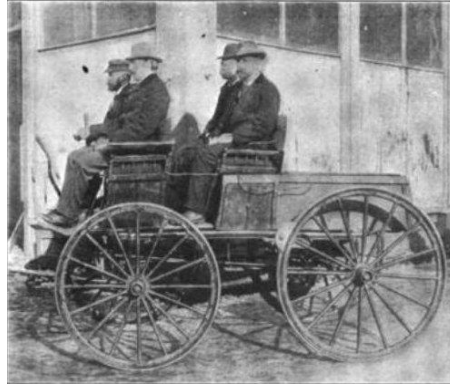


Şekil 2.4. Stratingh'in küçük elektrikli arabası (Guarnieri, 2011).

1835’de Sibrandus Stratingh, üç tekerlekli ahşap bir platform üzerine monte edilmiş, galvanik pil ve mıknatıslardan oluşan bir araba yapmıştır. Elektrik motorunu kullanan vagonlar ve lokomotifler üzerine çalışmalar 1851 yılına kadar devam etmiştir (Guarnieri, 2011).

1873 yılında Robert Davidson’un birincil pillerle ürettiği yüksek maliyetli ilk elektrikli arabası ve 1882 yılında Ayrton ve Perry’nin yarım beygir gücündeki seri bağlanmış on adet Planté pil hücresiyle beslenen üç tekerlekli aracı, İngiltere’de EA’ların gelişiminde öncü rol oynamıştır. Bu araçtan iki yıl sonra, ikincil pillerle daha kullanışlı bir araç tasarlayan Thomas Parker; elektrik kullanımı ile metro, tramvay ve otobüs ulaşımında gelişime ciddi katkılarda bulunmuştur (Guarnieri, 2012).

Fransa’da Charles Jeantaud, dört beygir gücündeki “Tilbury” tarzı elektrikli bir araç üretmiştir. Yaklaşık yarım ton ağırlığındaki araç ikincil pilleri sayesinde şarj edilmiş ve saatte 21 km hıza ulaşabilmiştir. Amerika’da William Morrison’ın 1896’da tasarladığı araç, yirmi dört tane pilin sağladığı enerji ile saatte 22 km hıza çıkabilmiştir (Burton, 2013).



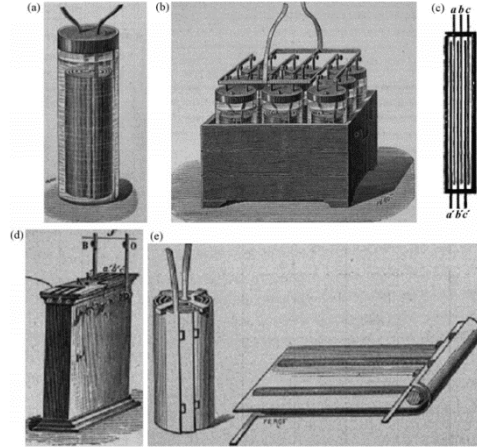
Şekil 2.5. Morrison’ın dört kişilik aracı (Upsbatterycenter, 2017).

EA’ların gelişimi, akü ve elektrik motorlarındaki yenilikçi çalışmalar sayesinde ivme kazanmışsa da 1908 yılında Henry Ford, Model T’yi piyasaya çıkardığında EA’lar için karanlık çağ başlamıştır. 1900 yılından itibaren on iki yıllık süreçte oldukça popüler olan EA teknolojisi, İYM’li araçların seri üretimi, maliyetlerin düşmesi ve şehirlerarası ulaşımın yaygınlaşmasını sağlayan yeni yollarda yaşanan menzil problemi nedeniyle popülaritesini kaybetmeye başlamıştır.

1920 yılına gelindiğinde İYM'li araçlar piyasaya hâkim olmuştur (Westbrook, 2001).

İYM'li araçların sürekli geliştirilmesi, benzin fiyatlarının düşük olması, benzin istasyonlarının yaygınlaşması gibi etkenler İYM'li araçların otomobil sektörünü tamamen ele geçirmesini sağlamıştır. Bakım-onarım alt yapısı gelişmiş ve seri üretim ile uygun maliyetli araçların üretilmesi İYM teknolojisinin konumunu sağlamlaştırmıştır. 1973 yılında ortaya çıkan petrol krizi ile birlikte özellikle Fransa'da, EA'lar üzerine ihtiyaç araştırmaları ve teknik araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. 1976'da ABD, EA'lar ve pil teknolojileri üzerine çalışmalar planlamıştır. Japonya 1976'da, EA'lar için hedefler belirlese de neticeye ulaşmamıştır. 1990'lı yıllara gelene kadar pil teknolojilerindeki yetersizlik elektrikli araçların yaygınlaşmasına engel olmuştur (Cowan and Hultén, 1996).

TEA'larda çekiş motorunu tahrik etmek için kullanılan pillerin icadı oldukça eskidir. 1800 yılında Volta'nın geliştirdiği pil, günümüzdeki pil teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. 1836'da Daniel ve 1866'da Leclanche pil hücreleri, Volta pilinin geliştirilmiş versiyonları olarak kullanılmıştır (Whittingham, 2012).



Şekil 2.6. Gaston Planté'nin 1883'te yayınladığı Elektrik Araştırması çizimleri. (a) Sarmal kurşun plakalı, (b) Geniş yüzeyli, (c ve d) Paralel kurşun plakalı hücreler (e) Lastik şeritlerle ayrılmış kurşun levhalar (Kurzweil, 2010).

İkincil pi olarak isimlendirilen şarj edilebilir pillerin mucidi, Johann Wilhelm Ritter'dir. 1802 yılında Alman fizikçinin ikincil akım kavramını keşfetmesinden

sonra, 1859'da Gaston Planté kurşun (Pb) - asit pil uygulamasını gerçekleştirmiştir. Elektrolit olarak kullandığı sülfürik asit (H_2SO_4) ve kurşun levhalar sayesinde şarj edilebilir hücreyi icat etmiştir (Kurzweil, 2010).

1900'de Thomas Edison, EA'larda daha hafif piller kullanabilmek için uzun ömürlü ve şarj edilmeden kaldığında bile daha dayanıklı olan nikel-demir (NiFe) pil hücrelerini icat etmiştir. Demir yerine kadmiyum (Cd) kullanılmasını ve nikel-kadmiyum (NiCd) pillerin üretilmesini sağlamıştır. Önceki versiyonlarına göre daha uzun ömürlü olan bu pillerin en büyük dezavantajı, pilin verimli kullanımı sağlamak için tamamen deşarj olduktan sonra şarj edilmesinin gerekmesidir. 1986'da nikel-metal hidrit (NiMH) pil hücreleri sayesinde daha yüksek enerji yoğunluğu elde edilse de, günler veya aylar içerisinde kapasite azalma yüzdesinin fazla oluşu en büyük dezavantajı olmuştur (Boddula et al., 2020).

1967 yılında "Ford Motor Company" çalışanları, katı elektrotlu ikincil bir pil geliştirmiştir. Ticari olarak uygulaması mümkün olmasa da katı elektrolit kullanan ikincil pil teknolojileri için başlangıç noktası olmuştur. 1976 yılında Stanley Whittingham katı elektrolitli pil için titanyum disülfid (TiS_2) kullanmış ancak oluşan dendritler pil hücrelerinin güvenli çalışmasına engel olmuştur. Lityum metalinin elektrot olarak kullanıldığı bu pil hücresi geliştirilememiştir. 1979'da John Goodenough uygulanabilir ilk Li-iyon hücrenin, Akira Yoshino ise geliştirdiği pil ile mobil cihazlarda kullanılmaya başlayan bu pil teknolojisinin öncüsü olmuştur (Goodenough, 2018).

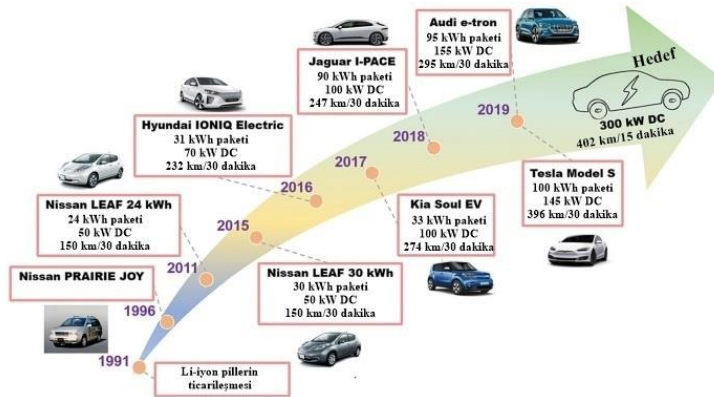
General Motors, Sunracer isimli EA'nın 1987 yılında "Solar Challenge" yarışındaki başarısından aldığı ilham ve dönemin hava kirliliğinin farkındalığı ile Impact adını verdiği elektrikli arabasını üretmeye karar vermiştir. 1996 yılında aracın geliştirilmiş son halini EV1 adıyla kullanıcılara sunmuş ve asenkron elektrikli motorla tahrik edilen aracın elektronik devrelerinde yeni nesil IGBT elektronik anahtarlar kullanılmıştır. Aracın teknolojisi, motor verimini yükselten ve kontrolünü sağlayacak yenilikçi yapısıyla öne çıkmasına rağmen, çekiş pili olarak kurşun-asit pilleri kullanmıştır. Elektrikli çekişin bu pil teknolojisindeki yetersiz performansı, NiMH pil ile güçlendirilmiş yeni versiyonun üretilmesine neden olmuştur (Hayes and Goodarzi, 2018: 6,7). Tesla Motors, 2007 yılında piyasaya

sürdüğü “Roadster” ile çekiş pili olarak Li-iyon teknolojisini kullanmıştır. Yüksek hızlara ulaşabilen bu spor arabayı, 2012 yılında piyasaya çıkan Tesla Model S takip etmiştir. Tesla sonraki yıllarda Model X ve Model 3 ile başarısını sürdürmüştür (Thomas and Maine, 2019).



Şekil 2.7. Tesla Roadster (Thomas and Maine, 2019).

1997 yılında Honda, EV Plus elektrikli aracını tanıtmıştır. Aynı yıl Toyota, 27 kWh metal hidrit pil teknolojisini kullanan aracı RAV4 EV’yi piyasaya sürmüştür. Araç, sonraki yıllarda yaklaşık 42 kWh’lik Li-iyon pil teknolojisi ile yeniden tasarlanmıştır. 2010 yılında ise Nissan Leaf yaklaşık 21 kWh gücündeki aracıyla elektrikli araç piyasasına giriş yapmış ve sonraki nesil araçlarında bu gücü iki katına çıkararak menzili genişletmiştir. BMW i3, Chevrolet Bolt ve 2020 Porsche Taycan gibi araçlar TEA piyasasında rağbet gören araçlar olmaya devam etmektedir (Wright, 2020).

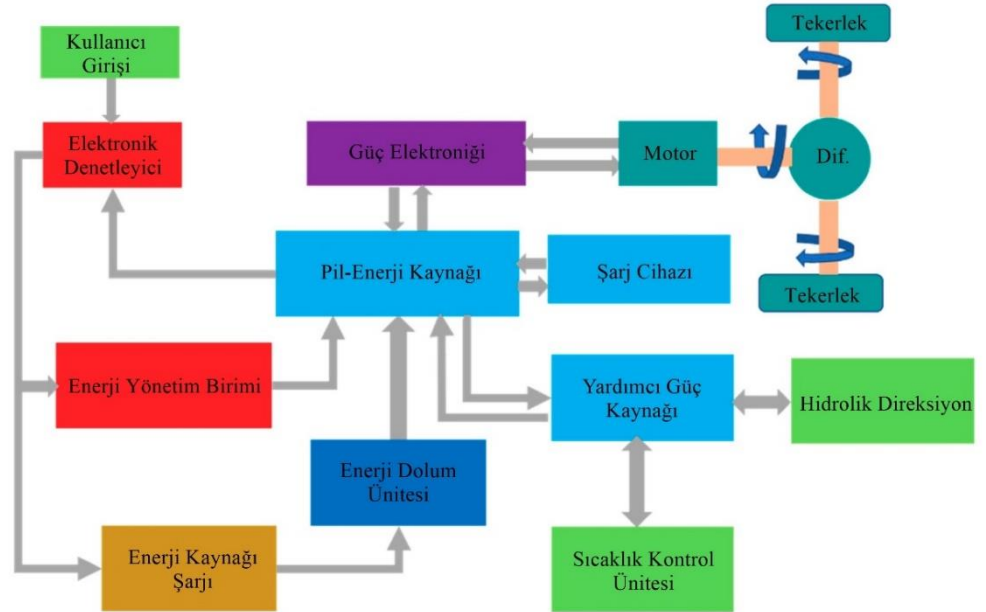


Şekil 2.8. Li-iyon tabanlı TEA’ların tarihçesi ve ilgili şarj yetenekleri (Cai et al., 2020).

Şekil 2.8, 1991 yılından bu yana bazı elektrikli araçların pil gücünü ve şarj özelliklerini göstermektedir. Yaygın pil teknolojisinin Li-iyon ve elektrikli araçların yaygınlaşmasındaki en önemli etkenlerin pil gücü ve şarj süresine göre menzil değeri olduğunu ifade etmektedir (Cai et al., 2020).

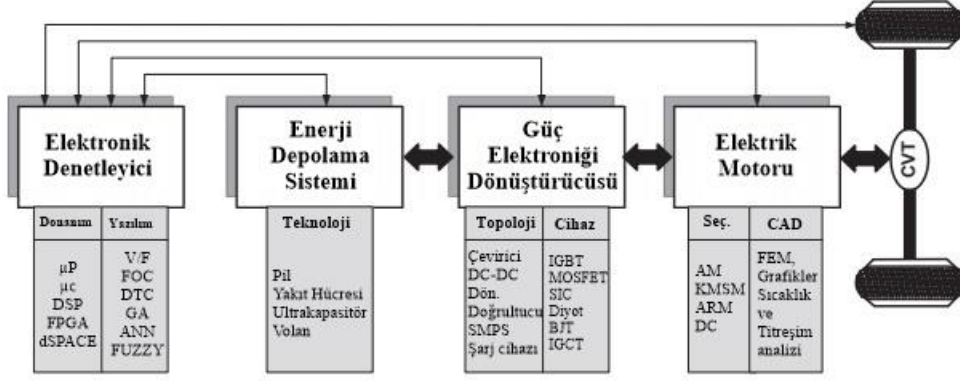
2.2 Elektrikli Araç Güç Aktarma Mimarisi

TEA'lar elektrik motoru ve çekiş pili arasındaki enerji aktarımını elektronik devreler aracılığıyla gerçekleştirir. DA kaynağı pil, motorun ihtiyacı olan enerjiyi sürücünün hızlanma gereksinimine göre tedarik eder. Güç elektroniği devresi DA/AA dönüşümünü sağlar. TEA'larda farklı motor tipleri kullanılmaktadır. Elektronik devrenin güç dönüşümü çekiş motorunun türüne göre DA/AA veya DA/DA şeklinde olabilir. Çekiş pili, kablolu veya kablosuz yöntemlerle şarj edilebilir. Rejeneratif frenleme adı verilen yöntem ile kazanılan enerji pili şarj etmek için kullanılır. Araçtaki tüm elektriksel süreç Enerji Yönetim Birimi sayesinde kontrol edilir. Pillerin aşırı ısınmasını önlemek için sıcaklık düzeyi kontrol edilir (Karki et al., 2020).



Şekil 2.9. Araç güç aktarma sistemi mimarisi (Karki et al., 2020).

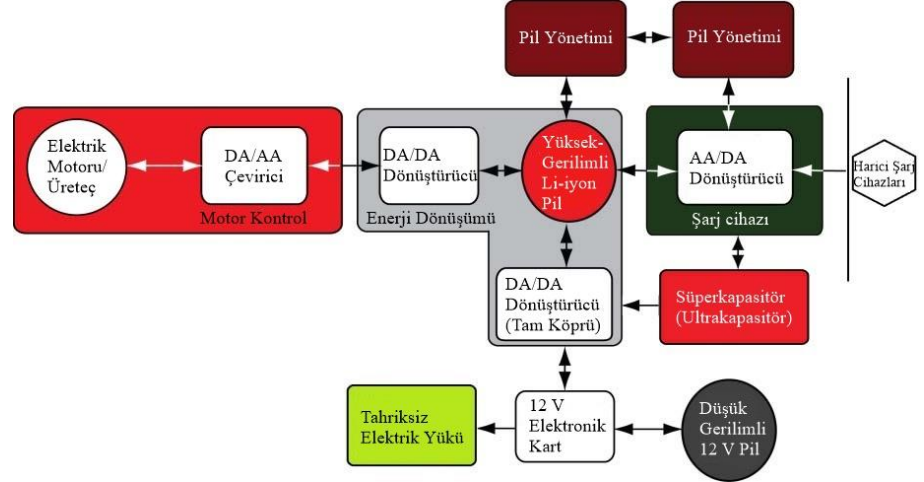
TEA’larda kullanılan elektrikli tahrik sistemi, aracın İYM’li araçlardan belirgin şekilde ayrılmasını sağlar. Elektrikli araçların hizmet türlerine göre değişen tork, sürüş modu, menzil, hız gereksinimleri sistemin bileşenlerini belirler. Maksimum verim ve güvenilir kullanım için tüm bileşenlerin uyumlu ve ihtiyaçları karşılayabilir yeterlilikte olması gerekir. Araç maliyetini belirleyen özellikle çekiş pili ve kullanılan elektrikli motor teknolojisidir (Kumar and Jain, 2014).



Şekil 2.10. Elektrikli tahrik sistem mimarisi (Kumar and Jain, 2014).

Şekil 2.10’da, elektrikli tahrik sistem mimarisi görülmektedir. Sistemin tüm kontrol ve denetleme işlemleri mikrodenetleyici tarafından gerçekleştirilir. Araçta kullanılan enerji depolama sistemini, güç elektroniği devresini ve çekiş motorunu kontrol eder. TEA’larda enerji depolama sistemi olarak pil kullanılır. Motor teknolojileri üreticilere göre farklılıklar gösterebilmektedir (Kumar and Jain, 2014).

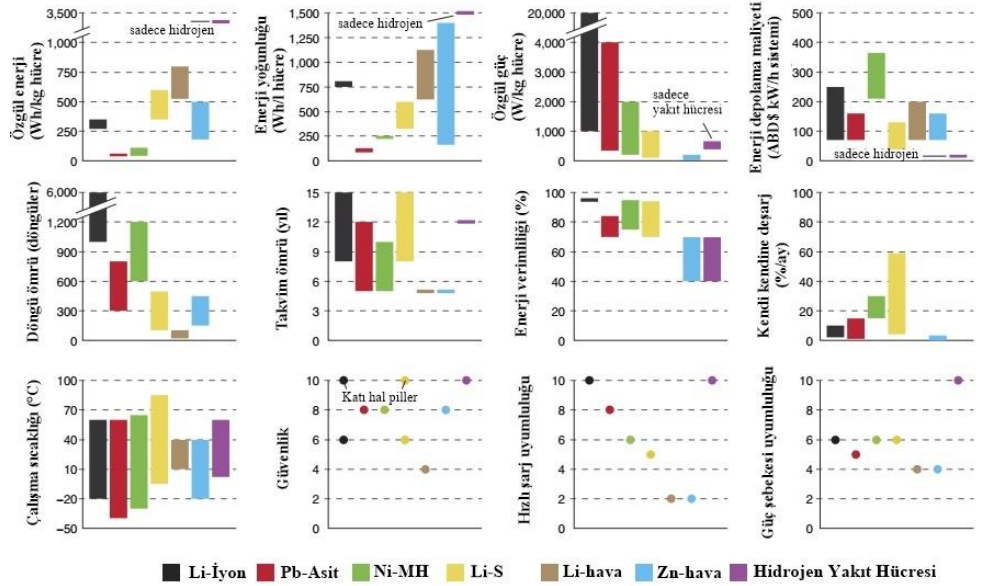
Şekil 2.11, güç sistemi mimarisinin blok diyagramını göstermektedir. Elektrik çekiş pili, pil yönetim sistemi tarafından kontrol edilir. TEA enerji sistemi, pilin yüksek enerji yoğunluğu ile süper kapasitörün yüksek güç yoğunluğu yeteneklerini birlikte kullanır. Güç elektroniği devreleri DA ve AA arasında dönüşümleri gerçekleştirir. Evirici (Inverter) ve dönüştürücü (Converter) devreler; şarj cihazları, pil ve motor arasında çalışma gereksinimini sağlayacak şekilde akım ve gerilim değerleri üretir. Elektrik motoru aynı zamanda rejeneratif frenlemeden kazanılan enerjinin pillerde depo edilebilmesi için üreteç görevi görür (Katić et al., 2014).



Şekil 2.11. EA tipik güç sistemi mimarisi (Katić et al., 2014).

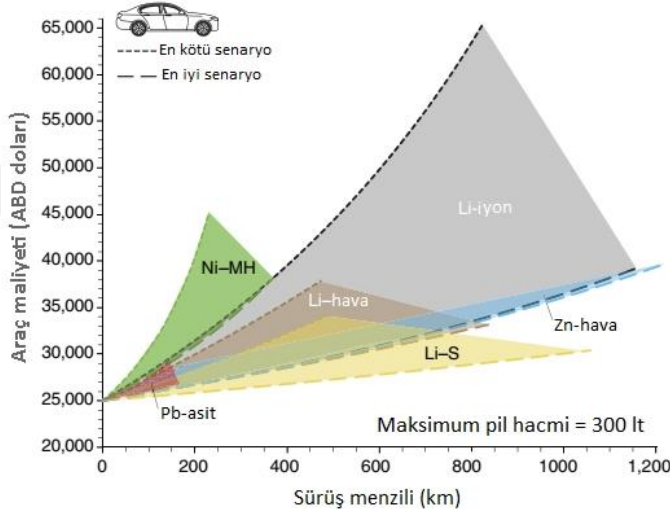
2.3 Piller

EA'lar 1900'lü yılların başında altın çağlarını yaşamış olsa da sürüş menzili ile ilgili sorunlar en büyük sorunların başında gelmiştir. Ancak günümüzde enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler, tekrar gündeme gelmelerini sağlamıştır. Özellikle pillerin artan enerji yoğunlukları, maliyetlerinin düşmesi, sera gazı emisyonlarının tehlikeli boyutlara ulaşması satışların artmasını sağlamıştır.



Şekil 2.12. Şarj edilebilir pillerin ve hidrojen yakıt hücrelerinin özellikleri (Cano et al., 2018).

Gittikçe düşen lityum-iyon pil maliyetleri, tek başına EA'lara yönelmeyi sağlamayacaktır. Özgül enerji yoğunluğunun arttırılması ve beraberinde maliyet dengesi önemlidir. EA'larda hızlı şarj yöntemleri aracı daha çabuk kullanıma hazır hale getirirse de pilin çok hızlı şarj edilmesi çevrim süresini olumsuz etkileyebilmektedir. Şekil 2.12'de incelenen pil türleri için çinko (Zn)-hava pil, sürüş mesafesini arttırmak için en iyi çözüm olarak görünürken, maliyet açısından incelendiğinde Li-sülfür (S) piller daha caziptir (Cano et al., 2018).



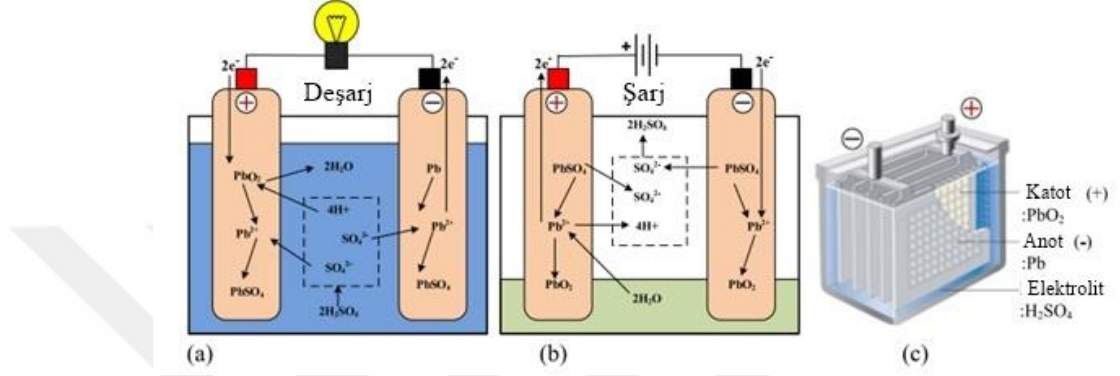
Şekil 2.13. Orta boy araç maliyeti ve araç menzilin duyarlılık grafikleri (Cano et al., 2018).

EA'larda şarj edilebilir ikincil pillerin kullanılması zorunludur. EA'ların yaygın kullanımı şarj edilebilir pil teknolojilerinin hızlı, verimli ve uzun ömürlü olmasına bağlıdır (Habib et al., 2021). Elektrikli aracın rejeneratif frenlemeden kazandığı enerjiyi minimum kayıpla kullanabilmesi, aracın hizmet şekline göre pil enerji düzeyinin uygunluğu, bakım gereksinimi ve olumsuz iklim koşullarında sorunsuz çalışması pilin kritik görevleridir (Dixon, 2010).

2.3.1 Kurşun-Asit Piller

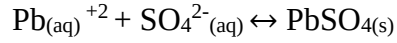
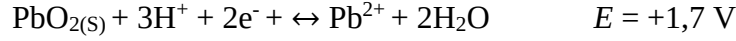
Pb-asit piller 1859 yılında Planté ilk pili icat ettikten sonra uzun tarihsel bir gelişim süreci yaşamıştır. Özellikle 1880-1890 yılları arasında Planté pili üzerine yapılan çalışmalar pilin hızla gelişmesini sağlamıştır. 1980'li yıllarda valf ayarlı tipleri geliştirilmiş ve 1990'da elektrikli araçlarda akü olarak kullanımı

yaygınlaşmıştır (Jung et al., 2015: 5). Pb-asit piller elektrolit olarak sülfürik asit kullanır. Elektrotlar kurşundan ve gözenekli yapıdadır. Deşarj anında sülfat iyonları açığa çıkar ve elektronlar kurşun negatif elektrottan, pozitif elektrota elektrik devresi üzerinden hareket eder. PbO₂ (kurşun oksit) elektrot ve negatif elektrot arasında bir ayırıcı bulunmaktadır. Ayırıcı, elektrotların elektrolite bıraktığı SO₄²⁻ (sülfat) iyonlarının geçişine izin verir.

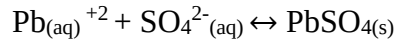
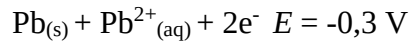


Şekil 2.14. Pb-asit pil kimyası: (a) deşarj sırasında, (b) şarj sırasında, (c) Pb-Asit pil prototipi (Hannan et al., 2017).

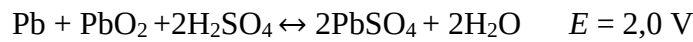
Anot tepkimesi:



Katod tepkimesi:



Genel tepkime:



Pilin deşarjı esnasında sülfürik asit azalır, su oluşur ve sülfat açığa çıkar. Şarj esnasında tersi gerçekleşir. H₂SO₄ konsantrasyonu şarj ve deşarj esnasında değişir (Jung et al., 2015: 10).

Kurşun-asit pil uygulamaları;

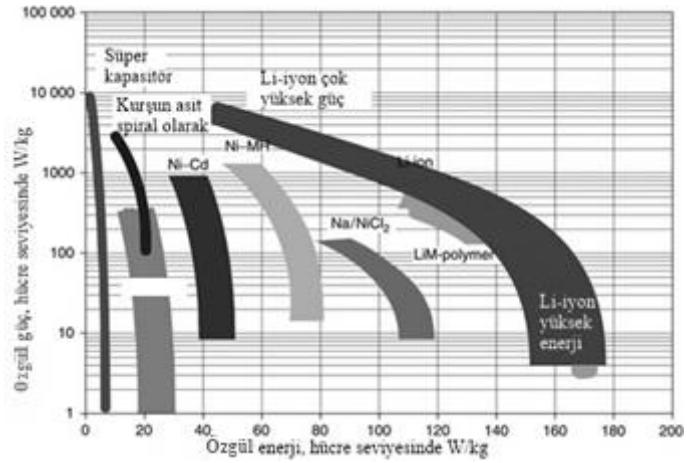
- Araçlarda elektrik ihtiyacını karşılamak
- Haberleşme, şebeke dağıtım, bilişim alt yapılarında enerji depolamak
- Elektrikle çalışan araçlar için motor çekiş enerjisini sağlamak
- Askeri amaçlı kullanım
- Yenilenebilir enerji teknolojileri ile birlikte enerji depolamak

Tablo 2.1. Kurşun asit pillerin avantajları ve dezavantajları (Jung et al., 2015: 4).

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük maliyet	Düşük çevrim ömrü
Geri dönüşüme uygun	Düşük enerji yoğunluğu
Valfli türler sayesinde bakım gerektirmez.	Uzun süre boшта kalması kalıcı hasara neden olabilir.
Üretim kolay	Zararlı bileşenler içerir.
Şarj verimliliği yüksektir.	Küçük boyutlu pil imalatı zordur.
Farklı kapasite ve boyutlarda üretilebilir.	Kısa devre kalıcı hasara neden olur.
-40°C ila 60°C iyi çalışma sıcaklığı	
Yüksek performans	
Şarj deşarj durum göstergesi basit	

Kurşun-asit aküler elektrolit kaybı yaşadığı için, bakım ihtiyacı duyarlar. Ancak farklı elektrot türleri kullanılarak ve valf ayarlı kurşun asit aküler sayesinde bu sorun ortadan kalkmıştır. Daha hızlı şarj olur ve tekrar su oluşturarak sıvı kaybı önlenmiş olur.

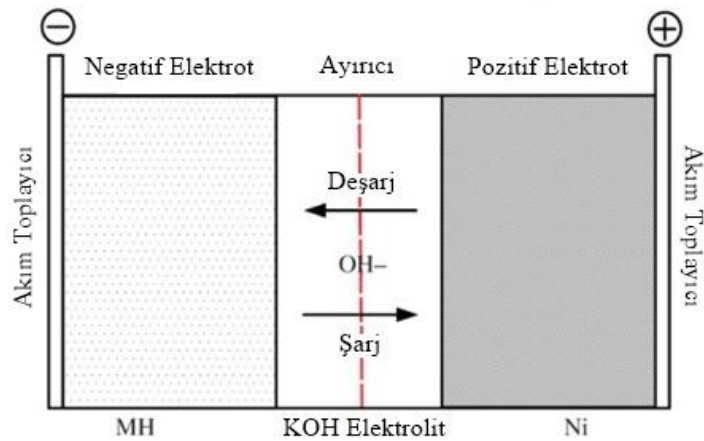
Şekil 2.15'deki grafiğe bakıldığında kurşun-asit piller, nikel ve lityum temelli pillere göre özgül enerji ve güç yoğunluğu bakımından yetersizdir. Bununla birlikte lityumun güvenlik sorunları ve geri dönüştürme problemleri vardır. Nikel temelli piller de maliyet açısından dezavantajlıdır. Kurşun nikel göre çok daha ucuzdur. Yine de geleneksel araçlarda tercih edilen kurşun-asit piller rejeneratif frenlemeden elde edilen akımı depolamakta yetersizdir. Pillerin tam şarjla çalışmaması elektrolit yapısının bozulmasına neden olacaktır (Pavlov, 2017: 21, 27).



Şekil 2.15. Farklı elektrokimyasal sistemler için özgül enerji - özgül güç grafiği (Pavlov 2017: 27).

2.3.2 Nikel-Metal Hidrit Piller

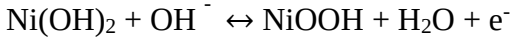
Nikel metal hidrit piller geçmiş yıllarda havacılık sektöründe ön plana çıkmasına rağmen günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Cd içerikli pillerde zamanla depolama kapasitesinin azalması, NiMH pillerde çözüme kavuşmuştur. Enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve maliyet açısından ön plana çıkmasa da dengeli özellikleri vardır (Conte, 2006).



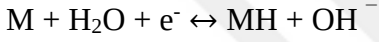
Şekil 2.16. NiMH pilin şematik diyagramı (Xiong and Shen, 2019: 73).

Nikel hidroksit ve metal hidrür elektrotlar, ayırıcı ve potasyum hidroksit (KOH), elektrolit pilin yapısını oluşturur. Deşarj durumunda anottan OH^- iyonları ayrılır ve ayırıcıdan geçerek katoda ulaşır. Elektrik devresi üzerinden elektron akışı gerçekleşir ve elektrik akımı akar. Elektrolit ile pozitif elektrot arasında tepkimenin olmaması kullanım süresinin uzun olmasını sağlar. Negatif elektrot tarafında vanadyum, titanyum, zirkonyum, nikel alaşımı kullanılır.

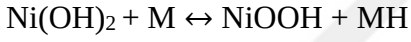
Anot tepkimesi:



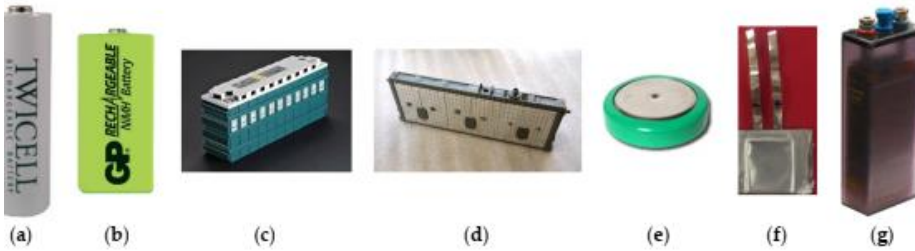
Katot tepkimesi:



Genel tepkime:



Potasyum hidroksit en çok kullanılan elektrolittir. Lityum hidroksit tepkime düzeyi sayesinde düşük, sodyum hidroksit ise yüksek sıcaklık uygulamalarında elektrolit olarak kullanılmaktadır. Ayırıcı genellikle polietilen malzemedir (Young and Yasuoka, 2016).



Şekil 2.17. NiMH piller: (a) silindirik, (b) çubuk, (c) metalik prizmatik, (d) plastik prizmatik, (e) düğme, (f) kese, (g) sulu yapılandırmalar (Young and Yasuoka, 2016).

NiMH pil teknolojisi HEA'lar için uygun ve lityum-iyon pillere göre düşük maliyetlidir. Özgül enerji ve güç yoğunluğunun pil paketli araçlarda menzil

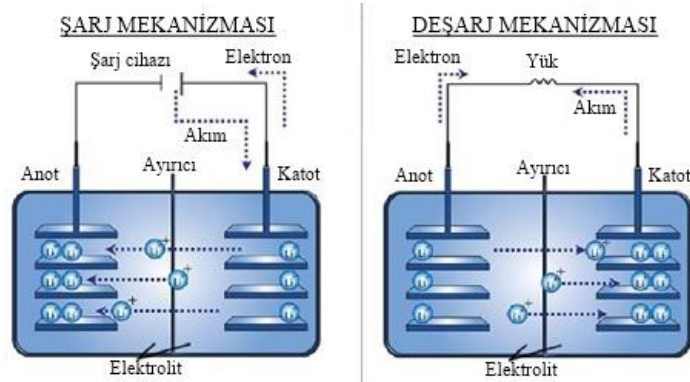
sorununa çözüm olamaması nedeniyle kullanımı uygun değildir (Andwari et al., 2017).

Tablo 2.2. Farklı NiMH pil ambalajı türlerinin karşılaştırması (Young and Yasuoka, 2016).

Şekil	Kasa malzemesi	Üretim	Maliyet	Enerji Yoğunluğu	Isı Dağılımı	Kötü Kullanım
Silindirik	Metal	Kolay	Düşük	Yüksek	Kolay	Yüksek
Çubuk	Metal	Orta	Düşük	Yüksek	Kolay	Yüksek
Metalik Prizma	Metal	Orta	Yüksek	Düşük	Kolay	Orta
Plastik Prizma	Plastik	Orta	Yüksek	Düşük	Zor	Orta
Düğme	Metal	Kolay	Düşük	Düşük	Kolay	Düşük
Kese	Alüminyum Folyo	Kolay	Düşük	Çok Yüksek	Kolay	Düşük
Sulu	Plastik/sulu	Kolay	Düşük	Düşük	Zor	Yüksek

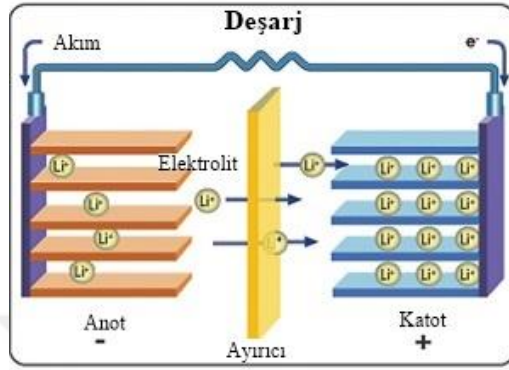
2.3.3 Lityum-İyon Piller

Lityum-iyon pil hücreleri de diğer pillerde olduğu gibi, pozitif ve negatif elektrot, elektrolit ve elektrotlar arasında bulunan bir ayırıcıdan oluşur. Anot, grafit veya karbondan oluşurken, katot kısmında Li ile farklı metal oksit bileşikler kullanılmıştır. Ayırıcı elektrotların kısa devre olmasını engeller ve susuz sıvı elektrolit, yüksek iyon geçirgenliği sağlayan iyon tuzu elektrolitidir (Voelker, 2014; Xiong, 2019).



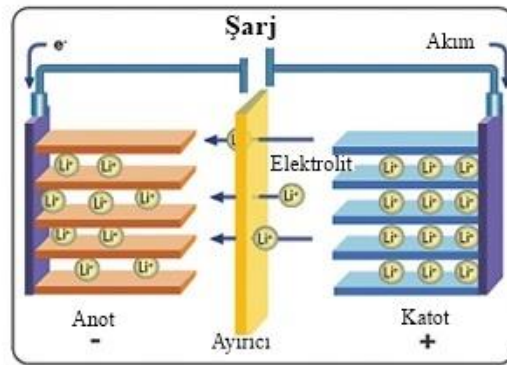
Şekil 2.18. Li-iyon pillerin şarj ve deşarj mekanizması (Xiong, 2019).

Deşarj esnasında anottaki iyonlar elektrolit üzerinden ayırıcıdan geçerek katota ulaşır. “De-interkalasyon” adı verilen bu işlem neticesinde, iyonların ve elektronların hareketine zıt yönde harici devre üzerinden akan elektrik akımı oluşur (Voelker, 2014).



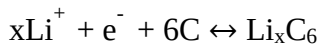
Şekil 2.19. Bir Li-iyon pilin deşarj sırasında çalışması (Voelker, 2014).

Şarj esnasında pili şarj etmek için kullanılan şarj cihazı, iyonların katottan anoda hareket etmesine neden olan bir elektrik akımı uygular. İnterkalasyon adı verilen süreçte, iyonlar farklı türden Li ile oluşturulan metal bileşenlerden, anottaki grafen yapı tarafından tutulur (Voelker, 2014).

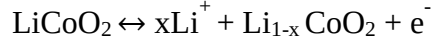


Şekil 2.20. Bir Li-iyon pilin şarj sırasında çalışması (Voelker, 2014).

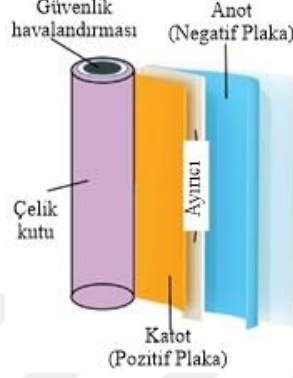
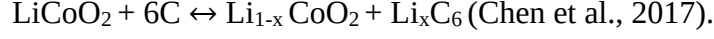
Anot Tepkimesi:



Katot Tepkimesi:

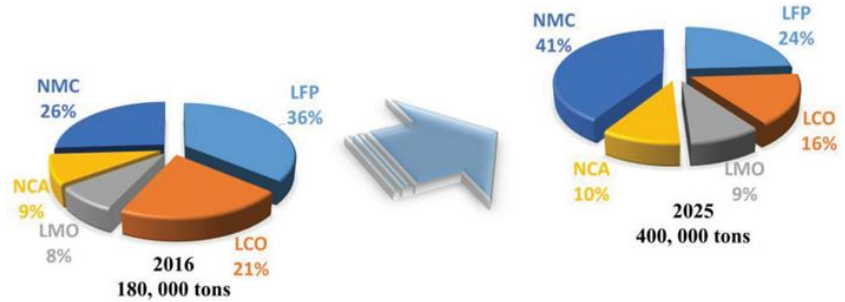


Genel Tepkime:



Şekil 2.21. 18650 (18 mm x 65 mm) LiCoO₂ pilin şematik diyagramı (Chen et al., 2017).

Li-iyon piller, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları gibi elektronik cihazlarda kullanıldığı gibi elektrikli araçlar için en cazip enerji depolama teknolojisidir. 2016 yılında %43 gibi yüksek bir oranla elektrikli araçlarda kullanılmıştır. 2025 yılında tüm üretimin yaklaşık yarısının, elektrik araç sektöründe kullanılacağı tahmin edilmektedir. Şekil 2.22’de NMC (nikel-manganez-kobalt), NCA (nikel-kobalt-alüminyum), LMO (Lityum Mangan Oksit), LFP (Lityum Demir Fosfat) ve LCO (Lityum Kobalt Oksit) katot malzemelerinin pazar paylarının kütle yüzdesi görülmektedir (Li et al., 2018).



Şekil 2.22. 2016’da ve 2025’e kadar tahmin edilen, tüm önde gelen malzemelerin Li-iyon pil pazar paylarının kütle yüzdesi (Li et al., 2018).

Lityum-iyon pil teknolojisinin elektrikli araçlarda menzil ve maliyet iyileştirmesi sağlaması, kullanılan katot malzemelerinin geliştirilmesi ile olmuştur. NMC ve NCA oksit katotlarının kullanılması, hedeflenen enerji yoğunluğuna ulaşılmasını sağlamıştır. Birçok büyük üretici, gelecek planlarını elektrikli araçlar üzerine kurmuştur. Şüphesiz ihtiyaç duyulan gavrimerik enerji yoğunluğunun geliştirilen lityum-iyon pillerle sağlanabilmesi en önemli etkenlerden birisidir. TEA’larda göz önünde bulundurulması gereken bir hususta tamamen şarj edilmiş araç ile günlük sürüş ihtiyacının karşılanabilmesidir. 2013 yılında, Nissan Leaf (88 Wh/kg) kullanıcılarının %10’u aracını tekrar şarj etmeden eve dönemezken; tekrar şarj gereksinimi duyan 2016 Tesla Model S-90 kullanıcılarında bu oran %1-2 seviyesine çekilmiştir. Yaklaşık enerji yoğunluğunun sağlanması, maliyetin önemini ortadan kaldırmamaktadır. Pil üreticileri hala hedeflenen kWh başına maliyeti yakalayamamıştır (Li et al., 2018).

Tablo 2.3. Üretici, araç ve pil malzemesi (Li et al., 2018).

Pil Üreticisi	Kullanıldığı Araç	Pil malzemesi (Anot/Katot)
AESC	Nissan/Leaf	Grafit/LMO-NCA
LG Chem	Renault/Zoe	Grafit/NMC-LMO
Li-Tec	Daimler/Smart	Grafit/NMC
Li Energy Japan	Mitsubishi/i-Miev	Grafit/LMO-NMC
Samsung	Fiat/500	Grafit/NMC-LMO
Lishen Tianjin	Coda/EV	Grafit/LFP
Toshiba	Honda/Fit	LTO/NMC
Panasonic	Tesla/Model S	Grafit/NCA

2.3.4 Lityum-Hava Piller

Ulaşımda ve yenilenebilir enerji kaynaklı enerji depolama teknolojilerinde kilit rol oynayan ikincil pillerde, verimlilik ve maliyet önemli parametrelerdir. Maliyeti düşürerek, enerji depolama yoğunluğunu üst seviyelere çıkartabilmek için hava bazlı piller önemli rekabet unsurlarından olacaktır. Karbon emisyonlarının azaltılması yolunda önem arz eden pil teknolojilerinde, EA’lar için menzil sorununu

aşmayı sağlayacak, yüksek özgül enerjiye sahip hava tabanlı piller geliştirilme aşamasındadır.

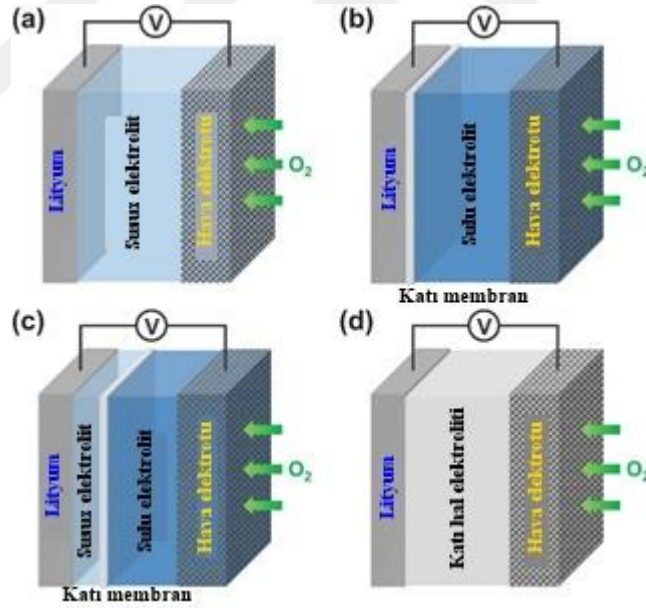
Lityum-hava pillerinde, teorik olarak 5.200 Wh/kg özgül enerji yoğunluğuna sahip olan pil, oksijenle doğrudan reaksiyona girer. Anot olarak lityum metal, hava elektrotu, bazik ve asidik sulu elektrolitler kullanılarak araştırmalar yapılmıştır.

Teorik olarak bazik elektrot ile

- Gravimetrik Yoğunluk : 1.300 Wh/kg
- Hacimsel Enerji Yoğunluğu : 1.520 Wh/L

Teorik olarak asidik elektrot ile

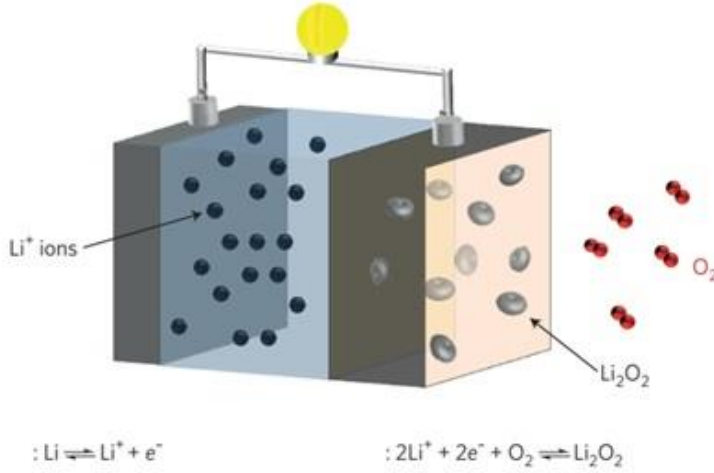
- Gravimetrik Yoğunluk : 1.400 Wh/kg
- Hacimsel Enerji Yoğunluğu : 1.680 Wh/L (Rahman et al., 2014).



Şekil 2.23. Dört tip Li hava pili için şematik yapılandırmalar: (a) susuz, (b) sulu, (c) hibrit, (d) katı hal (Tan et al., 2017).

Şekil 2.23’de dört tip lityum hava pili türü görülmektedir. Lityum hava pilleri, lityum elektrot ve gözenekli hava elektrodu arasında farklı tip elektrolitler kullanılarak tasarlanmıştır. Elektrolit susuz tiplerde, lityum tuzu, hidrojen ve protona sahip olmayan çözücü içerisine konularak elde edilmiştir. Sulu tiplerde

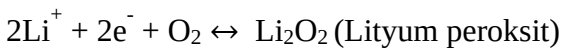
polimer tabaka eklenmiş NASICON (Sodyum Süper İyonik İletken) tipi bir ayırıcı kullanılır. Ayırıcı bu kombinasyon sayesinde anot ile tepkimeye girmez. İyonlar hızlı şekilde taşınır. Katı hal ayırıcı kullanan tiplerde elektrolitik sıvı olmadığı için sızıntı sorunları yaşanmaz. Karbonat bazlı elektrolitler ile verim sağlanamamıştır. Çevrim ömrünü arttırmak için farklı elektrolitler üzerinde çalışılmıştır. Susuz türlerde oksitlenmeyi önleyecek elektrolitler kullanılmıştır. Lityum peroksit oluşumu önemli bir sorun olmuş, çözüm olarak sıvı ve hibrit lityum hava pilleri kullanılmıştır. Reaksiyon sonucu lityum hidroksit oluşumu sağlanmış, katalizör kullanılarak fazla şarj ve deşarj sorunu çözülmüştür. Ancak enerji yoğunluğu azalmıştır. Katı tipler basit ve yüksek kapasiteye sahiptir. Diğer türlere göre daha güvenilir olmalarının yanı sıra tepkimesel sınırlılıklar ve iç direncin yüksek olması sorun teşkil etmektedir. Lityum hava pillerinde lityum peroksit ve lityum hidroksit elektrotlara zarar vermektedir. Bu pil teknolojisinin zayıf yönlerinin çözülmesi ve geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir (Tan et al., 2017).



Şekil 2.24. Bir aprotik Li-O₂ hücresinin şeması (Aurbach et al., 2016).

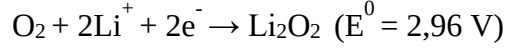
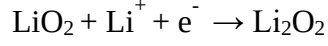
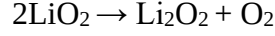
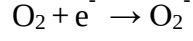
Susuz lityum hava pil için

İdeal katot tepkimesi:

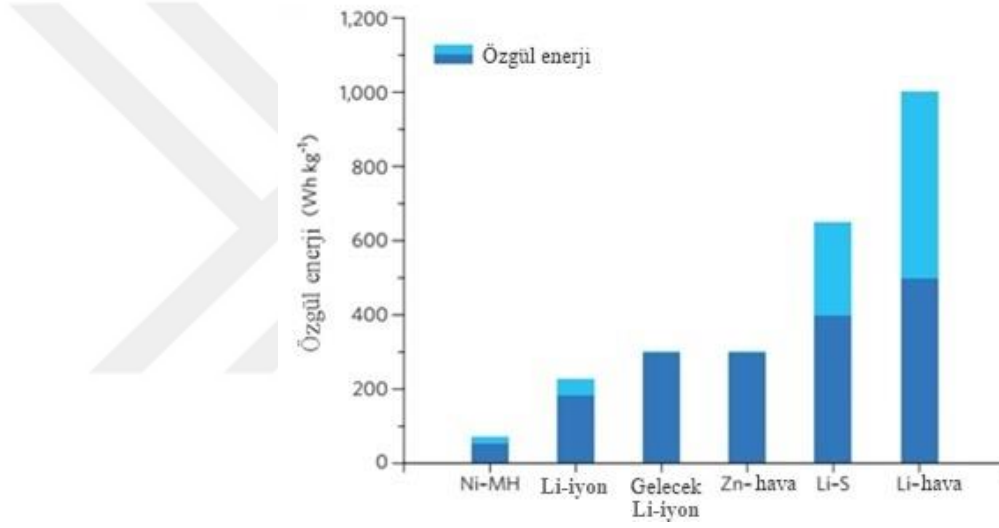
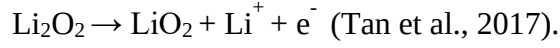
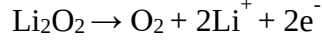


Deşarj tepkimeleri:





Şarj Tepkimeleri:



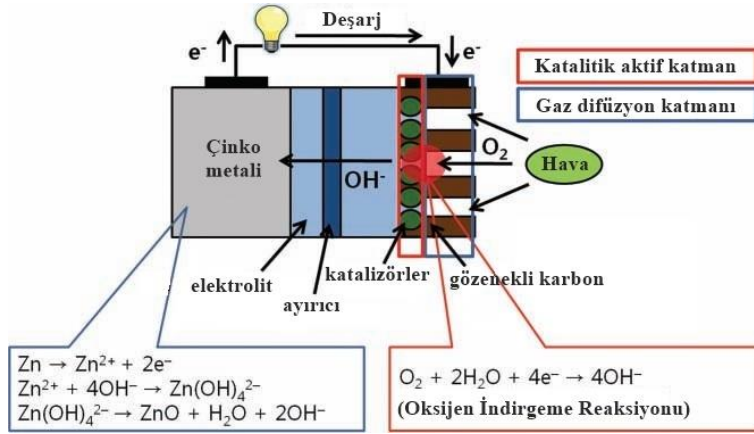
Şekil 2.25. Farklı pil depolama teknolojileri için özgül enerji değerleri (Aurbach et al., 2016).

Şekil 2.25’de, EA’larda yeterli sürüş menzili için teorik olarak lityum hava pillerinin diğer pil teknolojilerinin özgül enerji değerleriyle karşılaştırılması görülmektedir. Açık mavi renk, pratikte enerji depolamanın tahmini özgül enerji aralığını ifade etmektedir. Pilin kritik bileşenlerinden olan katotun hava bazlı üretilmesi ve benzinin enerji yoğunluğuna yakın enerji elde edilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda elde edilen enerji yoğunlukları yeterli seviyede üstünlük sağlayamamıştır. Ayrıca elektrolit ile ilgili problemler çözüme kavuşturulmalıdır. EA’larda kullanımın sağlanabilmesi için şarj/deşarj döngüsü boyunca oluşan katı lityum parçacıkların oluşumunun engellenmesi zorunludur. “Dentrit” adı verilen bu yapılar pilin ömrünü kısaltır hatta kısa devreye

neden olarak pil hücresinin patlamasına sebep olurlar. Lityum oksit tepkimesi için katalizör geliştirilmesi gereklidir. Ayrıca havanın içinde bulunan CO₂ (karbondioksit) ve su moleküllerinin oluşturacağı olumsuz etkenler önlenmelidir (Imanishi et al., 2014: 16, 18).

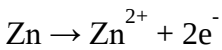
2.3.5 Çinko-Hava Piller

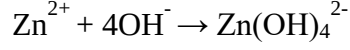
Çinko (Zn) – hava pillerde, pozitif elektrotta Zn kullanılmıştır. Anot ile elektrolit tepkimesinin verimli gerçekleşmesi Zn elektrotun yüzey alanının artırılması ile sağlanmıştır. Hava katodu, gaz difüzyon katmanı ve aktif katman arasında bulunan akım toplayıcıdan meydana gelmiştir. Pil hücresinde gaz fazında gelen oksijen, gözenekli karbon elektrotta nüfuz eder. Katalizör sayesinde çinko oksidasyonundan meydana gelen alkali elektrolitteki hidroksil iyonlarına indirgeme gerçekleşir. Elektrolit potasyum, sodyum ve lityum hidroksit inorganik bileşiklerinden oluşur. Ayırıcı polietilen, poliolefin gibi malzemelerden yapıldığından hidroksil iyonları kolayca taşınır. Hava katodunda gaz halinde oksijen, katı fazda katalizörler ve sıvı fazda elektrolit reaksiyonları gerçekleşir. Oluşan hidroksil iyonları, katottan çinko anota hareket eder. Dış elektrik devresinden anottan katoda elektron akışı gerçekleşir (Lee et al., 2011).



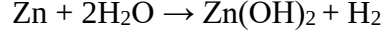
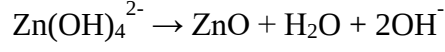
Şekil 2.26. Zn-hava pilinin çalışma prensibi ve elektrotlardaki reaksiyonlar (Lee et al., 2011).

Anot tepkimesi:

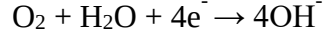




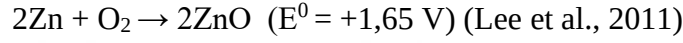
$$(E^0 = -1,25 \text{ V vs. NHE})$$



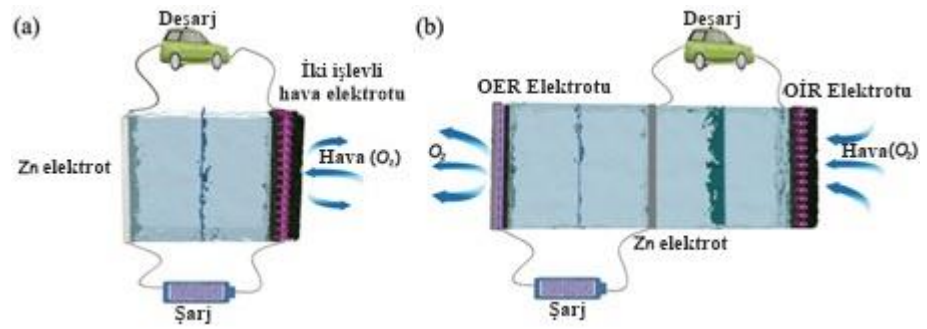
Katot tepkimesi:



Genel hücre tepkimesi:



Şarj edilebilir çinko-hava pillerin mekanik şarjı, fiziksel bileşenlerin (anot) pil hücresi içerisinden çıkarılması ve yeni elektrotlar ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bileşenlerin değiştirilmesi işlemi için fiziki yer ve çalışan gerekir. Elektriksel şarj için oksijen indirgenme ve yükseltgenme katalizörleri gereklidir. Çift fonsiyonlu katot uygulamasında, şarj işlemi sırasında katalizör yüksek gerilime yanıt vermez. Bu kullanım döngüsünün azalmasına neden olur. Yüksek gerilim kaynaklı aşınmalar, elektrotların hasar görmesine ve hücrenin kullanılmaz hale gelmesine neden olur (Pan et al., 2018).



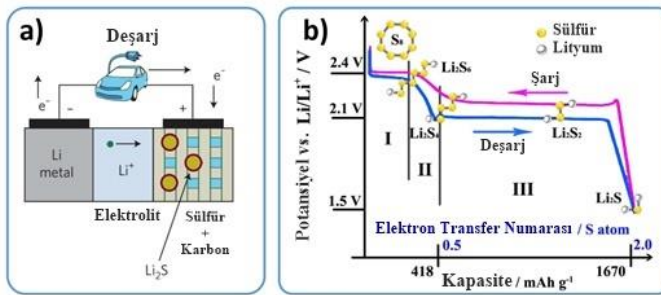
Şekil 2.27. (a) İki elektrotlu, (b) Üç elektrotlu şarj edilebilir Zn-hava pilinin şematik yapılandırmaları (OER: Oksijen Evrim Reaksiyonu. OİR: Oksijen İndirgeme Reaksiyonu) (Pan et al., 2018).

Çift elektrotlu uygulamada yaşanan sorunları çözmek için üç elektrotlu yapı kullanılır. İki ayrı hava elektrotu olan oksijen indirgeme reaksiyon katodu ve oksijen elektro katalizörü arasına çinko elektrotu yerleştirilir. Kullanım döngüsü sorunu çözülmesine rağmen; üç elektrotlu hücre, daha büyük boyutlu olması nedeniyle ağırdır. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğunun çift elektrotlu pil hücresinde daha yüksek olması ve daha basit yapısı dezavantajlarına rağmen daha çok kullanılmıştır. Katalizör indirgenme ve yükseltgenme dengesizliği düzeltilmesi gereken hususlardır (Pan et al., 2018).

Lityum-hava pilleri çinko hava pillerinden daha yüksek enerji sağlayabilir ancak teknolojik gelişimleri yeterli değildir. Bu iki pil teknolojisi, birleştirilmiş pil enerji depolama teknolojilerinde etkin rol oynayabilirler. Kullanım döngüleri yetersiz olsa da araç sürüş menzilini artıracaktır. Farklı pil teknolojilerinin bir arada kullanılması karmaşık ve pahalıdır. Çinko-hava pilleri katalizör stabilitelerinin uygun düzeye getirilmesiyle daha dayanıklı hale gelecektir. Çevreden alınan CO₂ kaynaklı karbonat oluşumu, uygun filtreleme teknolojileri sayesinde çözüme kavuşturulabilir (Cano et al., 2018).

2.3.6 Lityum-Sülfür Piller

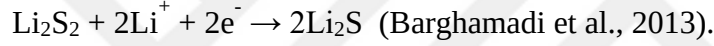
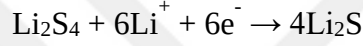
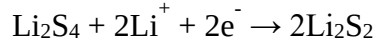
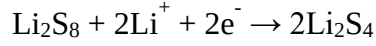
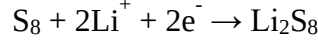
Lityum-sülfür piller lityum metalinden, karbon-kükürt birleşik elektrotlarından ve ayırıcısı akışkan organik elektrolit emdirilmiş ayırıcıdan oluşmuştur. Polimer yapılı elektrolit lityum iyonlarını taşır. Sülfür ile tepkimeye girmesiyle lityum sülfid oluşur.



Şekil 2.28. (a) Li-S pil şeması, (b) Li-S pildeki katotun ve karşılık gelen (ara) ürünlerin şarj-deşarj gerilim profilleri (Liang et al., 2016: 5).

Deşarj aşamasında tepkime sonucunda lityum sülfür (Li_2S) ortaya çıkar. Ara ürün olan çoklu sülfid bileşikler nedeniyle aşamalı olarak farklı tepkimeler gerçekleşir (Liang et al., 2016: 5).

Hücre tepkimeleri :



Aşamalı karmaşık tepkimeler, elektrolit yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Elementel kükürt doğada bolca bulunur ve zehirli değildir. Güvenli çalışma ve sıcaklık aralığı sayesinde caziptir (Barghamadi et al., 2013). Kükürtün bol ve ucuz olması ve bu pillerin güvenilir çalışması avantajının yanında, iyonik iletkenlik dezavantajdır. Çevrim ömrünün elektrikli araçlar için yeterli düzeyde olmaması ve kullanılmadığında pilin şarj akımını daha hızlı kaybetmesi eksi yönlerindendir. Elektriksel iletkenlik artırılmalıdır (Liang et al., 2016). EA ile uzun mesafeleri sorunsuz gidebilecek şekilde kullanılabilir. Anot materyali olarak lityum kullanımı, elektrolit eksilmesi ve kısa devreye yol açabilecek parçacıklar oluşumu nedeniyle güvenlik sorunlarına neden olsa da iç içe kükürt elektrot malzemesi ve lityum iyonlarının verimli taşınımına izin veren elektrolit iyileştirmeleri ile kullanışlı piller elde edilebilir (Cano et al., 2018).

Tablo 2.4'te görüldüğü üzere yaklaşık 0,128 dönüşüm getirisi, lityum-sülfür pillerinin dezavantajlarından. Bu değer lityum-iyon pillerde daha yüksektir. Yüksek elektriksel direnç, çözüm getirilmesi gereken dezavantajlardandır. Japonya'da yapılan çalışmalar teorik olarak çinko-hava pillerinin enerji

yoğunluğunu 18 kat kadar artırmıştır. Enerji yoğunluğu artsa da verimlilik iyileştirilmesi gereken yönlerindendir (Imanishi et al., 2014: 5).

Tablo 2.4. Çeşitli pil sistemleri için özgül enerji yoğunlukları (Imanishi et al., 2014: 4).

Sistem	Kütleye özgül enerji yoğunluğu (Wh/kg)			Hacime özgül enerji yoğunluğu (Wh/L)	
	Hesaplanan	Pratik	Dönüşüm getirisi ^a	Hesaplanan	Pratik
Li/O ₂	3,458	?		6,170	?
Li/S	2,566	350 ¹	0,128	4,260	350 ¹
Zn/hava	1,086	180 ²	0,166	6,091	208 ²
C/LiCoO ₂	387	100 ³	0,258	1,015	150 ³
		254 ⁴	0,633		585 ⁴
M-H/NiOOH	180	63 ⁵	0,35		142 ⁵
		58 ⁶	0,32		84 ⁶
Pb/PbO ₂	171	60,6	0,35	370	108

^aPratik/hesaplanan enerji yoğunluğu, ¹ca. 5 Wh, ²120 Wh, ³375 Wh, ⁴12 Wh, ⁵1.14 Wh, ⁶336 Wh

2.4 Süper Kapasitörler

2.4.1 Kapasitörlerin Tarihçesi

Leyden kavanozu, iki iletken arasına konulan dielektrik bir malzeme ile oluşturulmuştur. 1745'te kullanılan bu kavanozun dış ve iç yüzeyi folyo ile kaplanmıştı ve yalıtılmış iple asılı duran kavanoza doldurulmuş bir miktar suyun içinde iletken tel bulunmaktaydı. Kabın elektrik depolama yeteneği bir kaza sonucu ortaya çıksa da kapasitör icat edilmiştir. Sonraları Michael Faraday'ın çalışmaları kapasitörlerin gelişimine ışık tutmuş, 1 coulomb elektrik yüklü ve levhaları arasında 1 volt gerilim farkı oluşan kapasitörün kapasite değeri Farad olarak söylenmiştir (Whiter, 2021).



Şekil 2.29. Leyden kavanozu (Whiter, 2021).

1876 yılında Fitzgerald, mumlu kâğıttan dielektrik malzemeyi folyo ile sarılmış elektrotların arasına yerleştirerek yeni bir kapasitör icat etmiştir. Büyük boyutları nedeni ile radyolarda DA'daki dalgalanmayı filtrelemek için bobinlerle birlikte kullanılmışlardır (Ho et al., 2010).



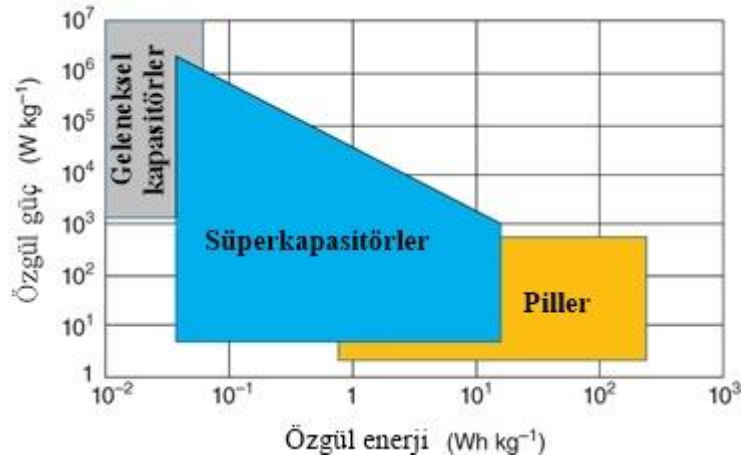
Şekil 2.30. (a) Eski radyolardan alınan mumlu kağıt ve folyo kapasitör örnekleri, (b) Eski mika kapasitörler (Ho et al., 2010).

1909 yılında Dubilier, mikanın dielektrik malzeme olarak kullanıldığı yavaş deşarj olan kapasitörü icat etmiştir. 1926 yılında titanyum dioksit kapasitörlerde kullanılmaya başlanmıştır. 1941 yılında ise baryumun o zamana kadar kullanılan tüm kapasitörlere göre daha yüksek olan dielektrik sabitine sahip olması, baryum titanatın kullanılmasını sağlamıştır. 1970 yılından sonra kapasitörlerin

kapasitelerini arttırmak ve kapasitörü yüksek gerilim seviyelerine şarj edebilmek için çok katmanlı yapı geliştirilmiştir. Seramik elektrot kullanan çok katmanlı bu yapılar, seri veya paralel bağlantılarla üretilmiştir. 2. Dünya Savaşı zamanlarında Bosch, metalize kâğıtta vakumlu metal ve cila kullanarak korozyon sorununa çözüm getirmiş ve 1950'li yıllarda telefon haberleşmesinde kullanılmasını sağlamıştır. Bell laboratuvarları metalize edilmiş polimer film kapasitörleri 1954'te geliştirmiştir. General Electric firmasının çift katmanlı kapasitörleri 1978 yılında Nippon Elektrik tarafından satılmaya başlamış ve 1 Farada (F) kadar üretilen bu kapasitörler, günümüzde 9000 F'a kadar yüksek kapasitelere ulaşmıştır (Ho et al., 2010).

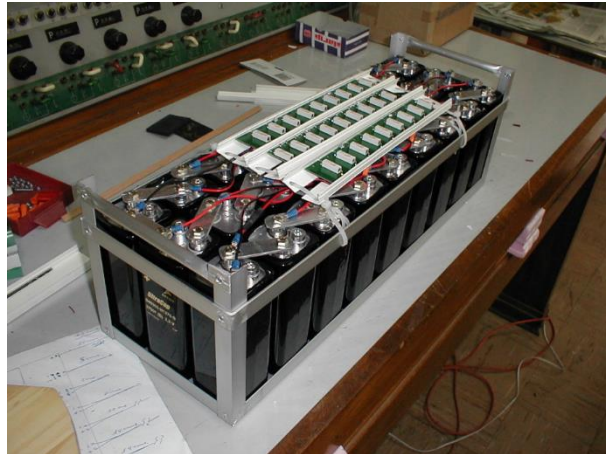
Piller, araçlarda büyük miktar enerji depolayabilmeleri, taşınabilir olmaları, farklı bileşenlerle test edilmiş türleri ile en çok kullanılan depolama elemanlarıdır. Gelişen EA teknolojilerinde menzil ve şarj süresi ile ilgili kaygılar farklı teknolojilerin bir arada kullanıldığı hibrit depolama teknolojilerine olan ilgiyi artırmıştır. Süper kapasitörlerin enerji yoğunluklarının düşük olması, maliyetlerinin yüksek olması uygulamalar için sorun teşkil etmektedir (Burke et al., 2014). Bunun yanında, çevrimsel kararlılıklarının yüksek oluşu ve çok hızlı şarj olma yetenekleri sayesinde yüksek enerji potansiyeline sahiplerdir. Yüksek akımın hızlı şekilde temini ve yüksek özgül güç potansiyelleri önemli avantajlarıdır. Araçlarda özellikle pil teknolojileri ile birlikte hibrit kullanılmaları, pil ve süper kapasitörün yeteneklerini bir araya getirir (Raza et al., 2018).

Küçük ve esnek olmaları, mobil cihazlarda kullanımlarını mümkün kılmıştır. EA'larda frenleme esnasında ortaya çıkan kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek depolanmasını sağlarlar. Şekil 2.31'deki Ragon grafiğinde görüldüğü üzere yüksek enerjili olmadıkları ancak yüksek güçlü oldukları söylenebilir (Sharma et al., 2019). Geleneksel kapasitörlere göre özgül enerji değerleri, pillerle karşılaştırıldığında özgül güç değerleri yüksektir (Boddula et al., 2022: 43).



Şekil 2.31. Yakıt hücreleri ve yanma enerjisi dahil olmak üzere enerji depolama cihazlarının Ragon grafiği (Boddula et al., 2022: 43).

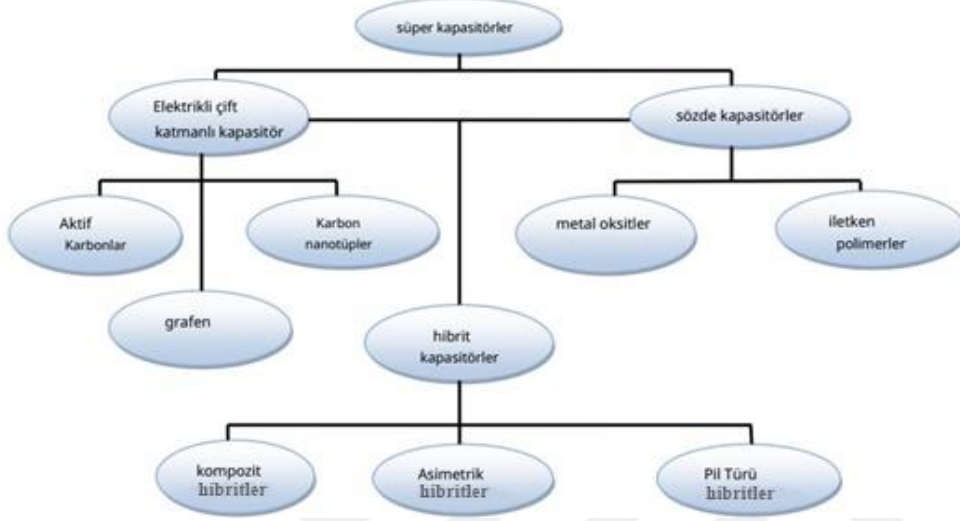
Geleneksel kapasitörlere nazaran büyük değerlerde kapasitör üretmek için, gözenekli karbon elektrotlar arasındaki mesafe küçültülmüş ve yüzey alanı genişletilmiştir. Geleneksel kapasitörlerde çok büyük hacimli Farad seviyesindeki kapasitörler, süper kapasitör teknolojisi sayesinde küçük hacimli kapasitör üretimini mümkün kılmıştır (Dixon, 2010).



Şekil 2.32. Süper kapasitör bankası (Dixon, 2010).

2.4.2 Süper Kapasitörlerin Sınıflandırılması

Süper kapasitörler, çift katmanlı, sözde ve hibrit olmak üzere 3 grupta sınıflandırılır.



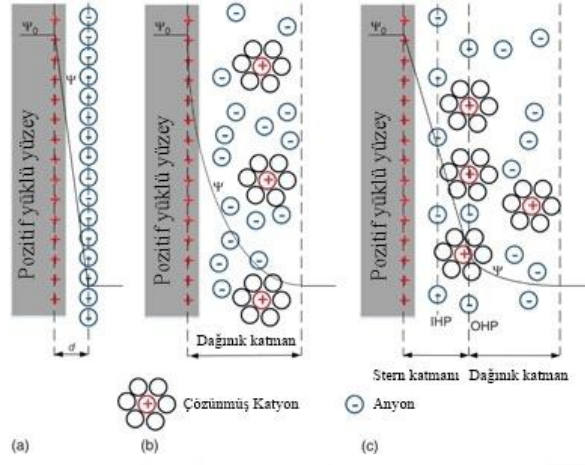
Şekil 2.33. Süper kapasitörlerin sınıflandırılması (Iro et al., 2016).

Elektrikli çift katmanlı süper kapasitörler (EÇKS), elektrokimyasal çift katmanlı depolama prensibi ile çalışır ve uçlarına uygulanan potansiyel fark sonucunda elektrotlarında elektrik yükü depolar. Kutuplarında artı ve eksi yüklerin birikmesiyle elektrostatik olarak elektrik enerjisi depolanır. Karbon temelli elektrotta biriken elektrik yükleri, ayırıcı ve zıt yükle yüklenmiş olan diğer elektrotta difüzyona neden olur. İyonlar elektrotlarda çift katmanlı yük oluşturur (Iro et al., 2016).

Kapasitörlerde paralel plakalar arasındaki mesafe süper kapasitörlerde nanometre seviyesine düşürülmüştür. Elektrotlar arasındaki mesafenin azaltılması ve elektrotlarda biriken yüklerin yüzey alanlarının artırılması, elektrik yükü depolama yeteneğini artırmıştır (Boddula et al., 2022: 45).

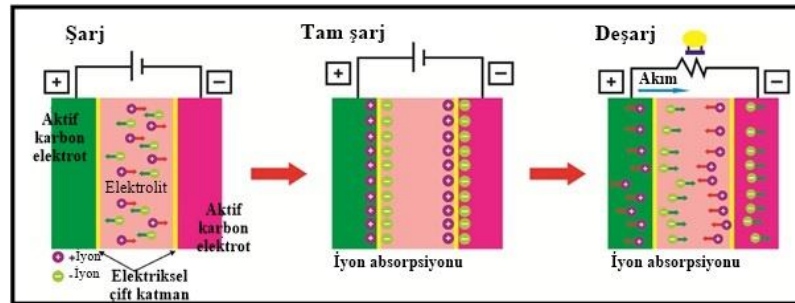
Çift katmanlı modellerden Şekil 2.34a Helmholtz modeli, aralarında d mesafesi olan artı ve eksi yükler arasında iyonların oluşturduğu yoğun bir tabakayı ifade etmektedir. Buna neden olan elektrotlar arasındaki potansiyel farktır.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2)$$



Şekil 2.34. Çift katmanlı modellerin şematik gösterimi. (a) Helmholtz modeli, (b) Gouy–Chapman modeli, (c) Stern modeli (Boddula et al., 2022: 45).

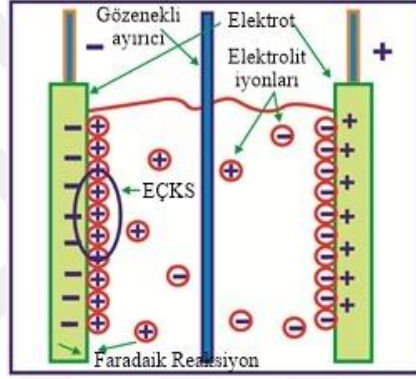
Modelde kapasite değeri, elektrotların yüzey alanı ile doğru, yükler arasındaki mesafe ile ters orantılıdır. Dielektrik sabiti arttıkça kapasite artar. Gouy–Chapman modelinde ise elektrotlar arasında oluşan gerilim farkı ve elektrolit yoğunluğu, iyonlar tarafından yayılan dağınık bir katman oluşturur. Helmholtz modeli iyon yoğunluğunu göz ardı ederken, katmanda yüksek düzeyde yük birikimi olduğunda oluşan durum bu model tarafından tanımlanmamıştır. Stern modeli, Gouy–Chapman modelinin geliştirilmiştir. Sert yoğun bir tabakanın (stern katmanı) iç ve dış Helmholtz düzlemlerinde, iyonların oluşumu açıklanmıştır (Boddula et al., 2022: 46).



Şekil 2.35. EÇKS'nin şarj ve deşarj aşamaları (Khalid et al., 2020: 33).

Farklı modeller ile açıklandığı üzere, iyonların oluşturduğu elektrik katmanları elektrik yüklerinin depolanmasını sağlar. Organik, sulu, iyonik asit çözeltili elektrolitler ile karbon, metal geçiş oksit ve iletkenlik özelliği olan polimer malzemelerden elektrotlar EÇKS yapısını oluşturur (Khalid et al., 2020: 32,33).

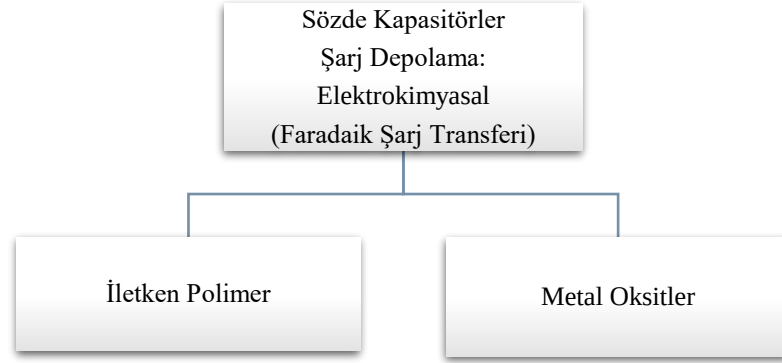
Çift katmanlı süper kapasitör şarj olurken uygulanan gerilim farkı sayesinde, elektrolit boyunca iyonlar elektriksel katmanlar tarafından çekilir. Artı tarafta ve eksi tarafta karşıt yükler elektrostatik yük depolar. Bu işlem çok hızlı gerçekleşir. Deşarj anında ise yüke elektrik akımı sağlar. İyonlar terk ettikleri elektrolitlere doğru yönelir (Khalid et al., 2020: 32,33).



Şekil 2.36. Faradaik reaksiyonlar gösteren EÇKS (Khalid et al., 2020:38).

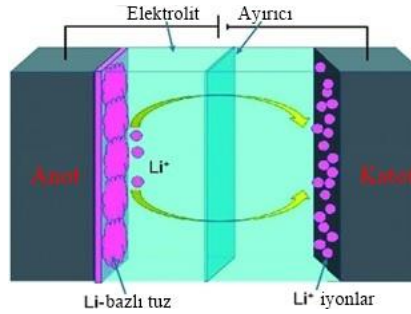
Sözde kapasitörlerde, yük transferi elektrot ve elektrolit arasında gerçekleşir. Elektrik yükünü elektrokimyasal olarak pil gibi depolarken, elektriksel çift katmanlı süper kapasitörlerdeki gibi elektrostatik olarak depolar. Şarj esnasında uçlarına uygulanan potansiyel fark, faz değişimi olmadan elektrot tarafında redoks tepkimesi gerçekleştirir (Khalid et al., 2020:38). Yük katmanlardan geçer ve kapasitör içerisinde faradaik akım akar. Çift katmanlı kapasitörlerden daha büyük özgül kapasite ve enerji yoğunluğu elde edilmiştir (Iro et al., 2016).

Sözde kapasitörlerin organik katı iletken polimer polipirol, polianilin gibi malzemeler ile üretilen polimer temelli tipleri olduğu gibi, metal oksit ve metal karbon malzeme ile de üretilirler. Çevrim stabilitesi karbon temelli türlerde daha iyidir (Najib and Erdem, 2019).



Şekil 2.37. Sözcük kapasitörlerin sınıflandırılması (Najib and Erdem, 2019).

Hibrit süper kapasitörlerde, faradaik ve faradaik olmayan mekanizma kapasite değerini arttırmak için bir arada kullanılmıştır. EÇKS’de kullanılan malzemeler, polimer ve karbon temelli sözcük kapasitörlerde kullanılan malzemeler birleştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen hibrit yapı, enerji yoğunluğunun yetersiz olduğu kapasitörlerde yoğunluğun artmasını sağlar. Tek tip elektrot kullanılmadığından, elektrokimyasal davranış enerji yoğunluğunun sözcük kapasitörlere göre daha iyi olmasını sağlar (Muzaffar et al., 2019).



Şekil 2.38. Hibrit süper kapasitör şematik diyagramı (Muzaffar et al., 2019).

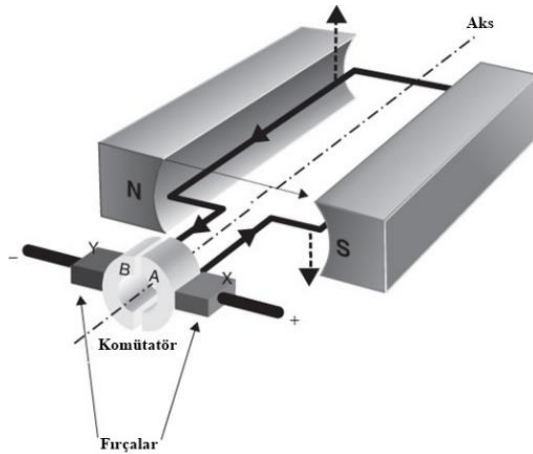
Şekil 2.38 Li ve karbon temelli hibrit yapıyı gösterir. Simetrik hibrit yapıda benzer elektrotlar kullanılırken, asimetrik tiplerde farklı tip elektrotlar kullanılır (Muzaffar et al., 2019).

2.5 Elektrikli Çekiş Motorları

EA'ların en önemli bileşenlerinden biri elektrik motorudur. Doğru akım veya alternatif akım ile çalışabilen motorlar, elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştürür. EA'ların başlangıcından günümüze kadar geçen süreçte, üreticiler çeşitli elektrik motorlarını tercih etmiştir. Doğru akımla çalışan motorların kontrol yöntemleri ve sürücü devreleri daha basit olsa da çeşitli dezavantajları nedeniyle alternatif akım ile çalışan tipleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Hayes and Goodarzi, 2018: 161).

- Fırçalı DA Motor
- Daimi Mıknatıslı Fırçasız DA Motor
- Daimi Mıknatıslı Senkron Motor
- Asenkron Motor
- Anahtarlama Relüktans Motoru
- Senkron Relüktans Motoru
- Kalıcı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor
- Eksenel Akı Demirsiz Kalıcı Mıknatıslı Motor

EA'larda kullanılan motor çeşitleridir (Kumar and Alexander, 2020: 52, 58).



Şekil 2.39. Basit sabit mıknatıslı DA motorun çalışmasını açıklayan diyagram (Larminie and Lowry, 2012: 234).

Fırçalı DA motorları, stator kısmında kalıcı mıknatısa sahiptir. Fırçalar ise rotor kısmında bulunur. Akım yolu Şekil 2.39'daki gibidir. Bobin sargısından geçen akım fırçalar arasında akarken oluşan zıt yönlü iki kuvvet, motorun dönmesini sağlar. Döndürme kuvvetinin gücü, kullanılan mıknatıs sayısı ile doğru orantılıdır (Larminie and Lowry, 2012: 233).

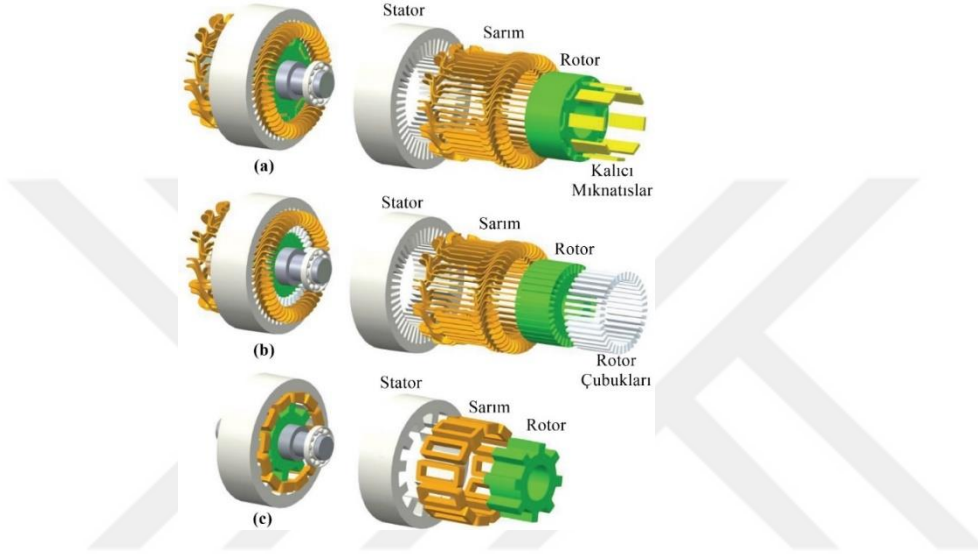
Daimi mıknatıslı fırçasız DA motorunun rotor sargıları, neodyum-demir-bor'dan üretilen güçlü sabit mıknatıslara sahiptir. DA/AA dönüşümü yapan devre üzerinden beslenerek çalışır. Isı dağılımının iyi olması, boyutlarının küçük oluşu ve ağırlıklarının az olması avantaj sağlar. Torku başlangıç anından itibaren en yüksek seviyede olmasına rağmen belirli hız değerinde azalmaya başlar. Bunun nedeni ters elektromotor kuvvetidir. Yüksek güç gerektiren araç uygulamalarında kullanılması avantajlı değildir (Kumar and Alexander, 2020: 52, 53).

Daimi mıknatıslı senkron motor, kalıcı mıknatıs kullanan AA motorudur. Fırçasız DA motorlarına benzer yapıya sahiptir. Verimliliklerinin yüksek olması, kısa tepki süreleri avantaj sağlar (Loganayaki and Kumar, 2019). Üç fazlı besleme kullanılır. SmCo (Samaryum Kobalt) ve NdFeB (Neodimyum) içeren güçlü mıknatıslara sahiptir. Rotorun çekirdek kısmında bulunurlar (Aliasand and Josh, 2020: 1807). İç yapıda kullanılan mıknatıslar hız seviyesinin artırılmasını sağladığı gibi manyetik alan zayıflatma sayesinde çalışma aralığını artırmaktadır. AA motoru olması nedeniyle sinüs dalgalı besleme kullanılır (Sheela et al., 2022).

Asenkron motor, indüksiyon motoru olarak da bilinen basit yapılı AA motorudur. Oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Güvenli çalışmalarının yanında üretim ve bakım maliyetlerinin düşük olması en önemli avantajlarından biridir. Motor torku, sargılar arasındaki faz farkı sayesinde üretilir. Rotor dönme hızı, motor sabit kısmındaki manyetik alan değişiminden daha düşüktür (De Santiago et al., 2011).

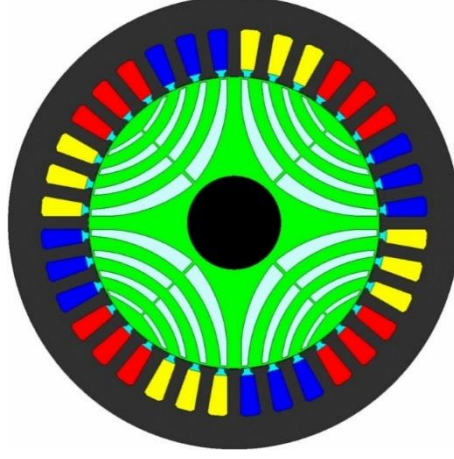
Anahtarlamalı relüktans motoru, stator sargıları DA motoru ile aynı yapıda senkron bir motordur. Stator uçlarının uyartımı, sargılarından geçen akımlar ile rotorun dairesel hareketini sağlar. Relüktans değişikliği ile akım statordan akar ve tork üretilmiş olur (Krishnan, 2001: 30). Rotorunda sabit mıknatıs ya da iletken yoktur. Üretim maliyeti düşüktür. Bakır kullanılmadığından, yüksek sıcaklıklarda

eritilerek işlenen bakırın yoğunluğu sayesinde, ihtiyaç duyduğu özel işleme ekipmanına gerek kalmamıştır. Asenkron motorların iletken kullanması daha pahalı üretim maliyetine neden olur. Anahtarlama relüktans motorların üretim ihtiyacını karşılayabilecek donanımlı firma sayısının fazla oluşu, bu tip motorların rekabet gücünü artırmaktadır. Mıknatıs maliyetlerinin olmaması ve ilk mıknatıslandırma işlemlerinin gerekmemesi maliyeti ciddi anlamda azaltmaktadır (Bilgin et al, 2018: 25,26).



Şekil 2.40. (a) Dâhilî sabit mıknatıslı senkron motor, (b) Asenkron motor, (c) Anahtarlama relüktans motor (Bilgin et al, 2018: 19).

Senkron relüktans motoru, anahtarlama relüktans motorlarında da olduğu gibi kalıcı mıknatıs kullanmaz. Maliyet avantajı sağlayan bu tasarım aynı zamanda, basit bir motor üretimini mümkün kılar. EA uygulamaları için ihtiyaç duyulan verim ve hızlanma yeterlilikleri sayesinde dikkat çekmektedir. Rotor hareketi ile birlikte değişken mekaniksel özellikler göstermesi, düzensiz tork üretim riskini beraberinde getirir. Stator sargıları ve rotor konumu ile ilgili yapılan çeşitli çalışmalar sayesinde bu önemli eksiklik çözülmeye çalışılmıştır (Rouhani et al., 2018). Bu motor türünde rotor tasarımı, tork yoğunluğu artmasını sağlarken, tork düzensizliğinin minimum seviyeye çekilmesi noktasında kritik öneme sahiptir. Dinamik hız aralığında motor performansının üst seviyeye çıkarılmasını sağlamak, motor tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardandır (Bianchi et al., 2014).



Şekil 2.41. Dört kutuplu senkron relüktans motorun yapısı (Rouhani et al., 2018).

Kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motor, rotora eklenen mıknatıslar sayesinde saf senkron relüktans motorların düşük güç yoğunluğu dezavantajına çözüm getirir. AA beslemeli senkron relüktans motorlar cazip maliyetlerde imal edilmesine rağmen; tork dalgalanmaları, gürültülü çalışma gibi elektrikli araçlarda istenmeyen yetersizliklere sahiptir. Güç faktörü yetersizliği, çekiş motoru için önemli bir sorundur ve akış bariyerine mıknatıs eklenmesi ile çözüm sağlanmaktadır. Alt arka elektromotor kuvveti, güç faktörü üzerinde güçlü bir etki sağlar (Zhang, 2020). Uygun maliyetli ferrit mıknatıslar sayesinde, motor maliyetine ciddi etkisi olan toprak mıknatıs kullanım zorunluluğu ortadan kaldırılmıştır. Kalıcı mıknatıslı motorlara göre üretimi daha kolaydır ve uygun tasarımlar sayesinde senkron motorlarla rekabet edebilir (Cai et al., 2014).

Eksenel akı demirsiz kalıcı mıknatıslı motorlar, farklı topolojilerle üretilen yüksek güç ve yüksek tork yoğunluklarına sahip motorlardır. Yaygın kullanım alanlarının yanında elektrikli araçlarda çekiş motoru olarak tercih edilmektedir (Aydın ve Güleç, 2016). Statorda, manyetik alan içerisinde mıknatıslanma davranışı gösteren malzeme bulunmaz. Bu yapı elektrik motorunun enerji kayıplarını engeller. Histeresiz ve Feko kayıplarının olmaması verimi yükseltir. Motorun yüksek tork yoğunluğu, düşük harmonikli manyetik alan sayesinde sağlanır (Geng and Zhang, 2016). Tork düzensizliği istenmeyen, çekiş motoru için hassas konum denetiminin önemli olduğu demirsiz kalıcı mıknatıs motorları iyi bir alternatif sunmaktadır (Ferkova et al., 2008).

Tablo 2.5’de, çekiş motoru için tüm parametreler görülmektedir. Güç, tork, hız, verim, boyut, sağlamlık gibi özellikler 1 ve 5 arasında puanlanarak değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesi neticesinde asenkron (indüksiyon) motoru ve kalıcı mıknatıslı senkron motorların elektrikli araç uygulamaları için uygun oldukları görülmektedir (Rind et al., 2017).

Tablo 2.5. Çekiş motoru performans değerlendirmesi (Rind et al., 2017).

Motor Özellikleri	DA Motoru	İndüksiyon Motoru	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor	Anahtarlamalı Relüktans Motor
Güç yoğunluğu	2,5	4	5	3,5
Verim	2,5	4	5	4,5
Kontrol edilebilirlik	5	5	4	3
Güvenilirlik	3	5	4	5
Sağlamlık	3	5	4	5
Tork yoğunluğu	3	4	5	4
Hız sınırı	2,5	4	4,5	4,5
Gerekli bakım	3	4	4	4
Tork dalgalanması/gürültü	3,5	4,5	4,5	3
Aşırı yük kapasitesi	3	4	4	4
Teknik olgunluk	5	4,5	4	3,5
Ömür	3,5	5	4	4,5
Ebat ve ağırlık	3	4	5	4
Maliyet	4	5	3	4
Toplam	46,5	62	60	56,5

Tablo 2.6’da, farklı araçlarda kullanılan motor türlerinin, avantaj ve dezavantajları görülmektedir. Tork, güç yoğunluğu, verimlilik, boyut, maliyet, kayıplar gibi parametreler motor tercihinde ön plana çıkmaktadır.

Tablo 2.6. Farklı motor tiplerinin avantajları, dezavantajları ve kullanımı (Kumar and Alexander, 2020: 57; 58).

Motor tipi	Avantaj	Dezavantaj	Kullanıldığı araç
Fırçalı DA motor	Düşük hızda maksimum tork	• Hacimli yapı • Düşük verimlilik • Fırçalarda ısı oluşumu	Fiat Panda Elettra (Seri DA motor), Conceptor G-Van (ayrı olarak uyarılmış DA motor)
Kalıcı mıknatıslı fırçasız DA motor	• Daha hafif • Daha küçük • Daha iyi ısı dağılımı • Daha fazla güvenilirlik • Daha fazla tork yoğunluğu • Daha fazla özgül güç • Rotor bakır kaybı yok • Asenkron motorlardan daha fazla verimlilik	• Hız artışıyla birlikte azalan tork • KM nedeniyle yüksek maliyet • Kısa sabit güç aralığı	Toyota Prius (2005)
Kalıcı mıknatıslı senkron motor	• Dişli sistemleri kullanmadan farklı hız aralıklarında çalışabilme • Verimli • Kompakt • Tekerlek içi uygulamaya uygun • Çok düşük hızlarda bile yüksek tork	• Tekerlek içi çalışma sırasında yüksek hızlarda büyük demir kaybı	Toyota Prius, Nissan Leaf, Soul EV
Asenkron motor	• En olgun komütatörsüz motor tahrik sistemi • Alan oryantasyon kontrolü kullanılarak ayrı olarak uyarılmış bir DC motor gibi çalıştırılabilir	-	Tesla Model S, Tesla Model X, Toyota RAV4, GM EV1

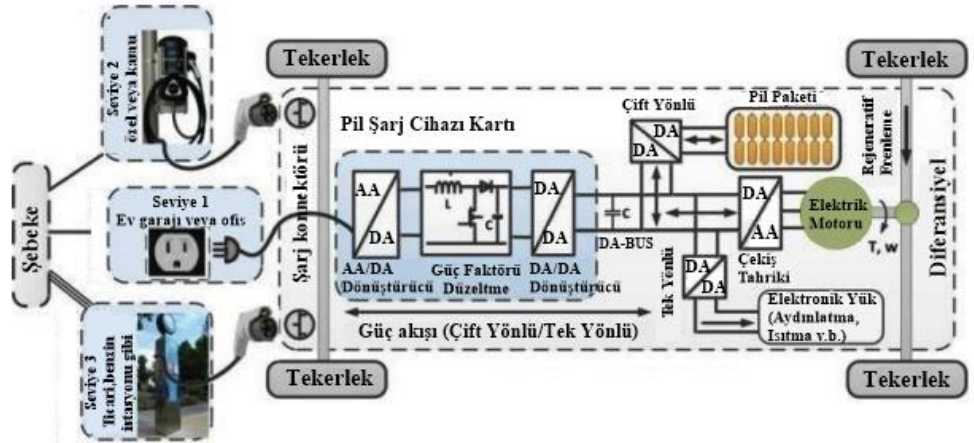
Tablo 2.6. Farklı motor tiplerinin avantajları, dezavantajları ve kullanımı (Kumar and Alexander, 2020: 57; 58). (devam)

Motor tipi	Avantaj	Dezavantaj	Kullanıldığı araç
Anahtarlama relüktans motoru	• Basit ve sağlam yapı • Düşük maliyetli • Yüksek hız • Daha az tehlike olasılığı • Uzun sabit güç aralığı • Yüksek güç yoğunluğu • Güçlü • Hata toleransı • Verimli • Küçük	• Çok gürültülü • Düşük verimlilik • KM makinelerinden daha büyük ve ağır • Karmaşık tasarım ve kontrol • Kontrol edilebilirlik ve üretimdeki sorunlar • Düşük güç faktörü	Chloride Lucas
KM destekli senkron relüktans motoru	• Senkron RM'lerden daha yüksek güç faktörü • İKM'de gözlemlenen demanyetizasyon problemlerinden arındırılmış	-	BMW i3
Eksenel akı demirsiz sabit mıknatıslı motor	• Dış rotorda demir kullanılmaz • Stator çekirdeği yok • Hafif • Daha iyi güç yoğunluğu • Minimum bakır kaybı • Daha iyi verimlilik • Değişken hızlı makine • Rotor, tekerleğin yan tarafına takılabilir.	-	Renovo Coupe

2.6 Güç Elektroniği Sistemi

EA’larda elektrikli tahrik sisteminin önemli bileşenlerinden birisi de güç elektroniği devreleridir. Pil depolama teknolojisinden aldığı enerjiyi elektrikli çekiş motorunu sürmek amacıyla kullanırken, farklı akım/gerilim dönüşümlerine ihtiyaç duyar. Araç performansının artırılması için güç elektroniği devrelerinin maliyet ve verim gereksinimleri kritik önem taşır. Kullanılan AA motorlarının DA pil kaynağından beslenebilmesi için gerekli olan DA/AA dönüşümü evirici (inverter) devreler sayesinde sağlanır. Güç elektroniği devrelerinin en önemli elemanları elektronik anahtarlama elemanlarıdır (Rajashekara, 2013).

TEA’larda güç dönüşümü sadece motor enerjisini sağlamak için kullanılmaz. Frenleme esnasında elde edilen kinetik enerjinin araç pillerinde kullanılması için DA/DA dönüşümü gereklidir. Ayrıca araç pillerinin şarj edilebilmesi için AA/DA dönüşümü sağlanmalıdır. Ters işlem olarak çekiş pili enerjisinin şebeke elektriğine aktarılması için ters dönüşüme ihtiyaç duyulur (Hegazy et al., 2013).

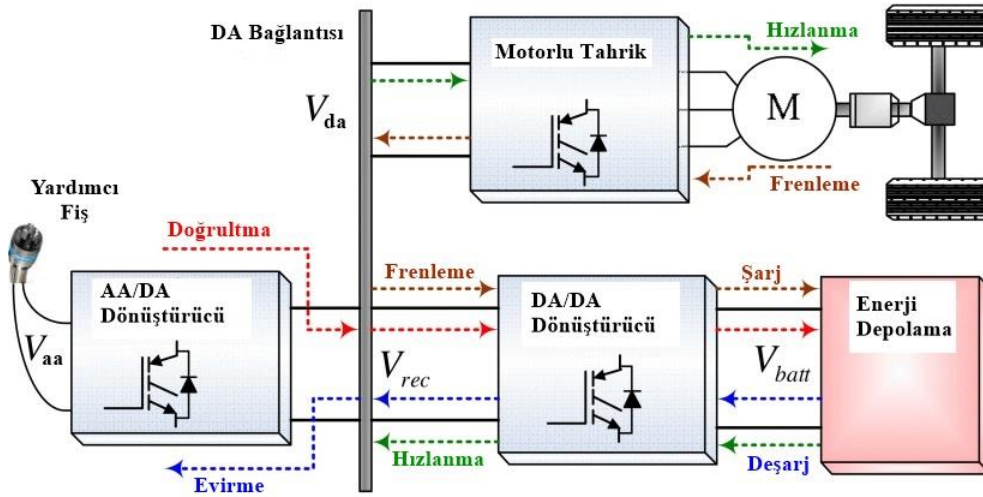


Şekil 2.42. Bir EA’da kullanılan güç elektroniği (Kar et al., 2021).

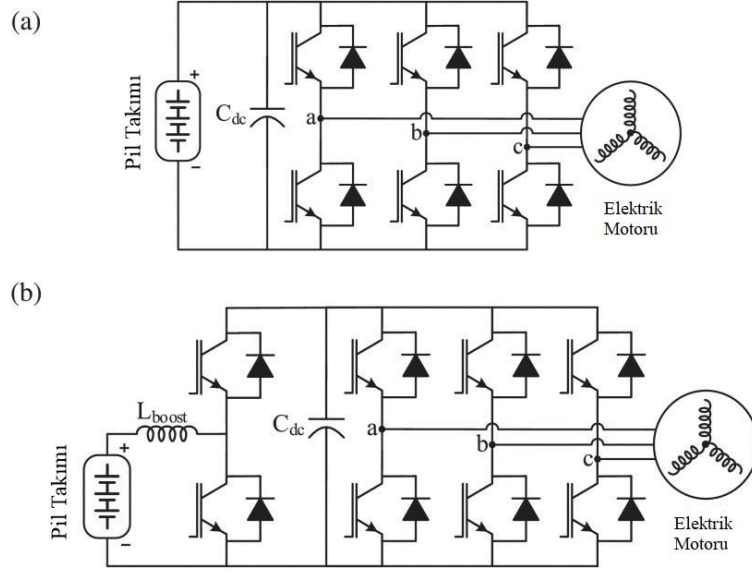
Şekil 2.42’de TEA için güç elektroniği sistem bileşenleri görülmektedir (Kar et al., 2021). Yeni nesil araçlarda teknoloji ilerledikçe araç özellikleri artmaktadır. Araçta bulunan sensörler ve mikrodenetleyicili kontrol sayesinde; sürücü, araç içi aydınlatma, ses sistemi, silecek kontrolleri, lastik basınç uyarıları, navigasyon, şerit

takip sistemi, araç klima sistemi v.b. özellikleri kullanabilmektedir. Araç motor tahriğine ek olarak, sıcaklık, ses, ışık, yol takip, güvenli sürüş gibi teknolojiler elektrik enerjisine ihtiyaç duyarlar. Elektronik yükler farklı gerilim ve akım değerleri ile çalışır. Elektronik yüklerinin fazla olması ve gerekli olan akım-gerilim değerlerinin elde edilmesi için kullanılan DA/DA dönüştürüm, araç verimliliğini olumsuz etkiler (Maroti et al., 2021).

EA sistemi içerisinde güç akışı tek veya çift yönlü olabilir. Kullanılan elektrikli çekiş makinası hızlanma modunda motor olarak çalışırken, frenleme modunda üreteç olarak çalışır. DA/DA dönüştürücü, hızlanma için gerekli enerjinin pilden motora doğru akışına ve kontrolüne izin verir. Frenleme esnasında ise kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesi ile oluşan enerji pile yönlendirilir. Aynı şekilde araç şarj durumundayken doğrultma devresinden gelen doğru akım, DA/DA dönüştürücüden pile akım akışına izin verirken, işlemin tersi olarak şebekeye akım akışını yönlendirmelidir. EA'da güç akışının çift yönlü olması, sistemin enerji harcarken ve enerji üretirken pil şarj/deşarj modlarının sürekliliğini sağlar. Hızlanma, frenleme, şarj,deşarj gibi durumlarda pil geriliminin, doğru akım bağlantı gerilimlerinin değişken olması gereklidir. Tüm bu güç dönüşümleri araç güç elektroniği kontrol sistemi tarafından ayarlanır (Onar et al.,2012).



Şekil 2.43. Elektrikli bir araçta güç elektroniği arayüzleri (Onar et al.,2012).

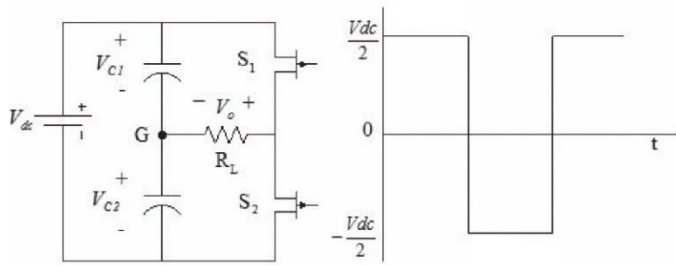


Şekil 2.44. Otomotiv endüstrisinde kullanılan standart evirici topolojileri (Reimers et al.,2019).

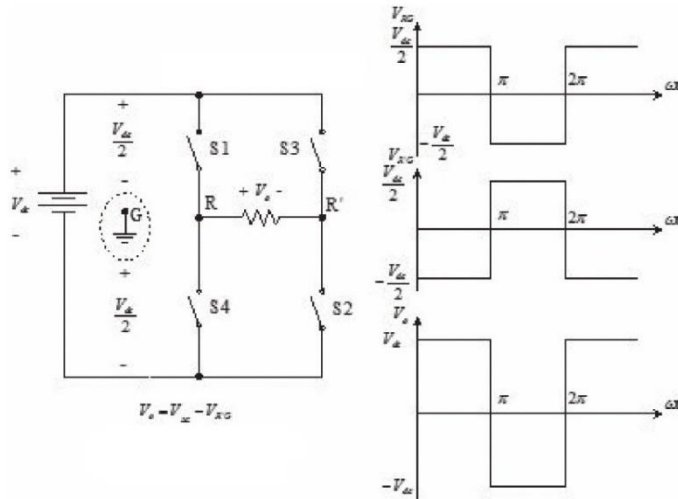
Evirici devreler, AA ile çalışan cihazların DA besleme kaynağı ile çalışmasını sağlayan elektronik devrelerdir. EA'larda pil depolama teknolojisi kullanılır ve çekiş motoru olarak genellikle alternatif akımla çalışan motorlar kullanılır. Bu yüzden motor pilden aldığı enerjiyi doğrudan kullanamaz. Regeneratif frenleme ile elde edilen enerjinin doğru akım kaynağı olan pile depolanması için eviricinin ters bir dönüşüm gerçekleştirme kabiliyetine de sahip olması gerekir. Şekil 2.44a'da üç fazlı AA motorunun ihtiyaç duyduğu gerilimi sağlayan, yaygın kullanıma sahip gerilim kaynaklı evirici devresi görülmektedir. Şekil 2.44b'deki topolojide evirici, pilden aldığı DA'yı devrede bulunan elektronik anahtarlarla AA'ya dönüştürür ve alternatif akım motoruna aktarır. Çekiş pilinden alınan DA'yı yükseltmek ve denetimli şekilde motora beslemek için gerilim kaynaklı evirici, yükselten dönüştürücü ile birleştirilmiştir (Reimers et al., 2019).

2.6.1 Gerilim Kaynağı Eviriciler

DA/AA dönüşümü, tek faz veya üç faz olarak yapılmaktadır. Gerilim kaynağı evirici uygulamalarında tek fazlı dönüşüm; yarım köprü veya tam köprü olarak tasarlanırken, yarım köprü birleşimleri sayesinde üç fazlı evirici uygulamaları gerçekleştirilir. Eviricinin gerilim kaynaklı uygulamasında harmonik bozulmaların etkisi önemlidir. DA/AA dönüşümünde ortaya çıkan harmonikler, motor torku titreşimlerine, düşük hız ısınmalarına ve motor veriminin düşmesine neden olur. Üretilen dalga formu kalitesinin düşmesi, istenmeyen etkiler yaratır. Harmonik kaynaklı olumsuzluklar, uygulandığı motorun endüktif yapısı sayesinde akımdaki harmonik bozulmaları azaltır. Bozulmaların azaltılması, kullanılan motor sürme yöntemleri sayesinde gerçekleştirilebilir (Kharjule, 2015).



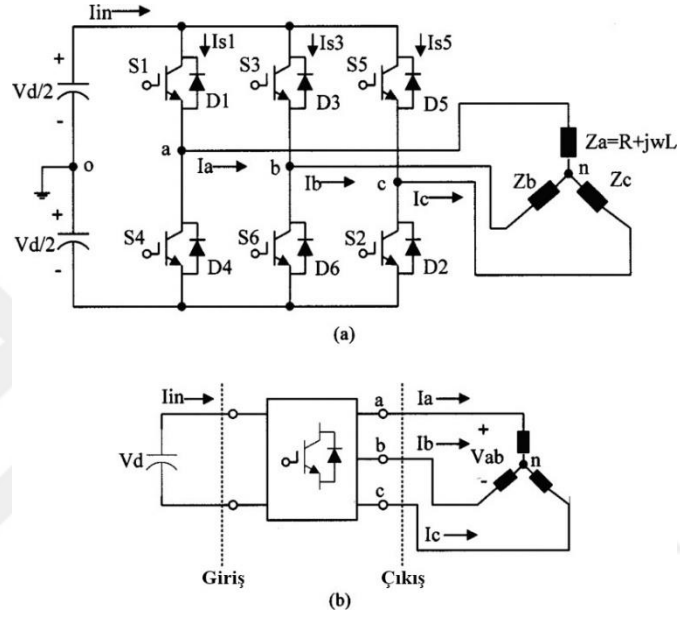
(a) Tek Fazlı Yarım Köprü Evirici



(b) Tek Fazlı Tam Köprü Evirici

Şekil 2.45. (a) Tek fazlı yarım köprü, (b) Tam köprü evirici (Kharjule, 2015).

İki evirici çeşidinin çıkış dalga biçimleri aynı iken, tam köprüde çıkış gerilimi, kaynak geriliminin tamamının yük üzerine aktarılmasını sağladığı yarım köprü eviricinin iki katı kadardır. Yarım köprü eviricide kullanılan IGBT anahtarlama elemanları S_1 ve S_2 'den biri iletimdeyken diğeri kesimdedir. Tam köprü eviricide ise S_1 - S_2 iletimdeyken, S_3 - S_4 kesimdedir. Sonraki yarım periyotluk sürede bunun tersi geçerlidir. Kullanılan IGBT'lerin anahtarlama sıraları ve süreleri elektronik kontrol devreleri ile gerçekleştirilir (Kharjule, 2015).



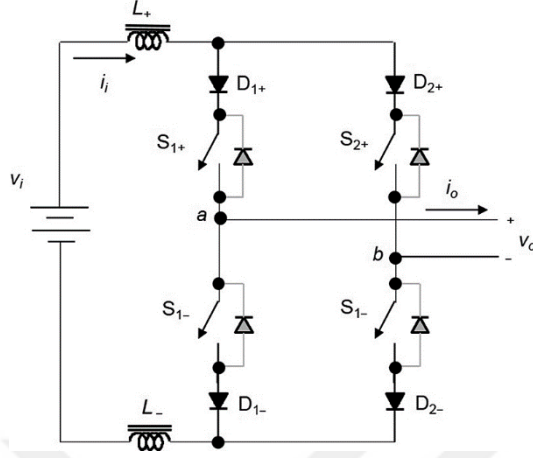
Şekil 2.46. (a) Gerilim kaynağı evirici devresi, (b) Girdi ve çıktı değişkenleri (Lee and Ehsami, 2001).

Üç fazlı motor için altı anahtarlı gerilim kaynağı evirici şekilde görülmektedir. Üç adet yarım köprü kullanılarak tasarlanmış eviricide her yarım köprü, fazlardan birini kontrol etmek için kullanılır (Lee and Ehsami, 2001).

2.6.2 Akım Kaynağı Eviriciler

Bu topoloji, gerilim kaynağı eviricilerden farklı olarak IGBT, MOSFET gibi anahtarlama elemanlarının yerine tristör teknolojisi üzerine üretilmiştir. Sabit akım darbeleri formunda AA üretimi gerçekleştirir. DA bağlantı indüktörü kullanılmıştır. Anahtarlama elemanlarına seri diyotlar bağlanmıştır. Çıkış filtre devresi

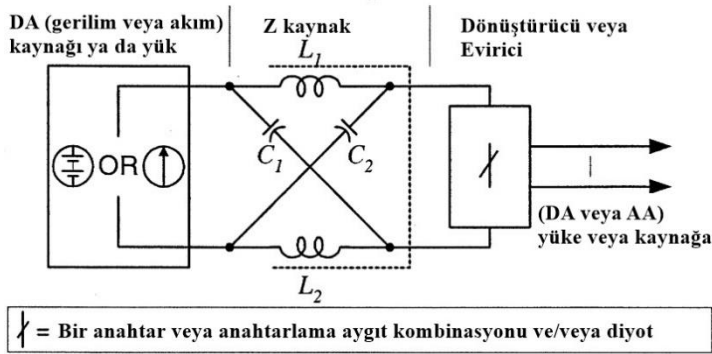
kondansatör içerir. Aşırı akıma karşı yüksek güvenlik sağlayan akım kaynağı eviriciler, yükseltici evirici olarak işlev görür (Rashid, 2017: 291, 293).



Şekil 2.47. Tek fazlı akım kaynaklı evirici (Rashid, 2017: 294).

2.6.3 Z-Kaynağı Eviriciler

Gerilim ve akım kaynağı eviricilerin çözülmesi gereken dezavantajları bulunmaktadır. AA ve DA arasındaki çeşitli güç dönüşümü birleşimlerinin gerçekleşmesine olanak sağlayan Z (empedans) kaynağı eviriciler sayesinde, istenilen çıkış gerilimi aralığı elde edilebilir. Empedans, devre veya bileşenlerin AA'ya gösterdiği direnç değeridir. Bu değer frekansa bağlı olarak değişebilir. Dolayısıyla empedans, büyüklük değerinin yanında faz açısı değeri ile birlikte ifade edilir. Kapasitör ve indüktör çiftlerinin bağlantısı ile elde edilen topolojiye sahiptir (Peng, 2003).

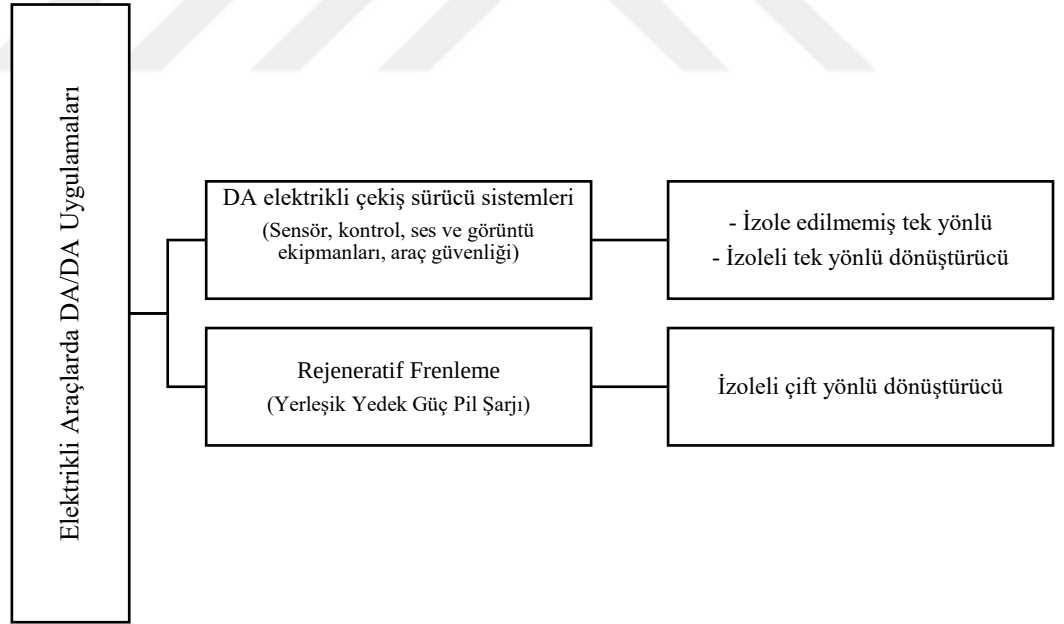


Şekil 2.48. Z-kaynak eviricinin genel yapısı (Peng, 2003).

Üç faz motor kontrolünde alternatif çözüm sunan Z kaynak evirici, kaynaktan bağımsız olarak daha yüksek gerilim değerlerini üretebilir. Harmonik bozulma sorununa uygun çözümler getirir ve güç faktöründe iyileştirme sağlar. Gerilim kaynağı eviricide karşılaşılan elektromanyetik bozulma kaynaklı hasarları engeller (Peng et al., 2005).

2.6.4 DA/DA Dönüştürücüler

EA'larda kullanılan güç dönüşümlerinden bir diğeri DA/DA dönüşümdür. EA'nın şarj edilmesi, çekiş pilinden alınan enerjinin araçta DA ile çalışan diğeri bileşenlerin çalıştırılması gibi uygulamalarda bu dönüşüm gereklidir. TEA'larda DA ile çalışan bileşenler, farklı gerilim ve güç seviyelerine ihtiyaç duyar. Ayrıca kullanılan çekiş motoru bir DA motoru ise çekiş motorunun kontrol edilmesi DA/DA dönüştürücüler sayesinde olur. Araç performansı ve verimliliği üzerinde etkisi olan dönüştürücüler daha yüksek gerilim seviyelerine yükseltmeyi sağlayabildiği gibi düşürme işlemi de yapar (Bellur and Kazimierczuk, 2007).

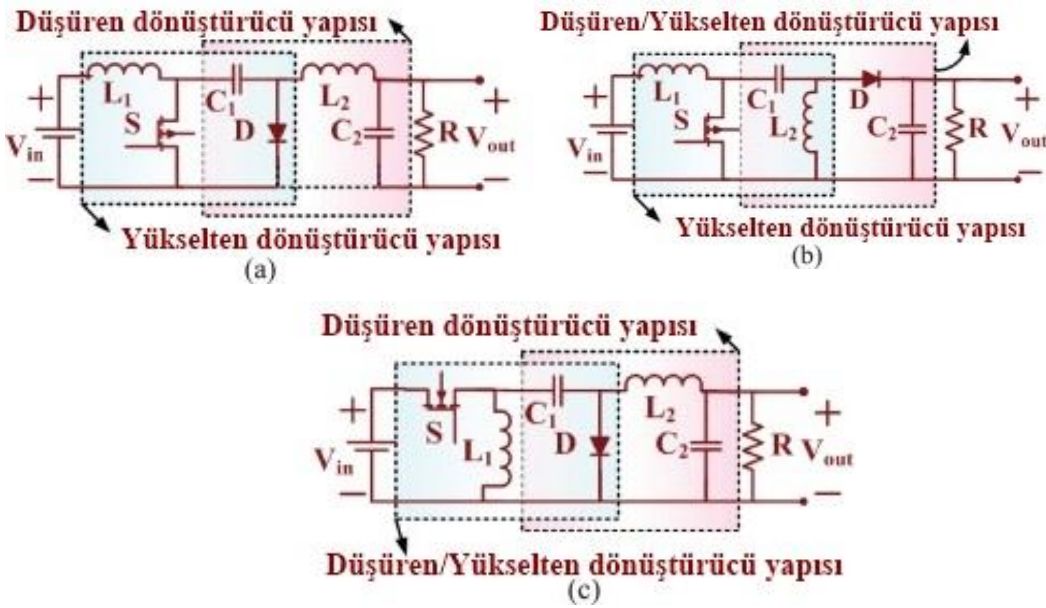


Şekil 2.49. DA/DA dönüştürücülerin elektrikli araçlardaki uygulamaları (Bellur and Kazimierczuk, 2007).

Gerilim dönüşümünde, düşük güçlü uygulamalarda yalıtım kullanılmasına gerek yoktur. Güçlü uygulamalarda ise yalıtıma gereksinim duyulur. Transformatör kullanımı ile bu gereksinim karşılanır. EA'lar için verim, maliyet, boyut, parazit ve girişimlerin engellenmesi önemlidir. Dönüştürücü devrelerinde kullanılan elektronik anahtarların kontrol edilmesi için sürücü devreler kullanılır. Güç seviyesine bağlı olarak ve istenen yükseltme/düşürme işlemlerini gerçekleştirmek için farklı topolojiler kullanılmaktadır (Soylu, 2011).

2.6.4.1 Tek Yönlü DA/DA Dönüştürücü

Güç akışının girişten çıkışa doğru olduğu bu dönüştürücüler; tek kademeli, çok kademeli ve çok fazlı DA/DA dönüştürücüler olarak sınıflandırılır. Tek kademeli dönüştürücüler geleneksel düşüren, yükselten ve düşüren/yükselten tip dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücülerin birleşimleri ile çok kademeli dönüştürücüler elde edilir. Yüksek güç gereksinimi için çok kademeli dönüştürücüler tercih edilir (Bhaskar et al., 2020).



Şekil 2.50. Düşük yükseltme DA/DA çok kademeli güç dönüştürücüsünün veya türetilmiş iki aşamalı topolojilerin güç devresi (a) CUK dönüştürücü, (b) Tek uçlu birincil endüktans dönüştürücü, (c) ZETA dönüştürücü (Bhaskar et al., 2020).

Alçak gerilim uygulamalarında, geleneksel dönüştürücüler ile elde edilen; CUK dönüştürücü, tek uçlu birincil endüktans dönüştürücü ve ZETA dönüştürücü

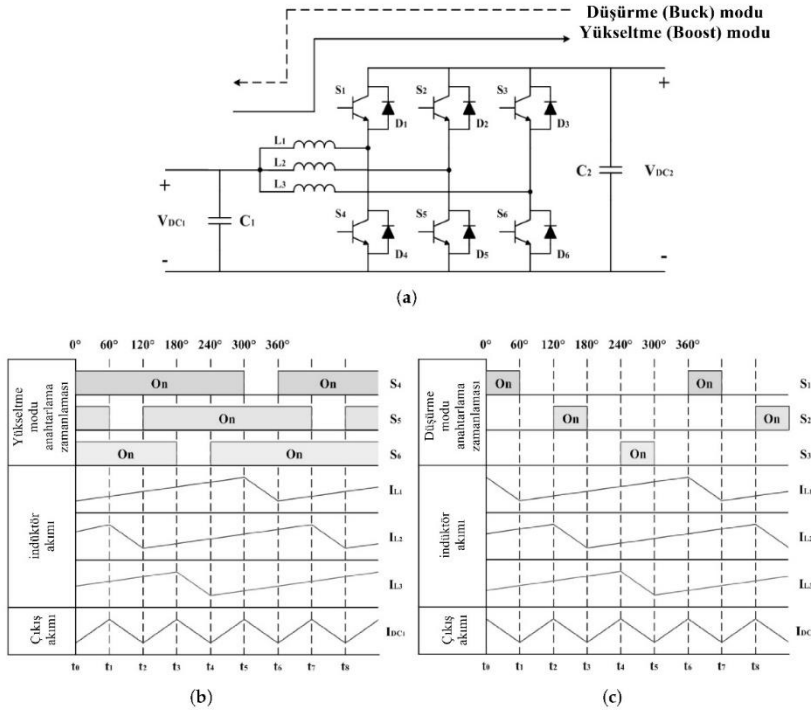
kullanılır. İndüktör, kapasitör ve güç anahtarı birleşimi ile birlikte diyot bulunmaktadır. Orta gerilim uygulamalarında ise birden fazla DA/DA dönüştürücü bağlantısı ile gerilim kademeli yükseltilir. Elektronik anahtarlama elemanı sayısının artması dezavantajdır. Yüksek gerilim dönüşümünde; anahtarlama kapasitör tabanlı, anahtarlama indüktör tabanlı, trafo tabanlı, Luo, çok seviyeli ve XY dönüştürücüler kullanılmaktadır (Bhaskar et al., 2020).

Tablo 2.7. Çok kademeli dönüştürücü uygulamalarında; güvenilirlik, maliyet, verimlilik, avantaj, dezavantajlar (Bhaskar et al., 2020).

Tek Yönlü DA/DA Çok Kademeli Dönüştürücüler	Güvenilirlik	Maliyet	Verimlilik	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulamalar
Anahtarlama Kapasitör Tabanlı Dönüştürücü	Yüksek	Ortalama	Çok Yüksek	Küçük boyut, hafif, modüler	Zayıf gerilim regülasyonu, yüksek başlangıç akımı, çok sayıda kapasitör	Düşük hizmet tipi aracın güç aktarma sistemi
Anahtarlama İndüktör Tabanlı Dönüştürücü	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek	Çok yüksek dönüşüm oranı, birçok dönüştürücü ile birleştirme	Çok sayıda indüktör, ağır, yüksek güç için düşük performans	Düşük hizmet tipi aracın güç aktarma sistemi
Trafo ve İndüktör Kuplaj Tabanlı Dönüştürücü	Ortalama	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek güç, yumuşak anahtarlama, yüksek dönüşüm oranı	Hacimli, manyetik kuplaj kaynaklı fazla kayıp, karşılaşık	Yüksek görev araçlarının güç aktarma sistemleri
Luo Dönüştürücü	Yüksek	Yüksek	Ortalama	Çok yüksek dönüşüm oranı, ortalama boyut	Çok sayıda indüktör, kapasitör ve diyot, karşılaşık kontrol, yüksek kayıplar	Hem düşük hem de yüksek görev araçlarının güç aktarma sistemleri
Çok Seviyeli Dönüştürücü	Ortalama	Yüksek	Çok Yüksek	Kendinden dengeli, modüler, genişletilebilir yapı, az sayıda anahtar	Çok sayıda kapasitör ve diyot	Yüksek görev araçlarının güç aktarma sistemleri,
X-Y Dönüştürücü	Yüksek	Ortalama	Yüksek	Tek anahtar, yüksek dönüşüm oranı, genişletilebilir yapı	Çok sayıda diyot, süresiz giriş akımı	Düşük ve yüksek hizmet tipi araçların güç aktarma sistemleri

2.6.4.2 Çift Yönlü DA/DA Dönüştürücü

Çift yönlü dönüştürücülerde, diyot ve elektronik anahtarlama elemanı sayesinde çift yönlü güç akışı sağlanır. Rejeneratif frenlemeden elde edilen enerjinin çekiş piline aktarılması EA'lar için önemlidir. Araç sürüş mesafesinin artırılması için yüksek verimli DA/DA dönüşümü sağlanmalıdır. TEA'larda yalıtımlı ve yalıtımsız DA/DA dönüştürücüler uygulama türüne göre seçilir. İzolasyonsuz dönüştürücüler; tek fazlı, sıfır gerilim/sıfır akım anahtarlama ve serpiştirilmiş olarak sınıflandırılır. Dönüştürücü, yükselten (boost) ve düşüren (buck) olarak çalışır. Yüksek verim elde etmek için yüksek frekansta anahtarlama kullanılır. Yumuşak anahtarlama ile MOSFET, IGBT gibi yarı iletken anahtarlama elemanlarında oluşacak kayıplar azaltılır (Tytelmaier et al., 2016).

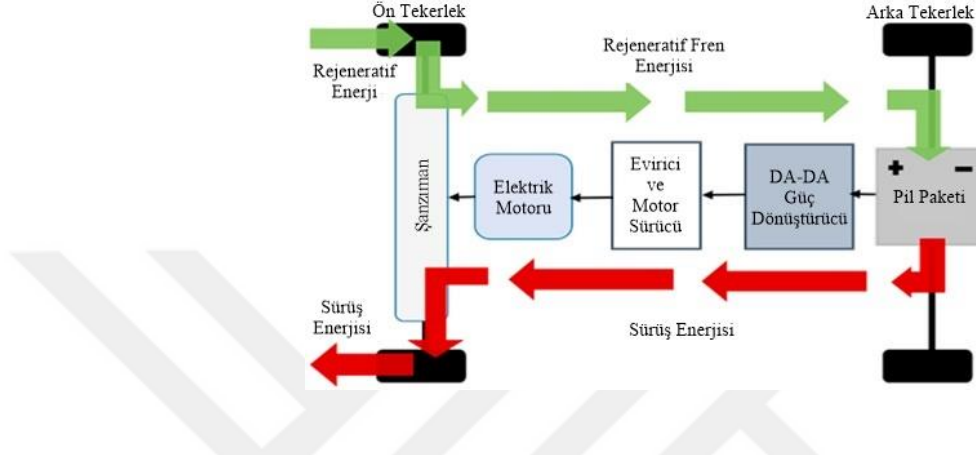


Şekil 2.51. Üç kollu yarım köprü çift yönlü DA/DA dönüştürücü. (a) dönüştürücünün diyagramı, (b) yükseltme modunda anahtarlama durumları ve akımlar, (c) buck modunda anahtarlama durumları ve akımlar (Szymanski et al., 2020).

Yalıtımlı dönüştürücülerde, yalıtım için transformatör kullanılır. Transformatör sayesinde gerilim kontrol işlemi kolaylıkla gerçekleştirilir. Kullanılan transformatör dönüştürücüyü boyut ve ağırlık anlamında olumsuz

etkiler. Yalıtımsız tiplerde bu dezavantaj ortadan kalkmıştır. Gerilimin yükseltilmesi ve düşürülmesi için çeşitli devreler kullanılmaktadır (Szymanski et al., 2020).

2.7 Rejeneratif Frenleme



Şekil 2.52. EA'lar için enerji akışlarının yenilenmesi ve yönlendirilmesi (Balali and Stegen, 2021).

Klasik İYM kullanan araçlarda frene basıldığında, kinetik enerji ısıya dönüşür. Rejeneratif frenleme, boşa harcanan bu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür ve depolanmasına olanak sağlar. Durdurma gücü yetersiz gelirse, geleneksel diskli fren sistemi otomatik olarak devreye girer (Balali and Stegen, 2021). Rejeneratif frenlemede, elektrik motoru tersine çevrilir, böylece tekerlekleri döndürmek için elektrik kullanmak yerine, dönen tekerlekler motoru çevirir ve elektrik oluşturur. Motoru döndürmek için tekerleklerden gelen enerjiyi kullanmak, aracı yavaşlatır (Alternative Fuels Data Center, n.d.).

Mohd et al., (2015) yaptıkları çalışmada, otomotiv sektöründe EA için gerekli olan enerji ihtiyacını hesaplayabilmek için modelleme ve simülasyon yöntemlerinin önemine vurgu yapmıştır. Bu şekilde daha ekonomik, basit ve hesaplanabilir tasarımlar mümkündür.

Martyushev et al., (2023) Tamamlayıcı Federal Test Prosedürü (US06), Japonya Çevrimi 08 (JC08), Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) ve Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Çevrimlerini (WLTC)

MATLAB/Simulink ortamında simüle ederek, kilometre başına harcanan pil gücünü hesaplamış ve menzil bilgilerini karşılaştırmıştır. Bahsi geçen sürüş çevrimlerinde; EA'ya ait hız, ivme, güç, enerji ve pil SOC grafikleri elde edilmiştir.

Kumar et al., (2023) çalışmalarında, MATLAB/Simulink ile EA'nın bir simülasyon modelini geliştirmiş ve araca ait tork, güç, enerji ve menzil değerlerini hesaplayarak sonuçları karşılaştırmıştır. Farklı yol eğim açılarında Şehir Dışı Sürüş Çevrimi'ni (EUDC) ve Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi'ni (NEDC) kullanarak yaptıkları modelleme çalışmasında % 0,05'in altında hatalarla araca ait simülasyon sonuçları elde etmiştir.

Wassiliadis et al., (2022) Volkswagen ID.3 Pro Performance modelinin güç aktarma organı analizi hakkında çalışmasında; araç bilgilerini toplamış, çekiş pilini sökerek pil üzerinde testler uygulamıştır. Araç farklı sürüş çevrimleri ile test edilmiş ve testler sonucunda araç menzili, enerji kayıpları, enerji yoğunluğu ve güç kabiliyetine dair sonuçlar elde edilmiştir.

Bairwa et al., (2023) EA güç aktarma sistemini inceleyerek; farklı koşullarda araç verim, güç ve tork değerlerini, modelleme ve simülasyon ile analiz ederek menzil ve performans etki eden bulguları incelemiştir. MATLAB-Simulink kullanılarak yapılan çalışmada, güç aktarma sistemi fiziksel olarak değil, simülasyon ortamında analiz edilmiştir.

Howroyd and Thring (2018) çalışmasında, "Python 3" kullanarak Nissan Leaf modelinin parametrelerini kullanarak nesne yönelimli modelleme yapmış ve yazılımın kolay yapılandırılabilen EA modeli olduğunu belirtmiştir.

Park et al., (2014) EA güç aktarma sistemini analitik olarak modellemiş, kinetik ve dinamik araç davranışlarını analiz etmek için mekanik ve elektrik sistemini birlikte değerlendirmiştir. MATLAB modeli ile araç performansını etkileyen; hız, ivme ve kuvvetler doğrulanmış ve analiz edilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında FTP-75 çevrim döngüsünde test edilen ve analitik modelle karşılaştırılmış veriler, evirici akımı ve motor hız bilgilerini de içermektedir.

Fadul et al., (2018) indüksiyon motorlu Li-iyon pil ile çalışan bir EA'yı, MATLAB/Simulink kullanarak modellemiş ve tekerlekler üzerinde harcanan enerji seviyesine odaklanmıştır. Aracın ivme endeksinin, tork ve hız verileriyle karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edildiği doğrulanmıştır.



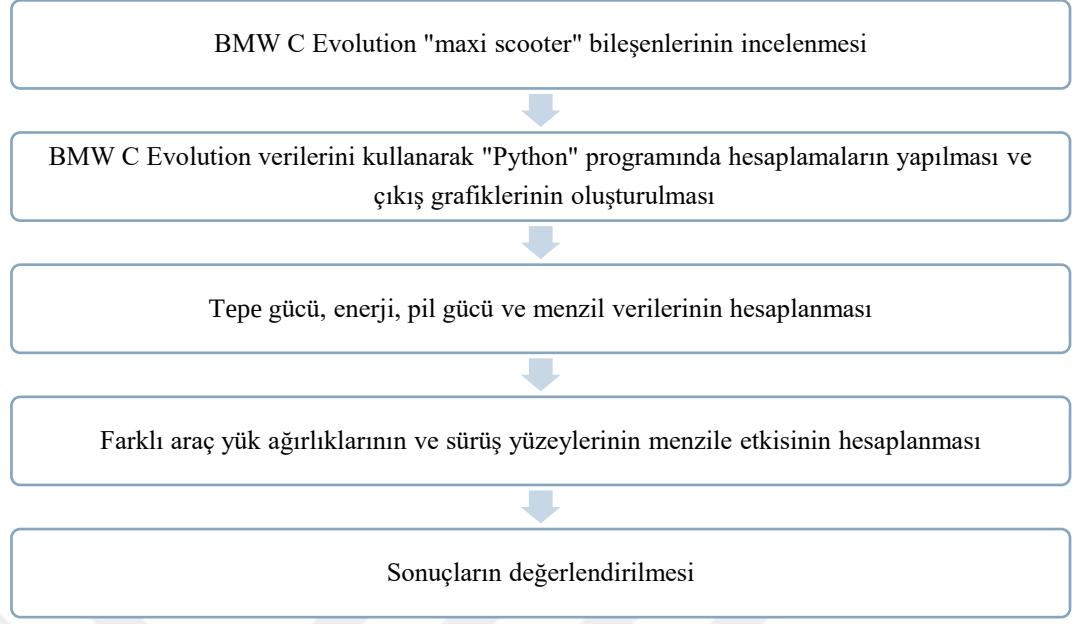
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında, iki tekerlekli “scooter” için kullanılan “Python” tabanlı model, “maxi-scooter” için uyarlanmış ve geliştirilmiştir. İki tekerlekli araç için “Python 3.9.13” sürümü üzerinde çalışan “Jupyter Notebook” kullanılmıştır. “Jupyter Notebook”; web tabanlı çalışan, açık kaynak yazılım programıdır (Jupyter, 2023). Dört tekerlekli TEA simülasyonunda, MATLAB/Simulink’in Güç Aktarma Organları Blok Setini kullanan EA Referans Uygulaması (EV Reference Application) kullanılmıştır. TEA modellemesi yapabilen bu uygulamada; çekiş pili, motor, araç çekişi gibi güç aktarma sistemi bileşenlerinin verileri kullanılmıştır (The MathWorks Inc., 2022).

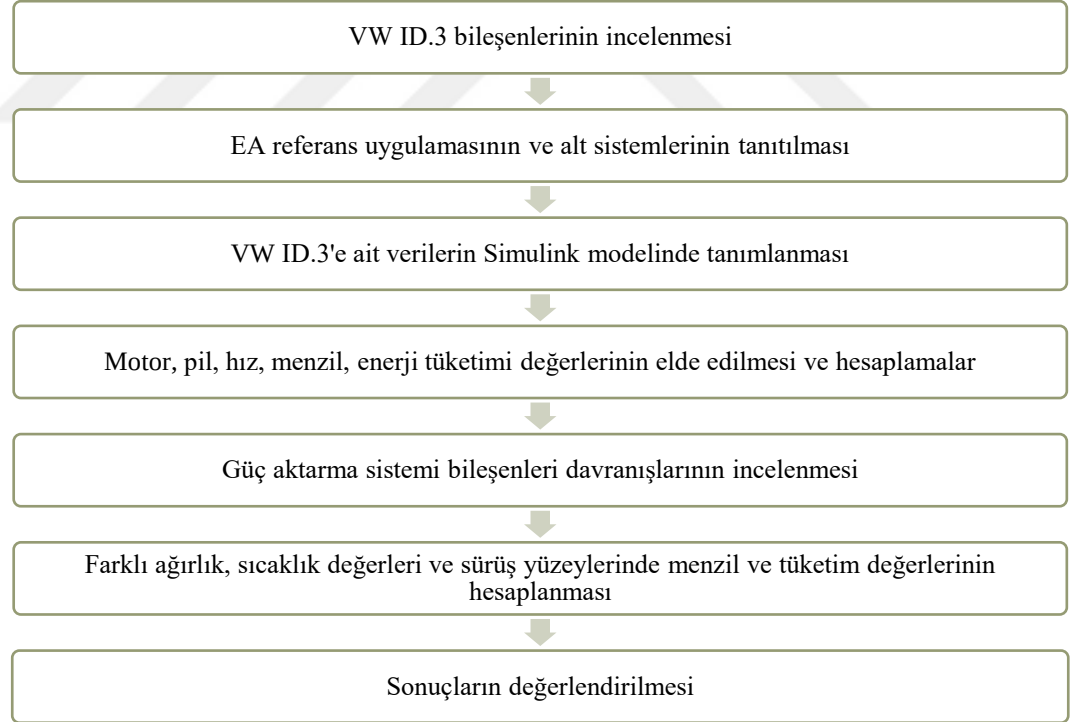
BMW; İYM’li araçlarının yanı sıra, iki ve dört tekerlekli TEA’lar da üretmektedir. İki tekerlekli TEA analizinde BMW C-Evolution verileri tercih edilmiştir. Popüler bir marka olması, İYM’li iki tekerlekli araçlarıyla karşılaştırma imkanı sağlaması nedeniyle seçilmiştir. Ayrıca araçla ilgili menzil, motor hız ve tork, pil gücü gibi veriler üretici tarafından paylaşılmaktadır. Dört tekerlekli TEA simülasyonu için VW ID.3 verilerinin kullanılma nedeni, üreticinin İYM’li araçlarıyla yapısal ve işlevsel karşılaştırma imkânı sağlamasıdır.

3.1 Analiz Akış Şemaları

Gerçek araç verileri, simülasyon girdileri olarak kullanılmıştır. Bu iki araç tamamen elektrikli. Şekil 3.1 iki tekerlekli, Şekil 3.2 dört tekerlekli TEA performans analiz aşamalarını gösteren akış şemalarıdır. Çalışmada, araçlar ve bileşenleri tanıtılmıştır. İki tekerlekli araç için “Python” ortamında araç performansına ait güç, enerji, tork, pil değeri ve sürüş menzili değerleri hesaplanmış, grafiksel çıktılar elde edilerek performans analizi yapılmıştır. Dört tekerlekli TEA için Simulink EA Referans Uygulaması kullanılarak araca ait menzil, tüketim, verimlilik, motor bilgileri, pil bilgileri elde edilmiş ve menzile etki eden etkenler araştırılmıştır.



Şekil 3.1. İki tekerlekli TEA performans analiz aşamaları.



Şekil 3.2. Dört tekerlekli TEA performans analiz aşamaları.

3.2 İki Tekerlekli Elektrikli “Maxi-Scooter” Bileşenleri

BMW C Evolution elektrik tahrikli, Li-iyon pil kullanan, iki tekerlekli bir araçtır. Araç standart ekipman ile şarj edilebildiği gibi, kendi şarj ekipmanı ile de şarj edilebilmektedir. Elektrik motoru olarak alternatif akım senkron motor kullanılmıştır. Motor sıvı soğutmalıdır ve 35 kW güce sahiptir. Araç, BMW elektrikli arabalarla aynı pili kullanmaktadır. Kullanılan pil sayısı elektrikli arabaya göre daha azdır. “C Evolution” kilitlenme karşıtı fren sistemine sahiptir ve menzil rejeneratif frenleme sayesinde artırılmaktadır (Urry, 2021).

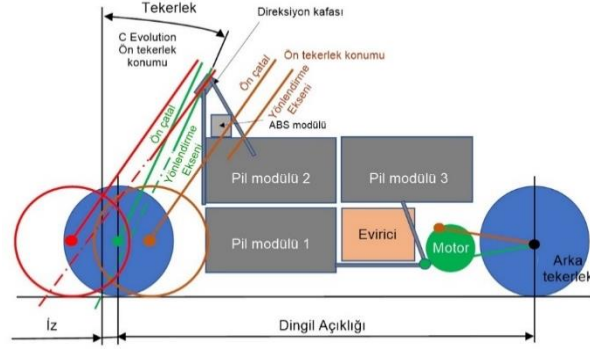


Şekil 3.3. BMW C evolution (Urry, 2021).

Tablo 3.1. Araç bilgileri (Bmw Motorrad, 2022).

Üretici	BMW
Çekiş motoru	AA Senkron Motor
Maksimum tork	72 Nm
Motor çıkış gücü	35 kW
0-50 km/h hızlanma süresi	2,8 s
WMTC menzil	160 km
Soğutma tipi	Sıvı soğutma
Pil türü	Li-iyon
Pil üretici	Samsung SDI Co.
Modül Sayısı	3
Modüldeki pil sayısı	12
Pil kapasitesi	94 Ah
Ağırlık	275 kg

Araç performansı ve sürüş menzili dört farklı sürüş modu ile değişmektedir. Araç yol modunda iken frenleme esnasında maksimum seviyede enerji kazanımı sağlarken, ekonomik sürüş modunda hız kısıtlı olduğundan enerji kazanımı sınırlıdır. Yelken mod geri kazanım sağlamazken, dinamik mod yüksek seviyede frenleme enerjisi kazanımı sağlar (Green Car Congress, 2014).



Şekil 3.4. Elektrifikasyon nedeniyle benzinli modele göre bileşen ve düzen farklılıkları (Marklines, 2020).

BMW C Evolution, benzinli model C 650 GT'ye göre yapısal farklılıklar içermektedir. Pil modüllerinin eklenmesi nedeniyle tekerlek boyutları ve direksiyon boyutu değiştirilmiş, ancak tekerlek açısı ve izi değiştirilmemiştir (Marklines, 2020).



Şekil 3.5. (a) Aksesuarları sökülmüş BMW C Evo, (b) Pil modülü (Marklines, 2020).

Araçta, BMW i3 elektrikli arabada kullanılan piller kullanılmıştır. Bir pil modülünde 12 tane pil hücresi seri bağlanmıştır. Her modül sağlam alüminyum muhafaza içerisinde yer almaktadır. Elektronik diğer bileşenler için 8 Ah ve 12

V'luk akü kullanılmıştır (Marklines, 2020). Çekiş pili nominal hücre gerilimi 3,7 V'tur.

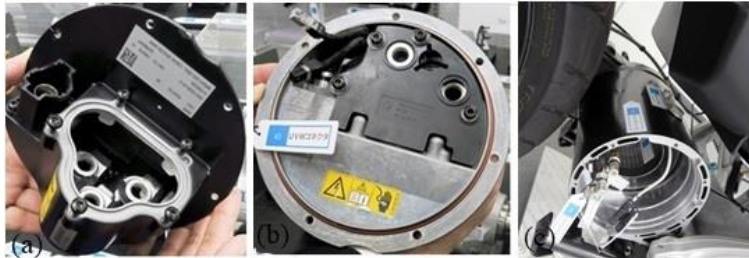
$$\text{Modül gerilimi} = 12 \cdot 3,7 \text{ V} = 44,4 \text{ V (12 seri pil hücresi)}$$

$$\text{Modül enerjisi} = 44,4 \text{ V} \cdot 94 \text{ Ah} = 4,17 \text{ kWh}$$

$$\text{Çekiş pili toplam enerji} = 4,17 \text{ kWh} \cdot 3 = 12,51 \text{ kWh'tir.}$$

Pil hücresi deşarj kesme gerilimi 3,3 V ve şarj gerilimi kesme değeri 4,2 V'tur (Evshop, 2022). Çekiş pili nominal çıkış gerilimi, üç modül için 133,2 V, toplam deşarj kesme gerilimi 119 V'tur. Araç toplamda 12,51 kWh'lik enerjisinin %90'ını kullanabilir.

Çekiş motoru, dâhilî mıknatıslı alternatif akım senkron motordur. Mıknatıslar rotor üzerindedir ve gömülü mıknatıs tasarımına göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Bunlardan biri düşük hızlarda ortaya çıkan rotor-stator etkileşiminin sonucu olan vuruş torkunun etkisinin azaltılması, diğeri ise elektromanyetik girişimin etkisinin büyük oranda önlenmesidir. Rotor yüzeyine monte edilen mıknatıslar üzerinde oluşan eylemsizlik kuvvetinin manyetik saçılmaya neden olma olasılığı ve relüktans torku üretilmemesi dezavantajlardır. Motor muhafazası içerisindeki kanallardan geçirilen sıvı sayesinde soğutma işlemi gerçekleştirilir. Sıcaklık sensörü de burada bulunur. Planet dişlisi ve dişli kayış tekerleğin içerisinde. Toplam redüksiyon oranı 8,28'dir.



Şekil 3.6. (a) Evirici bağlantı soketi, (b) motor statoru, (c) motor kasası (Marklines, 2020).

Evirici, aracın alt kısmında ve yüzeye bakan bölümde plastik bir muhafaza içerisinde bulunur. Pil ve motora bağlıdır. Sıvı ile soğutulmaktadır.

Evirici bileşenleri

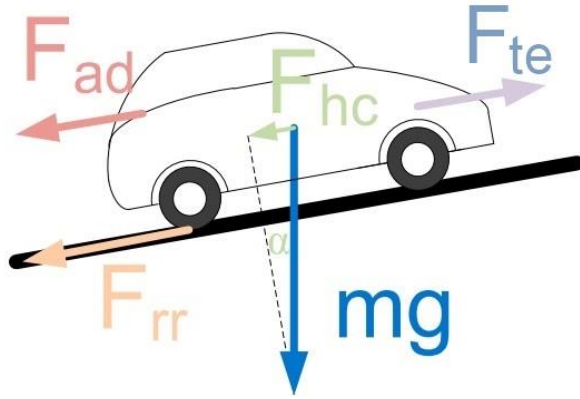
- Arka kapak
- Kontrol paneli
- Elektronik kartlar arasındaki bağlantıların yapıldığı kart
- IGBT modülü
- Su ceket
- Isı dağılım kutusu
- Doğrultucu kapasitör
- Ön kapak (Marklines, 2020).



Şekil 3.7. BMW C Evolution evirici (Marklines, 2020).

3.3 İki Tekerlekli Araç İçin Tanımlamalar ve Hesaplama Aşamaları

Araç hareketine etki eden kuvvetler Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Araca etki eden kuvvetler (Miceli and Viola, 2017).

F_{ad} : Aerodinamik sürüklenme kuvveti

F_{rr} : Yuvarlanma direnci kuvveti

F_{hc} : Tepe tırmanma kuvveti

F_{te} : Çekiş kuvveti

F_a : Hızlanma kuvveti

Aracın hareket edebilmesi için çekiş kuvvetinin, harekete zıt yönde olan diğer kuvvetlerin toplamından büyük olması gerekir (Miceli and Viola, 2017).

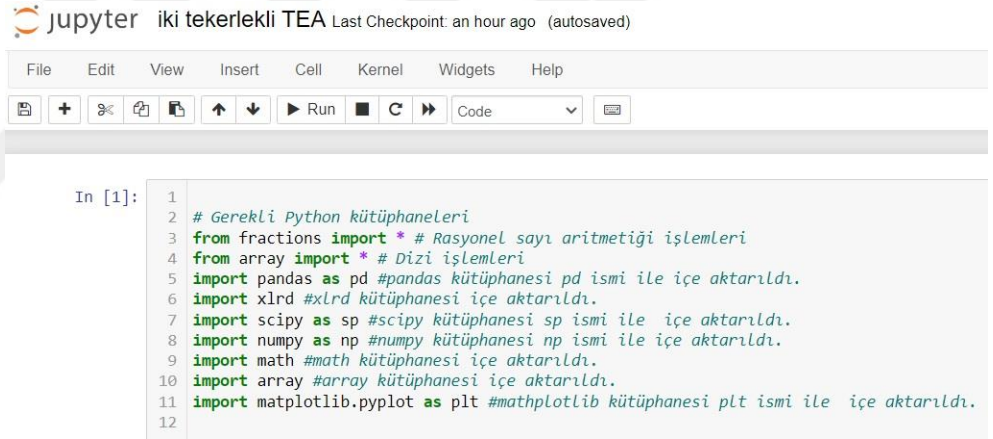
Hesaplamalar ve grafik çıktıları için izlenecek aşamalar aşağıdaki gibidir.

- Gerekli kütüphane dosyalarının tanımlanması
- Araç ile ilgili ağırlık, hızlanma bilgilerinin tanımlanması
- Motorsiklet sürüş çevrimi bilgilerinin okutulması
- Araç lastik verilerinin hesaplanması
- Aerodinamik sürüklenme kuvvetinin hesaplanması
- Yuvarlanma direncinin hesaplanması
- Tırmanma kuvveti, hızlanma kuvveti değerlerinin hesaplanması
- Çekiş kuvveti, çekiş torku, çekiş gücü değerlerinin hesaplanarak, grafik çıktılarının elde edilmesi
- Motor güç ve enerji değerlerinin hesaplanması
- Araç çekiş pili güç değerinin hesaplanması (DeepaksawIITD, 2021).

Motor, pil ve menzil verilerinin elde edilmesi için “Python” kütüphane dosyaları tanımlanmalıdır. Kütüphane dosyaları; hesaplamalar, grafik çizimleri, denklem çözümleri ve harici dosya okutma işlemleri için zorunludur.

- Pandas Kütüphanesi: Veri analizi için kullanılan açık kaynak Python kütüphanesidir (Pandas, 2022).

- Xlrd Kütüphanesi: xls uzantılı dosyaları okumak için kullanılan Python kütüphanesidir (Xlrd, 2022).
- Scipy Kütüphanesi: Matematiksel denklemler, istatistik problemleri çözümünde kullanmak için kullanılan açık kaynak Python kütüphanesidir (SciPy, 2022).
- Numpy Kütüphanesi: Bilimsel işlemler için kullanılan (çok boyutlu dizi işlemleri, rastgele sayı üretme, lineer cebir vb.) Python kütüphanesidir (NumPy, 2022).
- Matplotlib Kütüphanesi: Etkileşimli görseller oluşturmak için kullanılan Python kütüphanesidir (Matplotlib, 2022).



The screenshot shows a Jupyter Notebook window titled "iki tekerlekli TEA". The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Insert, Cell, Kernel, Widgets, Help) and a toolbar with icons for file operations, running, and undo/redo. The code cell, labeled "In [1]:", contains the following Python code:

```

1 # Gerekli Python kütüphaneleri
2 from fractions import * # Rasyonel sayı aritmetiği işlemleri
3 from array import * # Dizi işlemleri
4 import pandas as pd #pandas kütüphanesi pd ismi ile içe aktarıldı.
5 import xlrd #xlrd kütüphanesi içe aktarıldı.
6 import scipy as sp #scipy kütüphanesi sp ismi ile içe aktarıldı.
7 import numpy as np #numpy kütüphanesi np ismi ile içe aktarıldı.
8 import math #math kütüphanesi içe aktarıldı.
9 import array #array kütüphanesi içe aktarıldı.
10 import matplotlib.pyplot as plt #matplotlib kütüphanesi plt ismi ile içe aktarıldı.
11
12

```

Şekil 3.9. “Python” iki tekerlekli TEA hesaplamaları için kütüphane dosyalarının tanımlanması.

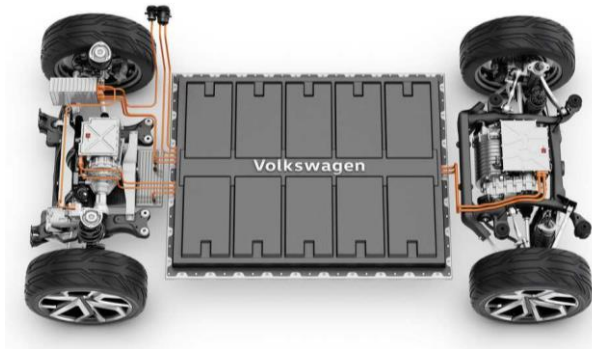
Şekil 3.9’da “import” komutu kullanılarak, ihtiyaç duyulan kütüphaneler ve modülleri programa çağırılmıştır. Bu sayede hesaplama işlemlerinde ihtiyaç duyulan fonksiyonlar programa aktarılmıştır. Kütüphane dosyaları farklı isimler ile program içerisinde kullanılabilir. Şekil 3.9’da görüleceği üzere; “pandas” için “pd”, “scipy” için “sp”, “numpy” için “np” ve “matplotlib.pyplot” için “plt” kısa isimleri kullanılmıştır. Hesaplama işlemlerinde bu kütüphanelere ait fonksiyonlar ve özellikler, tanımlanan kısa isimlerle kullanılacaktır.

3.4 TEA Bileşenleri



Şekil 3.10. Volkswagen ID.3 Pro (EV Database, 2022).

Volkswagen ID.3, paralel tahrik sistemine sahip APP 310 tahrik ünitesini kullanmaktadır. 150 kW tepe gücüne sahip, maksimum 310 Nm tork üreten fırçasız kalıcı mıknatıslı motora sahiptir. Elektrikli tahrik sistemi, Volkswagen firması tarafından farklı fabrikalarda üretilmektedir. Araç üç farklı motor çıkış gücü ve sürüş menzili seçeneği ile piyasada bulunmaktadır (Kane, 2019). Pro modeli 107.000 watt'lık 275 Nm tork üretebilen motora sahiptir (Marklines, 2022).



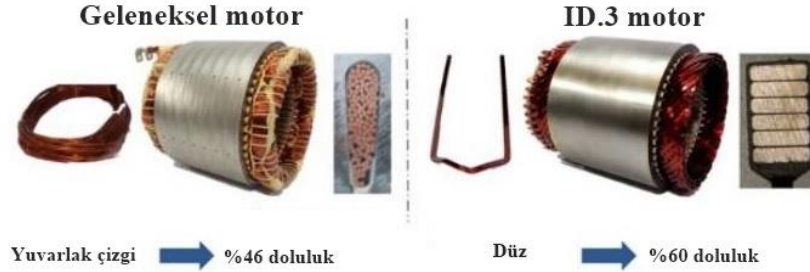
Şekil 3.11. Volkswagen ID.3 elektrikli tahrik sistemi (Kane, 2019).

Volkswagen ID.3 motoru kompakt ve hafif bir yapıya sahiptir. Yüksek tork üretebilir. Rotor, stator bobinine uygulanan akım etkisiyle oluşan manyetik alan sayesinde döner (Petters, 2019).



Şekil 3.12. Motor sürücü ünitesi (Petters, 2022).

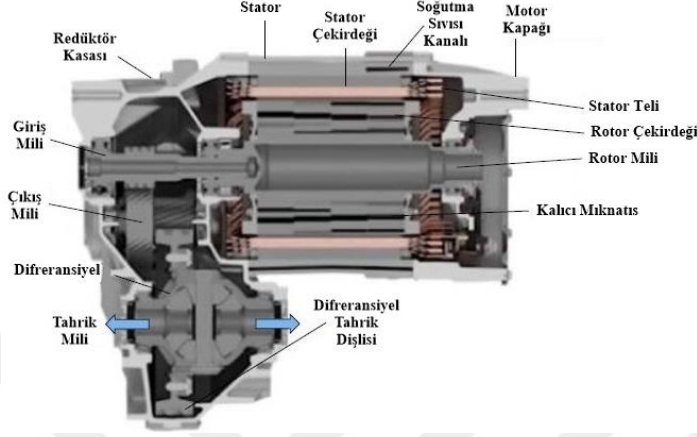
Stator çekirdeğinde yassı sargılar bulunmaktadır. Klasik sargılarda %46 doluluk sağlanırken, bu sargılar sayesinde boşluklar %60 oranında kapatılarak kayıplar azaltılmıştır. Tel boyutunun küçülmesi ve daha az bakır kullanılmasına rağmen akım yolu artırılmıştır. Bu şekilde performansı iyileştirilmiştir.



Şekil 3.13. Stator sargıları (Marklines, 2022).

Dâhilî kalıcı V şeklinde mıknatısa sahip motor, gürültü ve titreşimi azaltan bir yapıya sahiptir. Mıknatısların bulunduğu elektromanyetik çelik levha üzerinde bulunan boşluklar sayesinde motor ağırlığı azaltılmış ve statorun oluşturduğu manyetik alan çizgilerinin rotora geçiş etkisi artırılmıştır. Rotordaki mıknatıslar, dönüş yönü ile aynı doğrultuda ilerletilir. Bu rotorun daha gürültüsüz dönüşünü sağlar. Rotorun arka kısmında bulunan bir disk sayesinde dengesiz yük etkisi engellenmiştir. Döner kodlayıcı sayesinde motor kontrolörü rotor konumunu

algılar. Evirici ve stator bağlantısı, kayıpları ve elektromanyetik girişim etkisini minimum seviyeye çekecek şekilde tasarlanmıştır. Negatif ısı katsayılı direnç sayesinde motor sıcaklığı kontrol edilir. Sıvı soğutma kullanılmaktadır (Marklines, 2022).



Şekil 3.14. Motor kesiti (Marklines, 2022).

Tablo 3.2. ID.3 çekiş pili bilgileri (Marklines, 2022; EV Database, 2022; EVSpecifications, 2022).

Üretici	LG Chem (LGX E78)
Pil türü	Li-iyon (NCM712) Nikel: 7, Kobalt: 1, Mangan: 2
Seri hücre sayısı	108
Paralel hücre sayısı	2
Hücre sayısı (2 x 12 x 9)	216
Hücre gerilimi	3,65 V
Hücre kapasitesi	78 Ah
Modül sayısı	9
Modül gerilimi	44 V (3,65 · 12 seri)
Toplam kapasite	156 Ah
Toplam hücre gerilimi	396 V (44 · 9 modül)
Nominal enerji kapasitesi	62 kWh
Kullanılabilir enerji kapasitesi	58 kWh
Enerji yoğunluğu	265 Wh/kg

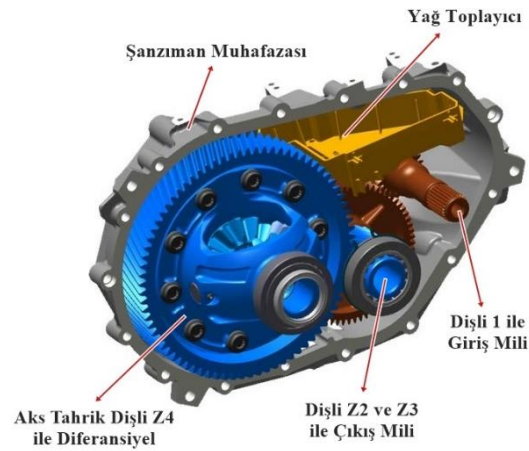
Çekiş pili alüminyum muhafazaya sahiptir ve araç iskeletinin sağlamlığına katkıda bulunur. Sıvı soğutma kanalları sayesinde ihtiyaca göre pil sıcaklığı düşürülür. 8°C'nin altındaki sıcaklıklarda çekiş pili ısıtılır. Pil paketi dört katmandan oluşur.

- Kapak
- Pil modülü, pil yönetim sistemi, pil kontrol modülü ve pil bağlantı soketleri
- Pil koruması ve soğutma sıvısı kanalları
- Yüzeyden gelebilecek darbelere karşı alt koruma kapağı (Marklines, 2022).

Pil kontrol modülü, artı ve eksi kutuplar için iki ayrı modül olarak kullanılmaktadır. Çekiş pili başlangıç anında doğrudan bağlanmaz. Kademeli olarak devreye alınır. Anahtarlama devresi röleler ve sigortalardan oluşur. Bir kaza esnasında çekiş pili enerjisi kontrol modülü sayesinde anında kapatılır (Marklines, 2022).

Tablo 3.3. ID.3 diğer bilgiler (EV Database, 2022: EVSpecifications, 2022).

Yüksüz ağırlık	1812 kg
Brüt ağırlık	2270 kg
Araç maksimum yük	533 kg
Şanzıman	Otomatik tek hızlı redüksiyon dişlisi
Evirici	Valeo Siemens eAutomotive
DA/DA Dönüştürücü	Bosch
Araç çekiş	Arka tekerlek

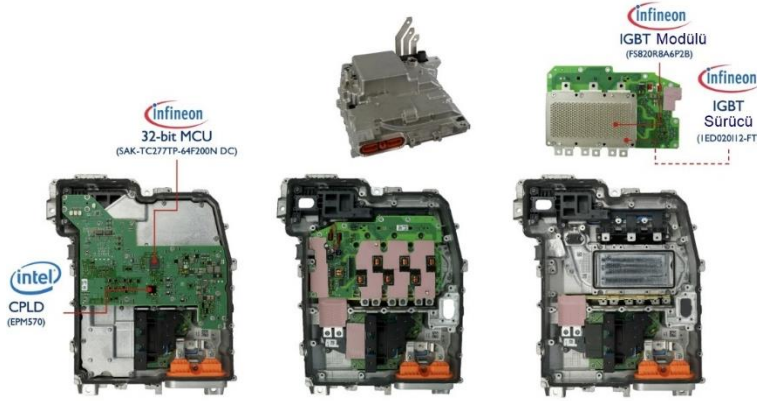


Şekil 3.15. Tek vitesli şanzıman 0MH/EQ310-1P (Volkswagen Group of America, 2021).

Tek vitesli şanzıman olarak 0MH/EQ310-1P kullanılmaktadır. Tek dişli kullanan bu şanzıman sistemi 310 Nm tork gücü ve 16.000 RPM dönme hızı üretebilir. Motor kapağı görevi görmesi sayesinde kompaktlık sağlar (Volkswagen Group of America, 2021).

- Konik dişli şeklinde, sürtünmeyi azaltan rulman yapısı ile giriş mili sessiz çalışır ve yüksek güç üretir.
- Yağ doğrudan tahrik dişlisine uygulanır. Tüm dişliler yağlandıktan sonra yağ karterinde toplanır.
- Redüksiyon dişlisi motor çekiş milinin önünde yer alır. Arkadan çekişli bir sistemdir (Marklines, 2022).

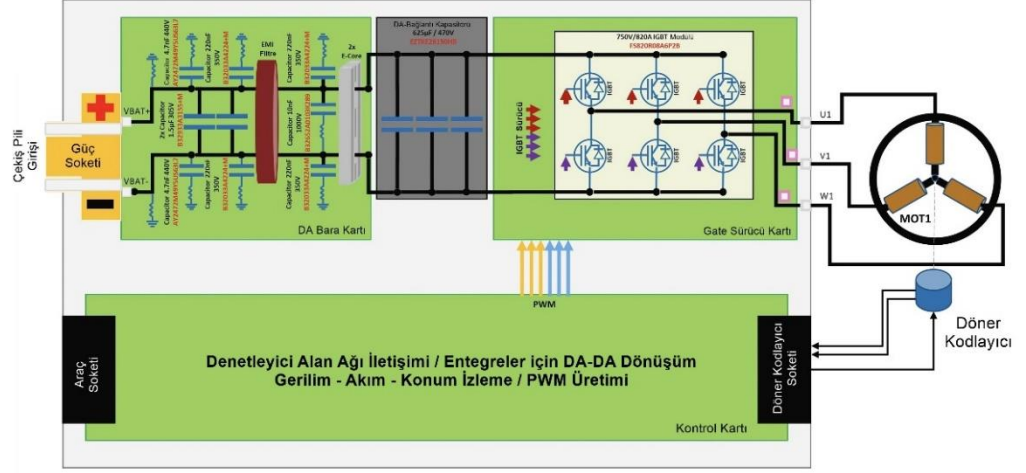
Güç aktarma sisteminin en kritik bileşenlerinden biri de evirici devrelerdir. Çekiş pilinden gelen yüksek akımlı DA'yı, elektrik motorunu çalıştırmak için AA'ya dönüştürür. Yüksek güçteki çekiş motorunun, değişken frekanstaki AA ile kontrol edilmesi sayesinde araç hareketi gerçekleştirilir (Rafin et al., 2023).



Şekil 3.16. Evirici demontajı (Roos and Emilio, 2021).

ID.3 Valeo Siemens evirici kullanmaktadır. Yapısında, Intel'in Karmaşık Programlanabilir Mantık Cihazı (KPMC), Infineon'un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ve Mikrokontrol Birimi (MKB) teknolojileri bulunmaktadır (Roos and Emilio, 2021). Intel EPM570F256C5N KPMC, 2,4 V

minimum – 3,6 V maksimum besleme gerilimi ve 55 mA besleme akımı ile çalışan, düşük enerji gereksinimi duyan bir işlemcidir (Altera, 2009).

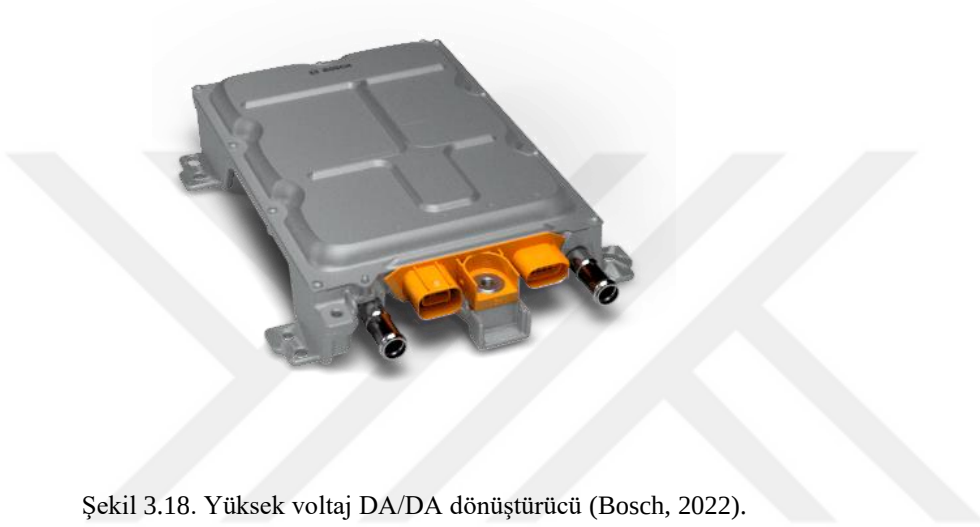


Şekil 3.17. Evirici blok şeması (Roos and Emilio, 2021).

Çekiş pilinden gelen enerji, güç soketi üzerinden eviriciye uygulanır. Bara kartı üzerinde düşük kapasiteli - yüksek voltajlı kondansatörler ve elektromanyetik girişim filtresi bulunmaktadır. DA bağlantı modülü sayesinde, bu kart üzerinden gelen gerilim filtrelenir ve dengelenerek IGBT modülüne aktarılır. Altılı IGBT sürücü devresi, PWM (Pulse Width Modulation - Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyali ile kontrol edilir. Elde edilen gerilim, elektrikli çekiş motoruna uygulanır. DA bağlantı modülü üzerindeki kondansatörler, IGBT'lerin anahtarlanması esnasında oluşan dalgalanmaları dengeler. Modülün sistem performansına önemli etkisi vardır. Döner kodlayıcı sayesinde motor konumu algılanır. Bu referans değeri sayesinde PWM sinyali ayarlanır (Roos and Emilio, 2021).

IGBT sürücü devresi üstün termal özellikler gösterir. Soğutma plakasına sahiptir. IGBT'ler yük kayıplarını azaltır ve verimin artmasını sağlar (Infineon, 2022). Eklenen hendek kapısı elektrotu sayesinde hücreler arasındaki mesafe daraltılmıştır. Alan durdurma katmanı sayesinde oluşan elektrik alanının daha düzenli olması ve arızalanma etkilerinin azaltılması sağlanmıştır (STMicroelectronics, 2022).

Araç standart elektrikli donanımı, 12V ile çalışır. Kurşun-asit akü, yüksek voltajlı çekiş pilinden alınan gerilimin, DA/DA çevirici ile düşürülmesi sayesinde şarj edilir. 3 kW Bosch DA/DA dönüştürücü, çekiş pilinin çalışma gerilimi değerleri arasında bu işlemi gerçekleştirir. Soğutma sıvısı dönüştürücü alt kapağın içerisinde dolaşarak geri dönüş sağlar. Elektronik kart bu taban yüzeyine, ısı transfer jeli sayesinde sıcaklığını aktarır. Ferit çekirdek elektromanyetik gürültüleri engeller (Marklines, 2022).



Şekil 3.18. Yüksek voltaj DA/DA dönüştürücü (Bosch, 2022).

Dönüştürücü 1,8 kW ile 3,6 kW ileri dönüştürücü olarak çalışabilir. Galvanik yalıtım sağlayan trafolu dönüştürücü, çok sargılıdır. Bu sayede düşük ya da yüksek gerilim çıkışları verebilir. %95 gibi yüksek bir verimlilik oranına sahiptir. Pil şarj ünitesi kaynaklı kayıplar yoktur (Bosch, 2022).

ID.3 yüksek verimlilikte çalışan rejeneratif frenleme sistemi kullanmaktadır. “ZF Friedrichshafen AG” tarafından üretilen geri kazanımlı fren donanımı, Elektronik Fren Güçlendirici (EBB) ve Elektronik Stabilite Kontrol (ESC) adı verilen iki sistemin birleştirilmiş bir uygulamasıdır. Aracın yavaşlaması esnasında ortaya çıkan enerjinin %90’a varan yüksek oranda geri kazanılmasını sağlayan bu sistem sayesinde sürüş menziline önemli bir iyileştirme sağlar. Özel yazılım ile çalışan bu fren sistemi enerji verimliliğini artırırken, tamamen durma veya güçlü bir yavaşlama etkisine ihtiyaç duyulduğunda kampanalı fren sistemini devreye sokar.

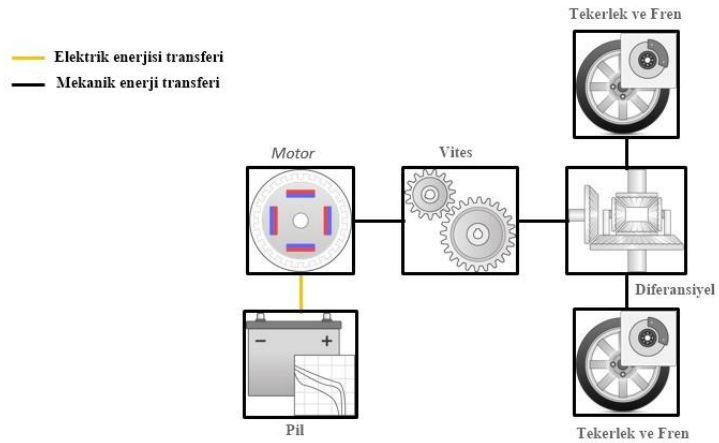
Tablo 3.4. “ZF” fren sistemi teknik özellikleri (Meyer et al., 2021).

	Elektronik Fren Güçlendirici	Elektronik Stabilite Kontrol
Elektrik motoru güç çıkışı	380 W / 420 W	250 W
Yardımcı kuvvet	5,3 kN	-
Piston sayısı	-	2
Boyutlar (U × G × Y)	240×202×203 mm	117×132×115 mm
Ağırlık	4,9 kg	1,9 kg

ZF’nin ürettiği fren sistemi; araca kolaylıkla monte edilebilmesi, ağırlığının az olması, yeterli fren basıncını üretebilmesi, hızlı ve hassas kontrol yeteneği ve güçlü performansı sayesinde, araç performansına önemli katkı sağlamaktadır. Yazılımla elde edilebilen, park halinde sürekli frenleme yeteneği sayesinde ekstra el freni bileşeni gerektirmez (Meyer et al., 2021).

3.5 Dört Tekerlekli TEA Referans Uygulaması

MATLAB/Simulink elektrikli araç referans uygulaması, detaylı TEA modellemesine olanak sağlar. Şekil 3.19’da güç aktarma sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Sistem pilden aldığı elektrik enerjisini kullanarak elektrik motorunu besler. Motorun ürettiği mekanik enerji, şanzıman sistemi üzerinden tekerleklere aktarılır. Simulink referans uygulaması sayesinde TEA araç güç aktarma organlarının performans analizi yapılabilmektedir (The MathWorks Inc., 2022).

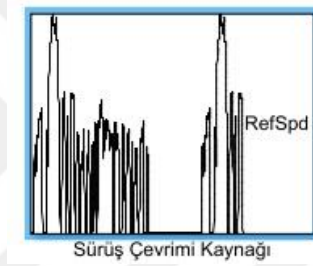


Şekil 3.19. Güç aktarma sistemi yapılandırması (The MathWorks Inc., 2022).

3.5.1 Sürüş Çevrimi Kaynağı (Drive Cycle Source)

Sürüş çevrimi, bölgesel olarak sürücülerin araç kullanma alışkanlıklarını (hızlanma, fren kullanımı gibi), yoğun ve yoğun olmayan trafik koşullarında ifade eden veriler sunar. Egzoz emisyonu tahminlemede ve trafik davranışının belirlenmesinde kullanılır. Farklı sürüş çevrimleri bulunmaktadır. Bu çevrimler bölgesel olarak iklim koşulları, sürücü alışkanlıkları ve araç yoğunluklarına göre değişmektedir. Bunun yanı sıra hizmet aracı türüne göre değişkenlikler gösterebilmektedir (Başlamışlı vd., 2016).

Çevrim kurulumu için hız birimi m/s, çıkış örnek periyodu ise sürekli olarak tanımlıdır. Arıza takibi pasif olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.20. Sürüş Çevrimi Kaynağı (The MathWorks Inc., 2022).

Üç farklı sürüş çevrimi kullanılmıştır.

- WLTP
- NEDC
- FTP-75

WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure), Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Prosedürü'dür. Üç farklı kategoride sınıflandırılmış olan bu test yöntemi, değişik araç sınıflarının test edilmesini sağlamıştır.

Nominal güç watt ve yüksüz kütle kg cinsinden tanımlanmıştır. Birbirlerine oranı, güç-kütle oranı olarak ifade edilir. Analiz için WLTP Sınıf 3 çevrimi

seçilmiştir. 23.266 m ve 1801 sn süre için test döngüsü sağlar. Aynı zamanda bu çevrim Avrupa ve Japonya’da kullanılan araç türlerini tanımlar (TransportPolicy, 2022).

Tablo 3.5. WLTP test çevrimleri (TransportPolicy, 2022).

Kategori	Güç - kütle oranı (GKO)	Hız aşamaları
3. Sınıf	$GKO > 34$	Düşük, Orta, Yüksek, Ekstra Yüksek
2. Sınıf	$34 > GKO > 22$	Düşük, Orta, Yüksek
1. Sınıf	$GKO < 22$	Düşük, Orta

NEDC, Avrupa şehir içi ve şehir dışı sürüş davranışları döngüsüdür. Şehir içi düşük hız, motor yükü ve egzoz sıcaklığını, şehir dışı yüksek hızlı sürüşü karakterize eder. 11.007 m ve 1180 sn süre için test döngüsü sağlar. Ortalama hız 33,6 km/saat ve maksimum hız 120 km/h’dir (TransportPolicy, 2022).

FTP-75, ABD Çevre Koruma Ajansı’nın ABD’de kullanılan Federal Test Prosedürü’dür. 17.767 m ve 1874 sn için test döngüsü sağlar. Ortalama hız 34,1 km’dir (U.S. Environmental Protection Agency, 2022).

3.5.2 Çevre (Environment) Bloğu

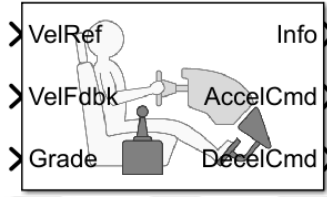
Bu blok araca uygulanan ortam değişkenleri; sıcaklık (Kelvin), rüzgâr hızı (m/s), basınç (Pascal) ve yol eğimini (derece) ayarlamak için kullanılır (The MathWorks Inc., 2022).

3.5.3 Boylamsal Sürücü (Longitudinal Driver) Bloğu

Araç kullanımı esnasında sürücünün tutumlarını modellemek, performans analizinde önemlidir. MATLAB/Simulink Boylamsal Hız İzleme Denetleyicisi (Longitudinal Speed Tracking Controller) modeli sayesinde hızlanma ve frenleme komutları üretir (The MathWorks Inc., 2022). Sürücünün yol bilgisini kullanarak, boylamasına ve yanal hızlanma kararları alması, direksiyon kontrolü ve gaz/fren hareketleri sayesinde aracı yönlendirme davranışları sürücü modellemesinin

temelini oluşturur. Bu yöntem sayesinde sürücünün ortam ve yol koşullarına göre en uygun manevra davranışları modellenebilir (Wang et al., 2018).

Sürücü modellemesi için insan-araç etkileşimleri üzerindeki davranışlar ve kısıtlamalar göz önünde bulundurulur. İnsanların değişen sürüş koşullarına göre algı, karar verme, tahmin ve manevra süreleri farklılıklar gösterir. Görme farklılıkları, değişken konum ve hız algılama durumları oluşturmaktadır. Bu sürücünün hızlanma ve frenleme davranışlarına doğrudan etki eder. Sürüş davranışları, işitsel bilgiler ve dokunsal bilgiler ile de değişiklik gösterir. Sürücü gaz/fren pedalları ve direksiyon sayesinde sürüş esnasında tahminlerde bulunur. Görsel bilgiler sayesinde konum ve hız, dengesiz algılar sayesinde döner hız ve ivme, anlamlandırma bilgileri ile doğrusal hız ve tork bilgisi, dokunsal duyularla titreşim bilgisi gibi değişkenler yorumlanır (Macadam, 2003).



Şekil 3.21. Boylamsal Hız İzleme Denetleyicisi (The MathWorks Inc., 2022).

$$x_1 = v \quad (3.1)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 = \frac{K_{pt}}{m} - g \sin(\gamma) + F_r \quad x_1 \quad (3.2)$$

$$\dot{x} = F_r + g\bar{u} \quad (3.3)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{F_r}{m} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{pt}}{m} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\bar{u} = u - \frac{m^2}{K_{pt}} g \sin(\gamma) \quad (3.7)$$

$$F_r = - [\tanh(x_1)(\frac{a_r}{x_1} + c_r x_1) + b_r] \quad (3.8)$$

$$a * = (T *) m^T [I + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F^n (T *)^n}{(n+1)!}] g e \quad (3.9)$$

$$b * = m^T [I + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F^n (T *)^n}{n!}] \quad (3.10)$$

$$m^T = [1 \ 1] \quad (3.11)$$

$a *$, $b *$: Sürücü tahmini skaler ve vektör kazancı

a_r : Statik yuvarlanma ve yürüyen aksam direnci

b_r : Doğrusal yuvarlanma ve aktarma organları direnci

c_r : Aerodinamik yuvarlanma ve yürüyen aksam direnci

F : Sistem matrisi, F_r : Yuvarlanma direnci

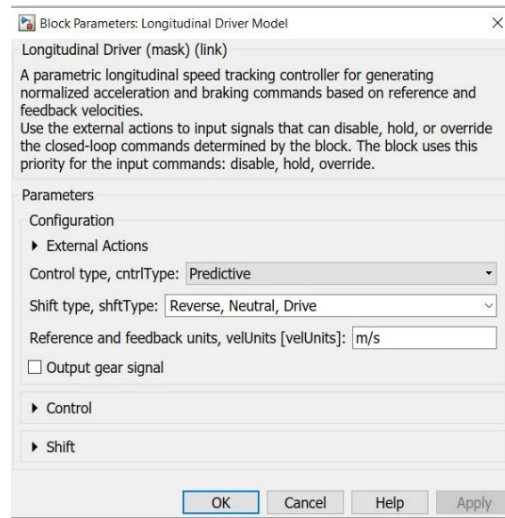
g : Yerçekimi sabiti, g : Kontrol katsayısı vektörü

K_{pt} : Çekiş kuvveti ve fren limiti, m : Araç kütlesi

m^T : Sabit gözlemci vektörü, $T *$: Önizleme zamanı penceresi

u : İleri araç hızı, v : Boyuna hız

x : Öngörülen araç durumu vektörü, γ : Eğim açısı (Macadam, 1980)



Şekil 3.22. Boylamsal Sürücü Modeli blok parametreleri (The MathWorks Inc., 2022).

Blok, referans hız (m/s cinsinden, VelRef), boyuna araç hızı (m/s cinsinden, VelFdbk), yol eğim açısı (derece cinsinden, Grade) girişlerine sahiptir. Çıkışlar ise bilgi sinyali (Info), sürücü komutlu araç ivmesi (AccelCmd) ve sürücü komutlu araç yavaşlamasıdır (DecelCmd).

3.5.4 Denetleyici (Controller) Bloğu

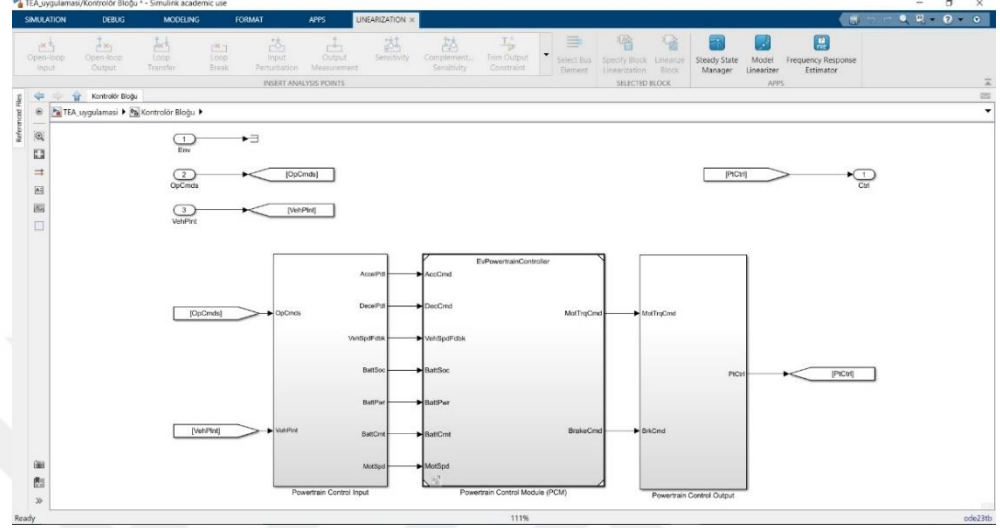
Bu alt sistem Güç Aktarma Organı Kontrol Giriş/Çıkış modülleri (Powertrain Control Input/Output) ve Güç Aktarma Kontrol Modülünden (Powertrain Control Module) oluşur. Sistem girişine Çevre, Boylamsal Sürücü ve Binek Araç bloğundan giriş sinyalleri uygulanır.

Tablo 3.6. Denetleyici bloğu (The MathWorks Inc., 2022).

Blok Adı	İşlevi
Accel Pedal to Traction Wheel Torque Request	Motor tork hız eğrisini kullanarak gaz pedalı konumunu tork komutuna dönüştürür.
Battery Management System	Pil şarj durumuna göre şarj ve deşarj gücünü belirler.
Brake Pedal to Total Braking Pressure Request	Fren pedalı konumunu fren basıncı isteğine dönüştürür.
Motor Torque Arbitration and Power Management	Güç Yönetim algoritması sayesinde motor torku veya sınırlı motor torku komutu arasında tercih yapar.
Regen Braking Control	Seri ve paralel rejeneratif freneleme kontrolü sağlar. Fren basıncına ve disk frenlerin parametrelerine dayalı toplam fren torku talebi üretir.

Çevre bloğundan gelen basınç, rüzgâr, sıcaklık ve yol eğimi bilgileri, Boylamsal Sürücü bloğu çıkışından komutlu araç ivmesi ve komutlu araç yavaşlaması bilgisi, Binek Araç bloğundan ElecFdbk ve VehFdbk sinyalleri bu bloğun girişine uygulanır. ElecFdbk pil şarj durumu, pil gücü, pil akımı ve motor tork bilgilerinden oluşur. VehFdbk sinyali ise araç ve motor hızı bilgilerini içerir. Denetleyici bloğu aldığı tüm bilgileri işleyerek, MotTrqCmd ve BrkCmd

sinyallerini üretir ve Binek Araç bloğuna uygular. Motor tork komutu ve fren komutu bilgileri, Güç Yönetim (Power Management) algoritması sayesinde üretilirler. Bu algoritma, mekanik gücün ihtiyaç duyduğu elektriksel gücü hesaplarken pil gücü yeterliliğini kontrol eder.



Şekil 3.23. Denetleyici bloğu (The MathWorks Inc., 2022).

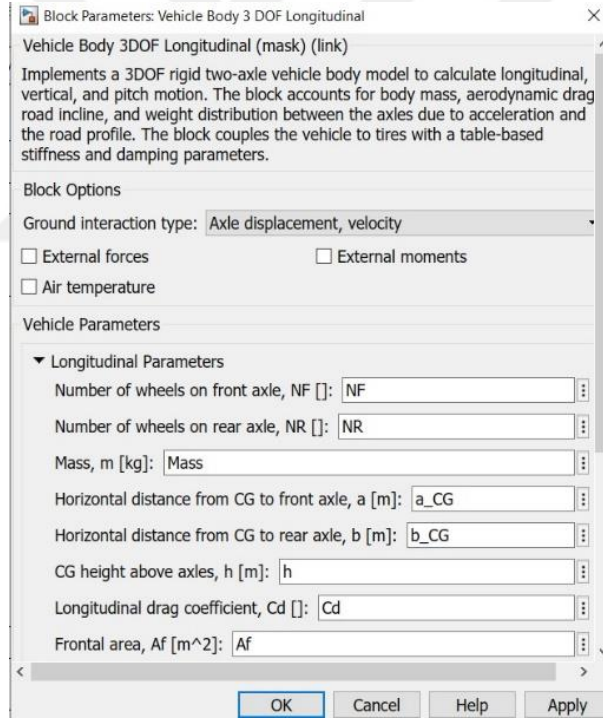
3.5.5 Binek Araç (Passenger Car) Bloğu

Bu blok Aktarma Organları (Drivetrain) ve Elektrik Tesisi (Electric Plant) sistemlerinden oluşur. Aktarma Organları bloğu, Aktarma Organları Giriş bloğundan (Drivetrain Plant Input) gelen *MotTrq*, *BrakeReq*, *Grade*, *Wind Vel* verilerini kullanır. Blok Rotasyonel Atalet (Rotational Inertia) bloğu sayesinde *MotTrq* (Motor tork) verisini *MotSpd* (Motor hız) verisine dönüştürür.

Araç (Vehicle) bloğu, Tekerlekler ve Frenler (Wheels and Brakes) bloğundan aldığı araç aksına etki eden kuvvetleri, eğim ve rüzgâr hızı bilgilerini kullanarak *InertFrm*, *BdyFrm*, *PwrInfo* (Info çoklu yol sinyalleri), *xdot*, *FzF*, *FzR* çıkışlarını üretir. Aktarma Organları Çıkış bloğu (Drivetrain Plant Output), *VehSpd* (araç hızı) ve *MotSpd* (motor hızı) verilerini kullanarak *VehFdbk* bilgisini oluşturur.

Tablo 3.7. Güç Aktarma Organları bloğu (The MathWorks Inc., 2022).

Blok Adı	İşlevi
Differential and Compliance	Ön, arka ve dört tekerden çekiş aktarma organı yapılandırmasının uygulanmasını sağlar.
Vehicle	3 Serbestlik Derecesine Sahip Boylamsal Araç Gövdesi (Vehicle Body 3DOF Longitudinal) bloğu sayesinde boylamsal, dikey ve eğim hareketini akslar üzerine binen ağırlık bilgilerini kullanarak hesaplar.
Vehicle Output Interface	Vehicle bloğundan aldığı verilerden VehSpd verisini seçip uygular.
Wheels and Brakes	Longitudinal Wheel bloğu sayesinde fren, boylamsal kuvvet ve yuvarlanma direnci torku değerlerini hesaplar.



Şekil 3.24. 3 Serbestlik Derecesine Sahip Boylamsal Araç Gövdesi blok parametreleri (The MathWorks Inc., 2022).

3 Serbestlik Derecesine Sahip Boylamsal Araç Gövdesi (Vehicle Body 3DOF Longitudinal) bloğu, ön ve arka akslardaki boylamsal kuvvetleri (F_{wF} , F_{wR}), yol eğim açısını (γ), rüzgâr hızını (W_X , W_Y , W_Z), araç sabit z eksenı boyunca ön ve

arka aks konumlarını ($\bar{Z}_F$, $\bar{Z}_R$) ve araç sabit z eksenini boyunca ön ve arka aks hızlarını ($\dot{Z}_F$, $\dot{Z}_R$) kullanarak çıkışta InertFrm, BdyFrm, PwrInfo (Info çoklu yol sinyalleri), araç sabit x eksenini boyunca araç ağırlık merkezi hızı (xdot) , araç sabit z eksenini boyunca ön aks üzerindeki normal kuvvet (F_{ZF}), araç sabit z eksenini boyunca arka aks üzerindeki normal kuvvet F_{ZR} çıkış bilgilerini üretir.

$$F_x = F_{wF} + F_{wR} - F_{d,x} - F_{sx,F} - F_{sx,R} + F_{g,x} \quad (3.12)$$

F_x : Araç üzerindeki boyuna kuvvet

F_{wF} : Araç sabit x eksenini boyunca ön akslarda boylamasına kuvvet

F_{wR} : Araç sabit x eksenini boyunca arka akslarda boylamasına kuvvet

$F_{sx,F}$: Ön akslarda boylamasına süspansiyon kuvveti

$F_{sx,R}$: Arka akslarda boylamasına süspansiyon kuvveti

$F_{d,x}$: Araç ağırlık merkezinde boyuna sürüklenme kuvveti

$F_{g,x}$: Araç üzerinde sabit şasi boyunca boylamasına yerçekimi kuvveti

$$F_{d,x} = \frac{1}{2TR} C_d A_f P_{abs} (\dot{x} - w_x)^2 \quad (3.13)$$

T : Çevresel hava sıcaklığı, R : Atmosferik özgül gaz sabiti , P_{abs} : Mutlak basınç , w_x : Rüzgâr hızı , $\dot{x}$: x eksenini boyunca araç hızı

$$F_z = F_{d,z} - F_{sz,F} - F_{sz,R} + F_{g,z} \quad (3.14)$$

F_z : Araç üzerindeki normal kuvvet

$F_{d,z}$: Araç ağırlık merkezi üzerindeki normal sürüklenme kuvveti

$F_{sz,F}$: Ön akslarda normal süspansiyon kuvveti

$F_{sz,R}$: Arka akslarda normal süspansiyon kuvveti

$F_{g,z}$: Araç üzerinde sabit şasi boyunca normal yerçekimi kuvveti

$$M_y = aF_{sz,F} - b F_{sz,R} + h(F_{wF} + F_{wR} + F_{sx,F} + F_{sx,R}) - M_{d,y} \quad (3.15)$$

a : Ön aksın, aracın ağırlık merkezinin normal iz düşüm noktasından ortak aks düzlemine olan uzaklığı

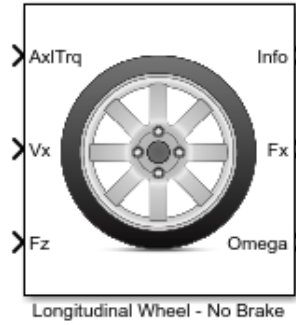
b : Arka aksın, aracın ağırlık merkezinin normal iz düşüm noktasından ortak aks düzlemine olan uzaklığı

$M_{d,y}$: Araçta sabit y ekseninde sürüklenmeden kaynaklanan tork

M_y : Araçta sabit y ekseninde araç üzerindeki tork

Blok ön ve arka akslara etki eden normal kuvvetleri, Denklem 3.12, 3.13 ve 3.14'ü kullanarak hesaplar.

Tekerlekler ve Frenler bloğu, Boylamsal Tekerlek (Longitudinal Wheel) bloğunu kullanarak tekerlek davranışlarını uygulamayı sağlar. Boylamsal kuvvet, yuvarlanma direnci ve tekerlek fren tipini belirlemeye yarar.



Şekil 3.25. Boylamsal Tekerlek bloğu (The MathWorks Inc., 2022).

Frensiz tekerlek seçeneği yanı sıra, diskli, kampanalı ve eşlenmiş fren seçenekleri bulunmaktadır. Boylamsal kuvvetlerin hesabında tekerleğin yol yüzeyindeki kayma davranışı belirleyicidir. Ayrıca dört farklı yuvarlanma direnci hesaplama seçeneğini destekler.

Elektrik Tesisi sistemi, pil ve motor alt sistemlerinden oluşur. Pil modeli olarak Veri Sayfası Pil (Datasheet Battery) bloğu kullanılmıştır. Pil üreticisi verileri kullanarak Li-iyon bir pil uygulanmıştır. Blok girişi BattCurr, BattTemp verileridir. Çıkışta ise BattVolt bilgisi üretilir. Pil sıcaklığı ve pil akım bilgisine bağlı, pil çıkış gerilimi üretilir (The MathWorks Inc., 2022).

$$E_m = f(SOC) \quad (3.16)$$

$$R_{int} = f(T, SOC) \quad (3.17)$$

$$V_T = E_m + I_{batt} R_{int} \quad (3.18)$$

$$I_{batt} = \frac{I_{in}}{N_p} \quad (3.19)$$

$$V_{out} = N_s V_T \text{ (filtresiz)} \quad (3.20)$$

$$\frac{V_{out}}{\tau s + 1} \text{ (filtreli)} \quad (3.21)$$

$$SOC = \frac{1}{Cap_{batt}} \int_0^t I_{batt} dt \quad (3.22)$$

$$Ld_{AmpHr} = \int_0^t I_{batt} dt \quad (3.23)$$

Cap_{batt} : Pil kapasitesi

E_m : Pil açık-devre gerilimi

I_{in} : Pil şebekesinden akan birleşik akım

I_{batt} : Modül başına pil akımı

Ld_{AmpHr} : Pil enerjisi

N_p : Paralel hücre sayısı

N_s : Seri hücre sayısı

P_{batt} : Pil gücü

P_{LdBatt} : Pil şebeke gücü

$P_{LossBatt}$: Pil şebeke güç kaybı

$P_{StoredBatt}$: Pil şebeke güç depolama

R_{int} : Pil iç direnci

SOC : Şarj durumu

V_T : Modül başına pil voltajı

Motor modeli, Eşlenmiş Motor (Mapped Motor) bloğunu kullanır. BusVolt, MotSpd, MotTrqCmd verileri kullanılarak, Çıkışta MotCurnt ve MotTrq verileri elde edilir. Bu blok elektriksel tork parametreleri maksimum tork, maksimum güç ve tork kontrol zaman sabitidir. Motorun elektriksel kayıpları bu blokta tanımlanır (The MathWorks Inc., 2022).

$$BattAmp = \frac{MechPwr + PwrLoss}{BattVolt} \quad (3.24)$$

Motor bloğu, pil akımını Denklem 3.24'ü kullanarak hesaplar.

$MechPwr$ mekanik güç, $PwrLoss$ güç kaybını ifade ederken, $BattVolt$ pil gerilimini ifade etmektedir.

Güç hesabında

$$P_{mot} = \omega_m T_e \quad (3.25)$$

$$P_{bus} = P_{mot} + P_{loss} \quad (3.26)$$

$$P_{stored} = \omega_m \dot{\omega}_m J \quad (3.27)$$

$$P_{loss} = -(P_{mot} + P_{loss} + P_{stored}) \quad (3.28)$$

eşitlikleri kullanılır.

j: Motor ataleti

P_{bus} : Elektriksel güç

P_{loss} : Motor güç kaybı

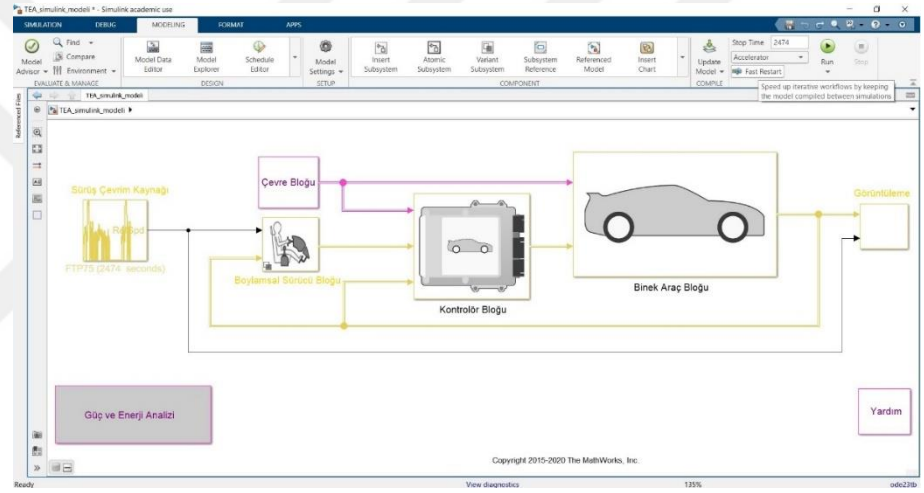
P_{mot} : Mekanik güç

P_{stored} : Depolanan motor gücü

T_e : Motor çıkış mili torku

ω_m : Motor mili hızı

(The MathWorks Inc., 2022).



Şekil 3.26. TEA Simulink modeli (The MathWorks Inc., 2022).

TEA Simulink modelinin güç ve enerji analizi için, Canlı Komut (Live Script) dosyası kullanılmıştır. Güç Hesaplama Çoklu Veri Yolu (Power Accounting Bus Creator) sayesinde; aktarılan, aktarılmayan ve depolanan güç değerleri elde edilir. Güç aktarımının pozitif olması sisteme güç akışını, negatif olması sistemden dışarı akışı ifade etmektedir. Aktarılmayan güç için ise pozitif değerler sisteme giriş olduğunu, negatif değerler ise kayıp oluştuğunu göstermektedir. Enerji depolamasının pozitifliği enerji artışını, negatifliği ise enerjide azalma olduğunu belirtir. “[autoblks.pwr.PlantInfo](#)” komutu çalıştırılarak simülasyon sonuçları ve raporları elde edilmiştir. Canlı komut dosyası Denklem 3.29 ve 3.30’u kullanır.

$$\eta = \left| \frac{\sum P_{\text{çıkış}} - \sum P_{\text{depolanan}} (\text{Depolanan güç} > 0)}{\sum P_{\text{giriş}} - \sum P_{\text{depolanan}} (\text{Depolanan güç} < 0)} \right| \quad (3.29)$$

$$\sum P_{\text{aktarılan}} + \sum P_{\text{aktarılmayan}} = \sum P_{\text{depolanan}} \quad (3.30)$$

η : Sistem verimi

$P_{\text{aktarılan}}$: Aktarılan güç

$P_{\text{aktarılmayan}}$: Aktarılmayan güç

$P_{\text{depolanan}}$: Depolanan güç

$P_{\text{giriş}}$: Güç Hesaplama Çoklu Veri Yolu tarafından kaydedilen giriş gücü

$P_{\text{çıkış}}$: Güç Hesaplama Çoklu Veri Yolu tarafından kaydedilen çıkış gücü

Canlı komut dosyası sistem verimi, enerji kayıpları ve depolanan enerji verilerinin PDF, Word, HTML ve LaTeX dosya biçimlerinde rapor olarak elde edilmesini sağlar.

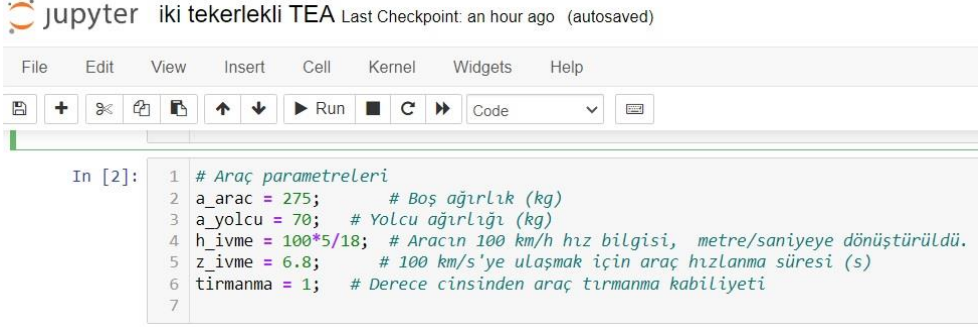
Modele ait çıkış grafikleri, görüntüleme bloğunda bulunan “Scope” üzerinden gözlemlenir. Simülasyon durma zamanı (Stop Time) her bir sürüş çevrimi süresine göre belirlenir. Araç çevrim süresi boyunca sürüş davranışlarını gerçekleştirir. Scope, km/h cinsinden araç hızı, % olarak ifade edilen pil SOC (pil şarj durumu), amper cinsinden pil akımı, dakikadaki devir sayısı anlamına gelen RPM (Revolutions Per Minute) olarak ifade edilen motor hızı, Nm biriminden motor torku ve 100 km sürüş boyunca litre (l) olarak tüketilen yakıt düzeyini gösterir. Görüntüleme bloğu tüm bu verilerin; ortalama, maksimum, minimum değerlerini hesaplar. TEA modelinin istenilen bileşenlerinin grafiksel davranışı Simülasyon Veri Denetçisi (Simulation Data Inspector) sayesinde analiz edilebilmektedir. Veriler görsel hale getirilebilir ve simülasyon sonuçları farklı parametrelerle karşılaştırılabilir. Ayrıca “MLDATX” dosyası olarak kaydedilebilir ve istenildiği zaman bu dosyaya erişim sağlanarak veriler incelenebilir.

Simulink Library Browser (Simulink Kütüphane Tarayıcısı) kullanılarak modele Simulink blokları eklenebilir ve değişiklikler yapılabilir. Vehicle Dynamics Blokset (Araç Dinamikleri Blok Seti) en önemli model bileşenlerini içerir. Özellikle bu kategoriye ait bileşenler TEA modelinin tasarımına olanak sağlar. Her bir bloğa ait bilgiler Model Data Editor (Model Veri Editörü) ile listelenir ve istenilen parametreler değiştirilebilir. TEA modeli için MATLAB R2021a sürümü kullanılmıştır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 İki Tekerlekli TEA hesaplamaları



```

jupyter iki tekerlekli TEA Last Checkpoint: an hour ago (autosaved)

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help

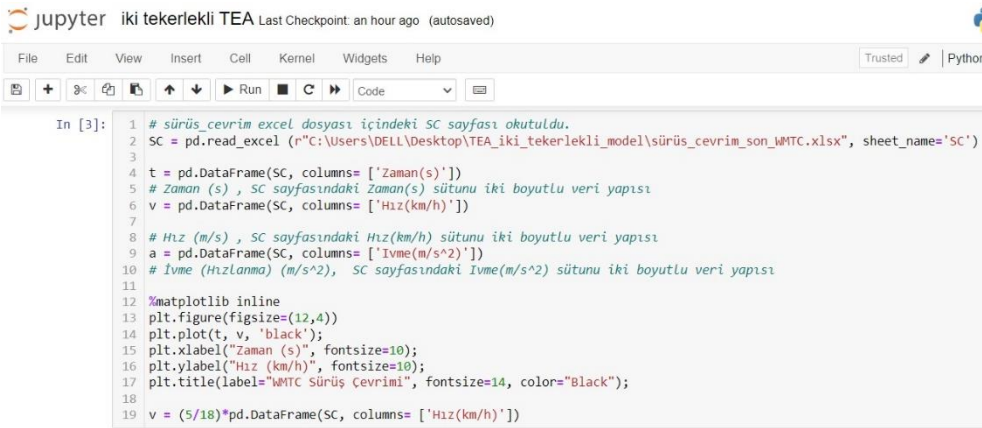
In [2]: 1 # Araç parametreleri
        2 a_arac = 275; # Boş ağırlık (kg)
        3 a_yolcu = 70; # Yolcu ağırlığı (kg)
        4 h_ivme = 100*5/18; # Aracın 100 km/h hız bilgisi, metre/saniyeye dönüştürüldü.
        5 z_ivme = 6.8; # 100 km/s'ye ulaşmak için araç hızlanma süresi (s)
        6 tırmanma = 1; # Derece cinsinden araç tırmanma kabiliyeti
        7

```

Şekil 4.1. İki tekerlekli TEA için araç veri tanımlamaları.

BMW'ye (2016) göre araç ağırlığı 275 kg'dır. Araç 6,8 saniyelik sürede 100 km/h hıza çıkabilmektedir. Sürücü ağırlığı 70 kg olarak alınmıştır.

WMTC (World-wide Harmonised Motorcycle Emissions Certification/Test ProCedure), farklı motor tiplerinin dünya çapında emisyonlarının ölçülmesinde kullanılan, vites değiştirme, ölçüm ve analiz uyumlu test döngüsü sağlamaktadır (Steven, 2002).



```

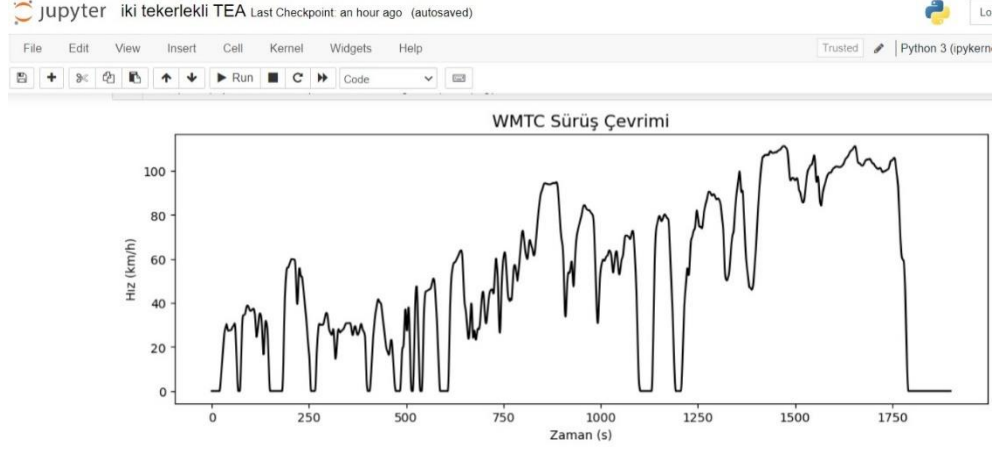
jupyter iki tekerlekli TEA Last Checkpoint: an hour ago (autosaved)

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted Python

In [3]: 1 # sürüş çevrim excel dosyası içindeki SC sayfası okutuldu.
        2 SC = pd.read_excel(r"C:\Users\DELL\Desktop\TEA_iki_tekerlekli_model\sürüş_çevrim_WMTC.xlsx", sheet_name='SC')
        3
        4 t = pd.DataFrame(SC, columns= ['Zaman(s)'])
        5 # Zaman (s) , SC sayfasındaki Zaman(s) sütunu iki boyutlu veri yapısı
        6 v = pd.DataFrame(SC, columns= ['Hız(km/h)'])
        7
        8 # Hız (m/s) , SC sayfasındaki Hız(km/h) sütunu iki boyutlu veri yapısı
        9 a = pd.DataFrame(SC, columns= ['Ivme(m/s^2)'])
        10 # Ivme (Hızlanma) (m/s^2), SC sayfasındaki Ivme(m/s^2) sütunu iki boyutlu veri yapısı
        11
        12 %matplotlib inline
        13 plt.figure(figsize=(12,4))
        14 plt.plot(t, v, 'black');
        15 plt.xlabel("Zaman (s)", fontsize=10);
        16 plt.ylabel("Hız (km/h)", fontsize=10);
        17 plt.title(label="WMTC Sürüş Çevrimi", fontsize=14, color="Black");
        18
        19 v = (5/18)*pd.DataFrame(SC, columns= ['Hız(km/h)'])

```

Şekil 4.2. İki tekerlekli TEA hesaplamaları için WMTC sürüş çevrimi dosyası.



Şekil 4.3. İki tekerlekli TEA hesaplamaları için WMTC Hız-Zaman grafiği (UNECE, 2022).

BMW C Evolution, 120/70-R15 ön lastik ve 160/60-R15 arka lastik kullanmaktadır. Araç arkadan çekişli olduğundan lastik verisi arka lastiğe göre hesaplanmıştır (Ultimate Specs, 2022).



Şekil 4.4. BMW C Evolution arka lastik 160/60-R15 bilgileri (Zigwheels, 2022).

Formüller:

$$H = \frac{AR \cdot W}{100} \quad (4.1)$$

$$d_w = D + 2H \quad (4.2)$$

$$r_w = \frac{d_w}{2} \quad (4.3)$$

Sürüklenme katsayısı aracın şekline bağlı olarak değişir. Bu değer azaldıkça, aerodinamik sürüklenme kuvveti azalır, araç enerji tüketimi azalır ve sürüş mesafesi artar.



Şekil 4.6. BMW C Evolution ön yüzey ölçüleri (Ultimate Specs, 2022), Görsel : (Dexigner, 2022).

Yaklaşık ön yüzey alanı hesabı:

$$A_a = ((0,915 + 0,26) / 2) (1,255) \text{'den } A_a = 0,73 \text{ m}^2 \text{ hesaplanır.}$$

jupyter iki tekerlekli TEA Last Checkpoint: an hour ago (autosaved)

```

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
[Icons] [Run] [Code]
In [5]:
1
2 ro = 1.225;      # Uluslararası Standart Atmosfer şartları hava yoğunluğu değeri (kg/m^3)
3 A = 0.83;       # yaklaşık ön yüzey alanı (m^2 cinsinden)
4 sür_kat = 0.56; # sürüklenme katsayısı sabiti
5 rüz_hız = 0;    # Rüzgar hızı bileşeni (m/s cinsinden)
6 ad_kuv = 0.5*ro*A*sür_kat*np.square(v - rüz_hız) # Aerodinamik sürüklenme, rüzgar hızı 0 m/s
7
8
9

```

Şekil 4.7. Aerodinamik sürüklenme kuvveti hesabı.

Angeletti et al., (2003) çalışmasında “Maxi Scooter” için sürücünün toplam yüzeye etkisini $0,1 \text{ m}^2$ ve sürüklenme katsayısı sabitini 0,56 olarak ifade etmiştir. Sürücünün toplam yüzeye etkisi, hesaplanan araç ön yüzeyine eklendiğinde yaklaşık yüzey alanı, $0,83 \text{ m}^2$ olarak çıkmaktadır. Araca etki eden rüzgâr hızı değişken, araca hızlandırıcı veya yavaşlatıcı etkisi rüzgâr yönüne göre değişiklik

göstereceğinden hesaplamada 0 m/s olarak kabul edilmiştir. ρ_a , 1,225 kg/m³ olarak alınmıştır (Uluslararası Standart Atmosfer Şartları).

Yuvarlanma direnci, araç performansı üzerinde etkili bir değişkendir. Lastik üzerine etki eden ağırlık nedeniyle oluşan deformasyon, direnç torku oluşmasına neden olur. Yuvarlanma direnci arttıkça enerji kaybı da artar. Enerji kaybı lastiklerde ısınma şeklinde ortaya çıkar (Eriksson and Nielsen, 2014). Yuvarlanma direnci katsayısı, lastik üzerindeki yüke, lastik basıncına, yol yüzeyine ve aracın hızına göre farklılıklar gösterir.

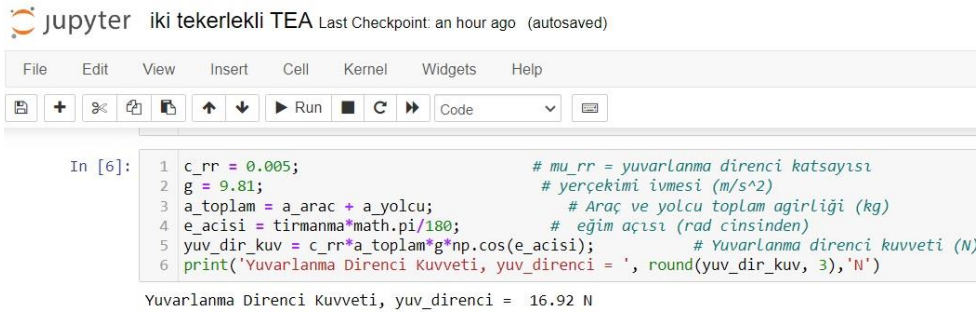
Tablo 4.1. Yuvarlanma direnci katsayıları (Wallentowitz, 2004).

Yol yüzeyi	Yuvarlanma direnci katsayısı
Sağlam asfalt, beton yol	0,005 – 0,015
Sert çakıl, aşınmış asfalt yol	0,02 – 0,03
Katranlı, yıpranmış, dalgalı yol	0,03 – 0,04
Çok iyi toprak yollar	0,04 – 0,05
Toprak yollar	0,05 – 0,15
Kum	0,15 – 0,35

$$F_{rr} = c_{rr} m g \cos \alpha \quad (4.6)$$

c_{rr} : Yuvarlanma direnci katsayısı, m : Toplam araç kütlesi, g : 9,81 m/s²

α : Eğim açısı (Goda et al., 2018).



```

In [6]: 1 c_rr = 0.005; # mu_rr = yuvarlanma direnci katsayısı
2 g = 9.81; # yerçekimi ivmesi (m/s^2)
3 a_toplam = a_arac + a_yolcu; # Araç ve yolcu toplam ağırlığı (kg)
4 e_acisi = tirmanma*math.pi/180; # eğim açısı (rad cinsinden)
5 yuv_dir_kuv = c_rr*a_toplam*g*np.cos(e_acisi); # Yuvarlanma direnci kuvveti (N)
6 print('Yuvarlanma Direnci Kuvveti, yuv_direnci = ', round(yuv_dir_kuv, 3), 'N')

Yuvarlanma Direnci Kuvveti, yuv_direnci = 16.92 N

```

Şekil 4.8. Yuvarlanma direnci kuvveti hesabı.

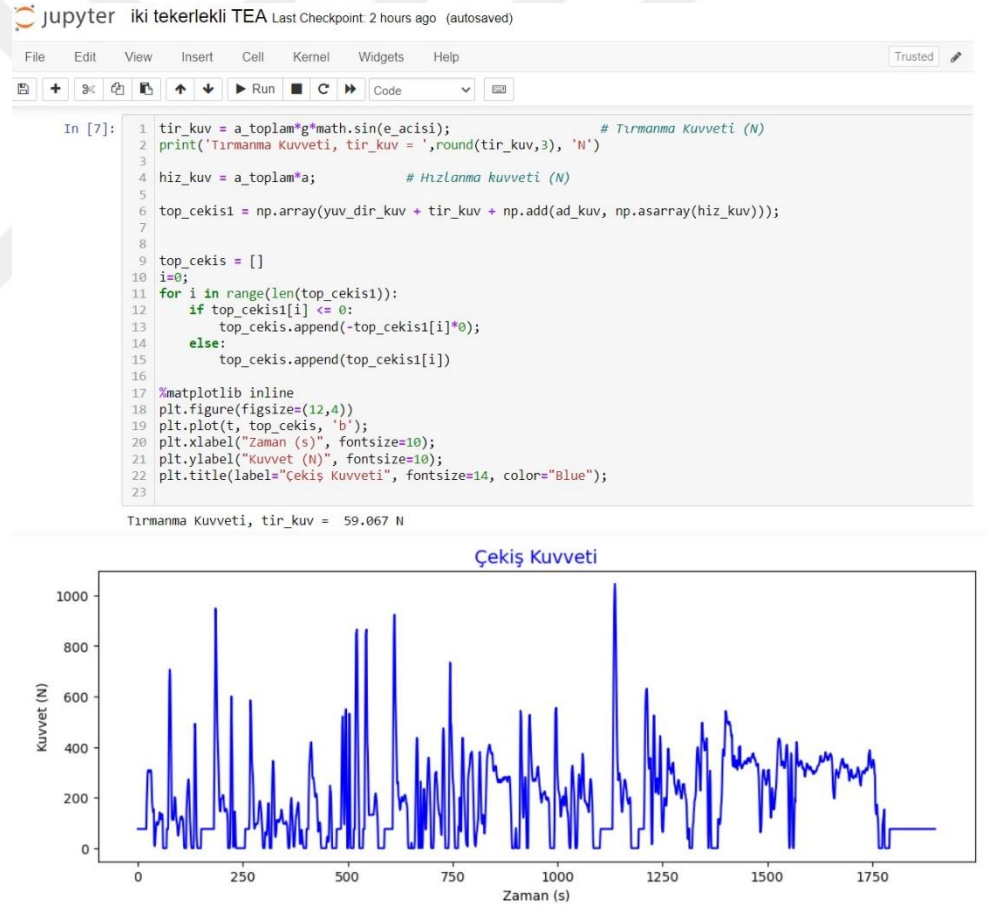
Araç eğimli bir yolda yukarı doğru tırmanırken, eğim açısına bağlı olarak tırmanma kuvveti aracı yavaşlatacaktır. Tırmanmanın tersine yokuş aşağı hareketi araca pozitif yönde kuvvet uygulayacak ve hızlanmasını sağlayacaktır. Eğim açısının sinüs değeri oranında hızlandırıcı veya yavaşlatıcı kuvvet etkisi yaratır (X-engineer, 2022).

$$F_{hc} = m g \sin \alpha \quad (4.7)$$

$$F_a = m a \quad (4.8)$$

$$F_{te} = F_{ad} + F_{rr} + F_{hc} + F_a \quad (4.9)$$

(Goda et al., 2018).



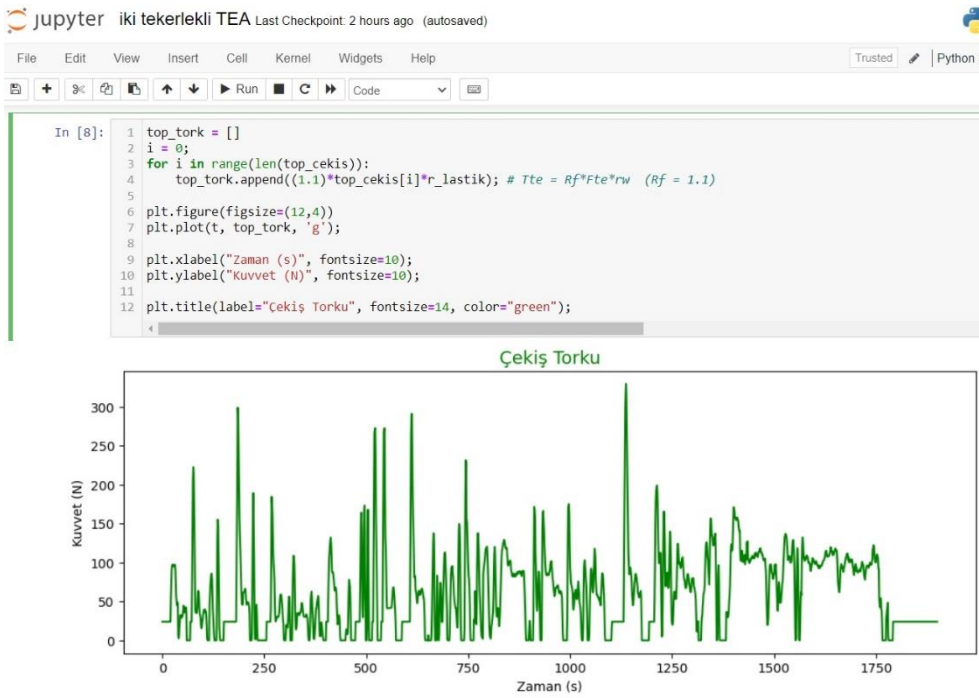
Şekil 4.9. (a) Tırmanma kuvveti hesabı, (b) Çekiş kuvveti grafiği

Arka tekerlek tahriği, planet diski ve kayış yardımı ile gerçekleştirilir. Aracın toplam çekiş torku hesaplanır. Selim'e (2013) göre tekerlekler, akslar ve motor rulmanları arasındaki 1,1 ile 1,15 arasında değişen değerler almaktadır. Hesaplama sürtünme faktörü 1,1 olarak alınmıştır.

$$T_{te} = R_f F_{te} r_w \quad (4.10)$$

R_f : Rulman, aks vb. arasındaki sürtünme kayıpları için sürtünme faktörü

r_w : tekerlek yarıçapı (Chauhan, 2015).

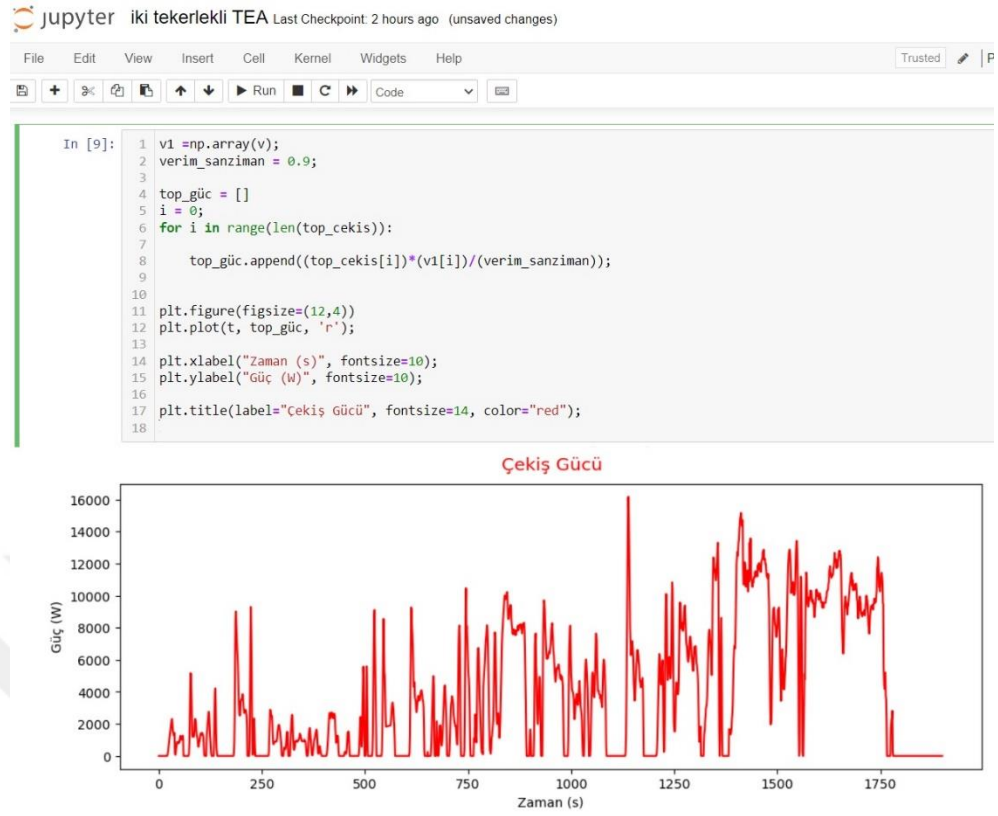


Şekil 4.10. (a) Çekiş torku hesabı, (b) Çekiş torku grafiği

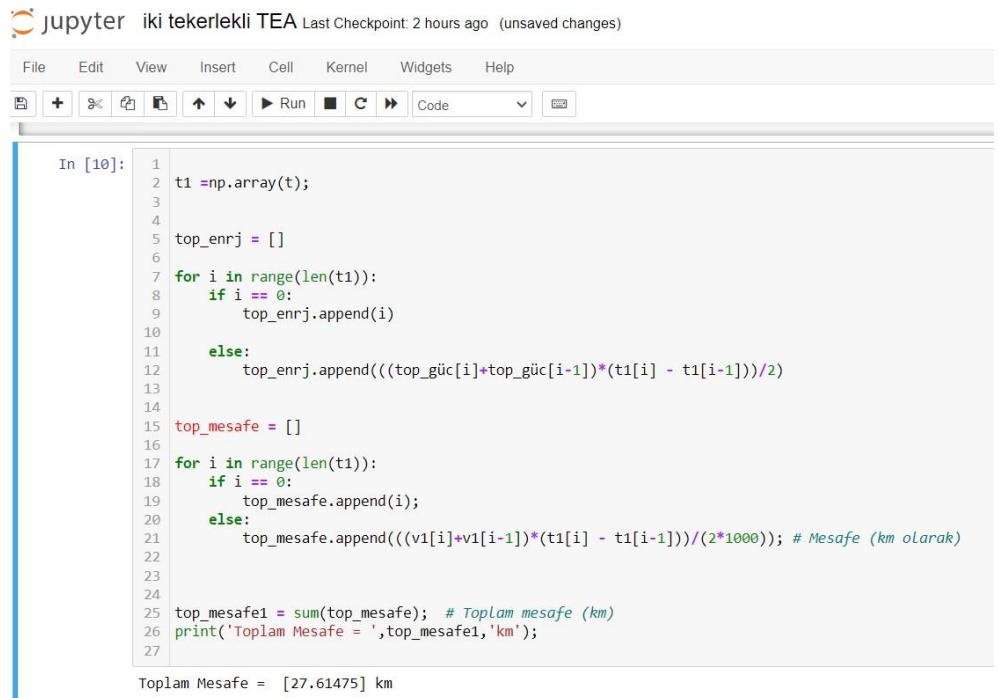
$$P_{te} = \frac{F_{te} \cdot V}{\eta} \quad (4.11)$$

P_{te} : Toplam çekiş gücü, V : Araç hızı (m/s)

η : Şanzıman verimlilik oranı (doğrudan tahrik için 0,9) (Goda et al., 2018).

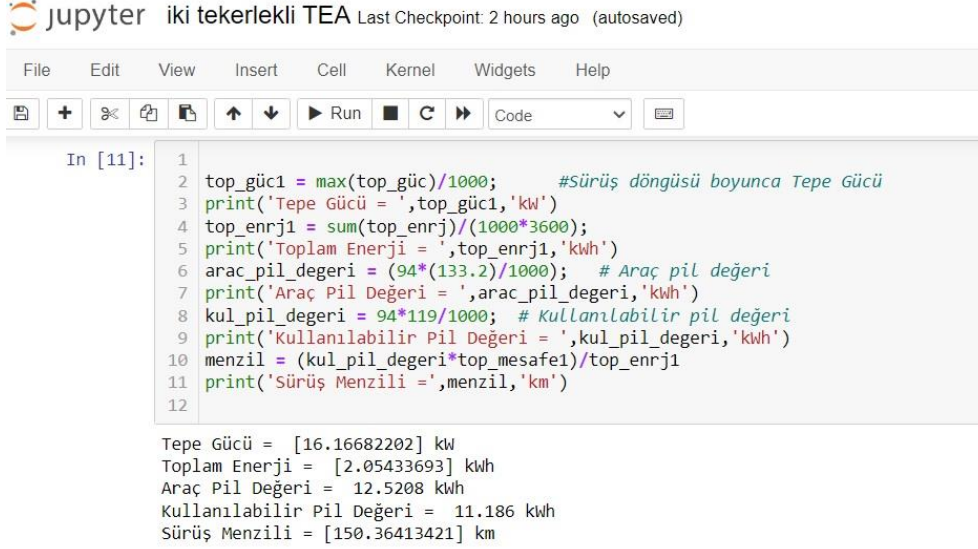


Şekil 4.11. (a) Çekiş gücü hesabı, (b) Çekiş gücü grafiği



Şekil 4.12. Sürüş çevrimi boyunca toplam mesafe.

Şekil 4.13’de görüldüğü üzere araç 27,61 km boyunca 2,054 kWh enerji harcamaktadır. Bu değer km başına 74,3 Wh enerjiye karşılık gelirken, enerji verimliliği 7,43 kWh/100 km olarak hesaplanmaktadır.



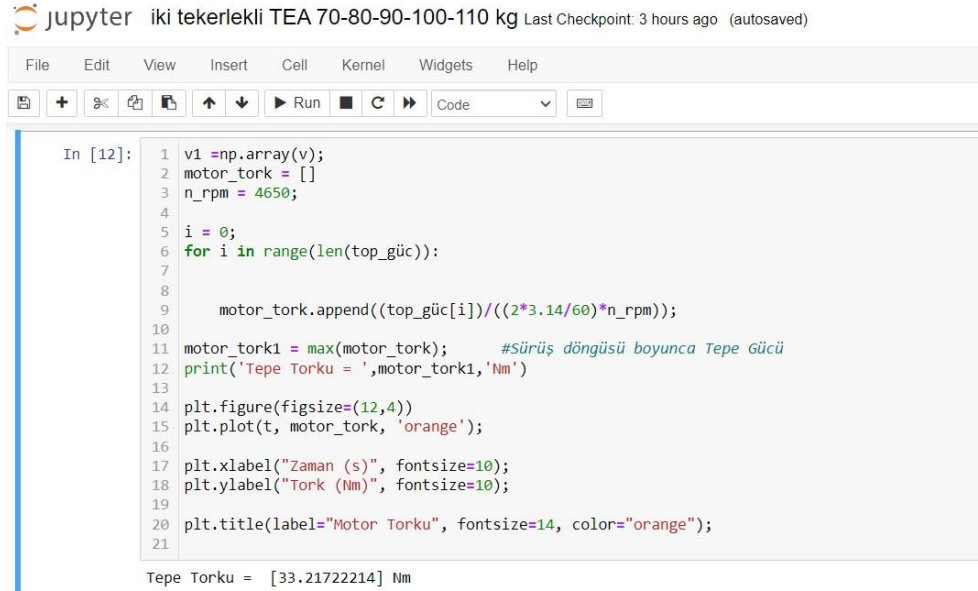
Jupyter iki tekerlekli TEA Last Checkpoint: 2 hours ago (autosaved)

```

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
+ - - - - - Run - - - - - Code
In [11]: 1 top_güc1 = max(top_güc)/1000; #Sürüş döngüsü boyunca Tepe Gücü
2 print('Tepe Gücü = ',top_güc1,'kW')
3 top_enrj1 = sum(top_enrj)/(1000*3600);
4 print('Toplam Enerji = ',top_enrj1,'kWh')
5 arac_pil_degeri = (94*(133.2)/1000); # Araç pil değeri
6 print('Araç Pil Değeri = ',arac_pil_degeri,'kWh')
7 kul_pil_degeri = 94*119/1000; # Kullanılabilir pil değeri
8 print('Kullanılabilir Pil Değeri = ',kul_pil_degeri,'kWh')
9 menzil = (kul_pil_degeri*top_mesafe1)/top_enrj1
10 print('Sürüş Menzili =',menzil,'km')
11
12
Tepe Gücü = [16.16682202] kW
Toplam Enerji = [2.05433693] kWh
Araç Pil Değeri = 12.5208 kWh
Kullanılabilir Pil Değeri = 11.186 kWh
Sürüş Menzili = [150.36413421] km

```

Şekil 4.13. Araç pil değeri ve toplam sürüş menzili.



Jupyter iki tekerlekli TEA 70-80-90-100-110 kg Last Checkpoint: 3 hours ago (autosaved)

```

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
+ - - - - - Run - - - - - Code
In [12]: 1 v1 = np.array(v);
2 motor_tork = []
3 n_rpm = 4650;
4
5 i = 0;
6 for i in range(len(top_güc)):
7
8     motor_tork.append((top_güc[i])/((2*3.14/60)*n_rpm));
9
10 motor_tork1 = max(motor_tork); #Sürüş döngüsü boyunca Tepe Gücü
11 print('Tepe Torku = ',motor_tork1,'Nm')
12
13 plt.figure(figsize=(12,4))
14 plt.plot(t, motor_tork, 'orange');
15
16 plt.xlabel("Zaman (s)", fontsize=10);
17 plt.ylabel("Tork (Nm)", fontsize=10);
18
19 plt.title(label="Motor Torku", fontsize=14, color="orange");
20
21
Tepe Torku = [33.21722214] Nm

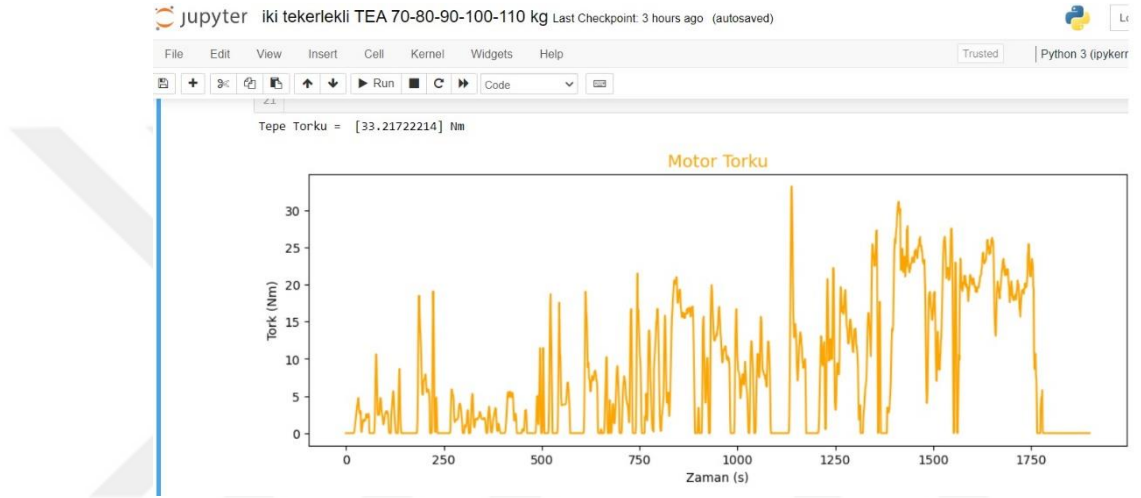
```

Şekil 4.14. Motor tepe torku hesabı.

Motor tepe torku hesabında Denklem 4.12 kullanılır. Hesaplama ve tork grafiğine ait yazılım Şekil 4.14’te verilmiştir. Hesaplanan tork bilgisi grafiği Şekil 4.15’te görülmektedir.

$$T_{motor} = \frac{P_{te}}{\frac{2\pi}{60} n_{rpm}} \quad (4.12)$$

(Goda et al., 2018).



Şekil 4.15. Motor torku grafiği.

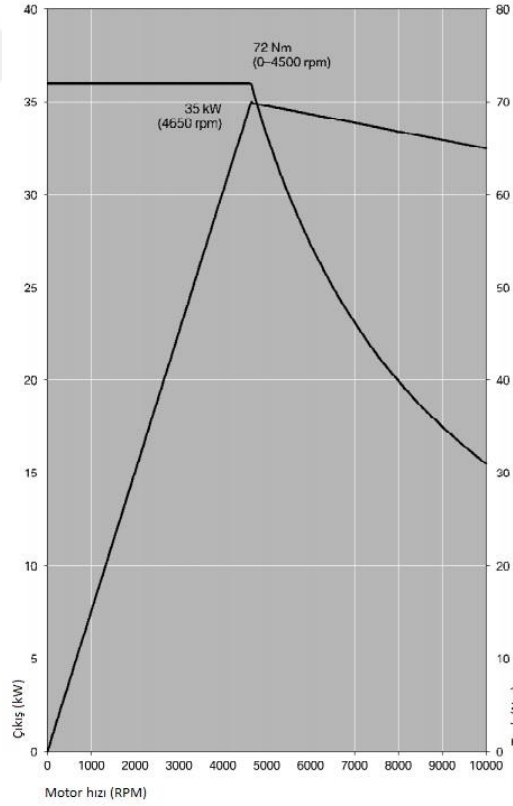
BMW C Evolution WMTC sürüş menzili yaklaşık 160 km olarak verilmektedir (BMW, 2016). Hesaplamalarda yolcu ağırlığı 70 kg, yuvarlanma direnci katsayısı 0,005 (asfalt zemin için) ve rüzgâr hızı 0 m/s olarak kabul edildiğinde sürüş menzili 150,4 km olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.2’de görüldüğü üzere, sürücü ağırlığı ihmal edilerek menzil hesaplandığında sürüş menzili 164 km çıkmaktadır. BMW (2016) verilerine göre 160 km sürüş menzili ile karşılaştırıldığında 4 km’lik bir fark görülmektedir. “Python” yazılımı ile gerçekleştirilen menzil hesabının, gerçek araç menziline %2,5 oranında farkla fazla çıktığı görülmektedir. Bu, hesaplamaların gerçek verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Farklı sürücü ağırlıklarıyla yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de görülmektedir. 70 ve 110 kg arasındaki beş farklı yolcu ağırlığıyla yapılan

hesaplamalarda, sürüş menzili 150 km ile 143 km arasında değişmektedir. Araç ağırlığı arttıkça sürüş menzili azalmaktadır. Araç WMTC sürüş çevriminde 1800 sn süre boyunca 27,6 km mesafe kat etmektedir (Bkz Şekil 4.12). 70 kg ağırlıkta sürüş çevrimi boyunca 2,054 kWh olan enerji tüketimi, 110 kg ağırlıkta 2,158 kWh'e çıkmaktadır. 70 kg yolcu ağırlığında enerji verimliliği, 7,43 kWh/100 km iken 110 kg yolcu ağırlığında 7,81 kWh/100 km bulunmuştur.

Tablo 4.2. Değişen yolcu ağırlıklarında pil, motor ve menzil değerleri.

Yolcu Ağırlığı (kg)	Toplam Ağırlık (kg)	Tepe Gücü (kW)	Toplam Enerji (kWh)	Sürüş Menzili (km)	Tepe Torku (Nm)
0	275	13,47	1,874	164,77	27,68
70	345	16,16	2,054	150,40	33,21
80	355	16,59	2,080	148,49	34,10
90	365	17,02	2,106	146,67	34,97
100	375	17,45	2,132	144,88	35,85
110	385	17,88	2,158	143,13	36,73



Şekil 4.16. BMW C Evolution motor hız, tork ve güç grafiği (BMW, 2016).

İki referans ağırlık arasında 0,38 kWh/100 km artan bir enerji tüketimi görülmektedir. Ağırlık arttıkça enerji tüketimi artmakta ve sürüş menzili azalmaktadır. Motorun araç çekişini sağlayabilmek için ürettiği maksimum tork kuvveti, yolcu ağırlığı arttıkça artmaktadır. 70 kg yolcu ağırlığında bu değer 33,21 Nm iken 110 kg ağırlıkta 36,73 Nm çıkmaktadır.

Şekil 4.16'da üretici tarafından yayınlanmış olan BMW C Evolution'a ait motor hız, tork ve güç grafiği görülmektedir (BMW, 2016). Şekil 4.16'daki verilerle, Tablo 4.2'deki sonuçlar karşılaştırıldığında; motor gücüne karşılık üretilen motor tork değerleri uyumludur. 16,16 kW güç karşılığında araç motoru 33,21 Nm tork üretmektedir. Şekil 4.16'daki grafikte güç değerine karşılık gelen motor torku bilgisi 32 Nm civarındadır. Hesaplamalarda oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Değişen sürüş yüzeylerinde ve 70 kg yolcu ağırlığında pil, motor ve menzil bilgileri Tablo 4.3'te görülmektedir. Yüzey yuvarlanma direnci katsayısı arttıkça araç menzili önemli oranda azalmaktadır. 70 kg yolcu ağırlığında, en düşük yuvarlanma direncine sahip asfalt zeminde araç menzili 150,40 km iken, en yüksek yuvarlanma direncine sahip olan kum zeminde 50,70 km'ye kadar düşmektedir. Hesaplamalarda, çevrim boyunca tüm sürüşün; tamamen asfalt, toprak veya kum yolda gerçekleştiği kabul edilmiştir.

Tablo 4.3. Değişen sürüş yüzeylerinde pil, motor ve menzil bilgileri.

Yol yüzeyi	Yuvarlanma direnci katsayısı	Tepe Gücü (kW)	Toplam Enerji (kWh)	Sürüş Menzili (km)	Tepe Torku (Nm)
Sağlam asfalt, beton yol	0,005	16,16	2,05	150,40	33,21
Sert çakıl, aşınmış asfalt yol	0,02	17,10	2,45	126,24	35,13
Katranlı, yıpranmış, dalgalı yol	0,03	17,77	2,71	113,80	36,52
Çok iyi toprak yollar	0,04	18,83	2,99	103,48	38,68
Toprak yollar	0,05	19,87	3,26	94,82	40,83
Kum	0,015	30,78	6,08	50,70	63,23

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere, yuvarlanma direnci katsayısına bağlı olarak; tamamen kum yolda harcanan enerji, asfalt yolda harcananın yaklaşık 3 katıdır. Bu artış, motor torkunun tepe değerinin yaklaşık olarak 1,9 kat artmasına neden olmuştur.

Tablo 4.4. Harekete zıt değişen rüzgâr hızının pil, motor ve menzile etkisi.

Hız (km/h)	Tepe Gücü (kW)	Toplam Enerji (kWh)	Sürtüş Menzili (km)	Tepe Torku (Nm)
0	16,16	2,05	150,40	33.21
5	16,41	2,19	141,00	33.72
10	16,68	2,33	132,12	34.28
15	17,70	2,56	120,44	36.36
20	18,16	2,66	116,12	37.30

Tablo 4.4’te 70 kg yolcu ağırlığında, asfalt yüzeyde ve harekete zıt yönde etki eden rüzgârın menzile, motor ve pile olan etkisi görülmektedir. Rüzgârın araç hareketine ters yönde etkisi arttıkça araç daha fazla enerji harcamaktadır. Sürüş menzili bu sebeple azalırken motorun ürettiğı tork artmaktadır.

4.2 Dört Tekerlekli TEA Simülasyonu

VW ID.3 için pil parametre değerleri Şekil 4.17’de verilmiştir. Bu değerler Tablo 4.5 ve Marklines (2022) verilerine göre belirlenmiştir. Araç 108 seri ve 2 paralel bağlı pil hücreleri ile toplam 216 pil hücresine sahiptir. 78 Ah maksimum şarj kapasitesi ve kullanılabilir kapasite 74,76 Ah olarak ayarlanmıştır.

Source	Name	Value	Data Type
Lithium Ion Battery Pack	BattChargeMax	BattChargeMax	
Lithium Ion Battery Pack	Em	Em	
Lithium Ion Battery Pack	CapLUTBp	CapLUTBp	
Lithium Ion Battery Pack	RInt	RInt	
Lithium Ion Battery Pack	BattTempBp	BattTempBp	
Lithium Ion Battery Pack	CapSOCBp	CapSOCBp	
Lithium Ion Battery Pack	Ns	Ns	
Lithium Ion Battery Pack	Np	Np	
Lithium Ion Battery Pack	BattCapInit	BattCapInit	
Model Workspace	BattCapInit	74.76	double (auto)
Model Workspace	BattChargeMax	78	double (auto)
Model Workspace	BattTempBp	[273.1 293.1 313.1]	double (auto)
Model Workspace	CapLUTBp	[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]	double (auto)
Model Workspace	CapSOCBp	[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]	double (auto)
Model Workspace	Em	[2.5 3.472 3.58 3.63 3.663 3.691 3.8...	double (auto)
Model Workspace	Np	2	double (auto)
Model Workspace	Ns	108	double (auto)
Model Workspace	RInt	[0.0043 0.0042 0.0033 0.0031 0.003...	double (auto)
SOC Ratio to %	Gain	100	Inherit: Inherit via internal rule

Şekil 4.17. Pil parametreleri (The MathWorks Inc., 2022).

Tablo 4.5. Araç pil parametreleri (Wassiliadis et al., 2022; Marklines, 2022).

Açıklama	Değerler
Nominal sıcaklıkta nominal kapasite, BattChargeMax [Ah]:	78
Açık devre voltaj tablosu verileri, Em [V]:	[2.500 3.472 3.580 3.630 3.663 3.691 3.801 3.912 4.023 4.134 4.217]
Açık devre voltajı kesme noktaları 1, CapLUTBp []:	[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]
Dâhilî direnç tablosu verileri, RInt [Ohms]:	[0.00430 0.00420 0.00330 0.00310 0.00305 0.00305 0.00320 0.00310 0.00305 0.00305 0.00304;0.00250 0.00240 0.00200 0.00190 0.00180 0.00180 0.00190 0.00180 0.00180 0.00180 0.00170;0.00180 0.00170 0.00160 0.00150 0.00150 0.00160 0.00170 0.00160 0.00160 0.00160 0.00150]
Pil sıcaklığı sınır değerleri 1, BattTempBp [K]:	[273.1 293.1 313.1]
Pil kapasitesi sınır değerleri 2, CapSOCBp []:	[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]
Serideki hücre sayısı, Ns []:	108
Paralel hücre sayısı, Np []:	2
Başlangıç pil kapasitesi, BattCapInit [Ah]:	74,76

LG Chem E78 pil nominal hücre gerilimi 3,65 V, kapasitesi 78 Ah, gravimetrik hücre yoğunluğu 265 Wh/kg'dır (Lima, 2021). Her bir modül, 12 seri pil hücresinden oluşmaktadır. Çekiş pili 9 modülün birleşmesinden oluşmuştur (Marklines, 2022).

$$V_{modül} = 12 \cdot 3,65 = 44 \text{ V (12 seri hücre)}$$

$$V_{çekiş\ pili} = 9 \cdot 44 = 396 \text{ V (9 seri modül)}$$

$$Kapasite_{çekiş\ pili} = 78 \cdot 2 = 156 \text{ Ah (2 paralel)}$$

$$Enerji_{nominal} : 62 \text{ kWh}$$

$$Enerji_{kullanılabilir} : 58 \text{ kWh}$$

Eşlenmiş Motor bloğu, pil gerilimi ve tork kontrolü bilgilerini alarak araç motoru davranışını modeller. Maksimum motor torku ve güç değerinin yanı sıra; motor verimlilik bilgileri, motor tork ve hızını belirler. Pil gerilimi ve pil akımı değerleri, pil gücünü belirler. Pilden çekilen akım bu noktada motorun sürüş çevrimi davranışına göre çektiği akım ile şekillenir.

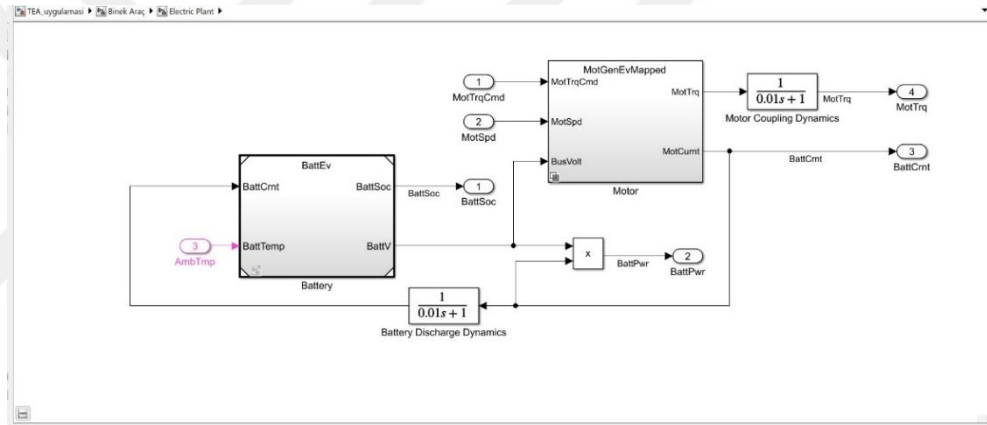
Tablo 4.6. Araç motor parametreleri (Wassiliadis et al., 2022).

Elektriksel Kayıplar	Değerler
Tablolanmış kayıplar için hız vektörü (w), w_eff_bp [rad/s]:	[0 1000 2000 3000 4000 4477.56 5000 6000 7000 8000 9000 10000 11000 12000 13000 14000]
Tablolanmış kayıplar için tork vektörü (T), T_eff_bp [Nm]:	[0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 195 210 225 240 255 275]
Karşılık gelen verimlilik, verimlilik_tablosu [%]:	[70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70;82 82 82 82 82 82 82 82 82 82 82 82 82 82;90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90;92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92 92;94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94;94 94 94;94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94;95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95;95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95;95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95;96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96;96 96 96 96 96 96;96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96;96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96 96;95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95 95;94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94;94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94;94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94 94]

Şekil 4.18’de motor parameteleri VW ID.3 için 107000 watt maksimum güç, 275 Nm maksimum tork değeri olarak tanımlanmıştır. Tork kontrol zaman sabiti 0,02 saniyedir (Marklines, 2022).

Model Data Editor			
Inports/Outports Signals Data Stores States Parameters			
Design			
Source	Name	Value	Data Type
Mapped Motor	torque_max	torque_max	
Mapped Motor	power_max	power_max	
Mapped Motor	Tc	Tc	
Mapped Motor	w_eff_bp	w_eff_bp.*pi/30	
Mapped Motor	T_eff_bp	T_eff_bp	
Mapped Motor	efficiency_table	efficiency_table	
Model Workspace	T_eff_bp	[0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 ...]	double (auto)
Model Workspace	Tc	0.02	double (auto)
Model Workspace	efficiency_table	[70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 ...]	double (auto)
Model Workspace	power_max	107000	double (auto)
Model Workspace	torque_max	275	double (auto)
Model Workspace	w_eff_bp	[0 1000 2000 3000 4000 4477.56 ...]	double (auto)

Şekil 4.18. Motor parametreleri.



Şekil 4.19. TEA Simulink modeli Elektrik Tesisi alt sistemi (The MathWorks Inc., 2022).

Aracın yüksüz ağırlığı 1812 kg'dır. Araç brüt ağırlık 2270 kg'dır. Bu değer yolcu ağırlıkları, motor, çekiş pili ve toplam yük ağırlığına karşılık gelir. 2345 kg maksimum yük ağırlığıdır (EV Database, 2022). Aracın brüt ağırlık değerinin üzerinde yüklenmesi güvenli değildir (FooteWork, 2022).

$$F_{\text{çekiş}}: \mu_t mg \quad (4.13)$$

$F_{\text{çekiş}}$: Yüzeyden tekerleğe etki eden çekiş kuvveti

μ_t : Tekerlek ve yüzey arasındaki çekiş katsayısı

m : Tekerlek üzerindeki kütle

g : Yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$) (Engineering ToolBox, 2011).

Yüksüz araç ağırlığı için çekiş kuvveti;

$$F_{\text{çekiş}} = 0,9.1812.9,81 \text{ m/s}^2 = 15988 \text{ N}$$

$$\text{İki tekerlekten çekiş için } \frac{15988}{2} = 7999 \text{ N}$$

Sürücü ve yolcu ağırlığı (150 kg) eklenerek hesaplanan çekiş kuvveti;

$$F_{\text{çekiş}} = 0,9.(1812+150).9,81 \text{ m/s}^2 = 17322 \text{ N}$$

$$\text{İki tekerlekten çekiş için } \frac{17322}{2} = 8661 \text{ N}$$

Kuru asfalt zeminde brüt araç ağırlığı için çekiş kuvveti;

$$F_{\text{çekiş}} = 0,9.2270.9,81 \text{ m/s}^2 = 20041 \text{ N}$$

$$\text{İki tekerlekten çekiş için } \frac{20041}{2} = 10020 \text{ N}$$

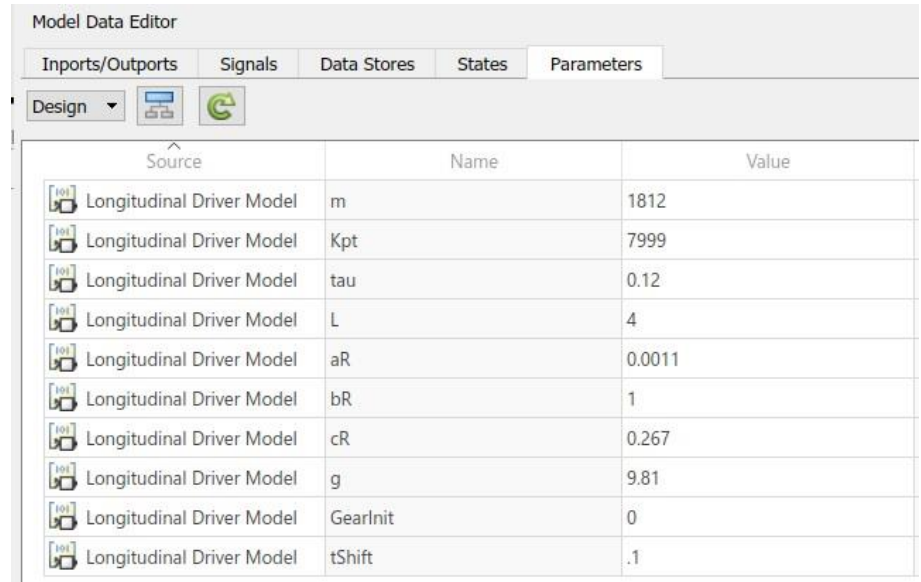
Tablo 4.7. Pnömatik lastikler için yaklaşık yuvarlanma direnci katsayıları (Bosch, 2002: 470).

Yol yüzeyi	Yuvarlanma direnci katsayısı
Beton, asfalt	0,011
Kaldırım	0,013
Haddelenmiş çakıl	0,02
Kum, taş, katranlı yol kaplama	0,025
Asfaltsız yol	0,05
Arazi	0,1-0,35

Tablo 4.8. Çekiş katsayısı (Engineering ToolBox, 2011).

Yüzey	Çekiş Katsayısı	Yüzey	Çekiş Katsayısı
Islak buz	0,1	Kuru haddelenmiş	0,6 - 0,7
Kuru buz/kar	0,2	Islak asfalt	0,6
Gevşek kum	0,3 - 0,4	Islak beton	0,6
Kuru kil	0,5 - 0,6	Kuru asfalt	0,9
Islak haddelenmiş	0,3 - 0,5	Kuru beton	0,9

Araç ön yüzey alanı $2,36 \text{ m}^2$ ve aerodinamik sürüklenme katsayısı 0,267'dir. Asfalt için yuvarlanma direnci katsayısı 0,011'dir (US Media Site, 2019). Araç menzil bilgilerinin doğruluğunu karşılaştırmak için, WLTP sınıfı seçiminde WLTP Class 3 çevrimi tercih edilir. GKO değeri hesaplandığında (Bkz. Tablo 3.5), araç araç gücü 107 kW ve yüksüz kütlesi 1812 kg olduğundan oran $(107.000/1812)$ 59 çıkmaktadır. Oran, aynı tabloda $GKO > 34$ değerine karşılık gelmektedir. WLTP Class 3 ayrıca Avrupa ve Japonya'daki araçlarda kullanılmaktadır (TransportPolicy, 2022). Bu nedenle sürüş menzilin doğruluğunu karşılaştırmak için araç önce yüksüz kütle ile simüle edilmiştir.



The screenshot shows the 'Model Data Editor' window with the 'Parameters' tab selected. The 'Design' dropdown is set to 'Design'. The table below lists the parameters for the 'Longitudinal Driver Model'.

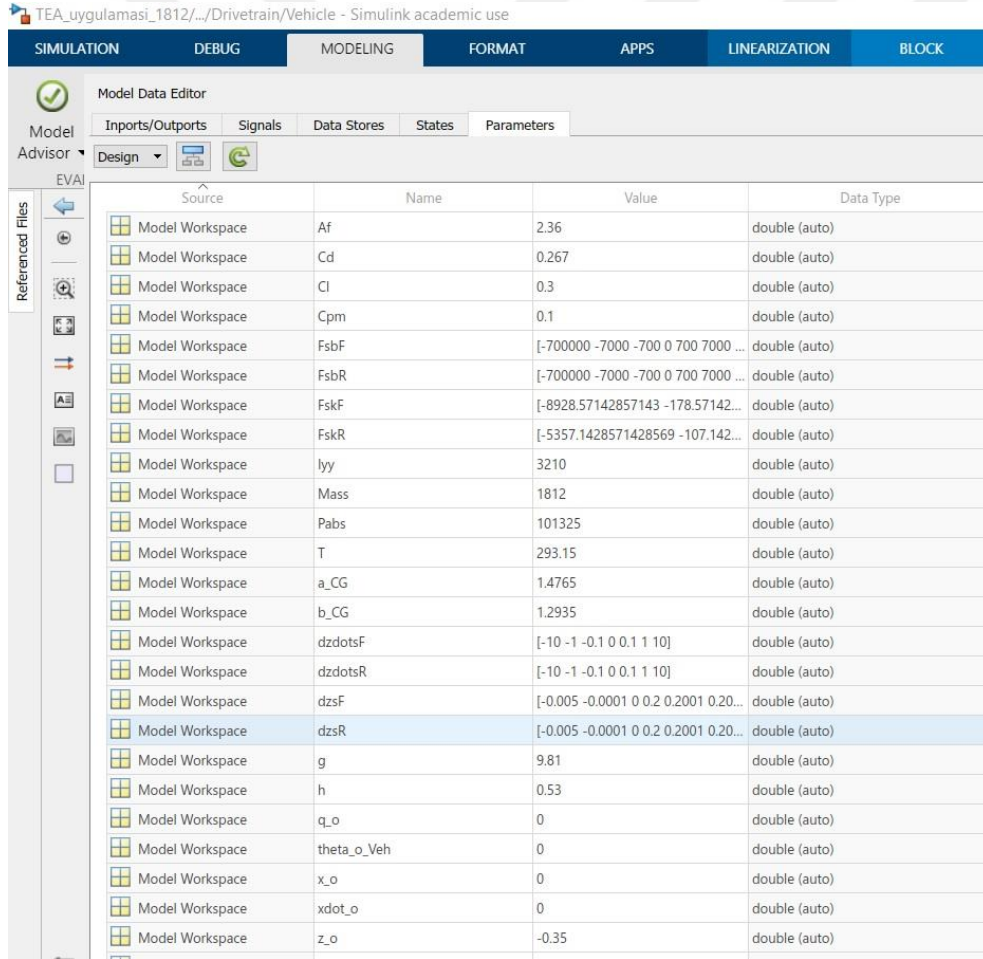
Source	Name	Value
Longitudinal Driver Model	m	1812
Longitudinal Driver Model	Kpt	7999
Longitudinal Driver Model	tau	0.12
Longitudinal Driver Model	L	4
Longitudinal Driver Model	aR	0.0011
Longitudinal Driver Model	bR	1
Longitudinal Driver Model	cR	0.267
Longitudinal Driver Model	g	9.81
Longitudinal Driver Model	GearInit	0
Longitudinal Driver Model	tShift	.1

Şekil 4.20. Boylamsal Sürücü bloğu parametreleri (The MathWorks Inc., 2022).

Yüksüz araç ağırlığı 1812 kg, dingil açıklığı 2,77 m, ön aks maksimum yük 1060 kg, arka aks ağırlığı maksimum yük 1260 kg'dır. Araç tepe noktasının yerden yüksekliği 156 cm, aynı aks üzerindeki tekerlekler arasındaki mesafe 1,548 m'dir (EVSpecifications, 2022). Araç lastik ebatları 215/55R18 T'dir. Bu ebatlardaki lastik yarıçapı 346,8 mm, lastik ağırlığı 9,52 kg'dır (Tiresize, 2023).

- Ön aks ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe: 1,4765 m
- Arka aks ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe: 1,2935 m
- Ağırlık merkezi yüksekliği: 0,53 m

olarak hesaplanmıştır (Diaz G., 2022).



Source	Name	Value	Data Type
Model Workspace	Af	2.36	double (auto)
Model Workspace	Cd	0.267	double (auto)
Model Workspace	Cl	0.3	double (auto)
Model Workspace	Cpm	0.1	double (auto)
Model Workspace	FsbF	[-700000 -7000 -700 0 700 7000 ...]	double (auto)
Model Workspace	FsbR	[-700000 -7000 -700 0 700 7000 ...]	double (auto)
Model Workspace	FskF	[-8928.57142857143 -178.57142...]	double (auto)
Model Workspace	FskR	[-5357.1428571428569 -107.142...]	double (auto)
Model Workspace	Iyy	3210	double (auto)
Model Workspace	Mass	1812	double (auto)
Model Workspace	Pabs	101325	double (auto)
Model Workspace	T	293.15	double (auto)
Model Workspace	a.CG	1.4765	double (auto)
Model Workspace	b.CG	1.2935	double (auto)
Model Workspace	dzdotsF	[-10 -1 -0.1 0 0.1 1 10]	double (auto)
Model Workspace	dzdotsR	[-10 -1 -0.1 0 0.1 1 10]	double (auto)
Model Workspace	dzsF	[-0.005 -0.0001 0 0.2 0.2001 0.20...]	double (auto)
Model Workspace	dzsR	[-0.005 -0.0001 0 0.2 0.2001 0.20...]	double (auto)
Model Workspace	g	9.81	double (auto)
Model Workspace	h	0.53	double (auto)
Model Workspace	q_o	0	double (auto)
Model Workspace	theta_o_Veh	0	double (auto)
Model Workspace	x_o	0	double (auto)
Model Workspace	xdot_o	0	double (auto)
Model Workspace	z_o	-0.35	double (auto)

Şekil 4.21. 3 Serbestlik Derecesine Sahip Boylamsal Araç Gövdesi blok parametreleri (The MathWorks Inc., 2022).

Araç şekline bağlı olarak değişen, dikey basınç farkı kaynaklı olarak ortaya çıkan kaldırma kuvvetinin aerodinamik üzerine etkisi önemlidir. Bu kuvvet;

$$L_A : \frac{1}{2} \rho V^2 C_L A \quad (4.14)$$

ile hesaplanır. L_A kaldırma kuvvetini, C_L kaldırma katsayısını, A ön alanı ifade etmektedir. Blok dikey parametrelerinden kaldırma katsayısı günümüz araçlarında rüzgâr açısının 0 değerinde, 0,3 ile 0,5 arasında değişmektedir. Simülasyon için bu değer 0,3 olarak alınmıştır (Gillespie, 2021: 84).

Atış (Pitching) momenti ağırlığın akslara aktarılmasını sağlamaktadır. Dingil mesafesi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$PM = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{PM} AL \quad (4.15)$$

PM atış momentini, C_{PM} atış momenti katsayısını, L dingil mesafesini ifade etmektedir. C_{PM} günümüz araçlarında 0,05 ile 0,2 arasında değişen değerler almaktadır. Atış momenti 0,1 alınmıştır (Gillespie, 2021: 85).

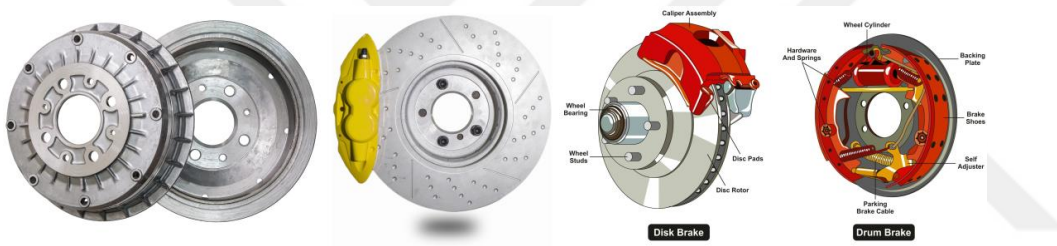
Araç otomatik şanzımanlı, arka tekerlekten tahrikli aktarma organı mimarisine sahiptir. Bağımsız tip süspansiyon kullanılmıştır. Arka bölümde multi-link, ön bölümde is McPherson süspansiyon bulunmaktadır (Auto-Data, 2023).



Şekil 4.22. McPherson dikme süspansiyonu (Shinde et al., 2018).

Dayanıklı ve hafif olması, konforlu sürüş nitelikleri sayesinde birçok araçta McPherson süspansiyon kullanılmaktadır. Ön süspansiyon olarak, direksiyon ve tekerlekler arasında aktarma organı olarak görev yapar (Shinde et al., 2018). Arka süspansiyonlar multi-link (çok bağlantılı) tiptir. Bu süspansiyon, esnek sürüş desteği sağlayan, ana montajı değiştirmeden farklı ve esnek tasarım imkânı sunan yüksek verimliliğe sahiptir. Günümüz araçlarında özellikle arka süspansiyon olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Raiciu, 2009).

Araçta elektromekanik servo kontrollü fren sistemi bulunmaktadır. Ön frenler disk fren, arka frenler kampanalı (drum) fren sistemi kullanmaktadır. Kampanalı frenler yüksek fren faktörüne sahiptir ancak tork performansı düşüktür. Disk frenler, dönen bir diski sabit konumlu fren elemanları arasına sıkıştırılarak fren torku üretir. Fren faktörü düşüktür (Gillespie, 2021: 45).



Şekil 4.23. Kampanalı ve disk fren (Gillespie, 2021: 45).

Tekerlekler ve Frenler bloğu, Boylamsal Tekerlek bloğu sayesinde tekerlek ve fren modellemesine olanak sağlar. Boylamsal Kuvvet (Longitudinal Force) (Boyuna Kuvvet) parametrelerinden “Magic Formula” sabit değeri seçilerek, tekerlek kaymasının fonksiyonu modellenmiştir.

$$F_x = f(\kappa, F_z) = F_z D \sin(C \tan^{-1}[\{B\kappa - E[B\kappa - \tan^{-1}(B\kappa)]\}]) \quad (4.16)$$

(Pacejka, 2012: 179)

Denklem 4.16'daki B, C, D, E katsayıları, ampirik lastik değerlerine dayanan sabit katsayılardır. Bu değerler Tablo 4.9'da verilmiştir. Simülasyon için kuru asfalt yüzey değerleri seçilmiştir.

Tablo 4.9. Yol yüzeyine göre “Magic Formula” katsayıları (The MathWorks Inc., 2022).

Yüzey	B	C	D	E
Kuru asfalt yol	10	1,9	1	0,97
Islak asfalt yol	12	2,3	0,82	1
Kar	5	2	0,3	1
Buz	4	2	0,1	1

Disk fren akütatörü (VAG1869), fren kaliper pistonuna bağlıdır. Fren balataları 1LA PR ile tanımlı, 1633 parça numaralı çift piston kaliperli tiptir. Akütatör çapı (disc_abore) 57 mm, disk çapı 330 mm’dir (Cardiagn, 2023). Balatanın rotor üzerinde uyguladığı kuvvetin ortalama yarıçapı (R_m) 150 mm’dir. Balatalarda sürtünme malzemesi seramiktir (Bosch, 2023). Seramik balata için sürtünme katsayısı 0,35 ile 0,45 arasındadır (Dineshkumar et al., 2017). Arka fren aktüatör çapı (disc_abore) 0,065 m, pabuç pimi ile tambur merkezi arasındaki mesafe (drum_a) 0,076 m, pabuç pimi ile kuvvet uygulama noktası arası mesafe (drum_c) 0,146 m, kampana iç yarıçapı (drum_r) 0,126 m’dir (EUspares, 2023).

Lastik yüklü yarıçap değeri (R_e), aynı ebattaki lastik için 308 mm’dir (Errol's Tyres, 2023). Ön ve arka lastik basıncı (press) 250 kPa/36 psi/2,5 bar’dır (Pure Tyre, 2023). Lastik basınç değeri 250000 pascal olarak girilmiştir.

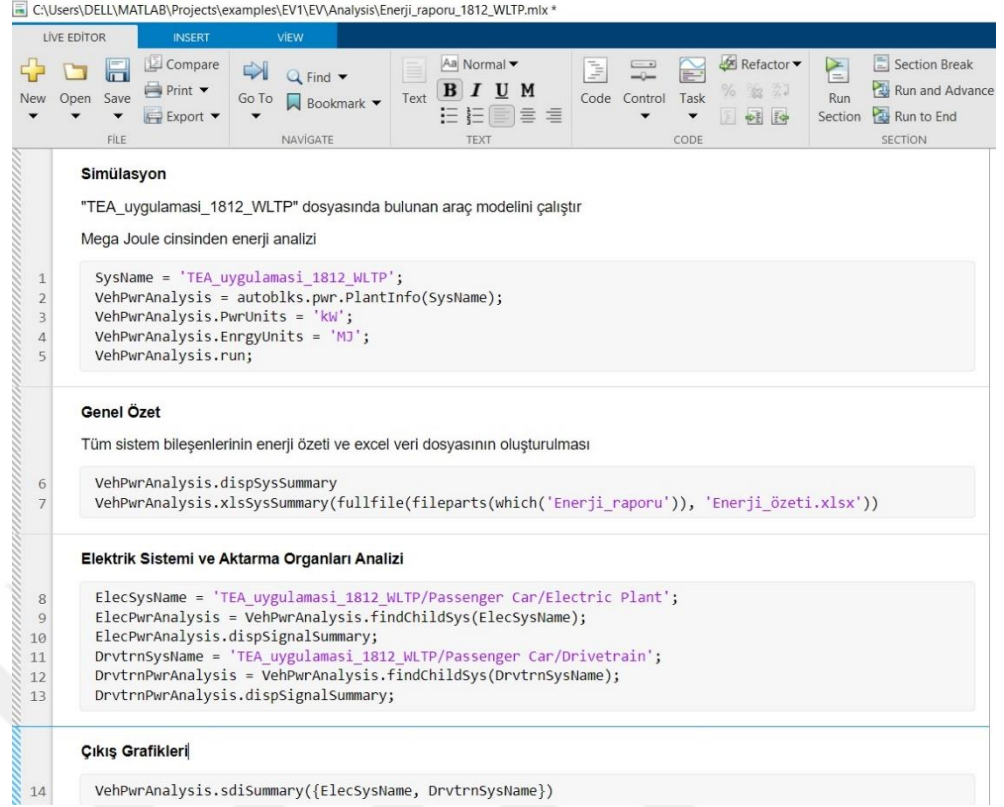
Aktarma Organı yapılandırma parametresi, Arka Tekerden Çekiş (Rear Wheel Drive) olarak ayarlanmıştır. VW ID.3 arka tekerden çekişlidir. Diferansiyel bloğu otomatik olarak arka tekerden çekiş moduna geçer. WLTP sürüş çevrimi 1800 sn olduğundan, simülasyon süresi bu zaman değerine ayarlanmıştır. Binek Araç bloğu modelin çıkış verilerinin üretilerek, görüntüleme bloğuna aktarıldığı yerdir. Şekil 4.24’de Tekerlekler ve Frenler bloğuna ait “Model Veri Editörü” parametrelerinin tanımlanmış hali bulunmaktadır.

Model Data Editor			
Inports/Outports		Signals	Data Stores
		States	Parameters
Design			
Source	Name	Value	Data Type
Model Workspace	Rm	0.15	double (auto)
Model Workspace	disk_abore	0.05	double (auto)
Model Workspace	num_pads	2	double (auto)
Model Workspace	Bx	10	double (auto)
Model Workspace	Cx	1.9	double (auto)
Model Workspace	Dx	1	double (auto)
Model Workspace	Ex	0.97	double (auto)
Model Workspace	FZMAX	6570	double (auto)
Model Workspace	FZMIN	0	double (auto)
Model Workspace	lyy_Whl	0.8	double (auto)
Model Workspace	Lrel	0.15	double (auto)
Model Workspace	Re	0.308	double (auto)
Model Workspace	UNLOADED_RADIUS	0.336	double (auto)
Model Workspace	VXLOW	2	double (auto)
Model Workspace	aMy	0.01	double (auto)
Model Workspace	alphaMy	0	double (auto)
Model Workspace	bMy	0	double (auto)
Model Workspace	betaMy	1	double (auto)
Model Workspace	br	0.001	double (auto)
Model Workspace	cMy	0	double (auto)
Model Workspace	kappamax	1.5	double (auto)
Model Workspace	lam_x	1	double (auto)
Model Workspace	mu_kinetic	0.35	double (auto)
Model Workspace	mu_static	0.45	double (auto)
Model Workspace	omegao	0	double (auto)
Model Workspace	press	250000	double (auto)

Şekil 4.24. Tekerlekler ve Frenler bloğu parametreleri.

4.2.1 Güç ve Enerji Analizi

Canlı komut dosyasında araç modelinin güç ve enerji analiz bilgileri için Şekil 4.25’deki komutlar çalıştırılmıştır. Bu komutlar, 1812 kg ağırlıktaki TEA araca ait “TEA_uygulamasi_1812_WLTP.xlsx” dosyasını çalıştırılarak enerji rapor dosyası oluşturur. Enerji analizi MJ (Mega Joule) cinsinden veriler üretir. Tüm alt sistemlerinin enerji giriş ve çıkış değerleri Tablo 4.10’da verilmektedir. Alt sistemlere ait verimlilik hesaplanmıştır. Tablo 4.10’daki veriler, 20 °C’de, kuru asfalt zeminde WLTP Class 3 sürüş çevriminde elde edilmiştir. Yol eğimi ve rüzgâr hızı 0’dır.



Şekil 4.25. TEA modeli canlı komut dosyası.

Tablo 4.10'da, araç modelinin toplamda 12,6 Mega Joule (MJ) enerji harcadığı görülmektedir.

$$1 \text{ MJ} = 277,7 \text{ Wh}$$

$$12,6 \text{ MJ} = 3,5 \text{ kWh}$$

Sürüş çevrimi boyunca sürüş menzili 23,266 km olduğundan,

$$12,6 \text{ MJ} / 23,2 \text{ km} = 0,543 \text{ MJ km başına enerji tüketir.}$$

$$0,54 \text{ MJ} \cdot 277,7 = 151 \text{ Wh'e karşılık gelmektedir.}$$

WLTP çevriminde, km başına 0,54 MJ (151 Wh) enerji tüketilmektedir. Araç 100 km mesafede 54 MJ (15 kWh) enerji harcamaktadır. Tablo 4.10'daki Binek Yolcu bloğu sistem bileşenleri incelendiğinde, enerji sarfiyatının %91'i (11,5 MJ)

Aktarma Organları tarafından, %9'u (1,1 MJ) ise Elektrik Tesisi tarafından harcanmaktadır. Enerjinin kullanımı; %48 (6 MJ) Tekerlekler ve Frenler, %38 (4,8 MJ) Araç, %7,6 (0,96 MJ) Motor, %2,6 (0,33 MJ) Diferansiyel, %2,53 (0,32MJ) Atalet Momenti ve %1,2 (0,14 MJ) Pil bloğu şeklinde sıralanmaktadır. Kilometre başına sırasıyla 73, 57, 11, 4, 4 ve 2 Wh enerji sarfıyatı görülmektedir.

Tablo 4.10. Binek Araç bloğu için WLTP verimlilik ve enerji analizi (The MathWorks Inc., 2022).

Sistem Adı	Verimlilik	Depolanan Enerji (MJ)	Enerji Girişi (MJ)	Enerji Kaybı (MJ)	Enerji Çıkışı (MJ)
Binek Araç					
Aktarma Organları	0,4	0,32	12,6	-11,5	-0,778
<u>Diferansiyel</u>	0,97	0	12,8	-0,33	-12,5
<i>Açık Diferansiyel</i>	0,97	0	12,8	-0,33	-12,5
<i>Arka Aks</i>	1	0	6,24	0	-6,24
<i>Arka Aks</i>	1	0	6,24	0	-6,24
<u>Tahrik Mili</u>	1	0	12,8	0	-12,8
<u>Dönme Ataleti</u>	0,98	0	13,2	-0,32	-12,9
<u>Araç</u>	0,71	0,32	10,1	-4,8	-4,9
<i>Araç Gövdesi 3 Sertlik Dereceli</i>	0,71	0,32	10,1	-4,8	-4,9
<u>Tekerlekler ve Fren</u>	0,64	0	16,8	-6	-10,7
<i>Boyuna Tekerlek – Ön 1</i>	0,06	0	0,53	-0,53	0
<i>Boyuna Tekerlek – Ön 2</i>	0,06	0	0,53	-0,53	0
<i>Boyuna Tekerlek – Arka 1</i>	0,68	0	7,9	-2,5	-5,4
<i>Boyuna Tekerlek – Arka 2</i>	0,68	0	7,9	-2,5	-5,4
Elektrik Tesisi	0,92	-12,9	0,78	-1,1	-12,6
<u>Pil</u>	0,99	-12,9	0,72	-0,14	-13,5
<u>Motor</u>	0,93	0	14,3	-0,96	-13,3

NEDC çevriminde, 11 km sürüş menziline 130 Wh/km enerji tüketimi gözlenmiştir. 100 km sürüşte 12,9 kWh enerji harcamaktadır. Harcanan enerji dağılımı %54 (2,75 MJ) Tekerlekler ve Frenler, %32 (1,66 MJ) Araç, %8,3 (0,43 MJ) Motor, %2,5 (0,13 MJ) Diferansiyel, %2,44 (0,126) Dönme Ataleti, %0,76 (0,04 MJ) Pil bloğu şeklindedir. Sırasıyla 70, 42, 11, 3, 3 ve 1 Wh/km enerji tüketimi olmaktadır.

FTP-75 çevriminde 139 Wh/km enerji tüketimi gözlenmiştir. Araç bu çevrimde 100 km menzilde 13,9 kWh enerji tüketmektedir. Harcanan enerji dağılımı %63 tekerlekler ve frenler, %22 araç, %9,9 motor, %2,3 diferansiyel, %2 dönme ataleti, %0,83 pil bloğu şeklindedir. Bu oranlara göre blokların enerji tüketimi 87, 31, 14, 3, 3, 1 Wh/km olarak bulunmuştur.

Thomas (2014) çalışmasında, Nissan LEAF'in 6,15 MJ ile şarj edilen pilinde, %16'lık kayıpla 5,16 MJ enerji depolandığını, %4 parazitik kayıplar ve %18 elektrikli sürüş sistem kayıplarının etkisiyle yola aktarılan enerjinin %62 seviyesine düştüğünü belirtmiştir. %32 oranında fren geri kazanım desteği ile birlikte enerji seviyesi %94'e, yani 5,76 MJ'e çıkmıştır. FTP çevriminde elde edilen veriler, frenleme, yuvarlanma direnci ve sürüklenme kuvveti tarafından bu enerjinin paylaşıldığını göstermiştir.

ID.3 verileri ile yapılan simülasyon sonucunda, sürüş çevrimi boyunca FTP çevriminde, Tekerlekler ve Frenler, Araç blokları toplam enerjinin %85'ini kullanmaktadır. Diferansiyel ve Dönme Ataleti bloklarının kullandığı enerji ile birlikte bu değer yaklaşık %90 seviyesine çıkmaktadır. WLTP çevriminde sonuçlar incelendiğinde, bu blokların harcadığı enerji %91 seviyesindedir. Model %4 farkla enerjiyi bu bloklarda harcamaktadır.

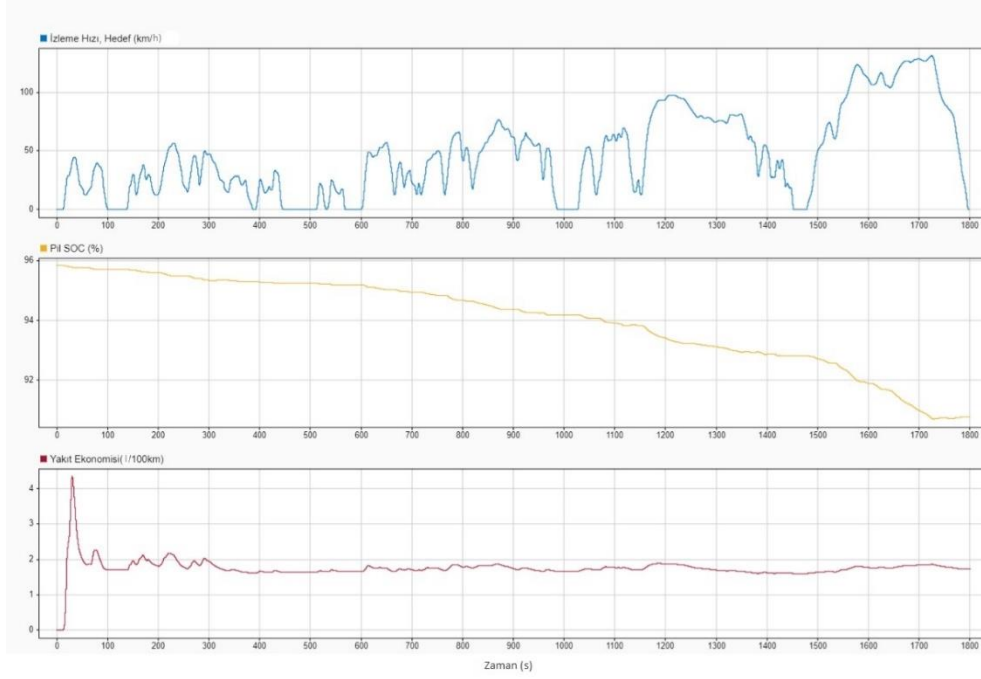
4.2.2 Yüksüz Ağırlıkta Dört Tekerlekli TEA Performans Bilgileri

23,266 km sürüş mesafesi sonunda SOC değeri %90,8 olarak çıkmaktadır. Wassiliadis et al., (2022) çalışmasında, aracın %3 SOC seviyesinde ve hücre enerjisinin %4'lük değerine ulaştığında sürüşün devam etmeyeceğini belirtmiştir. VW ID.3, çevrim boyunca şarjının %5,2'sini harcamaktadır. SOC başlangıç değeri %96 ve şarj %3'e düşene kadar her çevrimde %5,2'lik şarj azalması olduğundan;

$$\text{Çevrim sayısı} = (96 - 3) / 5,2 = 17,9 \text{ dir.}$$

23,266 km'lik toplam 17,9 çevrim sonunda araç toplam sürüş menzili;

$$\text{Sürüş menzili} = 17,9 \cdot 23,266 = 416 \text{ km çıkmaktadır.}$$

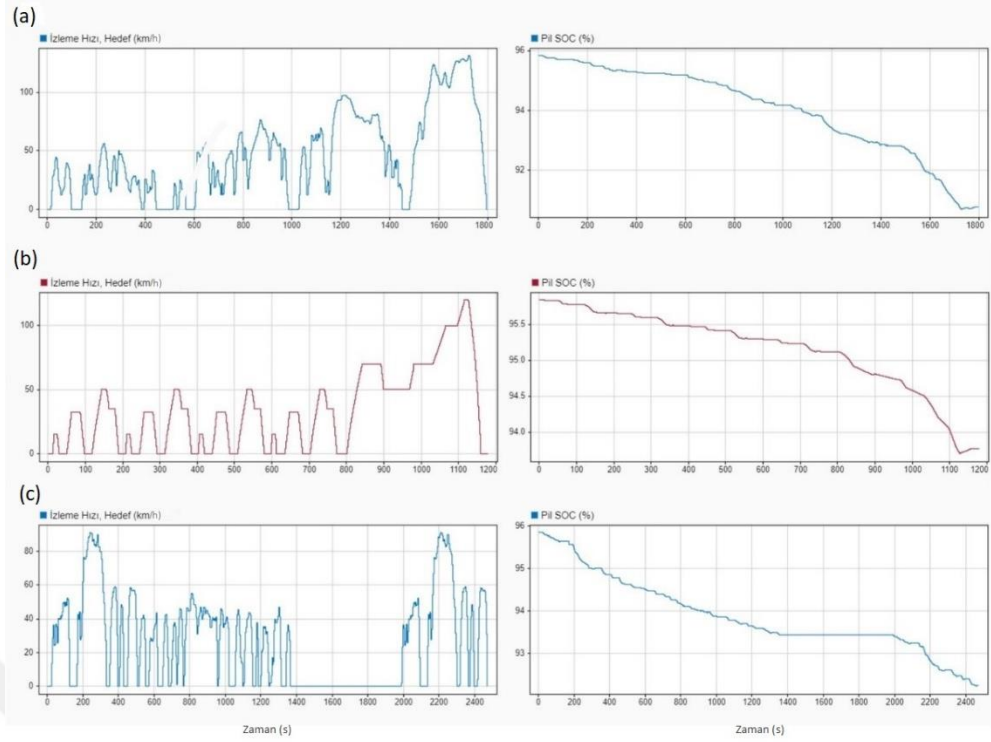


Şekil 4.26. WLTP Class 3 için hız, pil SOC ve yakıt ekonomisi grafikleri.

Tablo 4.11. WLTP Class 3 yüksüz araç simülasyon verileri.

Veriler	Ortalama	Maksimum
Araç Hızı (km)	46,5	131,3
Motor Hızı (RPM)	3176	8970
Motor Torku (Nm)	17,7	137,3
Pil Akımı (A)	16	116,8
Yakıt Ekonomisi(l/100 km)	1,75	4,35

Şekil 4.27’de, üç farklı sürüş çevriminde aracın hızlanma davranışı ve pil SOC bilgileri görülmektedir. WLTP Class 3 çevrimi sonunda %90,7, NEDC çevriminde %93,7 ve FTP-75 çevriminde %92,2 SOC değerleri elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre WLTP sürüş çevriminde menzil 416 km, NEDC sürüş çevriminde 462 km ve FTP-75 sürüş çevriminde 442 km olarak bulunmuştur. Tablo 4.12’de simülasyon sonucunda aracın hız, motor hız ve tork, pil akımına ait elde edilen maksimum ve ortalama değerler görülmektedir.



Şekil 4.27. (a) WLTP Class 3, (b) NEDC, (c) FTP-75 çevrimlerinde hız ve SOC grafikleri.

Tablo 4.12. WLTP, NEDC ve FTP-75 sürüş çevrimlerine ait veriler.

Veriler	WLTP		NEDC		FTP-75	
	Max	Ort.	Max	Ort.	Max	Ort.
Araç Hızı (km)	131,3	46,5	120	33,6	91,2	25,9
Motor Hızı (RPM)	8970	3176	8197	2295	6235	1764
Motor Torku (Nm)	137,3	17,7	83,4	14	118	13,44
Pil Akımı (A)	116,8	16	87,8	9,91	100,4	8,2

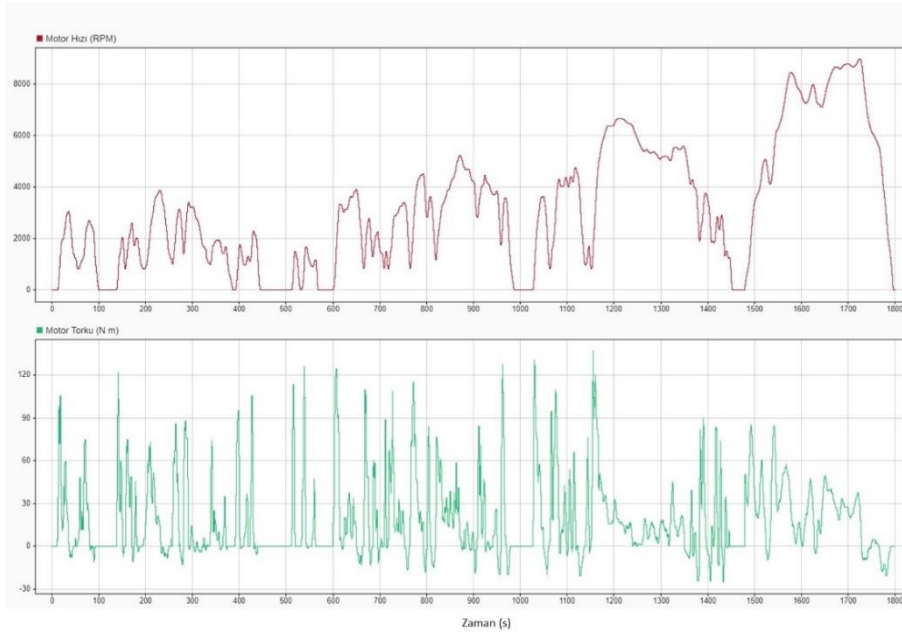
VW ID.3 Pro 107 kW için WLTP Düşük Enerji Testi (DET) menzili 427 km, nominal enerji tüketimi 154 Wh/km ve WLTP Yüksek Enerji TESTİ (YET) menzili 414 km ve nominal enerji tüketimi 157 Wh/km'dir. Düşük ve yüksek enerji testleri neticesinde enerji tüketimi yakıt eşdeğeri olarak sırasıyla, 1,7 l/100 km ve 1,8 l/100 km olarak verilmektedir (EV Database, 2022). Düşük ve yüksek enerji testi, aynı aracın farklı donanımlarından dolayı daha yüksek veya düşük enerji talebini ifade eder. Araçtaki jant, gövde döşemesi, eklentiler gibi farklılar aracın enerji gereksinimi değiştirir (EVDB, 2023). De Cock'a (2022) göre ID.3 enerji tüketimi km'de 155 Wh'dir.

Simülasyon sonucuna göre enerji tüketimi, 151 Wh/km ve yakıt eşdeğeri olarak 1,75 L/100 km olarak bulunmuştur. TEA modeli sürüş çevrimi boyunca 12,6 MJ enerji harcamaktadır. Bu değer 23 km sürüş için 3.500 Wh enerji tüketimine karşılık gelmektedir. Tüketim değerleri de WLTP DET ve YET değerlerine yakın değerlerdir. Bu sonuçlar TEA Simulink modeli verilerinin araç verileriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Yüksüz ağırlıktaki simülasyon sonuçlarına göre farklı çevrimlerde farklı menzil değerleri elde edilmiştir. Farklı sürüş davranışları, sürüş menzilin farklılık göstermesine neden olmaktadır. WLTP, diğer sürüş çevrimlerine göre daha yenilikçi olması ve gerçekçi sonuçlar sağlaması nedeniyle Avrupa Komisyonu tarafından tercih edilmiştir (Tutuianu et al., 2015). Model simülasyonu için WLTP çevrimi odak noktası olarak kabul edilmiştir.

4.2.3 Dört Tekerlekli TEA Motor Parametreleri

Şekil 4.28’de aracın motor hız ve tork grafikleri görülmektedir. Motor devir hızı maksimum 8970 RPM’e çıkmaktadır. Araç hızının en yüksek değeri olan 131 km/h hızda bu motor devrine ulaşılmaktadır.

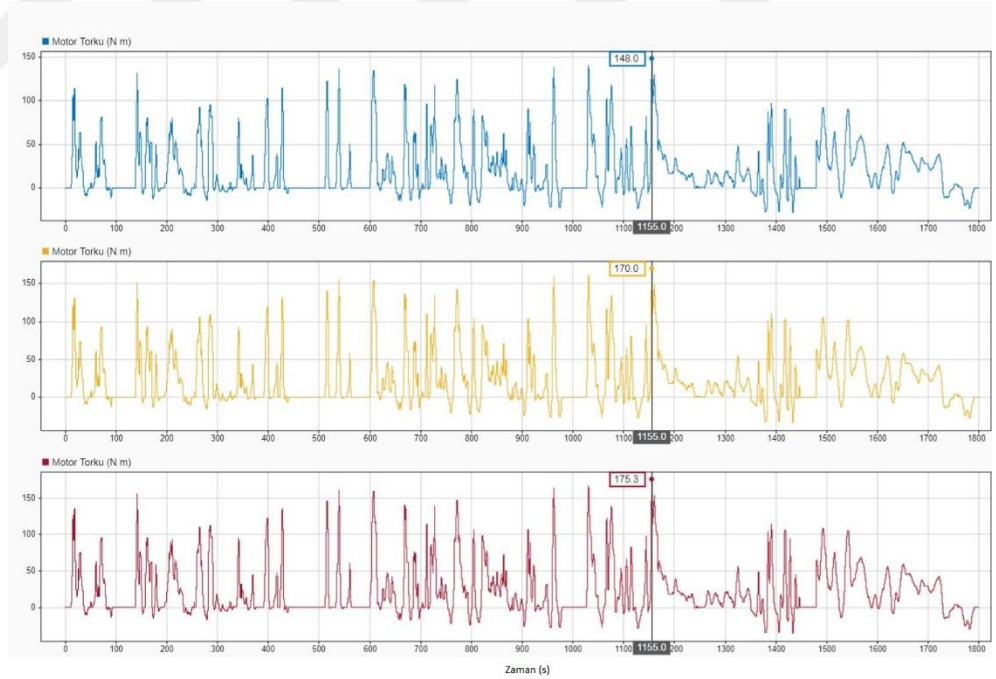


Şekil 4.28. WLTP çevriminde motor hızı ve motor torku grafikleri (■ Hız (RPM) , ■ Tork (Nm)).

1962 kg ağırlıkta maksimum tork 148 Nm'dir. Motor hızı 8967 RPM ve ortalama olarak 3175 RPM'dir. Yük ağırlığı arttıkça maksimum motor torku artış göstermektedir. Çekiş motoru 2270 kg ağırlıkta ortalama 21,13 Nm tork üreterek 170 Nm maksimum tork seviyesine ulaşmaktadır. WLTP çevriminde araç brüt ağırlıkta dakikada 8962 devire ulaşmaktadır. Seçilen araç ağırlıklarında motor devrinin 9000 RPM'yi aşmadığı gözlenmiştir. 275 Nm tork üretebilen ID.3 Pro 145 beygir gücündedir (EV Database, 2022).

310 Nm ID.3 Pro Performance modeli ile yapılan çalışmada aracın 16.000 devire ulaşmadığı ve 160 km/h maksimum hızda, 14.000 RPM hıza çıkabildiği belirtilmiştir. Ayrıca en verimli sürüş için 140 Nm ve 9000 RPM motor hızı ile %96 verimlilik oranı elde edilmiştir. Bu verimlilik oranı motor ve eviricinin verimlilik değerini ifade etmektedir (Wassiliadis et al., 2022).

Şekil 4.29'da, üç farklı araç toplam ağırlığında, motor torku grafikleri görülmektedir. Araç yalnızca yolcu ağırlığında 147 Nm motor torku üretmektedir.

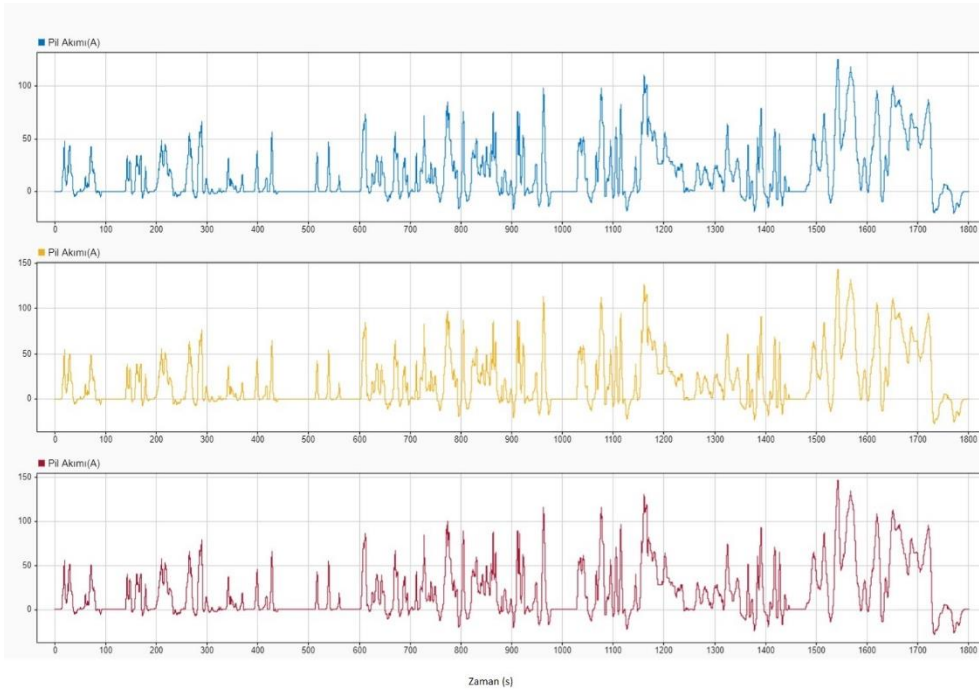


Şekil 4.29. Değişen araç ağırlıklarında motor torku (■ Hız 1962 kg , ■ 2270 kg , ■ 2345 kg).

Farklı araç ağırlıklarında yapılan simülasyon sonuçlarına göre, motor verimi %93 civarında çıkmaktadır. Simülasyonda evirici kaynaklı kayıplar ihmal edilmektedir. Wassiliadis et al., (2022) çalışmasında Sic tabanlı evirici kullanan ID.3 modelinde %96 oranında motor – evirici verimliliğinden bahsetmektedir. Poorfakhraei et al., (2021) çalışmasında, IGBT tabanlı evirici için %91 ve SiC tabanlı evirici için %97 ortalama verimden bahsetmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda IGBT tabanlı evirici kullanan ID.3 modellerinde motor ve evirici verimi %92 ve SiC tabanlı evirici kullanan modellerde %95 çıkmaktadır.

4.2.4 Ağırlığın Enerji Tüketimine Etkisi

1962 kg toplam ağırlıkta, WLTP sürüş çevrimi boyunca araç 13,2 MJ enerji harcamaktadır. Brüt ağırlık 2270 kg’da ise 14,5 MJ ve maksimum ağırlıkta 14,8 MJ enerji tüketimi görülmektedir. Araç ağırlığının artışı araç sürüş menziline azalmasına neden olmaktadır. Yalnızca yolcu ağırlığında aktarma organları 144 Wh/km, motor ve pil sistemi 14 Wh/km enerji harcamaktadır. Brüt ağırlıkta ise aktarma organları 157 Wh/km, motor ve pil sistemi 16 Wh/km enerji tüketmektedir. Maksimum araç ağırlığında bu değerler sırasıyla 160 Wh/km ve 16,7 Wh/km’ye çıkmaktadır.



Şekil 4.30. Değişen araç ağırlıklarında pil akımı grafikleri (■ Hız 1962 kg , ■ 2270 kg , ■ 2345 kg).

Şekil 4.30’da, ağırlığın pil akımına etkisi görülmektedir. 1962 kg ağırlıkta çekiş pilinden çekilen akım ortalama 16,42 A ve maksimum akım 125,2 A’dır. Brüt ağırlıkta, ortalama akım 18,14 A, çekilen maksimum akım ise 142,5 A’e yükselmiştir. Maksimum ağırlıkta ise 18,58 A ortalama akım değeri görülmektedir. Harcanan güç sırasıyla bir saatlik sürüş boyunca 7284 Wh, 8037 Wh ve 8228 Wh olmaktadır. Sürüş menzili 1962 kg’de 401 km, brüt ağırlıkta 361 km ve maksimum ağırlıkta 355 km’dir.

EVSSpecifications (2022) verilerine göre enerji verimliliği WLTP sürüş çevriminde 1805 kg boş ağırlıkta, 15,6 kWh/100 km’dir. Aracın 100 km’de harcadığı enerji açısından değerlendirildiğinde, 15,1 kWh/100 km’lik model enerji verimliliği ile gerçek araç verileri arasında 0,5 kWh bir fark çıkmaktadır. Bu değerler, model ve gerçek araç verilerinin yaklaşık değerler olduğunu göstermektedir.

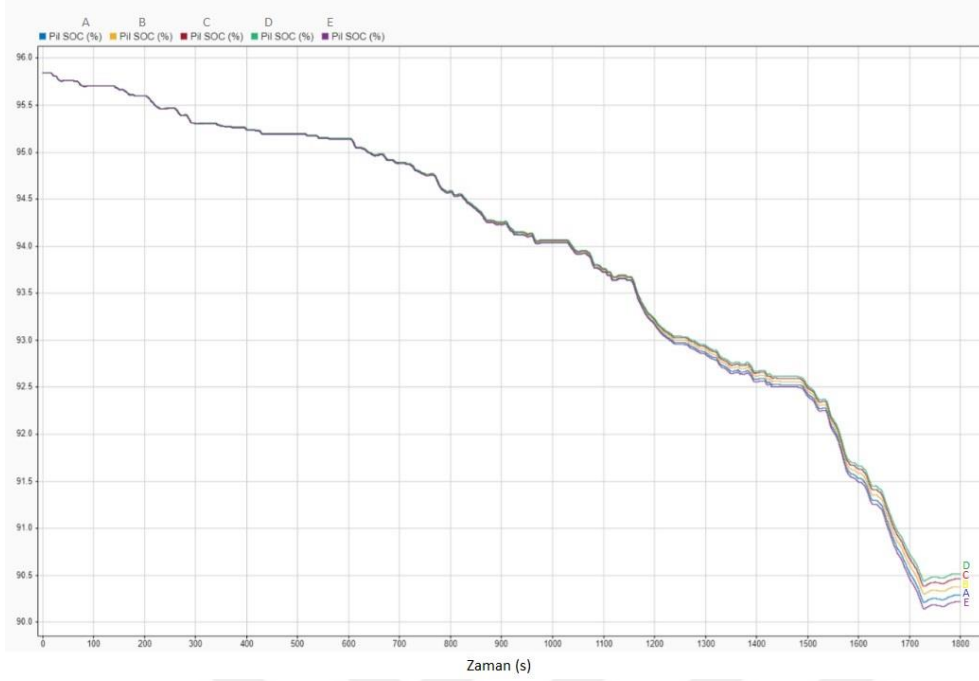
Farklı araç ağırlıklarında modele ait enerji verimliliği bilgileri paylaşılmıştır. Model enerji verimliliğinin boş ağırlık ve max ağırlık değerleri arasında 18,4 – 15,7 kWh/100 km’den, 2,7 kWh/100 km fark olduğu görülmektedir.

Tablo 4.13. WLTP çevriminde farklı yük ağırlıklarında enerji verimliliği.

Ağırlık (kg)	Harcanan Enerji (MJ)	Enerji verimliliği (kWh/100 km)
1812	12,6	15,1
1962	13,2	15,7
2270	14,5	17,3
2345	14,8	17,6

4.2.5 Sıcaklığın Enerji Tüketimine Etkisi

Ortam sıcaklığının araç menziline etkisi önemlidir. Sürüklenme kuvvetine etki eden değişkenlerden birisi de (Bkz. Denklem 3.13) çevresel sıcaklık değeridir. TEA modeli 1962 kg ağırlıkta, WLTP çevriminde farklı çevre sıcaklıklarında simüle edilmiştir.

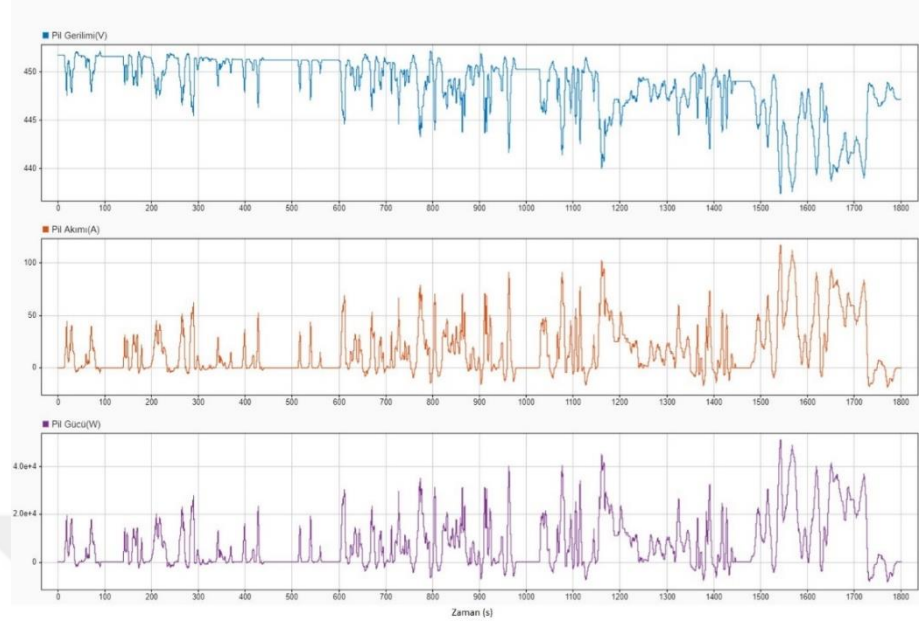


Şekil 4.31. Farklı sıcaklıklarda pil SOC grafiği (■ -10 °C , ■ 0 °C , ■ 10 °C, ■ 20 °C , ■ 30 °C).

Değişen hava sıcaklıklarında araç performansı incelenmiştir. Şekil 4.31’de görüldüğü üzere, -10 ile 30 °C arasındaki farklı sıcaklık değerlerinde pil SOC seviyesi 90,22 ile 90,52 arasında değişmektedir. %0,30’luk bu fark sürüş menzili üzerinde yaklaşık 20 km’lik bir fark yarattığı görülmektedir. -10 °C sıcaklıkta 13,8 MJ enerji tüketimi varken, 20 °C sıcaklıkta tüketim 13,2 MJ’dür.

Gerçek sürüş ölçümlerinde 23 °C ve -10 °C arasında ortalama 110 km’lik bir fark olduğu belirtilmiştir (EV Database, 2022). Çevresel sıcaklık kaynaklı 0,6 MJ’lük tüketim farkının km başına 7,1 Wh’lik etkisi bulunmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre bu fark yaklaşık 17 km çıkmaktadır. Simülasyonda; pilin -10 °C’deki davranışı, aracın ısıtılması için harcanan enerji ve bu sıcaklıktaki fren enerji geri kazanım yeteneği sonuçlara yansıtılamamaktadır. Steinstraeter et al., (2021) çalışmasında; BMW i3 ve Tesla Model 3 üzerinde yapılan araştırmada, araç ısıtma ve geri kazanım kayıpları nedeniyle menzil farkı aralığının yaklaşık %50 civarında değiştiğini belirtmiştir. Ayrıca, çok düşük sıcaklıklarda Li-iyon pillerin enerji ve güç kapasitesinde önemli kayıplar meydana geldiği görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda TEA’ların ciddi sürüş menzili kaybı önemli bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

4.2.6 Çekiş Pili Akım ve Gerilim Değerleri



Şekil 4.32. Çekiş pili gerilim, akım ve güç grafikleri (■ Gerilim, ■ Akım, ■ Güç).

ID.3, Infineon FS820R08A6P2B sürücü modülünü kullanmaktadır. Modül, EDT2 IGBT teknolojisine sahip AIKQ120N75CP2 güç anahtarına sahiptir. AIKQ120N75CP2 IGBT, 750 V kollektör – emiter (C-E) gerilimi ve 120 A kollektör akımına sahip 470 volt sistemlere uygun bir anahtarlama elemanıdır (Infineon, 2023). Simülasyon sonuçlarına göre, maksimum pil çıkış geriliminin araçta kullanılan evirici devresine uygun olduğu görülmektedir. Evirici devresi, pilden çekilen akım ve gerilim değerlerini dönüştürebilecek giriş gücü seviyesindedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

İki ve dört tekerlekli TEA'lar, sistem mimarisi açısından oldukça benzerdir. İkisi de çekiş pilinden aldığı enerji ile elektrik motorunu çalıştırarak araç hareketini sağlar. Ancak araç ağırlıkları, pil güç yoğunlukları, motor güçleri, taşıyabilecekleri yük ağırlığı ve donanım bileşenleri farklılıklar göstermektedir. Saxena et al., (2014) çalışmasında iki, üç ve dört tekerlekli araçları modelleyerek, araçların enerji tüketimlerini hesaplamış ve simülasyon sonuçlarının farklı olduğunu gözlemlemiştir. Sürüş çevrimleri ve parametrik farklılıklar, km başına enerji tüketiminin farklı olmasında önemli etkenlerdir.

İki tekerlekli TEA için “Python” ortamında BMW C Evolution verileri ile hesaplamalar yapılmış ve araca ait çekiş kuvveti, çekiş torku, çekiş gücü ve motor torku verileri görselleştirilmiştir. Simülasyonda, WMTC sürüş çevrimi kullanılmıştır. BMW (2016) verilerine göre araç, WMTC sürüş çevriminde yaklaşık olarak 160 km menzile ulaşabilmektedir. Tez çalışmasında, yapılan hesaplamalarda, sürücü ve yük ağırlığı ihmal edildiğinde menzil 164 km çıkmış ve yaklaşık %2,5'luk bir fark görülmüştür.

Hesaplamalar sonucunda; 70 kg yolcu ağırlığında, sürüş çevrimi boyunca 2,054 kWh enerji tüketimi gözlemlenmiştir. Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde 7,43 kWh/100 km tüketim sonucu elde edilen bulgular arasındadır. Araç 70 kg yolcu ağırlığında 150,5 km sürüş menziline ulaşabilmektedir.

Simülasyon sonuçlarına göre artan yolcu ağırlıklarında, enerji tüketimi ve maksimum motor torku artmakta ve menzil azalmaktadır. Ayrıca sürüş yüzeyinin menzile önemli etkisi olduğu gözlenmiştir. Farklı yuvarlanma direnci katsayısına sahip yüzeylerde menzil değerleri değişmektedir. Yuvarlanma direnci kuvveti arttıkça, menzil azalmakta, enerji tüketimi, motor torku ve gücü artmaktadır.

Ayrıca, araç hareketine zıt yönde etki eden rüzgârın etkisi araştırılmış ve aerodinamik sürüklenme kuvvetine bağlı olarak menzil, tüketim, güç ve tork bilgileri hesaplanmıştır. Rüzgârın hızının 5, 10, 15 ve 20 km/h değerlerinde, sürüş menzilin 150,4 km'den 116,2 km'ye kadar azaldığı, km başına 2,05 Wh'ten 2,66 Wh'e enerji tüketiminin arttığı görülmektedir.

Dört tekerlekli TEA için VW ID.3 verileriyle, MATLAB/Simulink Elektrikli Araç Referans Uygulama üzerinde yapılan çalışmada; menzil, enerji tüketimi, motor ve çekiş pili değerleri araştırılmıştır. WLTP, NEDC, FTP-75 sürüş çevrimlerinde araca ait performans verileri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. TEA için daha gerçekçi veriler ürettiğinden, simülasyonda ağırlıklı olarak WLTP çevrimi tercih edilmiştir.

Dört tekerlekli TEA simülasyon sonuçlarına göre 1812 kg araç ağırlığında, sürüş menzili; WLTP sürüş çevriminde 416 km, NEDC çevriminde 462 km ve FTP-75 çevriminde 442 km olarak çıkmaktadır. EV Database (2022) verilerine göre, WLTP DET nominal enerji tüketimi 154 Wh/km ve WLTP YET nominal enerji tüketimi 157 Wh/km, De Cock'a (2022) göre ID.3 enerji tüketimi km'de 155 Wh'dir. Simülasyon sonuçlarına göre bu model için km başına tüketim 151 Wh/km'dir. Simülasyon sonuçlarına göre, km başına enerji tüketimi değerleri bahsi geçen çalışmalardakileriyle yakın değerler vermektedir.

Teoh et al., (2019) Nissan Leaf modeli üzerinde yaptığı çalışmada, WLTP sürüş profiline kıyasla FTP-75 çevriminde %3,6 ve NEDC çevriminde %5,9 daha az enerji tüketildiğini belirtmiştir. Ayrıca WLTP'de daha fazla enerji tüketilmesi ve sürüş menzilin daha düşük olmasının nedeni, diğer iki sürüş çevrimine göre daha yüksek hızda ve daha düşük durma oranlarında gerçekleşmiş olmasıdır. Simülasyon sonuçlarına göre, tüketim NEDC çevriminde 130 Wh/km, FTP-75 çevriminde 139 Wh/km ve WLTP çevriminde bu değer 151 Wh/km'dir. Sonuçlar Teoh et al., (2019) çalışmasındaki sonuçlarla uyumlu şekilde, en düşüktен en yükseğe enerji gereksiniminin sırasıyla NEDC, FTP ve WLTP olduğunu göstermektedir.

Çalışmada sonuçlarına göre Binek Yolcu bloğu sistem bileşenleri incelendiğinde, enerjinin %91'i Aktarma Organları tarafından, %9'u ise Elektrik Tesisi tarafından harcanmaktadır. Tüketim dağılımı, Tekerlekler ve Frenler bloğu %48, Araç bloğu %38, diğer güç aktarma blokları %10 ve Elektrik Tesisi alt sistemleri olan Motor bloğu %7,6 ve Pil bloğu %1,2 olarak bulunmuştur. Thomas (2014) çalışmasında, Nissan LEAF ile yaptığı çalışmada frenleme, yuvarlanma direnci ve sürüklenme kuvveti tarafından harcanan enerjinin %94 seviyesinde olduğunu, elektrikli sürüş sistemi enerji tüketiminin %10 - %20 arasında değiştiğini belirtmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında tüketim oranlarının yaklaşık değerler olduğu görülmektedir.

Simülasyon sonuçlarına göre motor verimi %93 seviyesindedir. Wassiliadis et al., (2022) çalışmasında Sic tabanlı evirici kullanan ID.3 modelinde %96 motor – evirici verimliliğinden bahsetmektedir. Poorfakhraei et al., (2021) çalışmasında ortalama verimin, IGBT tabanlı evirici için %91, SiC tabanlı evirici için %97 olduğunu söylemektedir. Model üzerinden evirici verimliliği hesaplanamamaktadır. %93'lük motor verimi, evirici verimliliği ile birlikte değerlendirildiğinde simülasyon sonuçları %92 ile %95 arasında verimlilik oranlarına karşılık gelmektedir.

Değişken yolcu ve yük ağırlıklarında simülasyon sonuçları incelendiğinde, 1962 kg'da 15,7 kWh/100 km, 2270 kg brüt ağırlıkta 17,3 kWh/100 km ve 2345 maksimum ağırlıkta 17,6 kWh/100 km enerji verimlilik değerleri elde edilmektedir. Yük ve yolcu ağırlığının artması araç menzili azaltır ve enerji verimliliğinin düşmesine neden olur.

Sürüş ortam sıcaklığının menzile etkisi incelendiğinde; Simulink modelinin araç kabin ısıtma/soğutma tüketimlerini, sonuçlara yansıtamamasından dolayı -10 ile 30 °C arasındaki farklı sıcaklık değerlerinde pil SOC seviyesinin sadece %0,30'luk değişim gösterdiği ve bunun sonucunda sürüş menzil aralığının 20 km kadar değiştiği görülmektedir. Bu sıcaklık farkı, gerçek sürüşte daha büyük bir menzil farkına neden olmaktadır. Steinstraeter et al., (2021) çalışmasında; BMW i3 ve Tesla Model 3 üzerinde yaptığı araştırmada, menzil farkı aralığının yaklaşık

%50 civarında değiştiğini ve çok düşük sıcaklıklarda Li-iyon pillerin enerji ve güç kapasitesinde ciddi düşüşler olduğunu söylemiştir.

Sonuç olarak, iki tekerlekli ve dört tekerlekli TEA'ların; sürüş çevrimine, araç ağırlığına, sürüş yüzeyine, ortam sıcaklığına, araca etki eden aerodinamik etkiye bağlı olarak performans değerleri değişkenlik gösterir. Saxena et al., (2014) çalışmasında, iklimlendirme, yolcu ve yük, yardımcı bileşenler, motor verimliliği gibi değişkenlerin güç aktarma sistemi, araç performansı ve tüketime etkisine dikkat çekmektedir.

5.2 Öneriler

Tez çalışmasında; tamamen elektrikli bir aracın bileşenleri, mimarisi ve performans ölçütleri detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle ülkemizde yaygınlaşmaya yeni başlayan bu teknolojinin anlaşılması ve TEA davranışının detaylı analizine imkân sağlaması nedeniyle bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara yardımcı bir kaynak olabilir. Tezde iki tekerlekli TEA araç performans verilerini hesaplamak için kullanılan “Python” yazılımı, geliştirilerek daha detaylı bir araştırma için çıkış noktası olabilir. İki tekerlekli elektrikli araçlar hakkında az sayıda kaynak ve modelleme çalışması bulunmaktadır.

Daha gelişmiş “Python” modellemesi için motor ve sürücü simülasyonlarına destek olan Python araç kutusu “Gym-Electric-Motor” incelenebilir. Balakrishna et al., (2020) göre bu araç kutusu; güç aktarma mimarisi bileşenlerinin, motor kontrolörlerinin testi ve simülasyonunda kullanılabilecek, doğru akım ve alternatif akım elektrik motor tiplerini içeren geniş bir kütüphaneye sahiptir. Ayrıca gerilim kaynakları, güç elektroniği dönüştürücüleri, yük modelleri gibi bileşenleri içermektedir.

İki tekerlekli TEA hakkında daha kapsamlı analiz için MATLAB/Simulink'te bulunan Boylamsal Motosiklet Fren Testi Referans Uygulaması (Longitudinal Motorcycle Braking Test Reference Application) kullanılabilir. Bu uygulama benzinli motor kullanan iki tekerlekli bir aracın frenleme ve sürüş davranışlarını inceleme fırsatı sunmasının yanında, tamamen elektrikli bir versiyona uyarlanabilir.

Uygulama iki tekerlekli elektrikli bir araç için çok kapsamlı sürüş ve performans analizine imkân sağlayacaktır.

Dört tekerlekli araç analizleri için MATLAB'ın yeni sürümlerinde güncellemeler eklenen, farklı araç topolojilerine ait referans uygulamalar kullanılabilir. Simscape ile güçlendirilmiş TEA, HEA ve YHEA referans uygulamaları, araç davranışlarının anlaşılmasını kolaylaştıracak ve bu araçlar hakkında araştırma yapmak isteyenlere yardımcı olacaktır.

TEA performansına önemli etkisi bulunan; EA şarj modları, pil yönetim sistemi davranışları, rejeneratif frenleme yazılım ve teknolojileri araştırma konuları olabilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aliasand, A. E. and Josh, F. T.**, 2020, Selection of motor foran electric vehicle: A review. Materials Today: Proceedings, 24, 1804-1815, 1807p.
- Altera**, “MAX II Device Handbook”,
https://eu.mouser.com/datasheet/2/612/max2_mii5v1-1299433.pdf. (Erişim tarihi: 6 Ocak 2023)
- Alternative Fuels Data Center**, “How do all-electric cars work?”,
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work> (Erişim tarihi: 20 Ekim 2022)
- Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R. and Esfahanian, V.**, 2017, A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 414-430p.
- Angeletti, M., Sclafani, L., Bella, G. and Ubertini, S.**, 2003, The role of CFD on the aerodynamic investigation of motorcycles, SAE transactions, 1103-1111p.
- Aurbach, D., McCloskey, B. D., Nazar, L. F. and Bruce, P. G.**, 2016, Advances in understanding mechanisms underpinning lithium–air batteries, Nature Energy, 1(9), 1-11p.
- Auto-data**, “2020 Volkswagen ID.3 62 kWh (145 Hp)”, <https://www.auto-data.net/en/volkswagen-id.3-62-kwh-145hp-41700> (Erişim tarihi: 24 Ocak 2023)
- Aydin, M., ve Gulec, M.**, 2016, A new coreless axial flux interior permanent magnet synchronous motor with sinusoidal rotor segments, IEEE Transactions on magnetics, 52(7), 1-4p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bairwa, B., Supraja, B., Pratiksha, C. and Sumanth, A.,** 2023, Modeling and Simulation of Electric Vehicle Powertrain for Dynamic Performance Evaluation. In 2023 International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE) (pp. 1-7). IEEE.
- Balakrishna, P., Book, G., Kirchgässner, W., Schenke, M., Traue, A., and Wallscheid, O.,** 2021, Gym-electric-motor (GEM): A python toolbox for the simulation of electric drive systems, Journal of Open Source Software, 6(58), 2498.
- Balali, Y. and Stegen, S.,** 2021, Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110185.
- Barghamadi, M., Kapoor, A. and Wen, C.,** 2013, A review on Li-S batteries as a high efficiency rechargeable lithium battery. Journal of the Electrochemical Society, 160(8), A1256.
- Başlamışlı, S. Ç., Koçak, M., İnce, B., ve Testik, M. C.,** 2016, “TÜRKİYE SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNİN OLUŞTURULMASI: KONYA ŞEHİRİ ÇALIŞMASI”, Otekon’16, Bursa
- Bellur, D. M. and Kazimierczuk, M. K.,** 2007, DC-DC converters for electric vehicle applications, In 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo (pp. 286-293), IEEE.
- Bhaskar, M. S., Ramachandaramurthy, V. K., Padmanaban, S., Blaabjerg, F., Ionel, D. M., Mitolo, M. and Almakhlles, D.,** 2020, Survey of DC-DC non-isolated topologies for unidirectional power flow in fuel cell vehicles, IEEE Access, 8, 178130-178166

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bianchi, N., Fornasiero, E., Carraro, E., Bolognani, S. and Castiello, M.,** 2014, Electric vehicle traction based on a PM assisted synchronous reluctance motor, In 2014 IEEE international electric vehicle conference (IEVC) (pp. 1-6), IEEE.
- Bieker, G.,** 2023, A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric, ICCT - International Council on Clean Transportation Europe
- Bilgin, B., Jiang, J. W. and Emadi, A.,** 2018, Switched reluctance motor drives: fundamentals to applications. Boca Raton, FL., 25-26p.
- Bmw Motorrad,** “THE BMW C EVOLUTION.”, https://www.bmw-motorrad.com.my/en/models/urban_mobility/cevolution.html (Erişim tarihi: 25 Kasım 2022)
- BMW,** 2016, “The new BMW C evolution. Table of contents”, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0263449EN/366530> (Erişim tarihi: 23 Aralık 2022)
- Boddula R., Khan, A., and Asiri, A. M., Kolosov A. E.,** 2022, Handbook of Supercapacitor Materials, R. Boddula (Ed.), Wiley-VCH, 43p
- Boddula, R., Pothu, R. and Asiri, A. M. (Eds.),** 2020, Rechargeable Batteries: History, Progress, and Applications, John Wiley & Sons, 20-22p.
- Bosch,** “High-Voltage DC/DC Converter generation 3evo”, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/power-electronics/high-voltage-dc-dc-converter-generation-3evo/> (Erişim tarihi: 1 Mart 2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bosch**, 2023, “QuietCast™ Premium Disc Brake Pads (BC1633)”, <https://www.boschautoparts.com/p/quietcast%E2%84%A2-premium-disc-brake-pads-bc1633-> (Erişim tarihi: 27 Mart 2023)
- Bosch, R.**, 2002, Electronic Automotive Handbook, Robert Bosch GmbH, 1, 470p.
- Burke, A., Liu, Z. and Zhao, H.**, 2014, Present and future applications of supercapacitors in electric and hybrid vehicles, In 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC) (pp. 1-8), IEEE.
- Bursa İlinde Yapılacak Olan Elektrikli Otomobil Üretim Tesisi Yatırımına Proje Bazlı Devlet Yardımı Verilmesine İlişkin Kararın Yürürlüğe Konulması Hakkında 26 Aralık 2019 tarih ve 1945 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararı**, Resmi Gazete 30991 (27 Aralık 2019), md. 2/1.
- Burton, N.**, 2013, History of electric cars, The Crowood Press Ltd., Marlborough, 21p.
- Cai, H., Guan, B. and Xu, L.**, 2014, Low-cost ferrite PM-assisted synchronous reluctance machine for electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(10), 5741-5748.
- Cai, W., Yao, Y. X., Zhu, G. L., Yan, C., Jiang, L. L., He, C., ... and Zhang, Q.**, 2020, A review on energy chemistry of fast-charging anodes, Chemical Society Reviews, 49(12), 3806-3833p.
- Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., and Chen, Z.**, 2018, Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets, Nature Energy, 3(4), 279-289.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cardiagn**, 2023, “2020+ VW ID.3 Workshop – Brake system”, <https://cardiagn.com/2020-vw-id-3-workshop-brake-system/> (Erişim tarihi: 12 Şubat 2023)
- Chau, K. T.**, 2015, Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application., John Wiley & Sons, 4p.
- Chauhan, S.**, 2015, Motor torque calculations for electric vehicle. International journal of scientific & technology research, 4(8), 126-127 pp.
- Chen, M., Liu, J., He, Y., Yuen, R. and Wang, J.**, 2017, Study of the fire hazards of lithium-ion batteries at different pressures, Applied Thermal Engineering, 125, 1061-1074p.
- Conserve Energy Future**, “Various Advantages and Disadvantages of Electric Cars”, <https://www.conserve-energy-future.com/advantages-and-disadvantages-of-electric-cars.php> (Erişim tarihi: 3 Ağustos 2022)
- Conte, F. V.**, 2006, Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 123(10), 424-431p.
- Cowan, R. and Hultén, S.**, 1996, Escaping lock-in: the case of the electric vehicle. Technological forecasting and social change, 53(1), 61-79.
- Das, H. S., Tan, C. W. and Yatim, A. H. M.**, 2017, Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 268-291p.
- De Cock, J.**, 2022, Comparaison des deux modes de propulsion des véhicules électriques: véhicules à pile à combustible versus véhicules à batterie, MSc Thesis, Louvain School of Management, Université catholique de Louvain

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., and Leijon, M.**, 2011, Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review, IEEE Transactions on vehicular technology, 61(2), 475-484.
- DeepaksawIITD**, 2021, “Dynamic Modelling of 2W Electric Vehicle”, https://github.com/deepaksawIITD/Dynamic-Modelling-of-2W-EV/blob/main/EV_Modelling_IDC.ipynb (Erişim tarihi: 30 Kasım 2022)
- Dexigner**, 2022, “BMW C Evolution Electric Scooter”, <https://www.dexigner.com/news/25456>, (Erişim tarihi: 7 Aralık 2022)
- Diaz G.**, 2022, “Car Center of Mass Calculator”, <https://www.calctool.org/dynamics/car-mass-center> (Erişim tarihi: 22 Ocak 2023)
- Dineshkumar, R., Ramanamurthy, E. V. V., and Krishnapavanteja, C.**, 2017, Development of friction material by using precast prefired (pcp f) blocks. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 197, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- Ding, N., Prasad, K. and Lie, T. T.**, 2017, The electric vehicle: a review. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 9(1), 49-66.
- Dixon, J.**, 2010, March, Energy storage for electric vehicles, In 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology (pp. 20-26), IEEE.
- Egbue, O. and Long, S.**, 2012, Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. Energy policy, 48, 717-729p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. and Ebrahimi, K. M., 2018, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, CRC press, 1p

Enge, P., Enge, E. and Zoeph, S., 2021, Electric Vehicle Engineering, McGraw-Hill Education, 211p.

Engineering ToolBox, 2011, “Car - Traction Force.” https://www.engineeringtoolbox.com/tractive-effort-d_1783.html (Erişim tarihi: 18 Ocak 2023)

Eriksson, L. and Nielsen, L., 2014, Modeling and control of engines and drivelines, John Wiley & Sons, United Kingdom, 17p.

Errol's Tyres, 2023, “Tyre overall rolling diameter”, <https://www.errolstyres.co.za/content/tyre-overall-rolling-diameter> (Erişim tarihi: 28 Mart 2023)

EUs pares, 2023, “Brake Drum 286,0mm ATE 480046”, <https://www.euspares.co.uk/parts/ate/958107> (Erişim tarihi: 31 Mart 2023)

EV Database, 2022, “Volkswagen ID.3 Pro”, <https://ev-database.org/car/1531/Volkswagen-ID3-Pro> (Erişim tarihi: 5 Ocak 2023)

EVDB, 2023, “WLTP Explained: Simplifying Range and Efficiency”, <https://evdb.nz/wltp> ((Erişim tarihi: 5 Nisan 2023)

Evshop, “4.15kWh BMW i3 battery module 45V 94Ah nominal”, <https://evshop.eu/en/batteries/216-415kwh-bmw-i3-battery-module-45v-94ah-nominal.html> (Erişim tarihi: 28 Kasım 2022)

Evs specifications, “2021 Volkswagen ID.3 Pro – Specifications and Price”, <https://www.evs specifications.com/en/model/f1c2126> (Erişim tarihi: 6 Ocak 2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

EvsSpecifications, “2022 Volkswagen ID.3 Pro – Specifications and Price”,
<https://www.evspecifications.com/en/model/1d38274> (Erişim tarihi: 7 Ocak 2023)

Fadul, S. M. E., Aris, I. B., Misron, N., Halin, I. A., and Iqbal, A. K. M., 2018, Modelling and simulation of powertrain system for electric car. Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia, 2(1), 23-34.

Faraz, A., Ambikapathy, A., Thangavel, S., Logavani, K. and Arun Prasad, G., 2021, Battery electric vehicles (BEVs). In Electric Vehicles, Springer, Singapore, 137-160p.

Ferkova, Z., Franko, M., Kuchta, J., and Rafajdus, P., 2008, Electromagnetic design of ironless permanent magnet synchronous linear motor, In 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (pp. 721-726), IEEE.

Footework, “What is Gross Vehicle Weight GVWR”,
[https://footework.com/what-is-gross-vehicle-weight-gvwr/#:~:text=Gross%20Vehicle%20Weight%20\(%20GVWR%20\)%20is,the%20vehicle%20may%20be%20towing](https://footework.com/what-is-gross-vehicle-weight-gvwr/#:~:text=Gross%20Vehicle%20Weight%20(%20GVWR%20)%20is,the%20vehicle%20may%20be%20towing). (Erişim tarihi: 15 Ocak 2023)

Fornahl, D. and Hülsmann, M. (Eds.), 2016, Markets and Policy Measures in the Evolution of Electric Mobility, Springer, 1-2p

Geng, W., and Zhang, Z., 2016, Investigation of a new ironless-stator self-TEA ring axial flux permanent magnet motor. IEEE Transactions on Magnetics, 52(7), 1-4.

Gillespie, T. (Ed.), 2021, Fundamentals of vehicle dynamics. SAE international, 45-84p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Goda, S. M., Elkoteshy, Y. S. and Ouda, A. N. ,** 2018, Scalar control technique for three phase induction motor for electric vehicle application., In 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON) (pp. 705-711). IEEE.
- Goodenough, J. B.,** 2018, How we made the Li-ion rechargeable battery, Nature Electronics, 1(3), 204-204.
- Green Car Congress,** 2014, “BMW Motorrad’s electric C evolution”, <https://www.greencarcongress.com/2014/05/20140501-bmw.html> (Erişim tarihi: 26 Kasım 2022)
- Guarnieri, M.,** 2011, When cars went electric, part one [historical], IEEE Industrial Electronics Magazine, 5(1), 61-62p.
- Guarnieri, M.,** 2012, September, Looking back to electric cars, In 2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON), (1-6p)
- Habib, A. A., Hasan, M. K., Mahmud, M., Motakabber, S. M. A., Ibrahimya, M. I., and Islam, S.,** 2021, A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application. IET Power Electronics, 14(1), 1-13.
- Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A. and Ayob, A.,** 2017, Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69, 771-789.
- Hayes, J. G., and Goodarzi, G. A.,** 2018, Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles, John Wiley & Sons Ltd, 6-7p, 161p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hegazy, O., Barrero, R., Van Mierlo, J., Lataire, P., Omar, N., and Coosemans, T., 2013, An advanced power electronics interface for electric vehicles applications. IEEE transactions on power electronics, 28(12), 5508-5521.

Ho, J., Jow, T. R. and Boggs, S., 2010, Historical introduction to capacitor technology, IEEE Electrical Insulation Magazine, 26(1), 20-25.

Howroyd, S., and Thring, R., 2018, An electric vehicle model and validation using a Nissan Leaf: A Python-based object-oriented programming approach. Advances in Mechanical Engineering, 10(7), 1687814018782099.

Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G. J., Yu, W., ... and Sahu, R., 2021, Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. Proceedings of the IEEE, 109(6), 1039-1059p.

Imanishi, N., Luntz, A. C. and Bruce, P., 2014, The lithium air battery: fundamentals (p. 4), Springer, New York, 16-18p.

Infineon, “AIKQ120N75CP2”,
<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/automotive-qualified-igbts/automotive-igbt-discretes/aikq120n75cp2/> (Erişim tarihi: 7 Ocak 2023)

Infineon, “EiceDRIVER™ 1ED020I12-F Enhanced”,
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED020I12-F-DataSheet-v02_04-EN.pdf?fileId=5546d4626f229553016fa9c1327855b4 (Erişim tarihi: 7 Ocak 2023)

Infineon, “FS820R08A6P2B”,
<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/automotive-qualified-igbts/automotive-igbt-coolsic-mosfet-modules/fs820r08a6p2b/> (Erişim tarihi: 8 Ocak 2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

International Energy Agency, 2021, Global EV Outlook 2021, Paris, France.

Iro, Z. S., Subramani, C. and Dash, S. S., 2016, A brief review on electrode materials for supercapacitor, Int. J. Electrochem. Sci, 11(12), 10628-10643.

Jung, J., Zhang, L. and Zhang, J. (Eds.), 2015, Lead-acid battery technologies: fundamentals, materials, and applications (Vol. 8), Crc Press, 5-10p.

Jupyter, 2023, “Jupyter Notebook”, <https://jupyter.org/>, (Erişim tarihi: 24 Kasım 2022)

Kane, M., 2019, “VW ID.3 Electric Motor Is So Compact That It Fits In A Sports Bag”, <https://insideevs.com/news/382377/vw-id3-electric-motor-compact/> (Erişim tarihi: 2 Ocak 2023)

Kar, B., Pal, T. K. and Bhattacharyya, S., 2021, Study of the Reality on Electric Vehicle in Indian Scenario, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1080, No. 1, p. 012003), IOP Publishing.

Karki, A., Phuyal, S., Tuladhar, D., Basnet, S. and Shrestha, B. P., 2020, Status of pure electric vehicle power train technology and future prospects, Applied System Innovation, 3(3), 35.

Katić, V. A., Dumnić, B., Čorba, Z. and Milićević, D., 2014, Electrification of the vehicle propulsion system—an overview, Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, 27(2), 299-316.

Kharjule, S., 2015, Voltage source inverter, In 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (pp. 537-542), IEEE.

Krishnan, R., 2001, Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, CRC press, 30p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kumar, A., Chandekar, A., Deshmukh, P. W. and Ugale, R. T.,** 2023, Development of electric vehicle with permanent magnet synchronous motor and its analysis with drive cycles in MATLAB/Simulink. Materials Today: Proceedings, 72, 643-651.
- Kumar, L. A. and Alexander, S. A.,** 2020, Power Converters for Electric Vehicles, CRC Press, 52-58p.
- Kumar, L. and Jain, S.,** 2014, Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, 924-940p.
- Kurzweil, P.,** 2010, Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery, Journal of Power Sources, 195(14), 4424-4434.
- Larminie, J., and Lowry, J.,** 2012, Electric vehicle technology explained. John Wiley & Sons, 233-234p.
- Lee, B. K. and Ehsami, M.,** 2001, A simplified functional simulation model for three-phase voltage-source inverter using switching function concept. IEEE transactions on industrial electronics, 48(2), 309-321.
- Lee, J. S., Tai Kim, S., Cao, R., Choi, N. S., Liu, M., Lee, K. T. and Cho, J.,** 2011, Metal–air batteries with high energy density: Li–air versus Zn–air, Advanced Energy Materials, 1(1), 34-50.
- Li, M., Lu, J., Chen, Z., and Amine, K.,** 2018, 30 years of lithium-ion batteries, Advanced Materials, 30(33), 1800561.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liang, J., Sun, Z. H., Li, F. and Cheng, H. M.**, 2016, Carbon materials for Li–S batteries: Functional evolution and performance improvement. *Energy Storage Materials*, 2, 76-106.
- Lima P.**, 2021, “NCM 712 by LG Chem: E66A and E78 battery cells in detail”, <https://pushevs.com/2021/03/30/ncm-712-by-lg-chem-e66a-and-e78-battery-cells/> (Erişim tarihi: 13 Ocak 2023)
- Loganayaki, A. and Kumar, R. B.**, 2019, Permanent magnet synchronous motor for electric vehicle applications, In 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS) (pp. 1064-1069). IEEE.
- MacAdam, C. C.**, 1980, An optimal preview control for linear systems.
- Macadam, C. C.**, 2003, Understanding and modeling the human driver, *Vehicle system dynamics*, 40(1-3), 101-134.
- Manzetti, S. and Mariasiu, F.**, 2015, Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1004-1012p.
- Marklines, 2020**, “BMW C Evolution Teardown: EV components for big electric scooters”, https://www.marklines.com/en/report_all/rep2023_202005#report_area_2, (Erişim tarihi: 26 Kasım 2022)
- Marklines, 2022**, “Volkswagen ID.3 Electric Powertrain Teardown Analysis”, https://www.marklines.com/en/report_all/rep2279_202203#report_area_2, (Erişim tarihi: 6 Ocak 2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Maroti, P. K., Padmanaban, S., Bhaskar, M. S., Ramachandaramurthy, V. K. and Blaabjerg, F.**, 2021, The state-of-the-art of power electronics converters configurations in electric vehicle technologies. Power Electronic Devices and Components, 100001.
- Martyushev, N. V., Malozyomov, B. V., Sorokova, S. N., Efremenkov, E. A. and Qi, M.**, 2023, Mathematical Modeling the Performance of an Electric Vehicle Considering Various Driving Cycles. Mathematics, 11(11), 2586.
- Matplotlib**, 2022, “Matplotlib: Visualization with Python”, <https://matplotlib.org/>, (Erişim tarihi: 30 Kasım 2022)
- Meslekî ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü**, “Türkiye geneli alan detayları.”, <http://meslekiegitimharitasi.meb.gov.tr/alanbilgi.php> (Erişim tarihi: 02 Eylül 2022)
- Meyer, M., Barthen, A., Wille, J. M. and Reichel, J.**, 2021, Regen-braking-capable ZF Brake Control System for Electric Vehicles by VW. ATZ worldwide, 123(11), 36-41.
- Miceli, R. and Viola, F.**, 2017, Designing a sustainable university recharge area for electric vehicles: Technical and economic analysis, Energies, 10(10), 1604.
- Mohd, T. A. T., Hassan, M. K. and Aziz, W. A.**, 2015, Mathematical modeling and simulation of an electric vehicle. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 8, 1312-1321.
- Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K. and Thirumalai, J.**, 2019, A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 123-145.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Najib, S. and Erdem, E., 2019, Current progress achieved in novel materials for supercapacitor electrodes: mini review, *Nanoscale Advances*, 1(8), 2817-2827.

NumPy, 2022, “NumPy”, <https://numpy.org/>, (Erişim tarihi: 30 Kasım 2022)

Onar, O. C., Kobayashi, J. and Khaligh, A., 2012, A fully directional universal power electronic interface for EV, HEV, and PHEV applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5489-5498.

Pacejka, H. B., 2012, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed., Oxford, United Kingdom: SAE and Butterworth-Heinemann, 179p.

Pan, J., Xu, Y. Y., Yang, H., Dong, Z., Liu, H. and Xia, B. Y., 2018, Advanced architectures and relatives of air electrodes in Zn–air batteries, *Advanced Science*, 5(4), 1700691.

Pandas, 2022, “Pandas”, <https://pandas.pydata.org/>, (Erişim tarihi: 30 Kasım 2022)

Park, G., Lee, S., Jin, S. and Kwak, S., 2014, Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains. *Expert Systems with Applications*, 41(5), 2595-2607.

Pavlov, D., 2017, *A Handbook of Lead Acid Battery Technology and its Influence on the Product*, Atlantic Publication, New Delhi, 21-27p.

Peng, F. Z., 2003, Z-source inverter, *IEEE Transactions on industry applications*, 39(2), 504-510.

Peng, F. Z., Joseph, A., Wang, J., Shen, M., Chen, L., Pan, Z., ... and Huang, Y., 2005, Z-source inverter for motor drives. *IEEE transactions on power electronics*, 20(4), 857-863.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Petters, S., 2019, “Volkswagen details ID.3 electric drive”, <https://www.automotivepowertraintechologyinternational.com/features/volkswagen-details-id-3-electric-drive.html#prettyPhoto> (Erişim tarihi: 8 Ocak2023)

Poorfakhraei, A., Narimani, M., and Emadi, A., 2021, A review of multilevel inverter topologies in electric vehicles: Current status and future trends. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2, 155-170.

Pure Tyre, “VW ID3 Tyre Pressure Placard”, <https://www.puretyre.co.uk/tyre-information/tyre-pressures/volkswagen-tyre-pressures/vw-id3-tyre-pressure-placard/> (Erişim tarihi: 28 Mart 2023)

Rafin, S. S. H., Islam, R. and Mohammed, O. A., 2023, Overview of Power Electronic Converters in Electric Vehicle Applications. In 2023 Fourth International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM) (pp. 1-7). IEEE.

Rahman, M., Wang, X. and Wen, C., 2014, A review of high energy density lithium–air battery technology, Journal of Applied Electrochemistry, 44(1), 5-22p.

Raiciu T., 2009, “How Multi-Link Suspension Works”, <https://www.autoevolution.com/news/how-multi-link-suspension-works-7804.html> (Erişim tarihi: 2 Mart 2023)

Rajashekara, K., 2013, Present status and future trends in electric vehicle propulsion Technologies, IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 1(1), 3-10.

Rashid, M. H. (Ed.), 2017, Power electronics handbook. Butterworth-heinemann.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K. H., Yang, J., ... and Kwon, E. E.,** 2018, Recent advancements in supercapacitor technology. Nano Energy, 52, 441-473.
- Reimers, J., Dorn-Gomba, L., Mak, C. and Emadi, A.,** 2019, Automotive traction inverters: Current status and future trends, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(4), 3337-3350.
- Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J. and Jiang, L.,** 2017, Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review, Chinese Journal of Electrical Engineering, 3(3), 1-17.
- Roland, I.,** 2021, “Global EV Sales for 2021 H1”, <https://www.ev-volumes.com/news/global-ev-sales-for-2021-h1/> (Erişim tarihi: 10 Ağustos 2022)
- Roos, G. and Emilio M.D.P.,** 2021, “Under the Hood: the ID.3 and VW’s electrification platform”, <https://www.eetimes.com/under-the-hood-the-id-3-and-vws-electrification-platform/> (Erişim tarihi: 8 Ocak 2023)
- Rouhani, R., Abdollahi, S. E. and Gholamian, S. A.,** 2018, Torque ripple reduction of a synchronous reluctance motor for electric vehicle applications, In 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC) (pp. 386-391). IEEE.
- Saxena, S., Gopal, A., and Phadke, A.,** 2014, Electrical consumption of two-, three-and four-wheel light-duty electric vehicles in India. Applied energy, 115, 582-590.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schuitema, G., Anable, J., Skippon, S. and Kinnear, N.**, 2013, The role of instrumental, hedonic and symbolic attributes in the intention to adopt electric vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 48, 39-49p.
- SciPy**, 2022, “SciPy”, <https://scipy.org/>, (Erişim tarihi: 30 Kasım 2022)
- Selim, M.**, 2013, EML2322L-MAE Design and Manufacturing Laboratory Drive Wheel Motor Torque Calculations.
- Sharma, K., Arora, A. and Tripathi, S. K.**, 2019, Review of supercapacitors: Materials and devices. *Journal of Energy Storage*, 21, 801-825.
- Sheela, A., Suresh, M., Shankar, V. G., Panchal, H., Priya, V., Atshaya, M., ... and Dharaskar, S.**, 2022, FEA based analysis and design of PMSM for electric vehicle applications using magnet software, *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 2742-2747.
- Shinde, S. D., Maheshwari, S. and Kumar, S.**, 2018, Literature review on analysis of various Components of McPherson suspension. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19102-19108.
- Soylu, S. (Ed.)**, 2011, *Electric vehicles: modelling and simulations*, BoD–Books on Demand, InTech, Rijeka, Croatia 311-312p.
- Steinstraeter, M., Heinrich, T. and Lienkamp, M.**, 2021, Effect of low temperature on electric vehicle range, *World Electric Vehicle Journal*, 12(3), 115.
- Steven, H.**, 2002, Worldwide harmonised motorcycle emissions certification procedure, Institute for Vehicle Technology, 3p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- STMicroelectronics**, “Trench gate field-stop”,
https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/trench-gate-field-stop.html (Erişim tarihi: 24 Şubat 2023)
- Sun, X., Li, Z., Wang, X. and Li, C.**, 2019, Technology development of electric vehicles: A review. *Energies*, 13(1), 90.
- Szymanski, J. R., Zurek-Mortka, M., Wojciechowski, D. and Poliakov, N.**, 2020, Unidirectional DC/DC converter with voltage inverter for fast charging of electric vehicle batteries, *Energies*, 13(18), 4791.
- Tan, P., Kong, W., Shao, Z., Liu, M. and Ni, M.**, 2017, Advances in modeling and simulation of Li-air batteries, *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 155-189p.
- Teoh, J. X., Stella, M., and Chew, K. W.**, 2019, Performance analysis of electric vehicle in worldwide harmonized light vehicles test procedure via vehicle simulation models in ADVISOR. In 2019 IEEE 9th international conference on system engineering and technology (ICSET) (pp. 215-220). IEEE.
- The MathWorks Inc.**, “Build Full Electric Vehicle Model”,
<https://www.mathworks.com/help/autoblks/ug/explore-the-electric-vehicle-reference-application.html> (Erişim tarihi : 5 Ocak 2023)
- The MathWorks Inc.**, “Datasheet Battery”,
https://www.mathworks.com/help/autoblks/ref/datasheetbattery.html?searchHighlight=BattEv&stid=srchtitle_BattEv_4 (Erişim tarihi : 9 Ocak 2023)
- The MathWorks Inc.**, “Longitudinal Driver”,
<https://www.mathworks.com/help/vdynblks/ref/longitudinaldriver.html>,
 (Erişim tarihi: 10 Ocak 2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

The MathWorks Inc., “Longitudinal Motorcycle Braking Test Reference Application”, <https://www.mathworks.com/help/vdynblks/ug/motorcycle-braking-test-reference-application.html> (Erişim tarihi : 17 Ocak 2023)

The MathWorks Inc., “Longitudinal Wheel”,
<https://www.mathworks.com/help/autoblks/ref/longitudinalwheel.html>
(Erişim tarihi : 14 Ocak 2023)

The MathWorks Inc., “Mapped Motor”,
<https://www.mathworks.com/help/autoblks/ref/mappedmotor.html> (Erişim tarihi : 14 Ocak 2023)

The MathWorks Inc., “Vehicle Body 3DOF Longitudinal”,
<https://www.mathworks.com/help/vdynblks/ref/vehiclebody3doflongitudinal.html> (Erişim tarihi : 15 Ocak 2023)

The MathWorks Inc., 2022, MATLAB (Sürüm R2021a),
<https://www.mathworks.com/> (Erişim tarihi 20 Aralık 2022)

Thomas, J., 2014, Drive cycle powertrain efficiencies and trends derived from EPA vehicle dynamometer results. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 7(2014-01-2562), 1374-1384.

Thomas, V. J. and Maine, E., 2019, Market entry strategies for electric vehicle start-ups in the automotive industry–Lessons from Tesla Motors. Journal of Cleaner Production, 235, 653-663p.

Tiresize, 2023, “Continental ContiProContact - 215/55R18”,
<https://tiresize.com/tires/Continental/ContiProContact-215-55R18.htm>
(Erişim tarihi: 20 Ocak 2023)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

TransportPolicy, “International: light-duty: worldwide harmonized light vehicles test procedure (wltp)”,
<https://www.transportpolicy.net/standard/international-light-duty-worldwide-harmonized-light-vehicles-test-procedure-wltp/> (Erişim tarihi: 6 Ocak 2023)

TransportPolicy, “International: light-duty:New European Driving Cycle”,
<https://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-new-european-driving-cycle/> (Erişim tarihi: 7 Ocak 2023)

Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., ... and Steven, H., 2015, Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation, Transportation research part D: transport and environment, 40, 61-75.

Tytelmaier, K., Husev, O., Veligorskyi, O. and Yershov, R., 2016, A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems, In 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF) (pp. 22-28), IEEE.

U.S. Environmental Protection Agency, “Emission Standards Reference Guide”,
<https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp> (Erişim tarihi: 8 Ocak 2023)

Ultimate Specs, 2020, “BMW C Evolution Specs”,
<https://www.ultimatespecs.com/motorcycles-specs/bmw/bmw-c-evolution-2020#:~:text=Stock%20tire%20sizes%20are%20120,ABS>. (Erişim tarihi: 5 Aralık 2022)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- UNECE**, 2022, “Worldwide harmonized Motorcycle emissions Certification/Test procedure (WMTC) informal group”, <https://unece.org/worldwide-harmonized-motorcycle-emissions-certificationtest-procedure-wmtc-informal-group>, (Erişim tarihi: 2 Aralık 2022)
- Upsbatterycenter**, 2017, “History of Electric Cars: The Beginning”, <https://www.upsbatterycenter.com/blog/history-of-electric-cars/#prettyPhoto> (Erişim tarihi: 20 Ekim 2022)
- Urry J.**, 2021, “BMW C evolution (2014-2019) - Review & Buying Guide”, <https://www.bennetts.co.uk/bikesocial/reviews/bikes/bmw/c-evolution-2014-used> (Erişim tarihi: 24 Kasım 2022)
- US Media Site**, 2019, “World premiere of the fully electric ID.3: The First ID. family vehicle debuts for the European market”, <https://web.archive.org/web/20210201020827/https://media.vw.com/en-us/releases/1198> (Erişim tarihi : 19 Ocak 2023)
- Voelker, P.**, 2014, Trace degradation analysis of lithium-ion battery components. R&D Magazine,(April 2014) <http://www.rdmag.com/articles/2014/04/trace-degradation-analysislithium-ion-battery-components> Search PubMed,(accessed August 2015).
- Volkswagen Group of America**, 2021, “The ID.4 New Model Overview”, Volkswagen Academy, U.S.A.
- Wallentowitz, H.**, 2004, Lecture Longitudinal Dynamics of Vehicles, IKA RWTH, Aachen, 39p.
- Wang, J., Li, W., Li, J., Liu, Y., Song, B. and Gao, H.**, 2018, Modeling a driver’s directional and longitudinal speed control based on racing track features, Shock and Vibration, 2018.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wassiliadis, N., Steinsträter, M., Schreiber, M., Rosner, P., Nicoletti, L., Schmid, F., ... and Lienkamp, M.**, 2022, Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency, and lifetime from component to system level of the Volkswagen ID. 3. ETransportation, 12, 100167.
- Westbrook, M. H.**, 2001, The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars, The Institution of Engineering and Technology, London, 16-18p.
- Whiter, G.**, 2021, “Where did it all start? A chronological history of the development of radio”, <http://www.clarkmasts.net.au/development%20of%20radio/history%20of%20radio%20-%20page%202.htm> (Erişim tarihi: 27 Kasım 2022)
- Whittingham, M. S.**, 2012, History, evolution, and future status of energy storage. Proceedings of the IEEE, 100(Special Centennial Issue), 1518-1534
- Wright I.**, 2020, “History Of the Modern electric car.”, <https://carbuzz.com/features/history-of-the-modern-electric-car> (Erişim tarihi: 31 Ağustos 2022)
- X-engineer**, “How to calculate aerodynamic drag force”, <https://x-engineer.org/aerodynamic-drag/> (Erişim tarihi: 7 Aralık 2022)
- X-engineer**, “How to calculate road slope (gradient) force”, <https://x-engineer.org/road-slope-gradient-force/> (Erişim tarihi: 8 Aralık 2022)
- X-engineer**, “How to calculate wheel Radius”, <https://x-engineer.org/calculate-wheel-radius/> (Erişim tarihi: 7 Aralık 2022)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Xiong, R. and Shen, W.**, 2019, Advanced battery management technologies for electric vehicles, John Wiley & Sons, 73p.
- Xiong, S.**, 2019, A study of the factors that affect lithium ion battery degradation, Doctoral dissertation, University of Missouri-Columbia, 78p.
- Xlrd**, 2022, “xlrd”, <https://xlrd.readthedocs.io/en/latest/>, (Erişim tarihi: 30 Kasım 2022)
- Yong, T. and Park, C.**, 2017, A qualitative comparative analysis on factors affecting the deployment of electric, Energy Procedia, 128, 497-503.
- Young, K. H. and Yasuoka, S.**, 2016, Capacity degradation mechanisms in nickel/metal hydride batteries. Batteries, 2(1), 3.
- Zhang, Z.**, 2020, Design and experimental verification of low cost ferrite PM-assisted synchronous reluctance motor, In 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC) (pp. 327-334), IEEE.
- Zigwheels**, 2022 , “BMW C Evolution”, <https://www.zigwheels.ph/new-motorcycles/bmw/c-evolution/images> (Erişim tarihi: 5 Aralık 2022)

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım Doç. Dr. Mete Çubukçu'ya eğitimime verdiği emek ve tüm süreç boyunca gösterdiği destek için teşekkür ederim. Akademik ve kişisel danışmanlığının yanında, kibar ve anlayış dolu yaklaşımı ile tüm yüksek lisans eğitimi süresince yola devam edebilmemde önemli pay sahibi oldu.

Ayrıca, çalışma sürecinde beni her zaman cesaretlendiren, destek olan sevgili eşime, gösterdikleri sabır ve anlayış için kızım ve oğluma minnettarım.

Son olarak, bu tez çalışmasına katkı sağlayan herkese teşekkür ederim. Bu çalışma bana önemli bir deneyim ve farkındalık kazandırdı.

03/07/2023

İlker TURP

ÖZGEÇMİŞ

İLKER TURP

EĞİTİM BİLGİLERİ:

- 2020 - Halen: Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Teknolojisi (YL) (TEZLİ)
- 1999 – 2003: Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Telekomünikasyon Öğretmenliği

İŞ BİLGİLERİ:

Milli Eğitim Bakanlığı – Elektronik Öğretmeni

- 2003 – 2004: Konya İçeri Çumra ÇPL - Elektronik Öğretmeni
- 2004 – 2015: Çınarlı MTAL - Elektronik Öğretmeni
- 2015 – 2016: Çınarlı MTAL - Müdür Yardımcısı
- 2016 – 2017: Mersinli MTAL - Müdür Baş Yardımcısı
- 2021 – Halen: Bornova Selçuk Yaşar MTAL – Elektronik Öğretmeni

PROJE BİLGİLERİ:

- 2013 – 2019: Samsung Hope For Children – Samsung Akademi Görüntü ve Ses Sistemleri Eğitmeni

BİLGİSAYAR:

- Programlama Dilleri: C++, CCS, Pic Basic Pro, Python, Arduio, Kotlin
- Yazılım: Microsoft Office, Proteus, MATLAB, 3DS Max

YABANCI DİL:

- İngilizce