



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN VE ŞARJ İSTASYONLARININ İŞ
SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRAH BEŞİKTAŞLI

ARALIK

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN VE ŞARJ İSTASYONLARININ İŞ SAĞLIĞI
VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Emrah BEŞİKTAŞLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YURTÇU**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Emrah BEŞİKTAŞLI tarafından hazırlanan “Elektrikli Araçların ve Şarj İstasyonlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YURTÇU

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan: Prof. Dr. Levent UĞUR

Mekanik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şenol YAVUZ

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 31/12/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

(İmza)

Emrah

BEŞİKTAŞLI

(Tarih)

ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN VE ŞARJ İSTASYONLARININ İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Emrah BEŞİKTAŞLI

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2025

ÖZET

Bu yüksek lisans tezi, elektrikli araçlar (EA) ve şarj istasyonlarının hızla yaygınlaştığı endüstriyel dönüşüm sürecinde, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) perspektifinden doğan yeni risk alanlarını çok boyutlu olarak analiz etmektedir. Çalışmanın temel amacı; Türkiye’deki mevcut İSG mevzuatı ve uygulamalarının, elektromobilité ekosisteminde ortaya çıkan özgün risk faktörlerini karşılama yeterliliğini sorgulamak ve etkin bir yönetim modeli sunmaktır. Araştırma, Creswell ve Creswell (2018) tarafından tanımlanan karma yöntem (mixed method) çerçevesinde yapılandırılmıştır. Literatür taraması, uluslararası standart incelemeleri, vaka analizleri ve mevzuat karşılaştırmaları entegre edilerek; teknolojik (yüksek voltaj, batarya kimyası, termal kaçak), organizasyonel (yetkinlik, bakım süreçleri) ve siber-fiziksel (otonom sistemler, siber saldırılar) olmak üzere üç ana eksenle risk değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, batarya üretiminden geri dönüşüm süreçlerine kadar kimyasal maruziyet ve solunum riski yönetiminin yetersiz kaldığını; şarj istasyonlarında ise elektrik çarpması, ark flaşı ve termal kaçak risklerinin kritik düzeyde olduğunu göstermektedir. Özellikle Tip B RCD kullanımının ulusal mevzuatta zorunlu tutulmaması ciddi bir güvenlik açığı olarak tespit edilmiştir. IEC 60364-7-722, NFPA 70E ve ISO 45001 gibi uluslararası standartlarla yapılan karşılaştırmalar, Türkiye’nin mevcut yasal altyapısının (6331 sayılı Kanun), EA teknolojilerinin getirdiği hibrit tehlikeleri yönetmede eksik kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca siber-fiziksel sistemlerdeki açıkların, bakım personeli ve operatörler için yeni nesil tehlikeler doğurduğu belirlenmiş; bu kapsamda UN ECE R155/R156, ISO/SAE 21434 ve NIST IR 8473 çerçevelerinin ulusal düzeyde uyarlanması gerekliliği vurgulanmıştır. Sonuç olarak bu tez, biyolojik izleme zorunluluğu, Ark Flaşı analizi ve Tehdit Analizi ve Risk Değerlendirmesi (TARA) gibi spesifik yöntemleri içeren; Fine-Kinney, HAZOP ve FMEA tekniklerinin entegre edildiği hibrit bir risk analiz modeli önermektedir. Çalışma, Türkiye elektromobilité sektöründe İSG standartlarının çağdaş normlara yükseltilmesi adına stratejik bir yol haritası sunmaktadır.

Sayfa Adedi : 116
Anahtar Kelimeler : İş Sağlığı ve Güvenliği, Elektrikli Araçlar, Şarj İstasyonları, Lityum İyon Batarya Güvenliği, Siber-Fiziksel Riskler, Hibrit Risk Analizi
Danışman : Unvan Ad SOYAD

ASSESSMENT OF ELECTRIC VEHICLES AND CHARGING STATIONS FROM AN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY PERSPECTIVE

(M. Sc. Thesis)

Emrah BEŞİKTAŞLI

AMASYA UNİVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

This master's thesis multidimensionally analyzes the new risk areas arising from an Occupational Health and Safety (OHS) perspective during the industrial transformation process where electric vehicles (EVs) and charging stations are rapidly becoming widespread. The main objective of the study is to evaluate the adequacy of current OHS legislation and practices in Turkey in meeting the unique risk factors emerging in the electromobility ecosystem and to propose an effective management model. The research is structured within the framework of the mixed method defined by Creswell and Creswell (2018). By integrating literature review, international standard examinations, case analyses, and legislation comparisons; a risk assessment was conducted on three main axes: technological (high voltage, battery chemistry, thermal runaway), organizational (competence, maintenance processes), and cyber-physical (autonomous systems, cyber attacks). The findings indicate that chemical exposure and respiratory risk management are insufficient from battery production to recycling processes; and that electric shock, arc flash, and thermal runaway risks at charging stations are at a critical level. In particular, the lack of mandatory Type B RCD usage in national legislation has been identified as a serious safety gap. Comparisons made with international standards such as IEC 60364-7-722, NFPA 70E, and ISO 45001 have revealed that Turkey's current legal infrastructure (Law No. 6331) falls short in managing the hybrid hazards introduced by EV technologies. Furthermore, it has been determined that vulnerabilities in cyber-physical systems create new generation hazards for maintenance personnel and operators; in this context, the necessity of adapting UN ECE R155/R156, ISO/SAE 21434, and NIST IR 8473 frameworks at the national level has been emphasized. Consequently, this thesis proposes a hybrid risk analysis model in which Fine-Kinney, HAZOP, and FMEA techniques are integrated, incorporating specific methods such as mandatory biological monitoring, Arc Flash analysis, and Threat Analysis and Risk Assessment (TARA). The study presents a strategic roadmap for elevating OHS standards to contemporary norms in the Turkish electromobility sector.

Number of pages : 116

Keywords : Occupational Health and Safety, Electric Vehicles, Charging Stations, Lithium-Ion Battery Safety, Cyber-Physical Risks, Hybrid Risk Analysis.

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Ahmet YURTÇU

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Elektromobilité çağına geçiş, endüstriyel bir devrim olmanın ötesinde, iş sağlığı ve güvenliği alanında da paradigmaların yeniden tanımlanmasını zorunlu kılan bir dönüşüm sürecidir. "Elektrikli Araçlar ve Şarj İstasyonlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi" başlıklı bu yüksek lisans tezi, sadece mevcut riskleri listelemek amacıyla değil, ülkemizin bu teknolojik dönüşüm sürecinde insan hayatını merkeze alan proaktif bir güvenlik kültürü oluşturmaya katkı sağlamak amacıyla hazırlanmıştır.

Yüksek voltajdan kimyasal risklere, siber güvenlikten yasal mevzuata kadar çok disiplinli bir bakış açısı gerektiren bu çalışmanın her aşaması, benim için hem zorlu hem de öğretici bir akademik yolculuk olmuştur. Bu süreçte sadece literatürdeki boşlukları değil, aynı zamanda güvenli bir geleceğin nasıl inşa edilebileceğini de görme fırsatı buldum.

Bu zorlu ve uzun soluklu çalışma sürecinde, engin bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, araştırmanın her aşamasında akademik vizyonu ile ufku açan, sabrı ve yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YURTÇU'ya en derin saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince akademik ortamın sağlanmasında emeği geçen Amasya Üniversitesi'nin değerli akademik ve idari personeline, ayrıca Yüksek Lisans dönemi boyunca her aşamada yardımcı olan, sorularımızı asla geri çevirmeyen Fen Bilimleri Enstitüsü Sekreteri Sayın H. Emre KERMEN'e teşekkür ederim.

Bu yoğun çalışma temposunda, hafta sonlarından ve akşamlarından feragat ederek tezime zaman ayırmama anlayışla yaklaşan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, varlığıyla bana her zaman güç veren kıymetli eşim Didar KAYIŞ BEŞİKTAŞLI ve biricik oğlum Doruk BEŞİKTAŞLI'ya sonsuz teşekkür ederim. Onların sabrı ve sevgisi olmasaydı bu çalışmayı tamamlamak çok daha zor olurdu.

Son olarak, bu çalışmanın ülkemiz İSG literatürüne katkı sağlamasını ve elektrikli araç teknolojilerinin güvenli bir şekilde yaygınlaşmasında sektör paydaşlarına rehberlik etmesini temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
RESİMLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	2
1.2. Kapsamı	3
1.3. Yöntemi.....	4
1.4. Tezin Önemi ve Gerekçesi.....	5
2. İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ (İSG) TEMELLERİ	6
2.1. İSG Kavramı ve Yasal Çerçeve (ILO, 6331 Sayılı Kanun, AB Direktifleri)	6
2.2. Değerlendirme Yaklaşımları.....	7
2.3. İSG'nin Endüstri 4.0 ve Elektromobilité ile İlişkisi	10
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	12
3.1. Elektrikli Araç Fabrikaları:	12
3.1.1. Yüksek gerilim sistemleri, yangın riski, ergonomik riskler	13
3.1.2. Akıllı üretim hatlarında İSG entegrasyonu	15
3.1.3 Gigacasting gelişimi ve iş sağlığı-güvenliği (İSG) perspektifi.....	16

3.2. İSG Riskleri ve Analizleri.....	17
3.2.1. Yüksek basınç ve sıcaklık riskleri.....	18
3.2.2. Mekanik ve ezilme riskleri.....	18
3.2.3. Malzeme kalitesi ve yapısal riskler.....	18
3.2.4. Onarım ve geri dönüşüm zorlukları	18
3.2.5. Stratejik uygulama kararları.....	18
3.3. İSG Önlemleri Ve Standartlar.....	19
3.4. Bakım-Onarım Tesisleri.....	19
3.4.1. Ark flaşı riskleri	20
3.4.2. Kullanılacak KKD ekipmanı.....	21
3.5. 400V/800V Mimari.....	23
3.5.1. Elektrik şok riski, standardizasyon eksiklikleri	23
3.5.2 IEC 61851 ve ISO 6469-3 değerlendirmeleri	24
3.6. Manyetik Alanlar	25
3.6.1. Manyetik Alan Maruziyeti, ICNIRP Sınırları ve Uzun Vadeli Sağlık Etkileri	26
4. BATARYALAR.....	30
4.1. Elektrikli Araç Batarya Teknolojileri: Türler ve İSG Perspektifi.....	30
4.2. Batarya Üretim Süreçlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği.....	32
4.3 Batarya Mimarilerinin Güvenlik Riskleri	34
4.4. Batarya Bakım ve Onarımında İSG Riskleri	35
4.5. Geri Dönüşüm Süreçlerinde İSG Riskleri.....	37
4.6. Batarya Fabrikaları İçin Örnek Risk Analizi (Fine-Kinney Yöntemi)	38
4.7. Batarya Bakım-Onarım Süreçleri İçin İş Akışı ve Tehlike Analizi	40
4.7.1. İş akışı ve risk analizi.....	41

4.8. Gelecek Batarya Teknolojileri ve Trend Analizi (İSG Perspektifiyle).....	42
4.9 Bataryaların İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi.....	43
4.9.1. Batarya teknolojileri ve kimyasal riskler	43
4.9.2. Termal kaçak ve yangın riski	47
4.9.3. Zehirli Gaz Salımı ve İtfaiye Güvenliği.....	51
4.9.4 İtfaiye ve müdahale güvenliği.....	53
4.9.5. Şarj süreçleri ve elektriksel riskler.....	53
4.9.6. Şarj İstasyonlarında İSG Riskleri.....	54
4.9.7. Batarya geri dönüşümü ve çalışan sağlığı.....	55
4.9.8. Standartlar ve mevzuat perspektifi.....	56
4.10. Batarya Yangınlarına Müdahale ve İSG Önlemleri.....	57
4.10.1. Müdahale zorlukları	58
4.10.2. İtfaiye müdahale protokolleri.....	58
4.10.3. İSG önlemleri.....	59
4.10. 4. Politika ve standart geliştirme.....	59
4.10.5. Batarya kaynaklı ve söndürülemeyen elektrikli araç yangınları: vaka incelemeleri.....	60
4.10.6. Neden Söndürülmesi Zordur? İSG Açısından Değerlendirme.....	61
4.10.7. İSG perspektifiyle önerilen önlemler.....	63
5. YAZILIM VE OTONOM SÜRÜŞ TEKNOLOJİLERİ.....	64
5.1. Yazılım Güvenliği.....	64
5.1.1. Yazılım hatalarının kazalara etkisi	65
5.1.2. OBD-II ve CAN-Bus açıkları	65
5.2. Otonom Sürüş	66

5.2.1. Otonom sürüş seviyeleri ve sorumluluk paylaşımı.....	67
5.2.2. Lidar, radar sistemleri arızası ve çarpışma riski	70
5.2.3. ISO 26262 (Functional Safety) değerlendirmeleri.....	71
5.2.4. İSG Perspektifi.....	71
5.3. Siber Güvenlik	72
5.3.1. HMI (Human-Machine Interface) üzerinden olası saldırılar	73
5.3.2. NIST ve ISO/SAE 21434 standartları çerçevesinde İSG etkisi	74
5.3.3. İSG Perspektifi.....	74
5.4 Türkiye Bağlamında Yazılım ve Otonom Sürüş Teknolojileri.....	77
6. ŞARJ İSTASYONLARI	78
6.1. Topraklama, Kaçak Akım, Kullanıcı Eğitimi.....	80
6.2. IEC 62196 (şarj fişleri) ve IEC 60364 (tesisat güvenliği)	82
6.3. Şarj Altyapısında Bakım, Üretim ve Otomasyon Kaynaklı İSG Riskleri.....	83
6.3.1. Elektrik kesintisi, bakım personeli riski.....	83
6.3.2. Ekipman Üretim Tesisleri	84
6.3.3. Otomasyon sistemlerinde İSG entegrasyonu	85
7. BULGULAR.....	87
7.1 Türkiye’de Şarj Altyapısının Mevcut Durumu ve Yaygınlaşma Eğilimleri	87
7.2. Çevresel ve Solunum Riskleri.....	88
7.3. Bakım-Onarım Sürecine İlişkin Bulgular	89
7.4. Şarj İstasyonları Kaynaklı Yangınlar: Uluslararası ve Türkiye’den Vaka İncelemeleri.....	90
7.4.1. İSG açısından değerlendirme	91
7.4.2. İSG Önlemleri.....	91

7.4.3 Uluslararası vaka örnekleri	92
7.4.4. İSG açısından ortak bulgular	94
8. ÖRNEK ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU İNCELEMESİ (SAHA DEĞERLENDİRMESİ).....	96
8.1. İncelemenin Amacı ve Kapsamı	96
8.2. İncelenen Şarj İstasyonunun Genel Özellikleri.....	96
8.3. Elektriksel Güvenlik ve Topraklama Sistemlerinin Değerlendirilmesi	98
8.4. Yangın Güvenliği ve Termal Risklerin İncelenmesi	98
8.4.1. Güneş enerjisi sistemi (GES), invertör ve enerji depolama ünitesine yönelik Fine–Kinney risk değerlendirmesi	98
8.4.2. Risk değerlendirmesinin yorumlanması	100
8.4.3. Genel değerlendirme (Saha İncelemesi ile Uyum)	100
8.5. Ergonomik Riskler ve Fiziksel Güvenlik.....	101
8.6. Bakım-Onarım Süreçleri ve Çalışan Güvenliği	101
8.7. Bulguların Literatür ve Mevzuat ile Karşılaştırılması	101
8.8. Genel Değerlendirme ve İyileştirme Önerileri (Köprü Bölüm).....	102
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ	1096

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırması	9
Çizelge 3.1. Elektrikli Araç Bakım-Onarım Tesislerinde Riskler, Önlemler ve İlgili Standartlar.....	22
Çizelge 3.2. 400V/800V Mimari Sistemlerde Riskler ve Standartlar.....	25
Çizelge 3.3. Elektrikli Araçlarda Manyetik Alan Maruziyeti ve Standartlar	28
Çizelge 4.1. Temel Batarya Türleri ve İSG Karşılaştırması	32
Çizelge 4.2. Batarya Üretim Süreçlerinde Öne Çıkan İSG Riskleri	33
Çizelge 4.3. Batarya Gerilim Mimarileri ve İSG Karşılaştırması.....	34
Çizelge 4.4. Batarya Bakım ve Bertaraf Süreçlerinde Başlıca İSG Riskleri ve Önlemleri	36
Çizelge 4.5. Geri Dönüşüm Süreçlerinde Başlıca İSG Tehditleri	38
Çizelge 4.6. Lityum-İyon Batarya Fabrikası İçin Fine-Kinney Risk Analizi	39
Çizelge 4.7. Yeni Batarya Teknolojileri ve İSG Riskleri	42
Çizelge 4.8. Batarya Kimyasal ve Yangın Özellikleri Çizelgesi	46
Çizelge 4.9. Elektrikli Araç Batarya Yangınlarının Söndürülmesindeki Temel Zorluklar ve Operasyonel Engeller.....	62
Çizelge 5.1. Elektrikli Araç Ekosisteminde Dijitalleşme ve Otonom Sistemlerinden Kaynaklanan İSG Risk Matrisi İle İlgili Standartlar	76
Çizelge 7.1. Vaka Analizi Çizelgesi	92
Çizelge 8.1. Fine-Kinney Risk Değerlendirme Çizelgesi (GES-İnvertör-Batarya).....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektromobilite Ekosistemi İçin Önerilen Bütünleşik (Hibrit) Risk Yönetim Modeli.....	8
Şekil 4.1. Örnek Elektrikli Araç Bataryası.....	31
Şekil 5.1. Seviye 1 den Seviye 5 e Araç Otonomisi.....	68



RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Yüksek Otomasyon Teknolojileriyle Donatılmış Modern Elektrikli Araç ÜretimHattı ve Montaj Sahası Temsili Resim	13
Resim 3.2. Idra Group Tarafından Geliştirilen Yüksek Tonajlı Giga Press Döküm Makinesi	17
Resim 3.3. Ark Flaşı Tehlike Kaynakları ve Koruyucu Ekipman Gereklilikleri	21
Resim 5.1. Tesla Fremont Fabrikasında Üretim Hattından Çıkan Araçların Otonom Sevkiyat Süreci	68
Resim 5.2. Şirket X Seviye 5 Araç Otonomisi İçin Görselleştirme	70
Resim 6.1. Şarj İstasyonu Görseli Temsili	78
Resim 8.1. Örnek İstasyon İncelemesi	97
Resim 8.2. Örnek İstasyon İncelemesi	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir

Simgeler

Açıklama

A	Amper (Akım Birimi)
CO	Karbon Monoksit
CO ₂	Karbon Dioksit
Hz	Hertz (Frekans Birimi)
kW	Kilowatt (Güç Birimi)
kWh	Kilowatt-saat (Enerji Birimi)
m	Metre
V	Volt (Gerilim Birimi)
Ω	Ohm (Direnç Birimi)
°C	Santigrat Derece (Sıcaklık Birimi)

Kısaltmalar

Açıklama

AC	Alternatif Akım (Alternating Current)
AVAS	Akustik Araç İkaz Sistemi (Acoustic Vehicle Alerting System)
BESS	Batarya Enerji Depolama Sistemleri (Battery Energy Storage Systems)
BEV	Bataryalı Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle)

BMS	Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System)
CPS	Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DCFC	Doğru Akım Hızlı Şarj (Direct Current Fast Charging)
EA	Elektrikli Araç
EKED	Etiketle, Kilitle, Emniyete Al, Dene (Bkz: LOTO)
EPA	Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency - ABD)
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EU-OSHA	Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı
EVSE	Elektrikli Araç Tedarik Ekipmanı (Electric Vehicle Supply Equipment)
FMEA	Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effects Analysis)
HAZOP	Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (Hazard and Operability Studies)
HEV	Hibrit Elektrikli Araç (Hybrid Electric Vehicle)
HF	Hidrojen Florür
HRR	Isı Yayılım Hızı (Heat Release Rate)
HV	Yüksek Voltaj (High Voltage)
IC-CPD	Kablo İçi Kontrol ve Koruma Cihazı (In-Cable Control and Protection Device)
ICE	İçten Yanmalı Motor (Internal Combustion Engine)

IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
KKD	Kişisel Koruyucu Donanım
LOTO	Kilitleme / Etiketleme (Lock-Out / Tag-Out)
MSD	Manuel Servis Kesici (Manual Service Disconnect)
NFPA	Ulusal Yangından Korunma Birliği (National Fire Protection Association)
NIST	Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (ABD)
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi (Original Equipment Manufacturer)
OSHA	İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi (ABD)
PHEV	Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
PM2.5	Çapı 2.5 Mikrometreden Küçük Partikül Madde
RCD	Artık Akım Cihazı / Kaçak Akım Rölesi (Residual Current Device)
RÖS	Risk Öncelik Skoru
SAE	Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers)
SEI	Katı Elektrolit Arayüzeyi (Solid Electrolyte Interphase)

SoC	Şarj Durumu (State of Charge)
SoH	Sağlık Durumu (State of Health)
TARA	Tehdit Analizi ve Risk Değerlendirmesi (Threat Analysis and Risk Assessment)
UN ECE	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
USFA	ABD İtfaiye İdaresi (United States Fire Administration)
V2G	Araçtan Şebekeye (Vehicle-to-Grid)
V2V	Araçtan Araca (Vehicle-to-Vehicle)

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ölçekte yaşanan enerji dönüşümü, ulaşım sektörünü derinden etkilemekte ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması yönünde hızlı bir paradigma değişimi ortaya çıkarmaktadır. Elektrikli araçlar (EA), bu dönüşümün en görünür unsurlarından biri olarak hem karbon emisyonlarının azaltılmasında hem de sürdürülebilir mobilite sistemlerinin kurulmasında stratejik bir rol üstlenmiştir. Ancak, bu teknolojik devrim beraberinde yalnızca çevresel ve ekonomik faydalar değil, aynı zamanda yeni nesil iş sağlığı ve güvenliği (İSG) risklerini de gündeme getirmiştir.

Elektrikli araçlar; bataryalı elektrikli araçlar (BEV), şarj edilebilir hibrit araçlar (PHEV) ve hibrit sistemler olmak üzere farklı güç aktarma mimarilerine sahiptir ve bu mimariler, enerji verimliliği ile güvenlik risklerini doğrudan etkilemektedir (Annamalai ve Prabha, 2023). Elektrikli araçların üretimi, bakımı, şarj altyapısı ve geri dönüşüm süreçleri; yüksek gerilimli sistemlerin, kimyasal bileşenlerin, elektromanyetik alanların ve yazılım tabanlı kontrol sistemlerinin bir arada bulunduğu karmaşık bir çalışma ortamı oluşturmaktadır. Bu durum, geleneksel iş güvenliği yaklaşımlarının ötesinde, multidisipliner bir güvenlik yönetimi anlayışını zorunlu kılmaktadır. Özellikle yüksek voltaj riski, termal kaçak, toksik gaz salınımı, elektromanyetik alan maruziyeti ve siber-fiziksel güvenlik açıkları, bu yeni sistemlerin başlıca tehlike başlıklarını oluşturmaktadır.

Elektrikli araç ekosistemi, yalnızca sürücüler veya kullanıcılar için değil, üretim tesislerinde çalışan mühendisler, bakım-onarım personeli, şarj istasyonu operatörleri ve itfaiye ekipleri için de özgün risk türleri barındırmaktadır. Örneğin, batarya paketlerinin montajı sırasında yaşanan termal kaçak olayları veya şarj istasyonlarında meydana gelen ark flaşı ve kaçak akım kazaları, dünya genelinde ciddi iş kazalarına neden olmuştur. Nitekim son yıllarda Avrupa ve Asya’da meydana gelen EV yangınları, bu teknolojinin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda iş güvenliği boyutunun da düzenlenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymuştur (Larsson vd., 2017; Chen vd., 2022).

Türkiye’de ise elektrikli araç ve şarj istasyonu altyapısındaki hızlı büyüme, mevzuatın bu gelişmelere paralel ilerlemesini zorunlu kılmaktadır. EPDK verilerine göre 2025 yılı itibarıyla 60 bini aşkın şarj noktası faaliyettedir; ancak bu altyapıların tasarım, kurulum ve

işletme süreçlerinde uygulanması gereken uluslararası güvenlik standartları (ör. IEC 60364-7-722, ISO 45001, NFPA 70E) henüz tam anlamıyla ulusal mevzuata entegre edilmemiştir. Bu durum, gerek işletme güvenliği gerekse çalışan sağlığı açısından önemli bir uygulama boşluğu yaratmaktadır. Türkiye’de 6331 sayılı Kanun kapsamında elektrikli araç ve şarj altyapısına özgü İSG rehberi bulunmamakta, bu çalışma bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu bağlamda bu tez, elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarının tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan İSG risklerini teknolojik, organizasyonel ve yasal boyutlarıyla bütüncül olarak ele almayı amaçlamaktadır. Çalışma, hem uluslararası standartlar ve literatür çerçevesinde kapsamlı bir analiz sunmakta, hem de Türkiye’deki düzenlemelerin yetersizliklerini bilimsel verilerle ortaya koymaktadır. Ayrıca, batarya yangınları, yüksek voltaj sistem arızaları, elektromanyetik alan maruziyetleri ve siber güvenlik temelli fiziksel tehditler gibi yeni tehlike kategorileri için önleyici politika ve mevzuat önerileri geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez yalnızca bir teknik inceleme değil; aynı zamanda Türkiye’nin elektromobilité dönüşüm sürecinde İSG perspektifinin stratejik önemini vurgulayan bir rehber niteliği taşımaktadır. Elektrikli araç ve şarj altyapılarının güvenli şekilde yaygınlaşabilmesi için; mühendislik, mevzuat, denetim ve eğitim alanlarında eş zamanlı bir dönüşüm gerekliliği bilimsel olarak temellendirilmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Elektromobilité teknolojilerindeki küresel ölçekte yaşanan hızlı büyüme, elektrikli araç ve enerji depolama sistemlerinin (ESS) yaşam döngüsü boyunca geleneksel İSG paradigmalarını zorlayan karmaşık ve çok boyutlu riskler ortaya çıkarmaktadır (Ouyang vd., 2023). Bu çalışma, öncelikle kapsamlı bir literatür taramasına dayanarak hazırlanan bir akademik tezin temel bulgularını ve metodolojik çerçevesini doğrulamayı, mevcut kaynakçaları güncel bilimsel çalışmalarla derinleştirmeyi ve elde edilen bulgular ışığında Türkiye Cumhuriyeti’nin ulusal İSG mevzuatındaki (6331 Sayılı Kanun çerçevesi) belirgin boşlukları tespit ederek somut politika önerileri sunmayı amaçlamaktadır.

Türkiye pazarındaki elektrikli araç penetrasyonu, bu risk yönetiminin aciliyetini doğrulamaktadır. EPDK’nın 2025 Haziran raporuna göre, elektrikli araç satışları 2023

Haziran'dan 2025 Haziran'a kadar önemli ölçüde artış göstermiş (2999 araçtan 20729 araca ulaşmıştır), bu da şarj altyapısı ve bakım gereksinimlerinin hızla arttığını kanıtlamaktadır (EPDK, 2025). Bu hızlı büyüme, yüksek voltaj enerji depolama sistemleri, termal kaçak riskleri, toksik kimyasal maruziyetleri ve siber-fiziksel tehlikeler gibi yeni nesil risklere yönelik proaktif düzenlemeler geliştirme zorunluluğunu beraberinde getirmektedir (Checkoway vd., 2011; Ouyang vd., 2023).

Bu kapsamlı analiz, EA yaşam döngüsündeki kritik riskleri üç ana kategori altında incelemektedir: Elektriksel Riskler (yüksek voltaj ve ark flaşı), Kimyasal Riskler (batarya üretimi, yangın ve geri dönüşüm toksisitesi) ve Siber-Fiziksel Riskler (yazılım ve otonom sistem güvenliği) (ISO/SAE 21434, 2021; Ouyang vd., 2023). Türkiye’de 6331 sayılı Kanun kapsamında elektrikli araç ve şarj altyapısına özgü İSG rehberi bulunmamakta, bu çalışma bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

1.2. Kapsamı

Bu tez çalışması, elektromobilité ekosisteminin iki ana bileşeni olan elektrikli araçlar ve Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarını (EVSE), İSG disiplini perspektifinden, çok boyutlu ve bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmanın kapsamı; teknik, operasyonel, yasal ve siber-fiziksel boyutlar olmak üzere dört ana eksenle yapılandırılmıştır:

1. Teknolojik ve Fiziksel Kapsam: Araştırma, Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV) ve Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV) ile sınırlandırılmış olup, Hidrojen Yakıt Hücreli (FCEV) araçlar kapsam dışı bırakılmıştır. Şarj altyapısı özelinde ise, hem Alternatif Akım (AC) hem de Doğru Akım (DC) teknolojisine sahip, halka açık ve özel kullanımlı şarj istasyonları incelenmiştir. Bu bağlamda; Lityum-iyon batarya teknolojilerinden kaynaklanan termal kaçak, Yüksek Voltaj (HV) sistemlerinden kaynaklanan elektrik çarpması ve ark flaşı (arc flash) riskleri ile şarj ünitelerinin yaydığı Elektromanyetik Alan (Electromagnetic Field - EMF) etkileri çalışmanın teknik sınırlarını oluşturmaktadır.

2. Risk Yönetimi ve Metodolojik Kapsam: Çalışma, geleneksel İSG risklerinin (fiziksel, kimyasal, ergonomik) ötesine geçerek, Endüstri 4.0 ile entegre olmuş "Siber-Fiziksel Sistemler" (CPS) kaynaklı yeni nesil riskleri de kapsamına almıştır. Özellikle şarj ağlarındaki haberleşme protokolleri (OCPP, ISO 15118) üzerinden gelebilecek siber

saldırıların, sahada fiziksel bir iş kazasına (patlama, yangın, enerji kesintisi) dönüşme potansiyeli Tehdit Analizi ve Risk Değerlendirmesi (TARA) perspektifiyle irdelenmiştir. Metodolojik olarak, risklerin yönetimi için Fine-Kinney, Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (Hazard and Operability Analysis - HAZOP) ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemlerinin entegre edildiği hibrit bir risk analiz modeli önerilmiştir.

3. Mevzuat ve Standardizasyon Kapsamı: Tez, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili alt yönetmelikleri (Şarj Hizmeti Yönetmeliği, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik vb.) merkeze alarak, Türkiye'deki mevcut yasal altyapıyı analiz etmektedir. Bu ulusal mevzuat; IEC 60364-7-722, NFPA 70/70E, UN ECE R100/R138 ve ISO 45001 gibi uluslararası standartlarla karşılaştırılarak, yasal boşluklar ve uygulama eksiklikleri tespit edilmiştir.

4. Operasyonel Süreçler ve Kısıtlar: Çalışma kapsamı, elektrikli araçların sadece sürüş güvenliği ile sınırlı kalmayıp; bakım-onarım süreçlerini, şarj operasyonlarını, acil durum müdahalelerini (itfaiye ve ilk yardım) ve batarya geri dönüşüm/bertaraf süreçlerini de içermektedir. Ancak, batarya hücre kimyasının moleküler düzeydeki laboratuvar analizleri ve elektrikli araçların aerodinamik/mekanik tasarım detayları, İSG disiplininin odak noktası dışında kaldığından bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

Özetle bu çalışma; Türkiye'de hızla gelişen elektromobilité sektöründe, çalışanların ve kullanıcıların sağlık ve güvenliğini tehdit eden riskleri kaynağında tespit etmeyi ve bu risklere yönelik proaktif, uygulanabilir ve mevzuatla uyumlu çözüm önerileri geliştirmeyi kapsamaktadır.

1.3. Yöntemi

Bu çalışma, öncelikle kapsamlı bir literatür taramasına dayanmakla birlikte, tezin temel risk önceliklendirme aracı olarak Fine-Kinney Yöntemi'ni Risk Öncelik Skoru (RÖS) benimsemiştir. Fine-Kinney yöntemi, riskleri olasılık, maruziyet ve şiddet parametrelerine göre nicel olarak değerlendiren bir risk analiz yöntemidir (Kinney ve Wiruth, 1976).

Fine-Kinney yöntemi, risk öncelik sayısını üç parametrenin çarpımıyla belirler:

$$R\ddot{O}S = P \times F \times S \quad (1)$$

Burada P olasılığı, F maruz kalma sıklığını, S ise olayın şiddetini ifade eder. Bu değerlerin çarpımıyla elde edilen RÖS, riskin öncelik derecesini sayısal olarak tanımlar. Değer büyüdükçe tehlikenin acil müdahale gereksinimi artar (Kinney ve Wiruth, 1976).

Fine-Kinney, özellikle endüstriyel tesislerdeki (örneğin, Batarya Fabrikaları) risklerin nicel olarak önceliklendirilmesi ve kontrol hiyerarşisine entegrasyonu açısından yüksek uygulanabilirlik sunmaktadır (IEC 31010, 2019). Ayrıca, metodolojik tutarlılığı sağlamak amacıyla, tezin farklı bölümlerinde (Kimyasal prosesler ve yüksek voltaj sistemleri) HAZOP ve FMEA gibi diğer sistem güvenliği analiz metotlarının potansiyel uygulama alanları da tartışılmıştır.

Risk değerlendirmesi için literatürdeki senaryolar, Alman Teknik Denetim Kurumu (Technischer Überwachungsverein Süd - TÜV SÜD) kılavuzları ve Türkiye'deki örnek işletmelerden alınan veriler temel alınmıştır.

Bu çalışma, araştırma deseninin sistematik biçimde yapılandırılmasında karma yöntem yaklaşımının temel ilkelerini esas almıştır (Creswell ve Creswell, 2018).

1.4. Tezin Önemi ve Gerekçesi

Elektrikli araç teknolojilerindeki hızlı büyüme, geleneksel iş sağlığı ve güvenliği paradigmalarının ötesinde, üç ana risk kategorisinde (elektriksel, kimyasal ve siber) yeni tehditler ortaya çıkarmaktadır (Ouyang vd., 2024). Türkiye'de ise 6331 Sayılı İSG Kanunu ve bağlı mevzuatlar, yüksek voltaj enerji depolama sistemleri (ESS), termal kaçak (thermal runaway) riskleri ve otonom/bağlantılı araç yazılımlarından kaynaklanan siber-fiziksel tehlikeler gibi yeni nesil risklere yönelik özel düzenlemeler ve risk tolerans seviyeleri açısından belirgin boşluklar içermektedir. Bu bağlamda, tezin temel araştırma sorusu şudur: Türkiye'de EA ve şarj istasyonları yaşam döngüsündeki kritik İSG riskleri (üretim, kullanım, bertaraf), mevcut ulusal İSG mevzuatı (6331 Sayılı Kanun) çerçevesinde etkin bir şekilde yönetilebilmekte midir?

2. İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ (İSG) TEMELLERİ

2.1. İSG Kavramı ve Yasal Çerçeve (ILO, 6331 Sayılı Kanun, AB Direktifleri)

İş sağlığı ve güvenliği, çalışanların sağlıklarını korumayı ve işyerinde güvenli bir çalışma ortamı sağlamayı amaçlayan multidisipliner bir alandır. Dünya genelinde İSG uygulamalarının temelini, Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) tarafından oluşturulan sözleşmeler ve tavsiyeler oluşturmaktadır. Özellikle ILO'nun 155 ve 187 sayılı sözleşmeleri, üye ülkelerin ulusal İSG politikalarının oluşturulmasına yön vermektedir. Bu belgeler, iş yerlerinde güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamının oluşturulmasını, risklerin sistematik olarak kontrol altına alınmasını ve İSG kültürünün geliştirilmesini hedeflemektedir (ILO, 2021).

Türkiye'de İSG alanındaki yasal düzenlemelerin temelini ise 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu oluşturmaktadır. Bu yasa, çalışanların sağlık ve güvenliklerini korumaya yönelik genel yükümlülükleri, işveren ve çalışan sorumluluklarını, risk değerlendirme zorunluluğunu ve eğitim süreçlerini detaylı şekilde düzenlemektedir. Kanunun 10. maddesi gereğince işverenler, işyerinde var olan veya dışarıdan gelebilecek tehlikeleri belirlemek ve gerekli önlemleri almakla yükümlüdür. Bu yükümlülük, İSG'nin proaktif bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır (Resmî Gazete, 2012).

Avrupa Birliği kapsamında ise 89/391/EEC sayılı Çerçeve Direktifi, işverenin çalışanların güvenliğini sağlama yükümlülüğünü ve risk değerlendirme zorunluluğunu açıkça ifade etmektedir. Türkiye, AB üyelik süreci kapsamında bu direktifi iç hukukuna uyarlamış ve ilgili İSG mevzuatını harmonize etmiştir. Ayrıca, ISO 45001:2018 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi standardı uluslararası düzeyde İSG uygulamalarının standardizasyonunu sağlamaktadır. Bu standart, tehlike tanımlama, risk analizi ve sürekli iyileştirme ilkelerine dayanan sistematik bir yaklaşım sunmaktadır (ISO, 2018).

Sonuç olarak, İSG'nin yasal ve kurumsal çerçevesi hem ulusal (6331 Sayılı Kanun) hem uluslararası (ILO, AB Direktifleri, ISO 45001) belgelerle güçlü bir şekilde tanımlanmış ve işyerlerinde güvenli bir ortam oluşturmak için gerekli yapı tesis edilmiştir.

Bununla birlikte, Türkiye İSG mevzuatı elektrikli araçlar ve şarj istasyonları özelinde hâlâ genel hükümler düzeyindedir. Mevcut düzenlemeler 400–800V gibi yüksek gerilimli sistemler, enerji depolama üniteleri ve batarya üretim süreçlerine yönelik özel teknik kılavuz veya uygulama standardı içermemektedir. Avrupa Birliği'nin "Directive 2006/42/EC (Makine Güvenliği Direktifi)", bu tür yüksek voltajlı sistemlerde güvenlik gereklerini daha ayrıntılı biçimde tanımlamakta ve üretici, işveren ile çalışan yükümlülüklerini teknik düzeyde belirlemektedir.

Bu durum, Türkiye'de elektromobilité alanında hızla gelişen üretim ve bakım faaliyetleri için yeni mevzuat ihtiyacını ortaya koymakta; bu tez çalışması da bu boşluğun İSG açısından değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

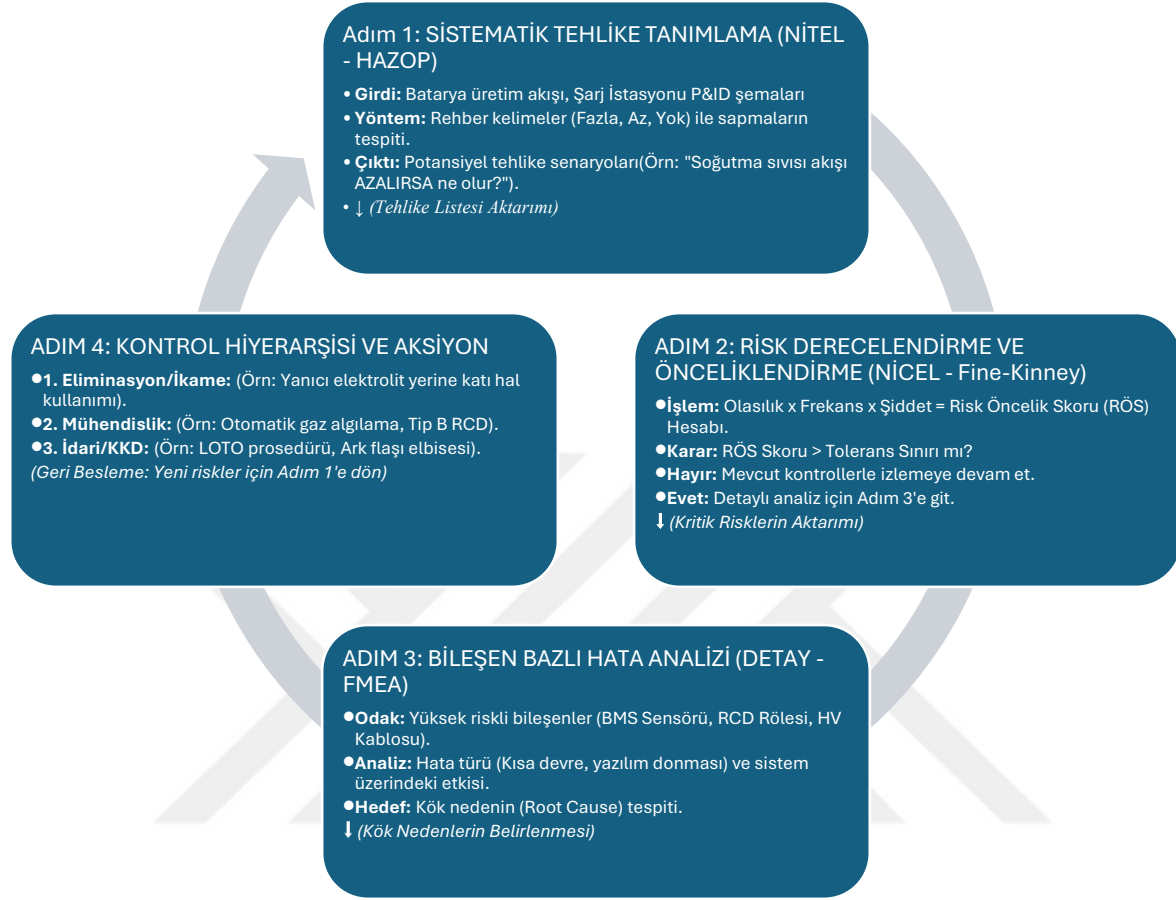
2.2. Değerlendirme Yaklaşımları

İş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının en önemli unsurlarından biri risk değerlendirme sürecidir. Bu süreç, olası tehlikelerin tanımlanması, bu tehlikelerin gerçekleşme olasılığı ile etkisinin analiz edilmesi ve uygun önlemlerin geliştirilmesini içerir. Risk değerlendirme yöntemleri, farklı sektörlerde ve uygulama alanlarında kullanılmak üzere çeşitli sistematik teknikler ile yürütülmektedir (ISO 31010, 2019).

Risk değerlendirme metotlarının seçimi, incelenen elektromobilité alanlarının doğasına bağlıdır. Örneğin, Lityum İyon Batarya Fabrikası gibi üretim tesislerinde, çok sayıda ve karmaşık riskin (kimyasal maruziyet, ergonomi, yüksek voltaj) önceliklendirilmesi için Fine-Kinney RÖS idealdir (Haimes, 2009). Öte yandan, Hızlı Şarj İstasyonu Operasyonları ve Batarya Yönetim Sistemi (BMS) gibi bileşenlerin potansiyel arıza modları, FMEA yaklaşımıyla daha derinlemesine incelenmelidir, zira FMEA, yüksek güvenilirlik gerektiren elektrikli sistemlerde kritik bileşen hatalarının sistem üzerindeki etkisini modellemekte üstündür (Triller vd., 2023).

Tez kapsamında geliştirilen ve elektromobilité ekosisteminin karmaşık yapısına (kimyasal, elektriksel ve dijital riskler) özgü olarak uyarlanan "Bütünleşik (Hibrit) Risk Yönetim Modeli"nin işleyiş şeması Şekil 2.1'de sunulmuştur. Bu modelde; HAZOP yöntemi ile süreç sapmaları nitel olarak tanımlanmakta, Fine-Kinney metodu ile riskler nicel olarak

puanlanarak önceliklendirilmekte ve yüksek riskli bileşenler için FMEA ile kök neden analizi yapılarak kontrol hiyerarşisi işletilmektedir.



Şekil 2. 1 Elektromobilite Ekosistemi İçin Önerilen Bütünleşik (Hibrit) Risk Yönetim Modeli

Fine-Kinney Yöntemi, üç parametre üzerinden riskleri derecelendirir: olasılık (P), şiddet (S) ve frekans (F). Bu parametrelerin çarpımıyla elde edilen Risk Öncelik Sayısı riskin derecesini belirler. Fine-Kinney yöntemi özellikle üretim tesislerinde ve endüstriyel uygulamalarda risklerin önceliklendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gül vd., 2022).

HAZOP yöntemi, kimya ve proses endüstrisinde geliştirilmiş olup sistematik bir şekilde süreçlerin analizini sağlar. Süreçlerdeki sapmaların nedenlerini, etkilerini ve kontrol yöntemlerini ortaya koyar. Özellikle tehlikeli kimyasalların kullanıldığı alanlarda tercih edilir (Kletz, 1999).

FMEA ise özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanılan, sistem, alt sistem ve bileşen düzeyinde arıza modlarını, bu modların etkilerini ve nedenlerini sistematik olarak tanımlayan bir yöntemdir. FMEA aynı zamanda Risk Öncelik Sayısı (RPN) hesabı ile risklerin önceliklendirilmesini sağlar (Stamatis, 2003).

Bu yöntemlerin karşılaştırmalı olarak avantajları ve sınırlılıkları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

Çizelge 2.1. Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırması

Yöntem	Uygulama Alanı	Analiz Düzeyi	Avantajı	Sınırlılığı
Fine-Kinney	Endüstriyel Tesisler	Genel Risk Analizi	Sayısal kolaylık, hızlı uygulanabilirlik	Subjektiflik, detay sınırlı
HAZOP	Proses Endüstrisi	Sistem/Süreç	Sistematik ve detaylı analiz	Zaman alıcı, uzmanlık gerektirir
FMEA	Otomotiv, Elektronik vb.	Bileşen/ Mekanik	Erken aşamada uygulanabilirlik	Yüzeysel kalabilir, sürekli güncelleme ihtiyacı

Çizelge 2.1. göre, hangi yöntem seçilirse seçilsin, İSG risk değerlendirme sürecinde bütüncül, sistematik ve sürdürülebilir bir yaklaşım benimsenmesi kritik öneme sahiptir. Özellikle elektromobilité gibi yeni teknolojilerin getirdiği karmaşık riskler karşısında bu yöntemlerin birlikte veya hibrit biçimlerde kullanılması önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında, elektromobilité sektöründeki karmaşık risklerin doğası gereği tek bir yöntemin yeterli olmadığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle, Fine-Kinney yönteminin nicel sonuçları, HAZOP analizinin sistematik bulguları ve FMEA'nın bileşen bazlı hata analizleri ile desteklenmiştir. Böylece hem genel risk düzeyleri hem de spesifik arıza modlarının neden-sonuç ilişkileri bütüncül biçimde ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, farklı risk türlerinin (elektriksel, kimyasal, ergonomik) aynı çerçevede karşılaştırılabilmesini sağlamıştır.

2.3. İSG'nin Endüstri 4.0 ve Elektromobilité ile İlişkisi

Endüstri 4.0, üretim teknolojilerinde dijitalleşmeyi, otomasyonu ve siber-fiziksel sistemleri temel alan bir devrim olarak tanımlanmaktadır. Bu dönüşüm, yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarını da köklü biçimde etkilemektedir (Kagermann vd., 2013). Özellikle nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ, artırılmış gerçeklik (AR) ve büyük veri analitiği gibi teknolojiler, İSG alanında tehlike tespiti, risk değerlendirmesi ve çalışan sağlığının korunmasına yönelik yeni fırsatlar sunmaktadır.

Türkiye’de de benzer dijital dönüşüm adımları atılmaktadır. Askerî Elektronik Sanayi (ASELSAN) ve Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG) üretim hatlarında yapay zekâ destekli İSG izleme sistemleri kullanılmaya başlanmış olup, bu sistemler sensör tabanlı veri toplama, maruziyet izleme ve erken uyarı mekanizmalarıyla çalışan güvenliğini artırmayı hedeflemektedir. Örneğin, ASELSAN, British Safety Council tarafından verilen 2022 Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Ödülü’nü kazanmıştır (ASELSAN, 2022). Ayrıca, TOGG’un sürücü izleme asistan sistemi, araç içi kameralarla göz hareketlerini izleyerek belirli süre göz kapalı kalma durumlarını algılamakta ve sürücüyü uyarı mesajlarıyla uyarmaktadır (Togg Team Türkiye, 2023).

İSG açısından, Endüstri 4.0’ın sunduğu imkânlar şunlardır:

- Giyilebilir sensörler sayesinde çalışanların maruz kaldığı sıcaklık, titreşim, gaz yoğunluğu gibi değerlerin anlık izlenmesi,
- Otomatik veri toplayan sistemler ile iş kazalarının önceden öngörülebilmesi,
- Robotik sistemlerin tehlikeli işleri üstlenmesiyle işçi maruziyetinin azaltılması,
- Artırılmış gerçeklik gözlükleri ile bakım-onarım süreçlerinde güvenli prosedürlerin adım adım yönlendirilmesi.

Elektromobilité ise elektrikli araç teknolojisinin yaygınlaşmasıyla birlikte ortaya çıkan yeni bir paradigma olarak, geleneksel otomotiv sanayisinde önemli değişiklikler doğurmaktadır. Bu değişiklikler yalnızca motor teknolojisini değil, aynı zamanda batarya üretimi, yüksek voltajlı sistemler, şarj altyapıları ve yeni iş modellerini de kapsamaktadır (Al Wahedi ve Bicer, 2024). Bu bağlamda, elektromobilité ile birlikte gelen İSG riskleri şunlardır:

- Yüksek voltaj sistemlerinde çalışan bakım personelinin elektrik çarpması riski,
- Batarya üretiminde kullanılan kimyasalların toksik etkileri,
- Şarj istasyonlarındaki yangın ve patlama riski,
- Batarya geri dönüşüm süreçlerindeki ağır metal maruziyeti.

Endüstri 4.0 ile elektromobilitenin kesişiminde, dijital teknolojilerin iş güvenliğini artırma potansiyeli öne çıkmaktadır. Örneğin, batarya üretiminde kullanılan robotik sistemler ve otonom lojistik çözümler, çalışanların tehlikeli ortamlardan uzak tutulmasını sağlar. Ayrıca, dijital ikiz (digital twin) teknolojileri sayesinde batarya sistemlerinin sanal ortamda modellenmesiyle, gerçek operasyonlara geçmeden önce risk senaryoları test edilebilir (Bauer vd., 2021).

Elektromobilité sektöründeki dijitalleşme ve otomasyon, fiziksel yükleri azaltırken yeni nesil psikososyal riskleri beraberinde getirmektedir. Avrupa İSG Ajansı'nın (EU-OSHA) raporlarına göre, algoritmik yönetim, uzaktan izleme baskısı ve sürekli değişen teknolojiye adaptasyon zorunluluğu, bakım personeli ve operatörlerde teknostres ve bilişsel aşırı yüklenme yaratmaktadır. Bu bağlamda, İSG politikaları sadece fiziksel kazaları önlemeye değil, dijital dönüşümün çalışan üzerindeki zihinsel etkilerini yönetecek 'dijital refah' (digital well-being) stratejilerini de kapsamalıdır (European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA, 2023).

Sonuç olarak, İSG kavramı Endüstri 4.0 ve elektromobilité ile birlikte yeniden şekillenmekte ve bu gelişmelere uyum sağlayabilecek esnek, dijitalleşmiş İSG sistemlerinin tasarımı gereklilik hâline gelmektedir.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araç teknolojileri, geleneksel içten yanmalı motor mimarisini köklü bir şekilde değiştirerek; üretim süreçlerinden bakım onarım faaliyetlerine, şarj altyapısından son kullanıcı deneyimine kadar yeni bir endüstriyel ekosistem yaratmıştır. Bu dönüşüm, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmakla birlikte, yüksek voltajlı batarya sistemleri, karmaşık güç elektroniği ve dijitalleşmiş üretim hatları gibi unsurlarla iş sağlığı ve güvenliği literatürüne daha önce tanımlanmamış özgün risk parametreleri kazandırmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, elektrikli araçların yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan bu teknik ve operasyonel riskler, üretim, bakım ve kullanım aşamaları ekseninde detaylı olarak incelenmiştir.

3.1. Elektrikli Araç Fabrikaları:

Elektrikli araç üretim tesisleri, geleneksel otomotiv fabrikalarına kıyasla yüksek gerilimli sistemler, batarya montaj hatları ve dijitalleşmiş üretim süreçleri nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından özgün riskler barındırmaktadır. Literatürde bu riskler; elektrik çarpması, yangın ve patlama tehlikeleri, kimyasal maruziyetler, ergonomik sorunlar ve otomasyon sistemlerinin getirdiği yeni riskler olarak sınıflandırılmaktadır (Gül vd., 2022; Amer vd., 2024).



Resim 3.1. Yüksek otomasyon teknolojileriyle donatılmış modern elektrikli araç üretim hattı ve montaj sahası temsili resim.

3.1.1. Yüksek gerilim sistemleri, yangın riski, ergonomik riskler

Özellikle yüksek gerilim sistemleri, EA fabrikalarının en kritik tehlike alanıdır. Lityum-iyon bataryaların montajı sırasında 400V ve 800V gerilim seviyeleri ile çalışılması, çalışanlar için ciddi elektrik şoku ve ark flaşı riskleri doğurmaktadır (Göçmen, 2022). Literatürde 800 V mimarisinin daha düşük akım taşıyarak iletim kayıplarını %50'ye kadar azalttığı, fakat bu durumun yalıtım ve kaçak akım tespit sistemlerinin karmaşıklığını artırdığı belirtilmiştir (Yılmaz, Kandlikar ve Emadi, 2020). 800V sistemlerde kullanılan üç seviyeli DC/DC dönüştürücü yapıları, galvanik izolasyonun sürdürülmesi açısından güvenlik avantajı sağlamakta; ancak yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle elektromanyetik parazit (EMI) ve yüzeysel ark oluşumu riskini artırmaktadır (Aghabali vd., 2019). Özellikle APU (Auxiliary Power Unit) ve entegre şarj devrelerinin aynı modül üzerinde bulunması hem 800V hem de 12V devrelerin yakın temasta olduğu karmaşık alanlarda bakım sırasında “çapraz gerilim teması” riskini artırmaktadır (Aghabali vd., 2019). Bu nedenle literatürde, üretim hatlarında izole edilmiş çalışma alanları, kilitleme/etiketleme (Lockout/Tagout- LOTO) prosedürleri ve yüksek gerilim eğitimleri zorunlu önlemler arasında gösterilmektedir (ISO, 2018; IEC, 2016).

Bunun yanında, yangın ve patlama riski batarya üretiminde ve montajında kritik bir güvenlik sorunudur. Termal kaçak, hücrelerin aşırı ısınması ve kısa devre sonucu ortaya çıkabilmekte ve üretim tesislerinde ciddi yangınlara yol açabilmektedir. Özellikle NMC ve NCA tabanlı bataryalarda bu risk daha belirgin olup, literatürde yangına dayanıklı izolasyon malzemeleri, otomatik yangın algılama ve bastırma sistemleri, düzenli acil durum tatbikatları önerilmektedir (Xiao vd., 2024).

Kimyasal maruziyetler de EA fabrikalarında öne çıkan bir diğer tehlike grubudur. Katot üretiminde kullanılan N-Metil-2-Pirolidon (NMP) gibi solventlerin solunması, çalışanlarda toksik etkilere neden olabilmektedir (Sarıkas, 2024). Ayrıca, ağır metal tozlarının solunum ve cilt yoluyla oluşturduğu riskler literatürde sıkça rapor edilmiştir. Bu nedenle yüksek verimli havalandırma sistemleri, kapalı devre üretim hatları ve HEPA filtreli lokal egzoz sistemleri önerilmektedir (Bayraktar, 2023).

Ergonomik riskler, özellikle batarya paketlerinin yüksek ağırlıkları nedeniyle kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlara karşı robotik montaj sistemleri, otomatik taşıma araçları ve ergonomik iş istasyonu tasarımları önerilmektedir (Bauer vd., 2021). Elektrikli araç üretim tesisleri ve özellikle batarya fabrikaları, geleneksel otomotiv sanayine kıyasla yüksek düzeyde toksik kimyasal maruziyet riski barındırmaktadır. Bu risklerin yönetimi, mühendislik kontrollerinin Türkiye'deki yasal zorunluluklarla ilişkilendirilmesini gerektirir.

Batarya katot üretiminde kullanılan N-Metil-2-Pirolidon (NMP) gibi solventlerin toksikolojik riskleri, Türkiye'deki Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik kapsamında belirlenen Mesleki Maruziyet Sınır Değerleri (MMSD) ile doğrudan ilişkilendirilmelidir (T.C. Resmî Gazete, 2013). Tezin mevcut bulgularında belirtilen NMP'nin reproduktif toksisitesi ve sinir sistemi üzerindeki potansiyel etkileri (Sarıkas, 2024), kapalı döngü ekstraksiyon sistemlerinin ve HEPA filtreli lokal egzoz havalandırmasının (Mühendislik Kontrolleri) birincil risk azaltma stratejisi olduğunu vurgulamaktadır. Bu mühendislik kontrolleri, maruziyetin yasal MMSD'nin altında tutulması için kritik öneme sahiptir.

Elektrikli araç yangınlarının, geleneksel içten yanmalı motor yangınlarından farklı olarak uzun süreli yeniden alevlenme ve toksik gaz açığa çıkması gibi özgün riskler taşıdığı rapor

edilmiştir (Brzezinska ve Bryant, 2022). Batarya yangınları sadece şarj sırasında değil, trafik kazaları gibi 'Mekanik İstismar' durumlarında da aniden ortaya çıkabilmektedir. Batarya paketinin darbe alması sonucu separatörün yırtılması ve iç kısa devre oluşması, saniyeler içinde termal kaçağı tetikleyebilir. Bu senaryo, kaza kırım ve kurtarma ekipleri için büyük risk oluşturduğundan, hasarlı elektrikli araçlara yaklaşırken termal kamera ile batarya sıcaklığının kontrol edilmesi ve 'gaz çıkışı' seslerinin dinlenmesi, kurtarma operasyonunun ilk adımı olmalıdır (Sun vd., 2020)

3.1.2. Akıllı üretim hatlarında İSG entegrasyonu

Endüstri 4.0 ve otomasyon teknolojileri, EA fabrikalarında hem fırsatlar hem de yeni riskler yaratmaktadır. Robotik ve yapay zekâ sistemleri, çalışanları tehlikeli işlerden uzak tutarken; insan-makine etkileşimi kaynaklı kazaların artabileceği belirtilmektedir (Kagermann vd., 2013). Bu nedenle, dijitalleşmenin sunduğu imkânlarla birlikte güvenlik kültürünün yeniden kurgulanması gerektiği vurgulanmaktadır.

Genel olarak literatür, elektrikli araç fabrikalarının İSG açısından geleneksel otomotiv üretiminden daha karmaşık bir yapı sunduğunu göstermektedir. Bu nedenle yüksek gerilimli sistemler, batarya kimyasalları ve yeni nesil üretim hatları nedeniyle bu tesislerde hibrit risk yönetimi yaklaşımlarının (ör. Fine-Kinney, HAZOP, FMEA) uygulanması önerilmektedir (Gül vd., 2022; Amer vd., 2024).

Geleneksel *Gigafactory* modelinin yanı sıra, yeni nesil elektrikli araç üretiminde Mikrofabrikalar konseptinin yükselişi, İSG yönetimi için yeni organizasyonel zorluklar yaratmaktadır (Alptekin, 2020). Bu konsept; daha az alanda yüksek otomasyon yoğunluğu, robotlarla artan insan-robot işbirliği (HRC) ve merkezi olmayan üretim yönetimi anlamına gelmektedir. Bu paradigma, dar alanda ergonomik kısıtlamaları (malzeme akışı ve bakım erişimi), otomasyon sistemlerinin acil durdurma prosedürlerini ve birden fazla küçük üretim sahasında prosedür standardizasyonu ve denetim kalitesini sağlamayı organizasyonel bir risk olarak öne çıkarmaktadır.

3.1.3 Gigacasting gelişimi ve iş sağlığı-güvenliği (İSG) perspektifi

Gigacasting (mega-casting), otomotiv endüstrisinde devrim niteliğinde bir üretim yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır. Yüksek basınçlı döküm (HPDC) makineleri aracılığıyla, aracın gövde yapısının büyük parçalarının tek blok halinde üretilmesi, parça sayısını yüzlerce bileşenden birkaç büyük döküm parçasına indirmektedir. Tesla, Model Y üretiminde bu yöntemi uygulayarak parça sayısını 300'den 2-3 parçaya düşürmüş ve maliyet, hız ve yapısal sağlamlık açısından önemli kazanımlar elde etmiştir (Burggräf vd., 2024). Benzer şekilde, Çinli üreticiler (BYD, NIO, XPeng) bu teknolojiye yoğun yatırım yaparken; Avrupa'da VW ve BMW gibi markalar da stratejik planlarında gigacasting yöntemini benimsemektedir (S&P Global Mobility, 2023). Giga-casting (Büyük Kalıp Döküm) yöntemi, yüksek basınç (6000-9000 ton) ve ergitilmiş alüminyumun yüksek sıcaklıkta kullanımı nedeniyle ciddi mekanik ve termal tehlikeler oluşturmaktadır (Triller vd., 2023). Bu süreçte çalışan maruziyetini azaltmak için ISO 12100 (Makine Güvenliği – Risk Değerlendirme ve Risk Azaltma) ve ISO 13849 (Makine Güvenliği – Kontrol Sistemleri Güvenliği) kapsamında yazılı güvenlik protokolleri oluşturulmalı ve çalışanların erişimine açık hale getirilmelidir. Bu standartlara uygun mühendislik kontrolleri ve prosedürler, yüksek basınçlı döküm hatlarında meydana gelebilecek kazaların önlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Kalıp değişimi ve hidrolik bakım faaliyetleri sırasında ortaya çıkan beklenmedik enerjilenme ve ezilme riski, Amerika Birleşik Devletleri'nde OSHA 29 CFR 1910.147 (Lockout/Tagout) standardı ile kontrol altına alınmaktadır (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2021).

Teknolojinin 2025 yılı itibarıyla geldiği noktada, kilitleme kuvvetleri 16000 tona yaklaşan 'Süper-Büyük' (Super-sized) döküm makineleri devreye alınmaya başlanmıştır (Resim 3.2). Bu ölçek artışı, hidrolik sistemlerde depolanan potansiyel enerjiyi ve dolayısıyla bakım süreçlerindeki risk büyüklüğünü artırmaktadır. Ancak süreç inovasyonları İSG açısından önemli bir kazanımı da beraberinde getirmiştir: Yang ve arkadaşları (2025) tarafından detaylandırıldığı üzere, 'ısıtma işlemi gerektirmeyen' (heat-treatment-free) yeni nesil alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi, üretim hattından yüksek sıcaklıklı çözelti fırınlarını ve su verme (quenching) havuzlarını çıkarmıştır. Bu gelişme, çalışanların termal yanık risklerine ve kimyasal buharlara maruziyetini kaynağında yok ederek (eliminasyon) proses güvenliğine doğrudan katkı sağlamaktadır (Yang vd., 2025).

Öte yandan, parça boyutlarının devasa boyutlara ulaşması, üretim sürecinde 'gaz gözenekliliği' ve 'soğuk birleşme' gibi kritik döküm kusurlarının oluşma ihtimalini artırmaktadır. Yang ve arkadaşları (2025), bu mikro yapısal hataların, aracın şasi bütünlüğünü ve çarpışma güvenliğini olumsuz etkileyebileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, giga-casting süreçlerinde çalışan güvenliğinin yanı sıra, son ürünün yapısal bütünlüğünü garanti altına alacak gelişmiş vakum sistemlerinin ve otonom kalite kontrol mekanizmalarının entegrasyonu, bütüncül güvenlik yaklaşımının bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Yang vd., 2025).



Resim 3.2. Idra Group tarafından geliştirilen yüksek tonajlı Giga Press döküm makinesi. "Giga Press" kaynağından, Idra Group tarafından, t.y., (<https://idragroup.com/en/gigapress>).

3.2. İSG Riskleri ve Analizleri

Gigacasting teknolojisinin endüstriyel ölçekte uygulanması, üretim verimliliğini artırmakla birlikte, operasyonel süreçlerde geleneksel döküm yöntemlerini aşan yeni ve yüksek risk profilleri oluşturmaktadır. Bu bölümde, süper-büyük döküm makinelerinin kurulum, işletme ve bakım aşamalarında çalışan sağlığını tehdit eden temel fiziksel, mekanik ve termal tehlikeler kategorize edilerek analiz edilmiştir.

3.2.1. Yüksek basınç ve sıcaklık riskleri

Gigacasting makineleri genellikle 6000–9000 tonluk basınç kapasitesine sahiptir. Ergitilmiş alüminyumun döküm sırasında yüksek sıcaklıklarda kullanılması, çalışanlar için ciddi yanık ve patlama riski doğurmaktadır. Ayrıca alüminyum tozlarının havada birikmesi, uygun havalandırma sistemleri bulunmadığında patlayıcı atmosfer oluşturabilmektedir (Quality Magazine, 2025).

3.2.2. Mekanik ve ezilme riskleri

Kalıp değişimi, hidrolik sistem bakımı ve ağır parçaların taşınması sırasında çalışanlar, ezilme ve sıkışma kazaları ile karşı karşıya kalabilmektedir. Özellikle pres makinelerinin bakım onarım faaliyetlerinde yüksek basınçlı hidrolik hortum patlamaları ve kalıp düşmeleri en önemli risk alanlarıdır (Burggräf vd., 2024).

3.2.3. Malzeme kalitesi ve yapısal riskler

Mega döküm parçalarında oluşabilecek çatlaklar, gözeneklilik ve plastik deformasyonlar hem ürün güvenliği hem de iş güvenliği açısından kritik sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, optik emisyon spektroskopisi (OES) ve simülasyon teknikleri ile malzeme kalitesinin sürekli izlenmesi zorunludur (Quality Magazine, 2025).

3.2.4. Onarım ve geri dönüşüm zorlukları

Tek parça dökümlerin onarımı veya geri dönüştürülmesi oldukça güçtür. Fransa'daki Otomotiv Dağıtım Federasyonu (Fédération de la Distribution Automobile- FEDA), gigacasting'in çevresel ve ekonomik riskleri nedeniyle tüketici güveni ve sürdürülebilirlik açısından riskli olabileceğini vurgulamıştır (FEDA, 2023). Bu zorluklar, geri dönüşüm tesislerinde çalışanlar için ek kesim, parçalama ve işleme riskleri doğurmaktadır.

3.2.5. Stratejik uygulama kararları

Reuters (2024) haberine göre Tesla, ilk etapta “tek parça gigacasting” yaklaşımından geri adım atarak üç parçalı gövdeye yönelmiştir. Bu karar, üretim esnekliği ve onarım kolaylığı açısından daha yönetilebilir bir risk profili sunduğunu göstermektedir. Bu durum, üreticilerin

yalnızca teknik verimlilik değil, aynı zamanda İSG ve çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini de dikkate aldığını ortaya koymaktadır.

3.3. İSG Önlemleri ve Standartlar

Gigacasting süreçlerinde iş güvenliğini sağlamak için hem makine güvenliği hem de İSG yönetim sistemleri kritik rol oynamaktadır:

- ISO 12100 ve ISO 13849: Makine güvenliği ve kontrol sistemleri için risk azaltma önlemleri.
- ISO 45001: İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri kapsamında risk temelli yaklaşım.
- Yerel OSHA ve EU-OSHA düzenlemeleri: Yüksek sıcaklık, ağır metal dumanları ve pres makineleriyle çalışmada işçi güvenliği önlemleri.
- Teknolojik Önlemler: Robotik otomasyon, acil durdurma sistemleri, sıcak metal teması için ısıya dayanıklı Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) ergonomik kaldırma ekipmanları.

Sonuç olarak; Gigacasting, otomotiv endüstrisinde üretim verimliliğini ve maliyet avantajlarını artıran yenilikçi bir yöntem olmakla birlikte, yüksek sıcaklık, mekanik basınç, yangın, ergonomi ve geri dönüşüm zorlukları gibi çok boyutlu İSG risklerini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, gigacasting uygulamaları yalnızca teknik bir üretim yeniliği olarak değil, aynı zamanda çalışan güvenliği ve sürdürülebilirlik perspektifi ile değerlendirilmelidir.

3.4. Bakım-Onarım Tesisleri

Elektrikli araç bakım ve onarım tesislerinde, yüksek gerilimli sistemlerin yapısı nedeniyle yalıtım hataları, ark flaşı olayları ve elektrik şoku riskleri mevcut olup, bu riskler bakım süreçlerinde çalışanlar için ciddi tehlikeler oluşturmaktadır. Literatürde bu tür risklerin azaltılması için LOTO prosedürleri, yüksek gerilim izoleli aletlerin kullanımı ve uygun kişisel koruyucu donanım seçimi eğitimi gibi önlemler savunulmaktadır (McGee, 2020; Bai, 2021).

Türkiye özelinde yapılan saha araştırmaları, hibrit ve elektrikli araç bakım-onarım servislerinde çalışan personelin, yüksek voltaj risklerini teorik olarak bildiği ancak pratik

güvenlik prosedürleri konusunda yetersiz kaldığını göstermektedir. Çalışanların büyük bir kısmı, konvansiyonel araçlardan elektrikli araçlara geçiş sürecinde, özellikle kişisel koruyucu donanım kullanımı ve yalıtılmış el aletleri konusunda kurumsal bir standart eksikliği yaşamaktadır. Bu durum, Türkiye'deki servis altyapısının teknik dönüşüme hazır olmasına rağmen, İSG kültürü ve mevzuat denetimi açısından acilen 6331 sayılı Kanun'a entegre edilmiş spesifik "Elektrikli Araç Bakım Güvenliği" yönetmeliklerine ihtiyaç duyduğunu doğrulamaktadır (TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2024).

TÜV SÜD'ün güncel çalışmasında, yüksek gerilim sistemlerinde çalışan tüm kadrolara yönelik üç seviyeli güvenlik eğitimi tanımlanmıştır:

- Seviye 1 – Yüksek gerilim sistemleri ile doğrudan çalışmayan personel
- Seviye 2 – Devre dışı bırakılmış sistemlerle bakım yapanlar
- Seviye 3 – Yüksek gerilim sistemleri üzerinde aktif çalışan elektrik mühendisleri

Bu yapı, bakım güvenliğini artırmak için kritik bir eğitim modeli olarak literatürde yer almaktadır (TÜV SÜD, 2025)

3.4.1. Ark flaşı riskleri

Özellikle bakım sırasında hatalı alet kullanımı veya mekanik arızalar sonucu meydana gelebilen ve tehlike kaynakları Resim 3.3'te detaylandırılan ark flaşı riskleri, ciddi yaralanmalara neden olabilmektedir. DC sistemlerde oluşan ark flaşlarının, AC sistemlerden farklı olarak sürekli enerji akışı nedeniyle daha şiddetli olduğu ve bu risklere karşı özel KKD kullanımı gerektiği Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2024) tarafından vurgulanmaktadır.



Resim 3.3. Ark flaşı tehlike kaynakları ve koruyucu ekipman gereklilikleri.

3.4.2. Kullanılacak KKD ekipmanı

OSHA ve NFPA 70E gibi standartlar KKD kategorilerini belirlemekte; örneğin izolasyonlu eldivenlerin (ASTM D120), ark flaşı koruyucu giysilerin, yüz kalkanlarının ve sert tabanlı, elektriksel dirençli ayakkabıların kullanımını önermektedir. Ayrıca, bu ekipmanların altı ayda bir test edilmesi ve “Danger High Voltage” uyarı alanlarının aktif şekilde denetimi kritik uygulamalardandır.

Ek olarak, bakım ortamlarında yangın riski önemli bir tehlikedir. IoT tabanlı sistemler, bataryalardaki anormallikleri gerçek zamanlı olarak tespit ederek erken müdahale imkânı sunmaktadır (Husaini ve Sulistiyowati, 2024). Literatürde görülen bir diğer boyut, atölye havası kalitesinin takibi: AI ve IoT ile geliştirilen sistemler, zehirli gaz yoğunluğunu otomatik kontrol ederek işçi sağlığını güvence altına almaktadır.

Son olarak, robotik uygulamalar bakım-onarım süreçlerine entegre edilerek, manuel kablo montajı esnasında çalışanları yüksek gerilimli bileşenlerden uzaklaştırmaktadır. Bu sayede hem ergonomik riskler azalmakta hem de elektriksel kazaların riski sınırlandırılmaktadır (Wang, 2024).

Çizelge 3.1. Elektrikli Araç Bakım-Onarım Tesislerinde Riskler, Önlemler ve İlgili Standartlar

Risk/Tehlike Türü	Alınması Gereken Önlemler	İlgili Standart/Mevzuat
Elektrik Çarpması (400–800V sistemler)	İzole eldiven, yüz siperi, kilitleme/etiketleme (LOTO) prosedürü uygulanmalı. Çalışma alanı bariyerlerle çevrilmelidir.	TSE EN 60903, OSHA 1910.333, ISO 45001
Termal Yanık/Ark Flaşları	Elektriksel koruma kıyafeti (ARC-rated), ısı dayanımlı eldiven, acil durum butonları.	NFPA 70E, IEC 61482
Kimyasal Maruziyet (Batarya elektroliti, asit buharı)	Kimyasal dayanımlı eldiven, gözlük, havalandırma sistemi ve sızıntı tepsileri kullanılmalıdır.	REACH, TSE EN 374, OSHA HazCom
Yangın ve Patlama Riski	Batarya söndürme ekipmanı (Class D), otomatik gaz algılama ve söndürme sistemi, acil tahliye planı.	NFPA 855, ISO 45001, 6331 Sayılı Kanun
Ergonomik Zorlanma (ağır batarya taşıma)	Mekanik kaldırma sistemleri, robotik destek, eğitimli personel görevlendirilmesi.	ISO 11228, OSHA Ergonomics Guidelines
Kayma / Düşme / Çarpma	Zemin işaretlemesi, kişisel koruyucu ayakkabı, temiz çalışma alanı.	ISO 45001, 6331/9. Madde
Gürültü ve Titreşim	Gürültü haritası hazırlanmalı, kulaklık kullanılmalı, periyodik ölçümler yapılmalı.	TSE EN ISO 9612, Gürültü Yönetmeliği
Psikososyal Riskler / Stres	Vardiya planlaması, mola aralıkları, çalışan destek programları.	ILO Stress at Work, ISO 45003

Çizelge 3.1’de sunulan risk envanteri, elektrikli araç bakım süreçlerinin geleneksel mekanik tehlikelerin ötesinde, yüksek voltaj ve kimyasal maruziyet gibi hayati riskler barındırdığını göstermektedir. Bu bağlamda, listelenen uluslararası standartlar (ISO, OSHA, NFPA),

tesislerde uygulanması gereken mühendislik kontrolleri ve doğru KKD seçimi için temel bir uyum rehberi niteliği taşımaktadır.

3.5. 400V/800V Mimari

Elektrikli araçlarda kullanılan 400 V ve 800 V mimarileri, batarya paketlerinin ve güç elektroniği sistemlerinin çalışma gerilimlerini ifade etmektedir. Bu mimari tercihi, aracın şarj süresi, performansı, kablolama ağırlığı ve sistem maliyetine doğrudan etki etmektedir. 400 V mimariler günümüzde Tesla Model 3/Y, Renault Megane E-Tech, BMW i4, Nissan Leaf, Hyundai Kona ve Kia Niro gibi birçok modelde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna karşın, Porsche Taycan, Audi e-tron GT, Hyundai Ioniq 5/6, Kia EV6 ve Lucid Air gibi yüksek performanslı modellerde 800 V mimariler tercih edilmektedir. 400 V sistemler düşük maliyetli bileşenleri ve yaygın şarj altyapısı ile avantaj sağlarken, 800 V sistemler daha yüksek şarj hızı, daha ince kablo kullanımı ve daha düşük ısınma gibi teknik üstünlükler sunmaktadır (Flash Battery, 2024; Power-Sonic, 2024). Bununla birlikte, yüksek voltaj düzeyleri, iş sağlığı ve güvenliği açısından ek riskler ve daha katı güvenlik standartları gerektirmektedir (EV Reporter, 2019).

Bununla birlikte, yüksek voltajlı sistemlerde meydana gelebilecek kazaların önemli bir bölümü yalnızca teknik arızalardan değil, insan hatalarından da kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ISO 26262 (Yol Araçlarında Fonksiyonel Güvenlik) standardı kapsamında İnsan Hatası Analizleri (Human Error Analysis – HEA) yapılması ve sonuçların risk değerlendirme sürecine entegre edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, sistem güvenliğiyle insan faktörünü bir arada değerlendirerek elektrikli araç ve şarj altyapısında daha güvenli çalışma koşullarının oluşturulmasını sağlar.

3.5.1. Elektrik şok riski, standardizasyon eksiklikleri

Yüksek voltajlı mimariler, özellikle bakım ve onarım süreçlerinde elektrik çarpması ve ark flaşı risklerini artırmaktadır. Literatürde, izolasyon hataları, uygunsuz KKD kullanımı ve prosedürel eksikliklerin ciddi iş kazalarına yol açabileceği vurgulanmaktadır. Bu nedenle, LOTO uygulamaları, yetkinlik temelli eğitimler ve izolasyonlu kişisel koruyucu donanımlar kritik önlemler arasında yer almaktadır (Linja-Aho vd., 2024).

Standardizasyon açısından, 800 V sistemlerin yaygınlaşması mevcut 400 V altyapıya sahip şarj istasyonlarında uyum sorunlarını gündeme getirmektedir. Bu durum, hem kullanıcı güvenliği hem de altyapı sürdürülebilirliği açısından standart eksikliklerini ortaya çıkarmaktadır. Literatürde, megawatt düzeyinde şarj kapasiteleri (örneğin Megawatt Charging System) ve 1000 V üzeri mimarilerin ticari araçlarda denenmeye başlamasıyla birlikte bu eksikliklerin daha da kritik hale geleceği belirtilmektedir (CharIN, 2023; ResearchInChina, 2025).

3.5.2 IEC 61851 ve ISO 6469-3 değerlendirmeleri

Elektrikli araçlarda yüksek voltajlı mimarilerin güvenliğini sağlamak için uluslararası standartlar büyük önem taşımaktadır. IEC 61851 serisi, elektrikli araçların iletken şarj sistemlerine ilişkin güvenlik gerekliliklerini düzenlemekte, özellikle kullanıcıların şarj sürecinde elektrik çarpmasına karşı korunmasını hedeflemektedir (IEC, 2017).

ISO 6469-3:2021 ise elektrikli araçların yüksek voltaj sistemlerinde elektriksel güvenlik önlemlerini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Standardın içeriğinde yalıtım direnci, kısa devre koruma, termal olaylara karşı koruma mekanizmaları ve eş potansiyel bağlantılar gibi güvenlik önlemleri yer almaktadır (ISO, 2021). Literatürde, bu standartların 400 V ve 800 V sistemlerde güvenliği sağlamada temel referans olduğu, ancak 1000 V üzeri sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte güncellenme ihtiyacının doğacağına işaret edilmektedir (ResearchInChina, 2025).

Çizelge 3.2. 400V/800V Mimari Sistemlerde Riskler ve Standartlar

Konu	Standart / Referans Düzeyleri	Araştırma Bulguları	Kaynaklar
Elektrik şok riski	OSHA 1910.132; ISO 6469-3	800 V sistemlerde şok riski daha yüksektir; KKD ve izolasyon kritik.	EV Reporter (2019); Flash Battery (2024)
Standardizasyon eksiklikleri	IEC 61851 serisi	400 V altyapı ile 800 V araçlar arasında uyumsuzluk sorunları bulunmaktadır.	Power-Sonic (2024)
IEC 61851 değerlendirme esi	IEC 61851-1 (şarj güvenliği)	Şarj istasyonlarında kullanıcıların elektrik çarpmasına karşı korunmasını hedefler.	IEC (2017)
ISO 6469-3 değerlendirme esi	ISO 6469-3:2021 (araç içi güvenlik)	Yalıtım, kısa devre ve termal korumaları tanımlar; >1000 V sistemlerde güncelleme ihtiyacı vardır.	ISO (2021); ResearchInChina (2025)

Çizelge 3.2’de sunulan karşılaştırma, voltaj mimarisindeki yükselişin (400V’tan 800V’a geçiş) iş güvenliği risklerini ve koruma gerekliliklerini doğrudan artırdığını göstermektedir. Mevcut IEC ve ISO standartları temel güvenlik çerçevesini çizse de, bulgular özellikle 1000V üzeri gelecek nesil sistemler ve şarj altyapısı uyumsuzlukları için mevzuatın teknolojik gelişime paralel olarak dinamik biçimde güncellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.6. Manyetik Alanlar

Elektrikli araçların güç elektroniği sistemleri ve inverterleri, araç içerisinde elektromanyetik alan oluşumuna neden olmaktadır. Bu alanlar, özellikle sürücüler, yolcular ve bakım personeli için potansiyel maruziyet riski taşımaktadır. EMF maruziyeti; şiddet, frekans ve süre parametreleri ile ilişkili olarak farklı sağlık etkilerine yol açabilmektedir. Bu nedenle,

elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri iş sağlığı ve güvenliği açısından önemli bir araştırma alanıdır.

Türkiye’de elektromanyetik alan ölçümleri için TSE EN 50499 standardı temel alınmakta, ancak elektrikli araç şarj kabinleri ve yüksek güçlü DC dönüştürücü alanlarında bu ölçümlerin düzenli yapılmadığı görülmektedir (Türk Standardları Enstitüsü, 2019). Bu durum, özellikle bakım personeli ve uzun süreli maruziyete sahip çalışanlar için potansiyel bir İSG açığı oluşturmaktadır.

Elektrikli araç şarj istasyonlarında elektromanyetik alan maruziyeti, uzun vadeli sağlık etkileri açısından incelenmesi gereken bir konudur. Dünya Sağlık Örgütü’nün (2017) rehberine göre, 0–300 GHz aralığında maruziyet ölçümleri düzenli olarak yapılmalı ve işverenler tarafından raporlanmalıdır. TSE EN 50499:2019 standardı da bu ölçümler için Türkiye’de geçerli teknik çerçeveyi tanımlar. Bu kapsamda, şarj istasyonlarında çalışan personelin EMF maruziyetinin kayıt altına alınması ve yıllık izleme programına dahil edilmesi önerilmektedir.

Elektrikli araç teknolojisindeki yeni yönelimlerden biri olan Kablosuz Güç Aktarımı (WPT) sistemleri, fiziksel kablo bağlantısı risklerini (takılma, elektrik çarpması) ortadan kaldırırsa da, yüksek frekanslı EMF maruziyeti açısından yeni bir İSG riski doğurmaktadır. Endüktif şarj sistemlerinin tasarımı üzerine yapılan çalışmalar, verici ve alıcı bobinler arasındaki hizalama hatalarının (misalignment), kaçak manyetik alan seviyelerini artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, şarj pedi ile araç arasına girebilecek metal cisimlerin aşırı ısınarak yangın riski oluşturmaması için, bu sistemlerde Yabancı Cisim Algılama (FOD) sensörlerinin bulunması ve periyodik olarak test edilmesi bir güvenlik zorunluluğu olarak standartlara eklenmelidir (Cardoso, 2023; Aslan, 2024; SAE J2954, 2020; ICNIRP, 2020).

3.6.1. Manyetik Alan Maruziyeti, ICNIRP Sınırları ve Uzun Vadeli Sağlık Etkileri

Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) (2020) kılavuzları, 100 kHz–300 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik alanlara yönelik hem temel kısıtlamaları (doku içinde indüklenen alanlar) hem de referans seviyeleri (çevresel ölçüm değerleri) belirlemektedir. Bu limitler, kısa süreli etkiler (ör. sinir stimülasyonu,

termal etkiler) için güvenlik sağlamayı hedeflemekte, ancak uzun vadeli sağlık etkileri konusunda kesin bir kanıt bulunmamaktadır (ICNIRP, 2020).

Elektrikli araç kabinlerinde yapılan ölçümler, düşük frekanslı manyetik alanların genellikle ICNIRP sınırlarının altında kaldığını göstermektedir. Tan ve ark. (2023), araç kabininde yapılan ölçümlerde ICNIRP ve Çin GB 8702-2014 standardı limitlerinin altında değerler bulmuş, ayrıca simülasyon ve deneysel sonuçların %15'ten az fark gösterdiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde, Hristov, Stefanov ve Kostov (2020), tarafından yürütülen bir çalışmada, elektrikli ve hibrit araçlarda farklı oturma pozisyonlarında yapılan ölçümler, ICNIRP ve Bulgar standartlarının altında değerler ortaya koymuştur.

Avrupa Komisyonu'nun JRC raporu (2020), elektrikli araçlarda ölçülen manyetik alanların, ICNIRP referans değerlerinin en yüksek bölgelerde %14–18 seviyesinde, ön yolcu baş hizasında ise yalnızca %1,5 seviyesinde kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca FP7 programı kapsamında yürütülen bir araştırmada, elektrikli araç içi manyetik alan maruziyetinin içten yanmalı motorlu araçlara göre daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

EMF'nin uzun vadeli sağlık etkileri ise halen tartışmalıdır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), düşük frekanslı manyetik alan maruziyeti ile çocukluk çağı lösemisi arasında olası bir ilişki olabileceğini belirtmekte, ancak nedensel bir bağ kurulamadığını vurgulamaktadır. Çalışan maruziyetleri üzerine yapılan araştırmalarda ise elektrik üretimi gibi sektörlerde daha yüksek EMF düzeyleri rapor edilmiş, buna karşın elektrikli araç içi kabinlerde maruziyetin sınırlı düzeyde kaldığı bulunmuştur (Hansson-Mild vd., 2023).

Çizelge 3.3. Elektrikli Araçlarda Manyetik Alan Maruziyeti ve Standartlar

Risk Faktörü / Bulgular	Standart / Referans Düzeyleri	Araştırma Bulguları	Kaynaklar
Düşük frekanslı manyetik alan maruziyeti (B- alanı, indüklenen E- alanı)	ICNIRP (2020) – 100 kHz–300 GHz için sınırlar belirlenmiştir. GB 8702-2014 (Çin) – ulusal limitler.	EV kabininde ölçülen değerler ICNIRP ve GB 8702-2014 sınırlarının altında bulunmuştur. Simülasyon–test farkı %15’in altındadır.	Tan vd. (2023)
Yolcu baş hizasında EMF	ICNIRP referans seviyeleri	JRC raporuna göre, ön yolcu baş hizasında ölçülen EMF, referans değerinin yalnızca %1,5’i seviyesindedir.	JRC (2020)
Araç içi EMF dağılımı	ICNIRP (2020); Bulgar ulusal standartları.	Elektrikli ve hibrit araçlarda farklı noktalarda yapılan ölçümler, tüm değerlerin ICNIRP ve ulusal sınırların altında olduğunu göstermiştir.	Hristov vd. (2020)
Kümülatif sağlık etkileri	DSÖ değerlendirmeleri.	Çocukluk çağı lösemisi ile ELF-MF arasında olası ilişki bildirilmiş, ancak nedensellik doğrulanmamıştır.	DSÖ (2016)
Çalışan maruziyeti (enerji üretimi vb.)	İş sağlığı limitleri (ILO, EU-OSHA rehberleri).	Elektrik üretiminde çalışan işçilerde EV içi kabinlere kıyasla daha yüksek EMF düzeyi rapor edilmiştir.	Hansson-Mild vd. (2023)

Çizelge 3.3’te derlenen literatür verileri, elektrikli araç kabinlerindeki elektromanyetik alan maruziyetinin, ICNIRP tarafından belirlenen uluslararası güvenlik limitlerinin belirgin şekilde altında kaldığını kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verileri ışığında; değerler anlık (akut) maruziyet açısından güvenli kabul edilse bile,

kümülatif sağlık etkilerine yönelik epidemiyolojik belirsizliklerin devam etmesi, bu parametrenin sürekli izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

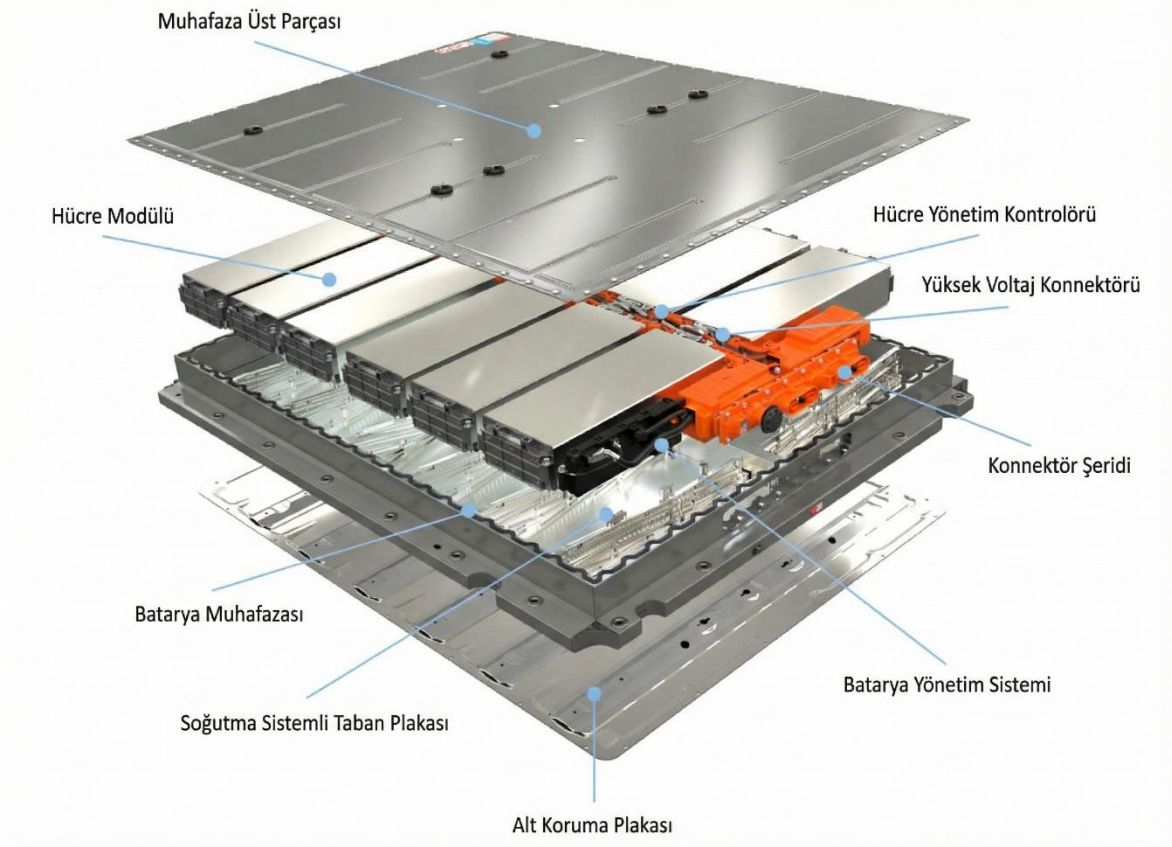


4. BATARYALAR

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte bu araçların güç kaynağı olan bataryaların iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bataryalar yalnızca enerji depolama işlevi görmeyip aynı zamanda yüksek gerilim, kimyasal reaksiyonlar, termal olaylar ve mekanik etkileşimler yoluyla potansiyel risk kaynaklarıdır (Xiao vd., 2024). Bu bölümde elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar 9 ana başlıkta incelenecek; kullanılan batarya teknolojileri, üretim süreçleri, mimariler, bakım ve onarım uygulamaları, geri dönüşüm sistemleri, termal yönetim yöntemleri ve ilgili mevzuat ile standartlar İSG perspektifinden değerlendirilecektir.

4.1. Elektrikli Araç Batarya Teknolojileri: Türler ve İSG Perspektifi

Günümüzde elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan batarya teknolojileri lityum-iyon (Li-ion), nikel-metal hidrit (NiMH) ve katı hal bataryalarıdır. Li-ion bataryalar yüksek enerji yoğunlukları, hafiflikleri ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle tercih edilmektedir (Saleh, 2021). Bununla birlikte bu bataryalar, hücre içi kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ısınma, kısa devre ve termal kaçak riski taşımaktadır. Özellikle anot kısmında yüksek entropili oksit (HEO) gibi gelişmiş malzemelerin kullanımıyla enerji kapasitesi artırılmakta, fakat bu durum içsel güvenlik kontrollerini daha da kritik hâle getirmektedir (Bayraktar, 2023). Nikel-metal hidrit bataryalar ise daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmakla birlikte termal kararlılık açısından avantaj sağlayabilir. Batarya türü seçiminde sadece enerji verimliliği değil, aynı zamanda iş güvenliği riskleri de göz önünde bulundurulmalıdır (Xiao vd., 2024).



Şekil 4.1. Örnek Elektrikli araç bataryası.

Görselde, lityum-iyon batarya paketinin modüler yapısı ve güvenliği sağlayan alt sistemler detaylandırılmıştır. İSG açısından en kritik bileşenlerden biri olan Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System - BMS), hücrelerin voltaj ve ısı değerlerini anlık izleyerek termal kaçışı (thermal runaway) önleyici bir bariyer görevi görür. Bataryanın tabanında yer alan sıvı soğutma plakası (Cooling system), şarj ve deşarj sırasındaki ısı yükünü yönetirken; güçlendirilmiş dış muhafaza (Housing/Underbody protection), hücre modüllerini ve yüksek voltaj bağlantılarını (High-voltage connector) dışarıdan gelebilecek mekanik darbelere ve çevresel etkilere karşı izole etmektedir (Cousin, 2025).

Çizelge 4.1. Temel Batarya Türleri ve İSG Karşılaştırması

Batarya Türü	Enerji Yoğunluğu	Yangın Riski	Kimyasal Tehlike	İSG Açısından Not
Lityum-İyon	Yüksek	Yüksek	Orta	Yaygın, dikkat gerektirir
Katı Hal (Solid-State)	Çok Yüksek	Düşük	Toz riski (seramik)	Üretimde özel havalandırma
Li-S (Lityum Sülfür)	Orta	Orta	SOx gazı riski	Gaz izleme zorunluluğu
Sodyum-İyon	Orta	Düşük.	Belirsiz	Yeni risk profili

Kaynaklar: Saleh (2021); Bayraktar (2023); Amer vd. (2024); Xiao vd. (2024).

Çizelge 4.1. 'e göre;

- Lityum-iyon Bataryalar: Yüksek voltaj (>400V), termal kaçak riski, yangın ve patlama tehlikeleri barındırır.
- Solid-State Bataryalar: Katı elektrolit kullanımı sayesinde termal kaçak riski daha düşüktür ancak üretim maliyetleri yüksektir.
- Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄): Göreceli olarak daha güvenlidir fakat enerji yoğunluğu düşüktür.
- Lityum Sülfür (Li-S) ve Sodyum-iyon (Na-ion) gibi alternatif teknolojiler, kaynak güvenliği ve maliyet avantajı sağlamayı hedeflemektedir (Yılmaz vd., 2013).

4.2. Batarya Üretim Süreçlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği

Batarya üretim süreçleri, kimyasal reaksiyonlar ve yüksek sıcaklık işlemleri içerdiği için çok sayıda İSG riskini beraberinde getirmektedir. Özellikle LiFePO₄ (LFP) ve LVP gibi gelişmiş katot malzemelerinin üretiminde kullanılan solventler (örneğin N-Metil-2-Pirolidon, NMP), çalışanlar için hem solunum yoluyla hem de cilt temasıyla toksik maruziyet riski oluşturur (Sarıkaş, 2024). Solid-state bataryaların üretiminde kullanılan seramik bazlı elektrolitler ise solunabilir toz partikülleri ve yüksek sıcaklıkta sinterleme işlemleri nedeniyle ilave risk

faktörleri yaratmaktadır (Ali vd., 2024). Özellikle manganez bileşiklerine uzun süreli maruziyetin nörotoksik etkileri literatürde açık biçimde ortaya konmuştur (Rodrigues vd., 2021). Üretim alanlarında kuru oda teknolojisi, yüksek verimli havalandırma sistemleri, toz toplama sistemleri ve patlayıcı ortam dedektörleri ile desteklenmiş kapalı devre üretim hatları İSG açısından zorunludur. Bayraktar (2023) üretim süreçlerinde kullanılan nanoparçacıkların da İSG açısından ayrı bir tehdit oluşturduğunu ve bu risklerin mutlaka düzenli izlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, batarya üretiminde grafit ve karbon esaslı bileşiklere maruziyetin, solunum yolu hastalıkları açısından yüksek risk oluşturduğu NIOSH (2019) tarafından rapor edilmiştir.

Lityum-iyon batarya üretiminde başlıca tehlikelerden biri LiPF₆ gibi elektrolitlerin dökülmesi, NMP gibi VOC içeren çözücülerin solunması ve statik elektrik kaynaklı patlama riskidir. Solid-state bataryalarda ise sıvı elektrolit yerine kullanılan seramik tozları (örneğin LiTaO₃) hem yüksek sıcaklıkta üretim zorunluluğu hem de partikül maruziyeti açısından ek riskler taşır. Bu tür ortamlarda çalışanların TS EN 689 standardına göre maruziyet ölçümleri yapılmalı, HEPA filtreli yerel egzoz sistemleri kurulmalı ve kimyasal geçirmez KKD kullanımı zorunlu hale getirilmelidir (Bayraktar, 2023).

Kritik Tehlikeler:

- Elektrolit Maruziyeti: LiPF₆ gibi toksik elektrolitlerin cilt ve gözle teması ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir.
- Termal Kaçak: Lityum hücrelerde iç kısa devre oluşması, hızlı sıcaklık artışına ve yangına neden olabilir.
- Statik Elektrik: Tozlu üretim ortamlarında patlayıcı ortam riski oluşturabilir.
- Patlayıcı Gazlar: Hidrojen ve CO gibi gazlar, hücre üretimi sırasında açığa çıkabilir.

Çizelge 4.2. Batarya üretim süreçlerinde öne çıkan İSG riskleri

Süreç Adımı	Risk Tipi	Önlem Önerisi
Elektrot Kaplama	Toksik solvent buharı	HEPA filtreli havalandırma, gaz algılayıcı
Hücre Montajı	Elektrik çarpması	İzolasyon önlemleri, KKD
Test ve Kalibrasyon	Yangın riski	Isı dedektörleri, yangın söndürücüler

Kaynaklar: (Kurt 2022; Bayraktar 2023; Sarıkış 2024).

Çizelge 4.2’de sunulan süreç bazlı risk analizi, batarya üretim hattının homojen bir tehlike yapısına sahip olmadığını; aksine 'kimyasal', 'elektriksel' ve 'termal' risklerin işlem adımlarına göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, elektrot kaplama aşamasındaki solvent buharları için kaynağında kontrol (lokal havalandırma) öncelikliyen, test ve kalibrasyon aşamalarında termal kararlılığın izlenmesi (aktif sensörler) hayati önem taşımaktadır. Literatür verileriyle uyumlu olan bu Çizelge, İSG önlemlerinin üretim teknolojisiyle eş zamanlı olarak tasarlanması gerekliliğini vurgulamaktadır.

4.3 Batarya Mimarilerinin Güvenlik Riskleri

Modern elektrikli araç bataryaları genellikle 400V ya da 800V mimari üzerine kuruludur. Bu yüksek voltaj seviyeleri, şarj sürelerini azaltırken, elektrik çarpması, ark oluşumu ve termal kaçak gibi ciddi İSG risklerini artırmaktadır (Amer vd., 2024). Kurt (2022), batarya sistemlerinin fiziksel modelleme süreçlerinde yüksek voltajlı mimarilerin detaylı güvenlik analizlerinin yapılması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca batarya modül tasarımında hücreler arası ısı geçişini önleyecek fiziksel bariyerler ve yangına karşı dayanıklı malzemelerin kullanımı önerilmektedir. Bu bölümde çalışacak teknik personelin yüksek voltaj ortamlarında çalışmaya uygun olarak sertifikalandırılmış olması gerekmektedir (Göçmen, 2022).

Soğutma sistemlerinin arızalanması, özellikle yüksek enerji yoğunluklu sistemlerde termal kaçak riskini artırmakta ve batarya hücreleri arasında domino etkisiyle yangına neden olabilmektedir. Göçmen (2022), soğutma sistemlerinin yetersizliği durumunda ısı dağılımının düzensizleştiğini ve bu nedenle hücre sıcaklıklarının kritik eşiklerin üzerine çıkabildiğini göstermiştir. Bu sebeple aktif termal yönetim sistemlerinin çift yedekli yapılarda tasarlanması ve düzenli kontrol sistemlerine entegre edilmesi önerilmektedir.

Çizelge 4.3. Batarya gerilim mimarileri ve İSG karşılaştırması (Kurt, 2022; Amer vd., 2024).

Mimari Tipi	Gerilim Seviyesi	Avantajı	İSG Riski
400V	Orta	Yaygın sistem	Elektrik çarpması riski
800V	Yüksek	Hızlı şarj	Ark oluşumu, yalıtım ihtiyacı

Çizelge 4.3'teki veriler ışığında; otomotiv endüstrisinin 400V standardından 800V mimarisine geçişi, şarj performansını artırırken İSG risk profilini de değiştirmektedir. Voltaj seviyesinin iki katına çıkması, riskin sadece 'elektrik çarpması' ile sınırlı kalmayıp, daha yıkıcı etkilere sahip 'ark oluşumu' ve 'yalıtım delinmesi' tehlikelerine evrilmesine neden olmaktadır. Bu Çizelge, 800V sistemlerde çalışacak personelin standart elektrik eğitimi yerine, ark flaşı ve yüksek gerilim izolasyonu konusunda özelleşmiş sertifikasyonlara sahip olması gerektiğini doğrulamaktadır.

4.4. Batarya Bakım ve Onarımında İSG Riskleri

Batarya sistemlerinin bakım ve onarım süreçlerinde karşılaşılan başlıca riskler elektrik çarpması, kimyasal yanıklar, termal olaylar ve toksik gaz salımıdır. Özellikle batarya paketlerinin sökülmesi sırasında robotik demontaj sistemlerinin kullanılması operatör güvenliğini artırmaktadır (Zang vd., 2024). Ayrıca, batarya bakım protokollerinin IEC 62133, ISO 6469-1 ve ISO 26262 gibi uluslararası standartlara uygun şekilde hazırlanması gerekir. Saleh (2021), NiMH ve Li-ion bataryalar arasındaki bakım gereksinimlerinin farklılık gösterdiğini ve İSG açısından bu farkların dikkate alınmasının kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Hasarlı bataryaların taşınması ve bertarafı özel dikkat gerektirir. Fiziksel olarak hasar görmüş bataryalar, içerisindeki enerji nedeniyle patlama, elektriksel şok ve toksik gaz yayımı gibi riskler oluşturur. Zubi vd. (2018) bu tür bataryaların inert atmosferli muhafaza kutularında taşınması gerektiğini ve KKD kullanımı zorunluluğunun altını çizmektedir. Ayrıca, bu bataryaların bertarafı sırasında elektro-kimyasal stabilite gözetilerek özel nötralizasyon işlemleri uygulanmalıdır (Ali vd., 2024).

Batarya bakım ve bertaraf süreçleri ciddi İSG risklerini içermektedir. Özellikle eskimiş veya hasar görmüş bataryaların yüksek enerji içeriyor olması, elektriksel şok, yangın, patlama ve toksik gaz yayılımı gibi tehlikeleri beraberinde getirmektedir. Zubi vd. (2018), bu tür bataryaların taşınması, sökülmesi ve imha edilmesi sırasında özelleşmiş eğitim almış personelin çalışması gerektiğini ve KKD kullanımının zorunlu olduğunu belirtmiştir.

Bakım işlemleri sırasında en sık karşılaşılan tehlikeler arasında gerilim altında çalışma, hücre delinmesi sonucu kimyasal sızıntı ve yangın riski yer almaktadır. Özellikle robotik

demontaj sistemlerinin kullanımı, insan müdahalesini azaltarak güvenliğini artırabilir (Zang vd., 2022).

Bennett (2023), yapay zekâ etiği üzerine geliştirdiği “AI Committee on Ethics (AICE)” çerçevesiyle, Seviye 5 otonom araçlarda sorumluluk aktarımının yalnızca teknik değil, aynı zamanda etik bir denetim sorunu olduğunu vurgulamıştır. Bu çerçeve, insan ve makine arasındaki hesap verebilirlik zincirinin yeniden tanımlanmasını önererek, otonom sistemlerin iş güvenliği süreçlerinde etik gözetim mekanizmalarıyla desteklenmesi gerektiğini belirtmektedir.

Ayrıca, sökülen bataryaların bertarafı için tehlikeli atık prosedürleri doğrultusunda hareket edilmesi; etiketleme, geçici depolama ve nakliye süreçlerinin izlenebilir ve kontrol altında olması gerekir.

Çizelge 4.4. Batarya bakım ve bertaraf süreçlerinde başlıca İSG riskleri ve önlemler.

Süreç	Risk Türü	Önem Önerisi
Batarya Sökümü	Elektrik çarpması, yangın	Gerilim kontrolü, izolasyon eldiveni, KKD
Fiziksel Hasar	Patlama, termal kaçak	Robotik demontaj sistemleri, korumalı alan
Bertaraf/Nakliye	Kimyasal sızıntı, toksik gaz	Tehlikeli madde prosedürü, kapalı taşıma sistemi

Çizelge 4.4’te özetlenen risk hiyerarşisi, batarya bakım ve bertaraf süreçlerinin standart bir 'tamir' işlemi değil, yüksek riskli bir 'tehlikeli madde yönetimi' operasyonu olduğunu göstermektedir. Özellikle hasarlı bataryaların sökümünde insan faktörünün devreden çıkarılarak robotik sistemlere geçilmesi Çizelgedeki 'patlama ve termal kaçak' riskini minimize edecek en etkin mühendislik kontrolü olarak öne çıkmaktadır (Zubi vd., 2018; Kurt, 2022; Xiao vd., 2024; Zang vd., 2024). Bertaraf aşamasındaki kimyasal sızıntı riski ise, sürecin atölye sınırlarını aşarak lojistik ve çevresel güvenlik protokolleriyle entegre edilmesi gerektiğini doğrulamaktadır.

4.5. Geri Dönüşüm Süreçlerinde İSG Riskleri

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömürlerinin sonuna geldiğinde güvenli şekilde geri dönüştürülmeleri hem çevresel sürdürülebilirlik hem de çalışan güvenliği açısından kritik önemdedir. Geri dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan başlıca İSG riskleri, ağır metal tozlarının solunması, asidik buharların açığa çıkması, ısıtma işlemleri sırasında yangın oluşması ve malzeme ayrıştırma sırasında kimyasal yanıklardır (Koca ve Yılmaz, 2023; Xiao vd., 2024).

Kooperatif temelli geri dönüşüm modelleri, sürecin belirli aşamalarını merkezileştirerek hem daha yüksek kontrol hem de izlenebilirlik sağlamaktadır. Bu sistemlerde, tehlikeli atıkların yaşam döngüsü boyunca takibi ve yasal düzenlemelere uygunluğun artırılması amacıyla blockchain teknolojisinin entegrasyonu önerilmektedir (Xiao vd., 2024). Ayrıca, bu tesislerde çalışanların maruz kaldığı tehlikelerin azaltılması için kapalı devre ekstraksiyon sistemleri ve gelişmiş filtrasyon donanımları kritik öneme sahiptir.

Öte yandan, elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sonunda bertaraf edilmesi sürecinde, manuel demontaj işlemleri çalışanları doğrudan yüksek voltaj, toksik gaz sızıntısı ve patlama riskleriyle karşı karşıya bırakmaktadır. Bu risklerin kaynağında yok edilmesi (eliminasyon) ilkesi gereği, insan operatörlerin tehlikeli bölgeden uzaklaştırıldığı robotik demontaj sistemlerine geçiş bir İSG zorunluluğudur. Zang ve arkadaşları (2024) tarafından belirtildiği üzere; bilgisayarlı görü (computer vision) ve derin öğrenme destekli robot kollar, batarya paketlerinin değişken yapılarına uyum sağlayarak söküm işlemini otonom gerçekleştirmekte, böylece kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını ve kimyasal maruziyeti minimize etmektedir (Zang vd., 2024)

Ek olarak, ağır metal maruziyetine karşı biyolojik izleme (örneğin kanda nikel veya kobalt düzeyi ölçümü) zorunlu hale getirilmelidir. Bu tür biyolojik izleme programları, çalışan sağlığının korunmasında erken uyarı mekanizması işlevi görür ve kronik toksisite risklerini azaltır.

Çizelge 4.5. Geri dönüşüm süreçlerinde başlıca İSG tehditleri

Süreç Aşaması	Risk Türü	Önerilen Önlem
Ayıklama	Metal tozu	Maskeler, vakumlu toplama sistemleri
Ekstraksiyon	Asidik buharlar	Kapalı devre sistem, gaz algılayıcılar
Isıl işlem	Yangın riski	Otomatik yangın bastırma sistemleri
Manuel ayırma	Kesici-delici yaralanma	Kevlar eldiven, metal dedektörleri
Akışkan ayırıştırma	Toksik kimyasal karışım	Kimyasal uyumlu tanklar, operatör eğitimleri

Çizelge 4.5.' te de belirtildiği gibi geri dönüşüm tesislerinde çalışan personelin hem kimyasal güvenlik hem de ergonomi açısından eğitilmesi ve sürekli gözlem altında tutulması gerekir. Bu kapsamda TS EN ISO 45001 standardına uygun bir İSG yönetim sistemi oluşturulmalıdır (Göçmen, 2022).

4.6. Batarya Fabrikaları İçin Örnek Risk Analizi (Fine-Kinney Yöntemi)

Batarya üretim tesisleri, yüksek kimyasal tehlikeler ve yangın riskleri barındırması nedeniyle sistematik bir risk değerlendirmesine ihtiyaç duyar. Bu bağlamda Fine-Kinney yöntemi, olasılık (P), şiddet (S) ve frekans (F) değerlerinin çarpımıyla hesaplanan risk öncelik sayısı üzerinden risk düzeyini belirlemeye olanak tanır. Bu yöntem, özellikle tehlikelerin sınıflandırılması, önceliklendirilmesi ve önlem stratejilerinin belirlenmesi açısından endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gül vd., 2022).

Çizelge 4.6. Lityum-iyon batarya fabrikası için Fine-Kinney risk analizi

Tehlike	Olasılık (P)	Şiddet (S)	Frekans (F)	RÖS = P×S×F	Risk Düzeyi	Öneri
Elektrolit dökülmesi (LiPF ₆)	4	5	4	80	Yüksek	Kapalı sistem dolum, kimyasal geçirmez KKD, dökülme kitleri
Statik elektrik kaynaklı patlama	3	5	4	60	Yüksek	Topraklama sistemleri, antistatik zemin ve giysi
Termal kaçak (yangın)	3	5	3	45	Orta	Sıcaklık sensörleri, yangın algılama-söndürme sistemi
Solvent buharı solunması	4	4	3	48	Orta	Lokal havalandırma, VOC dedektörleri, maske zorunluluğu
Malzeme taşıma (ergonomik risk)	3	3	3	27	Düşük	Ergonomik taşıma ekipmanları, personel eğitimi

Not: Değerlendirme 5’li skalaya göre yapılmıştır (1: Düşük, 5: Çok Yüksek). $RÖS \geq 70$ için “acil müdahale” gereklidir.

Çizelge 4.6.'da bir lityum-iyon batarya üretim tesisinde karşılaşılabilecek başlıca riskler için örnek bir Fine-Kinney değerlendirmesi sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre batarya üretim alanında kimyasal maruziyet, termal yanık ve elektrik çarpması riskleri öncelikli olarak belirlenmiştir.

Risk puanları 70'in üzerinde olan alanlarda mühendislik kontrollerine öncelik verilmelidir. Bu kapsamda havalandırma sistemlerinin iyileştirilmesi, kapalı sistem dolum ekipmanlarının kullanılması ve otomatik acil durdurma sistemlerinin devreye alınması önerilmektedir. Ayrıca, risk seviyeleri periyodik olarak yeniden değerlendirilerek alınan önlemlerin etkinliği izlenmelidir.

Yangın önleme stratejileri, bu riskin proaktif biçimde kontrol altına alınması için hayati önem taşır. Özellikle yüksek enerji yoğunluklu hücrelerde (örneğin NMC, NCA kimyasal sistemlerinde) termal kaçak riski büyüktür. Bu tür üretim ortamlarında sıcaklık sensörleri, CO₂ veya halokarbon bazlı otomatik söndürme sistemleri, seramik izolasyonlu hücre modülleri ve düzenli yangın tatbikatları gibi önlemler uygulanmalıdır (Amer vd., 2024).

Bayraktar (2023), batarya üretim tesislerinde yangın riskini azaltmak için yalnızca mühendislik önlemleri değil, aynı zamanda organizasyonel güvenlik kültürünün yerleştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

4.7. Batarya Bakım-Onarım Süreçleri İçin İş Akışı ve Tehlike Analizi

Elektrikli araçlarda batarya modülünün değişimi ve bakım-onarımı sırasında karşılaşılan riskler, yalnızca teknik değil aynı zamanda ciddi iş sağlığı ve güvenliği sorunları doğurmaktadır. Bu süreçler, yüksek voltajlı sistemler ve kimyasal bileşenlerle çalışmayı içerdiğinden, uluslararası standartlara dayalı sistematik bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Özellikle ISO 26262 (Fonksiyonel Güvenlik) ve IEC 60204-1 (Makinalarda Elektriksel Güvenlik) standartları bu tür işlemlerde temel referans niteliğindedir (Sarıkas, 2024; Zang vd., 2024).

4.7.1. İş akışı ve risk analizi

Batarya bakım süreçlerinde operasyonel körlükten veya prosedür eksikliğinden kaynaklanabilecek kazaların önlenmesi adına, sürecin adım adım tanımlanması gerekmektedir. Aşağıda, enerji izolasyonundan sistemin yeniden devreye alınmasına kadar olan kritik iş akışı; potansiyel tehlikeler ve ilgili önleyici tedbirler ekseninde analiz edilmiştir:

1. Araç yüksek gerilim sisteminden ayrılır (LOTO prosedürü uygulanır)
 Risk: Yüksek voltaj hattının aktif kalması → elektrik çarpması
 Önlem: Yüksek gerilim izolatörleri, LOTO, yetkinlik sertifikalı personel
2. Batarya modülü fiziksel olarak sökülür
 Risk: Ağırlık nedeniyle kas-iskelet yaralanmaları, modül düşmesi
 Önlem: Vinç sistemleri, 2 kişilik ekip çalışması, ergonomik eğitim
3. Batarya modülü incelenir / onarım yapılır
 Risk: Termal kaçak, kimyasal sızıntı, elektriksel kısa devre
 Önlem: Isı sensörleri, yangın söndürme battaniyesi, antistatik eldiven, izolasyon altlığı (Göçmen, 2022)
4. Modül yeniden monte edilir ve test edilir
 Risk: Yanlış bağlantı, yüksek akım, cihaz arızası
 Önlem: Test öncesi devre kontrolü, izolasyon test cihazı, uzaktan test ekipmanı
5. Aracın enerji sistemleri yeniden aktif hale getirilir
 Risk: Gerilim ani yükselmesi, siber arıza
 Önlem: Kontrol listesi ile adım adım yeniden bağlantı, yazılım güncelleme kontrolü (Amer vd., 2024)

Bu iş akışı ISO 26262 – Fonksiyonel Güvenlik ve IEC 60204-1 standartları kapsamında değerlendirilmelidir (International Electrotechnical Commission 2016; ISO, 2018). Ayrıca bu iş akışı, yalnızca teknik operasyonların güvenliğini değil, aynı zamanda çalışanların eğitimi, belgelendirilmesi ve denetlenmesini de kapsayan bütünsel bir İSG stratejisi ile desteklenmelidir.

4.8. Gelecek Batarya Teknolojileri ve Trend Analizi (İSG Perspektifiyle)

Elektrikli araç bataryaları alanında son yıllarda hızlı bir teknolojik dönüşüm yaşanmaktadır. Enerji yoğunluğu artarken, üretim süreçleri daha karmaşık hâle gelmekte, bu da yeni İSG risklerini beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda öngörüye dayalı risk değerlendirme yaklaşımları (proactive risk assessment) büyük önem taşımaktadır (Xiao vd., 2024).

Çizelge 4.7. Yeni batarya teknolojileri ve İSG riskleri

Teknoloji	Öne Çıkan Özellikler	Potansiyel İSG Riskleri	Mevzuat / Standart İhtiyacı
Solid-State Batarya	Yüksek enerji yoğunluğu, yangına dayanıklı	Seramik elektrolit parçacık solunması, yüksek sıcaklıkta üretim	Tozlu ortamlar için havalandırma, TS EN 689 (toz maruziyet ölçümü)
Lityum Sülfür (Li-S)	Daha ucuz ve çevreci hammadde	Sülfür oksitlenmesi → zehirli gaz çıkışı	Kimyasal gaz dedektörü zorunluluğu
Sodyum-İyon Batarya	Lityumdan bağımsız, geniş kaynak	Yüksek voltajta elektrolit ayrışması	IEC 62660 (hücre güvenlik testleri) revizyonu gerekebilir
Geri Dönüştürülmüş Batarya Hücreleri Kullanımı	Döngüsel ekonomi, düşük maliyet	Kullanılmış bataryalarda belirsiz arıza riski	Geri dönüşüm sertifikasyon sistemleri (örn. UL 1974)
Batarya-as-a-Service (BaaS)	Modüler ve değiştirilebilir sistemler	Kullanıcı hatası, modül tak-çıkarma sürecinde kısa devre	Kullanıcı eğitimi, kilitli güvenli istasyon yapıları

Çizelge 4.7’de sunulan teknolojik projeksiyon, batarya ekosistemindeki gelişmelerin İSG risklerini ortadan kaldırmadığını, aksine 'dönüştürdüğünü' göstermektedir. Özellikle katı hal

bataryaların termal kararlılığı artırmasına karşın üretimde partikül maruziyeti yaratması veya Lityum-Sülfür teknolojisinin toksik gaz riski taşıması, koruyucu önlemlerin yalnızca 'yangın odaklı' yaklaşımdan 'kimyasal ve hijyen odaklı' tedbirlere evrilmesi gerektiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca BaaS modeli gibi operasyonel yenilikler, riskin fabrika sahasından son kullanıcıya kaymasına neden olduğundan, standartların (IEC, UL) teknik testlerin ötesine geçerek operasyonel süreçleri de kapsamaya zorunlu görünmektedir.

Bu teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak, geleneksel İSG kontrol önlemlerinin yetersiz kalabileceği ve yeni risk tanımlarına ihtiyaç duyulabileceği açıktır. Özellikle modüler sistemler ve bulut tabanlı batarya yönetim sistemleriyle birlikte yazılımsal güvenlik açıkları da fiziksel güvenliğin bir parçası hâline gelmektedir (Amer vd., 2024). Bu nedenle standartların güncellenmesi ve yeni yönetmeliklerin oluşturulması kaçınılmaz görünmektedir.

Gelecek batarya teknolojilerinin getireceği yeni tehlikelere karşı iş sağlığı ve güvenliği açısından önleyici stratejilerin, Ar-Ge süreçlerine entegre edilmesi ve tasarımdan itibaren güvenli üretim yaklaşımının benimsenmesi önerilmektedir. Ayrıca TS EN ISO 45001 standardının gelecekte bu teknolojileri kapsayacak şekilde revize edilmesi de önerilmektedir.

4.9 Bataryaların İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi

Batarya teknolojileri, elektrikli araç ekosisteminin enerji kaynağını oluşturmakla birlikte, üretiminden bertarafına kadar uzanan yaşam döngüsü boyunca çok boyutlu güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir. Bu bölümde, lityum-iyon ve yeni nesil bataryaların barındırdığı kimyasal, termal ve elektriksel tehlikeler; çalışan sağlığı, acil durum yönetimi ve uluslararası mevzuat çerçevesinde detaylı olarak analiz edilmiştir.

4.9.1. Batarya teknolojileri ve kimyasal riskler

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle otomotiv sektörünün temel enerji depolama teknolojisi haline gelmiştir. Bununla birlikte, bu bataryalar, termal kaçak, toksik gaz salımı ve yangın riski gibi önemli iş sağlığı ve güvenliği tehditleri barındırmaktadır.

Chang (2023), lityum-iyon bataryaların yalnızca termal değil, aynı zamanda kimyasal etkileşimler sonucu ortaya çıkan toksik riskler barındırdığını belirtmektedir. Araştırmada, ikinci harmonik nesil spektroskopisi (SHG) yöntemiyle elektrot yüzeylerinde meydana gelen iyonik adsorpsiyon süreçlerinin çevresel toksisiteyi artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, batarya güvenliği politikalarının yalnızca yangın önleme değil, kimyasal maruziyet risklerini de kapsamaması gerektiğini göstermektedir.

Batarya güvenliğinde termal kaçağı başlatan temel mekanizma, sanılanın aksine sadece dışsal ısı değil, hücre içindeki Katı Elektrolit Arayüzeyi (SEI) tabakasının kararsızlığıdır. Güncel elektrokimyasal analizler, SEI tabakasının aşırı şarj veya yüksek sıcaklık altında bozulmasının, elektrolit ile elektrot arasında ekzotermik (ısı veren) reaksiyonları tetiklediğini ve bunun da durdurulamaz bir ısınma döngüsüne (termal kaçak) yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, şarj döngüleri sırasında anot yüzeyinde oluşan lityum dendritleri (iğne benzeri yapılar), separatörü delerek iç kısa devreye ve ani yangınlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, batarya üretim proseslerinde İSG önlemleri, dendrit oluşumunu engelleyecek kalite kontrol süreçlerine odaklanmalıdır (Erdem, 2023).

Elektrikli araçların çevresel ve mesleki riskleri değerlendirilirken, sadece kullanım aşamasına değil, "Beşikten Mezara" (Cradle-to-Grave) yaşam döngüsüne odaklanılmalıdır. Yapılan analizler, bir elektrikli aracın toplam karbon emisyonunun ve toksik kimyasal kullanımının önemli bir kısmının, henüz araç yola çıkmadan, batarya üretim ve montaj aşamasında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, İSG önlemlerinin sadece şarj istasyonlarında değil, batarya fabrikalarındaki kimyasal depolama ve üretim hatlarında yoğunlaştırılması gerektiğini, aksi takdirde "yeşil enerji" dönüşümünün, "gri bir İSG tablosuna" dönüşebileceğini ortaya koymaktadır (Bhosale vd., 2023).

Batarya kimyası seçimi, İSG ve çevresel risk yönetimi açısından kritik bir denge sunar. Yüksek performanslı Nikel Manganez Kobalt (NMC) bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahipken, Lityum Demir Fosfat (LFP) bataryalar uzun ömür ve daha yüksek termal kararlılık eşiği yaklaşık 270 °C / 518 °F sunarak daha güvenli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yaşam döngüsü analizleri (LCA), lityum iyon bataryaların imalat aşamasının (hammadde çıkarımı ve üretimi), küresel ısınma potansiyeli, su toksisitesi ve insan sağlığı toksisitesi gibi çevresel etkilerde en büyük paya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, daha uzun pil ömrü sağlayan etkin bir Termal Yönetim Sisteminin (BTMS) dahi, batarya ömrünü iki katına

çıkarak Yaşam Döngüsü Maliyetini (LCC) %33 ve Karbon Ayak İzini %35 oranında azaltılabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, tasarım aşamasında, LFP'nin üstün termal güvenliği ve çevresel avantajları göz önüne alınarak İSG risk profiline düşürülmesine öncelik verilmelidir.

Batarya paketlerinde tek bir hücrede başlayan termal kaçağın, komşu hücrelere sıçrayarak tüm paketi kontrolsüz bir yangın sürecine sürüklemesini önlemek, yalnızca aktif soğutma sistemleriyle sınırlı kalmayan bütüncül güvenlik yaklaşımlarını gerektirmektedir. Bu bağlamda, son dönem deneysel çalışmalar, hücreler arasına entegre edilen düşük termal iletkenliğe sahip pasif bariyer malzemelerin, termal kaçağın zincirleme bir reaksiyona dönüşmesini anlamlı ölçüde geciktirdiğini ve sınırlandığını ortaya koymaktadır. Özellikle porous vacuum silica (PVS) ve aerogel-tabanlı izolasyon katmanlarının, kapalı ve yarı kapalı batarya modüllerinde ısı transferini zayıflatarak hem termal kaçak tetiklenme süresini uzattığı hem de etkilenen hücre sayısını ciddi biçimde azalttığı deneysel olarak gösterilmiştir. Bu tür pasif bariyerlerin kullanımı, yüksek enerji yoğunluklu lityum-iyon bataryaların üretim, montaj ve depolama süreçlerinde, tasarımla güvenlik yaklaşımının ayrılmaz bir bileşeni olarak değerlendirilmekte; termal, kimyasal ve patlama risklerinin kaynağında azaltılması açısından iş sağlığı ve güvenliği standartlarına sistematik biçimde entegre edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Liu vd., 2025).

Termal kaçak, batarya hücrelerinden birinde meydana gelen aşırı ısınmanın zincirleme reaksiyonlarla diğer hücrelere yayılmasıyla oluşur. Bu durum, bataryanın kontrolsüz şekilde yanmasına ve yangının uzun süre devam etmesine yol açabilir. Wang, Mao, Stoliarov ve Sun (2019), lityum-iyon bataryaların termal kaçak sürecinde, hücre içi kısa devreler, elektrolit bozulmaları ve elektrot malzemelerinin parçalanmasının kritik tetikleyiciler olduğunu vurgulamaktadırlar.

Çizelge 4.8. Batarya kimyasal ve yangın özellikleri Çizelgesi

Batarya Tipi	Ana Kimyasal Bileşen	Termal Kaçak Başlama Sıcaklığı (°C)	HF Salınım (ppm)	Yeniden Tutuşma Olasılığı (%)
NMC (LiNiMnCoO ₂)	Kobalt, Nikel	170–190	15–25	48
LFP (LiFePO ₄)	Demir Fosfat	210–240	5–10	21
NCA (LiNiCoAlO ₂)	Kobalt, Alüminyum	160–180	22–30	56

Çizelge 4.8’de sunulan karşılaştırmalı veriler, batarya kimyasının güvenlik profili üzerindeki belirleyici rolünü netleştirmektedir. Özellikle LFP (Lityum Demir Fosfat) teknolojisi, yüksek termal kaçak başlangıç sıcaklığı ve düşük toksik gaz (HF) salınımı ile İSG açısından en kararlı yapıya sahipken; NMC ve NCA türlerinin %50 seviyelerine ulaşan 'yeniden tutuşma' (re-ignition) olasılıkları, bu bataryalara müdahale eden acil durum ekiplerinin yangın sonrası gözetim ve soğutma süreçlerini çok daha titiz yürütmesi gerektiğini kanıtlamaktadır (Sauer vd. 2024; Supri vd. 2024)

Yangın sırasında açığa çıkan kimyasal emisyonlar, yalnızca yangının kendisiyle değil, aynı zamanda toksik gazlarla da tehlike yaratmaktadır. Larsson, Andersson, Blomqvist ve Mellander (2017), lityum-iyon batarya yangınlarında hidrojen florür (HF) ve fosforil florür (POF₃) gibi yüksek derecede toksik gazların açığa çıktığını ve bu gazların işçiler ile müdahale ekipleri için ciddi sağlık riskleri oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Sun, Bisschop, Niu ve Huang (2020) tarafından yapılan kapsamlı bir literatür taramasında, dünya genelinde raporlanan elektrikli araç yangınlarının çoğunun bataryalardan kaynaklandığı; bu yangınların söndürülmesinin ise klasik yöntemlere kıyasla çok daha zor olduğu belirtilmiştir. Özellikle kapalı otoparklarda çıkan batarya yangınlarında, yangının

kontrol altına alınması için binlerce litre suyun gerektiği ve buna rağmen bataryaların yeniden tutuşma riskinin sürdüğü ifade edilmiştir.

Batarya yangınlarının söndürülmesi de ayrı bir teknik zorluktur. Ghiji ve Erdoğan (2020), batarya yangınlarına müdahalede kullanılan su ve köpük bazlı yöntemlerin çoğu durumda yetersiz kaldığını; bunun yerine Aqueous Vermiculite Dispersion (AVD) gibi yeni nesil söndürme teknolojilerinin umut vaat ettiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, yangın sonrası bataryaların haftalar boyunca gözetim altında tutulması gerektiği, aksi halde yeniden tutuşmaların meydana gelebileceği belirtilmektedir.

Bu nedenle, elektrikli araç bataryalarının üretiminden kullanımına ve geri dönüşümüne kadar olan tüm yaşam döngüsünde İSG odaklı önlemler alınmalıdır. Bu önlemler şunları içermektedir:

- Batarya üretim tesislerinde havalandırma sistemleri ve gaz dedektörleri kurulması,
- Araç bakım-onarım merkezlerinde LOTO prosedürlerinin uygulanması,
- İtfaiye ve acil müdahale ekipleri için özel eğitimler ve kimyasal dayanımlı kişisel koruyucu donanımlar,
- Uluslararası standartlara (örn. NFPA 855 – Energy Storage Systems) uygun kurulum ve depolama yöntemleri.

Sonuç olarak, lityum-iyon bataryalar elektrikli araçların sürdürülebilirliği açısından kritik rol oynasa da, beraberinde getirdikleri kimyasal ve termal riskler nedeniyle çok katmanlı bir güvenlik yaklaşımı gerektirmektedir.

4.9.2. Termal kaçak ve yangın riski

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların en ciddi güvenlik sorunlarından biri termal kaçak olgusudur. Termal kaçak, bir batarya hücresinde iç kısa devre, aşırı şarj, mekanik darbe veya yüksek sıcaklık nedeniyle başlayan kontrolsüz ısınma reaksiyonlarının zincirleme şekilde yayılmasıdır. Bu süreç sonucunda batarya sıcaklığı hızla artar, yanıcı gazlar açığa çıkar ve yangın veya patlama meydana gelebilir (Wang vd., 2020).

Küresel ölçekte 2010-2022 yılları arasındaki elektrikli araç yangın kazaları incelendiğinde, yangınların oluşum nedenleri İSG önlemlerinin odaklanması gereken noktaları

değiştirmektedir. İstatistikler, yangınların %20'sinin şarj esnasında, daha büyük bir oranının ise araç park halindeyken (kendiliğinden yanma) meydana geldiğini göstermektedir. Bu veri, İSG önlemlerinin sadece sürüş veya kaza anına değil, özellikle şarj istasyonları ve kapalı otoparklardaki "bekleme" süreçlerine odaklanması gerektiğini kanıtlar niteliktedir. Ayrıca, yangınların yaz aylarında (yüksek ortam sıcaklığı) ve kış aylarında (şarj stresi) zirve yapması, termal yönetim sistemlerinin mevsimsel dayanıklılığının kritik bir güvenlik parametresi olduğunu ortaya koymaktadır (Ouyang vd., 2023).

Termal kaçak süreciyle ilgili literatürde, tam ölçekli deneysel çalışmalar EV yangınlarının ilerleyişini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Olona ve Castejon (2025) tarafından yapılan deneysel analizlerde, elektrikli araç bataryalarının yangın sırasında ısı akısının batarya alt plakası boyunca 40–60 kW/m² seviyelerine ulaştığı ve yangın battaniyesi (fire blanket) kullanımının oksijen erişimini kısıtlayarak yangını 12 dakika içerisinde stabilize ettiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Dehghani vd. (2025), Tesla Model 3 üzerinde gerçekleştirdikleri testlerde batarya modüllerinin ısı yayılım oranlarının araç gövdesine %120'ye kadar yansıdığını belirlemiştir. Bu bulgular, termal olayların yalnızca batarya içinde değil, çevresel ısı etkisiyle de büyüdüğünü göstermektedir.

Yangınların Özellikleri: Lityum-iyon batarya yangınları geleneksel fosil yakıt yangınlarından farklıdır. Batarya yangınları, saatler hatta günler sürebilen yüksek sıcaklık ve alevlenmelerle karakterizedir. Bu durum, yangın söndürme faaliyetlerini karmaşıktırmakta ve itfaiye ekiplerinin maruziyet risklerini artırmaktadır (Larsson vd., 2017). Ayrıca yangın sırasında açığa çıkan hidrojen florür (HF), karbon monoksit (CO) ve hidrojen siyanür (HCN) gibi toksik gazlar, yalnızca araç yolcularını değil, aynı zamanda bakım teknisyenlerini ve acil müdahale ekiplerini doğrudan tehdit etmektedir (Liu vd., 2023).

Batarya yangınlarında yalnızca ısı değil, aynı zamanda kimyasal gaz karışımları da ciddi patlama riski taşımaktadır. Sauer vd. (2024), termal runaway sırasında açığa çıkan gazların %65 oranında H₂, CO ve CH₄ içerdiğini, bu karışımın %4,1–75 vol aralığında yanıcı özellik gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle kapalı otopark veya bakım alanlarında gaz birikimi, deflagrasyon (ani yanma) olasılığını artırmaktadır. Bu nedenle, şarj istasyonlarının havalandırma sistemleri hem yangın söndürme hem de gaz tahliyesini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Benzer şekilde, Birleşik Krallık Ulaştırma Bakanlığı tarafından hazırlanan

kılavuzda da kapalı otoparklarda şarj noktalarının yerleşimine ilişkin yangın güvenliği önlemleri detaylı biçimde tanımlanmıştır (Arup, 2023).

Geleneksel hava veya dolaylı sıvı soğutma sistemlerinin, özellikle Aşırı Hızlı Şarj (XFC) koşulları ve yüksek enerji yoğunluklu bataryalar altındaki yüksek ısı yükünü yönetmekte yetersiz kaldığı belirtilmiştir. Bu zorlu koşullara karşı, Faz Değiştiren Malzeme (PCM) ve Metal Köpük (MFPCM) kombinasyonunun hem ısı dağılımını artırması hem de batarya sıcaklığını güvenli aralıkta tutmada üstün performans sergilemesi nedeniyle XFC için en uygun çözüm olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, PCM ile sıvı soğutmanın birleştirildiği hibrit sistemler, enerji tüketimini en aza indirerek tepe sıcaklıklarını düşürmede üstün performans göstermiştir. İSG mevzuatında, termal riskleri minimize etmek amacıyla, yüksek kapasiteli ve hızlı şarj edilebilir bataryalarda NFPA 855 standardına ek olarak MFPCM veya Daldırma Soğutma gibi yüksek termal verimli sistemlerin kullanımının teşvik edilmesi, hatta zorunlu kılınması yönünde teknik kriterler belirlenmelidir (Suresh vd., 2025).

Kapalı otoparklarda elektrikli araç yangınlarına müdahale, geleneksel yangınlara göre daha yüksek İSG riskleri taşımaktadır. TMMOB Makina Mühendisleri Odası'nın (MMO) raporu, elektrikli araç yangınlarında ortam sıcaklığının, içten yanmalı araç yangınlarındaki 816 °C seviyesine kıyasla, 2480 °C'ye kadar (bazı yapısal unsurlar için) çıkabileceğini tespit etmiştir. Bu aşırı sıcaklık ve yüksek toksik gaz salımı, otoparklardaki yapısal dayanım gerekliliklerinin ve duman tahliye sistemlerinin kapasitesinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu risk artışı nedeniyle NFPA (Ulusal Yangından Korunma Derneği) gibi uluslararası kuruluşlar, otoparkların tehlike sınıfını yükselterek sprinkler sistemi tasarım yoğunluğunu artırmış ve tüm otoparklarda sprinkler sistemini zorunlu kılmıştır. Bu veriler, tezin ulusal mevzuatta öngördüğü Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'in acilen yenilenmesi gerekliliğini desteklemektedir (TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2024).

Otopark Yönetmeliği'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile, yeni yapılacak binalarda ve AVM otoparklarında toplam park kapasitesinin en az %5'inin (bölgesel ihtiyaçlara göre artırılabilir) elektrikli araç şarj yeri olarak ayrılması zorunlu hale getirilmiştir. Bu yasal zorunluluk, kapalı otoparklardaki 'yangın yükü yoğunluğunu' kaçınılmaz olarak artıracaktır. Dolayısıyla, mevcut 'Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik' hükümleri, lityum iyon batarya yangınlarının gerektirdiği yüksek

soğutma suyu debisi ve duman tahliye kapasitesi açısından, Otopark Yönetmeliği'nin getirdiği bu yeni kapasite artışını karşılamada yetersiz kalmaktadır (Resmî Gazete, 2021).

Şarj istasyonlarında riskler; Termal kaçak riski özellikle hızlı şarj istasyonlarında artmaktadır. Yüksek akım altında hücrelerin aşırı ısınması, batarya paketlerinde zincirleme reaksiyonlara neden olabilir. Yanlış kablolama, hatalı yazılım yönetimi veya arızalı soğutma sistemleri, şarj istasyonu çalışanları için ark flaşı, patlama ve yangın riski oluşturur (Li vd., 2019). 800 V hızlı şarj mimarilerinde yüksek akım iletiminden kaynaklanan “contact resistance heating” olayını önlemek için aktif soğutmalı konnektör ve termal izleme teknolojilerinin kullanılması önerilmektedir (Yılmaz vd., 2020). Bu nedenle şarj istasyonlarında çalışan personelin yüksek sıcaklık sensörleri, gaz algılama sistemleri ve acil tahliye planları ile korunması gerekmektedir.

Batarya yangınları sırasında açığa çıkan gazların tahliyesi için havalandırma sistemlerinin tasarımı kritik öneme sahiptir. Krstić vd. (2025), batarya yangını sonrası havadaki HF gazı konsantrasyonunun 25 ppm seviyesine ulaştığını ve bu değerin 10 ppm'lik izin verilen mesleki sınır değeri aştığını belirtmiştir. Bu nedenle, yangın sonrası müdahale alanlarında gaz sensörleri ve aktif tahliye fanları bulunmalıdır.

Ayrıca, şarj istasyonlarında termal olaylara yönelik acil eylem planı hazırlanmalı ve çalışanlara yangın müdahale eğitimi verilmelidir (National Fire Protection Association [NFPA], 2023). Yangın söndürme sistemleri batarya türüne uygun seçilmeli; örneğin, lityum-iyon bataryalar için Class D söndürücüler kullanılmalıdır. Bu tür planlı müdahale programları, olay sonrası çevresel etkilerin azaltılmasına ve çalışan güvenliğinin sürdürülebilir biçimde korunmasına katkı sağlar.

Şarj istasyonlarında yangın güvenliği için kullanılan geleneksel duman ve ısı dedektörleri, genellikle yangın başladıktan sonra devreye girmekte ve erken müdahale için geç kalabilmektedir. Bu gecikmeyi önlemek amacıyla, Derin Öğrenme (Deep Learning) tabanlı bilgisayarlı görü sistemlerinin (Computer Vision) kullanımı önerilmektedir. YOLOv7 gibi nesne algılama algoritmalarıyla entegre edilen bu sistemler, güvenlik kameraları üzerinden dumanı veya alevi piksel düzeyinde analiz ederek, geleneksel sensörlerden çok daha hızlı bir şekilde 'görsel erken uyarı' verebilmekte ve yangın büyümeden müdahale imkanı sağlamaktadır (Kim vd., 2024).

İtfaiye ve Kurtarma Operasyonları: Lityum-iyon batarya yangınlarının söndürülmesi özel önlemler gerektirir. Geleneksel yangın söndürme ajanları çoğu zaman yetersiz kalırken, su bazlı soğutma ve özel köpük sistemleri daha etkili bulunmuştur. Bununla birlikte, bataryaların yangın sonrasında yeniden alevlenme riski, kurtarma personelinin uzun süreli gözetim yapmasını zorunlu kılmaktadır (Feng vd., 2018).

İSG Önlemleri:

- Batarya paketlerinde termal sensörler ve erken uyarı sistemleri kullanılması,
- Şarj istasyonlarında acil yangın söndürme sistemleri ve otomatik kesici devreler,
- Bakım personeli için alev geciktirici KKD ve solunum koruyucu donanım,
- İtfaiye ekipleri için özel eğitim ve tatbikatlar.

Sonuç olarak, termal kaçak kaynaklı yangınlar yalnızca sürücüler için değil, özellikle bakım çalışanları, şarj istasyonu operatörleri ve acil müdahale ekipleri için yüksek risk taşımaktadır. Bu nedenle, batarya tasarımında güvenlik protokollerinin geliştirilmesi, şarj altyapısında yangın güvenlik standartlarının uygulanması ve çalışanların eğitime öncelik verilmesi kritik önem taşır.

4.9.3. Zehirli Gaz Salımı ve İtfaiye Güvenliği

Lityum-iyon bataryaların en kritik güvenlik sorunlarından biri, yangın veya termal kaçak sırasında açığa çıkan toksik gaz emisyonlarıdır. Batarya elektrolitlerinde kullanılan organik karbonat solventleri ve katot/anot malzemeleri yüksek sıcaklık altında bozunarak hidrojen florür (HF), karbon monoksit (CO), hidrojen siyanür (HCN), fosgen (COCl₂) gibi toksik gazlar üretmektedir (Larsson vd., 2017). Bu gazlar, düşük konsantrasyonlarda bile akut toksisiteye sahip olup hem araç yolcuları hem de bakım personeli ve itfaiye çalışanları için ciddi sağlık riski taşımaktadır.

Gaz Salımının Özellikleri:

- Hidrojen Florür (HF): Batarya yangınlarında en sık rapor edilen gazdır. Solunumla alındığında ciddi akciğer hasarına yol açar; cilt temasında derin doku nekrozu oluşturur (Feng vd., 2018).
- Karbon Monoksit (CO): Renksiz, kokusuz olup yangın sırasında hızlıca yükselir; yangın bölgesinde çalışan personelin bilinç kaybına ve ölüme sebep olabilir (Liu vd., 2023).
- Hidrojen Siyanür (HCN): Elektrolit bileşenlerinin bozunması ile ortaya çıkar; sinir sistemi üzerinde toksik etki göstererek kısa sürede ölümcül olabilir (Larsson vd., 2017).
- Diğer Organik Bileşikler: Benzen, toluen ve formaldehit gibi VOC'ler (uçucu organik bileşikler) göz, cilt ve solunum yollarında tahrişe yol açmaktadır (Xie vd., 2020).

Lityum-iyon bataryaların kullanım ve bertaraf süreçleri, termal ve kimyasal risklerin en yoğun olduğu aşamalardır.

Termal kaçak olgusu sırasında elektrolitlerin bozunmasıyla açığa çıkan Hidrojen Florür (HF) gazı, itfaiye ve bakım personeli için solunum ve cilt yoluyla akut toksisite riski oluşturmaktadır (Larsson vd., 2017). HF gazına maruziyet riski nedeniyle, bu tesislerdeki acil müdahale protokolleri, NFPA 855 (Sabit Enerji Depolama Sistemlerinin Kurulumu Standardı) rehberliğinde belirlenen özel önlemleri içermelidir (NFPA, 2023). Tezin ana önerisi, yangın sonrası müdahale eden tüm personelin HF gazına karşı kimyasal dayanıklı solunum koruyucu donanım kullanması ve acil durum planlarına, cilt teması durumunda kullanılacak Kalsiyum Glukonat jel/solüsyonunun dahil edilmesi zorunluluğunu içermelidir. Benzer şekilde yapılan deneysel çalışmalar, lityum-demir-fosfat (LFP) bataryaların yüksek sıcaklık altında güvenlik performansının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir (Liu vd., 2022; Rawat ve Kumar, 2024).

HF yanıklarında ağrı hemen hissedilmeyebilir (sinsi etki). Bu nedenle, batarya üretim ve geri dönüşüm tesislerinde revir personelinin HF yanıklarına müdahale konusunda özel eğitilmiş olması ve 'HF Antidot Kitlerinin' (Kalsiyum Glukonat Jel) sadece revirde değil, çalışma sahasındaki acil yardım dolaplarında da erişilebilir olması hayati önem taşır.

4.9.4 İtfaiye ve müdahale güvenliği

Batarya yangınlarının söndürülmesi sırasında itfaiye ekipleri, yüksek sıcaklıkla birlikte toksik gazlara en yoğun maruz kalan gruptur. Geleneksel yangınlarda kullanılan KKD (kişisel koruyucu donanım) çoğu zaman yetersiz kalmakta; özellikle HF gibi gazlara karşı kimyasal dirençli solunum maskeleri ve tam yüz koruması gerekmektedir (Robinson vd., 2021). Ayrıca, yangın sonrası bataryalarda yeniden alevlenme riski bulunduğundan, itfaiyecilerin uzun süreli gözetim yapması ve gaz ölçüm cihazlarıyla ortamı takip etmesi önerilmektedir (Jouhara vd., 2021).

İSG Perspektifi açısından, batarya yangınlarında açığa çıkan gazlar şu üç kritik riski beraberinde getirmektedir:

1. *Solunumsal Risk:* Yangın sırasında görevli itfaiye ve bakım personeli, yüksek oranda toksik gaz soluma riski taşır.
2. *Kimyasal Yanık Riski:* HF ve diğer asidik gazlarla temas, ciltte derin yanıklara ve gözlerde kalıcı hasara neden olabilir.
3. *Psikososyal Etki:* EV yangınlarının uzun süreli ve tekrarlayan doğası, müdahalede bulunan personelde stres, kaygı ve tükenmişlik sendromuna yol açabilir.

Dehghani vd. (2025), araç gövdesi ve bitişik araçlar arasında ısı geçiş katsayısını 12–16 kW/m² olarak ölçmüş ve bu durumun çoklu araç yangınlarının ana nedeni olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, şarj istasyonlarında araçlar arası minimum 2,5 metre güvenlik mesafesi bırakılması, NFPA 855 standardı gereğince önerilmektedir.

4.9.5. Şarj süreçleri ve elektriksel riskler

Elektrikli araçların güvenli şekilde çalışabilmesi için şarj altyapısı kritik bir rol oynamaktadır. Ancak şarj süreçleri, özellikle yüksek voltajlı hızlı şarj sistemleri ile birlikte ciddi elektriksel riskler barındırmaktadır. Günümüzde çoğu elektrikli araç, 400 V ve 800 V DC mimariler ile çalışmaktadır; yüksek güçlü şarj istasyonlarında ise 150–350 kW seviyelerine ulaşılmaktadır (Çınar, 2014; Tran vd., 2021). Bu durum, şarj istasyonlarında görev yapan çalışanlar açısından elektrik çarpması, ark flaşı, yangın ve ekipman hasarı risklerini artırmaktadır.

Elektriksel Riskler;

- Yüksek Voltaj Maruziyeti: Şarj kabloları ve konnektörlerde meydana gelebilecek izolasyon hataları, bakım personeli için doğrudan elektrik çarpması riskini beraberinde getirir. 800 V mimarilerde bu risk daha da artmaktadır (Zhou vd., 2020).
- Ark Flaşı ve Yanık Riski: Hatalı bağlantılar veya arızalı konnektörler, ani enerji boşalmaları ile ark flaşına sebep olabilir. Ark flaşları yalnızca elektrik şokuna değil, aynı zamanda ciddi yanık yaralanmalarına yol açmaktadır (OSHA, 2021).
- Termal Riskler: Hızlı şarj sırasında kabloların aşırı ısınması, yangın riskini yükseltmektedir. Özellikle kötü bakım görmüş kabloların ısı bozulması çalışanların güvenliği için kritik bir tehdit oluşturur (Li vd., 2019).

4.9.6. Şarj İstasyonlarında İSG Riskleri

Şarj istasyonları yalnızca sürücüler için değil, bakım ve onarım personeli için de risklidir. IEC 61851 standardı, şarj istasyonlarının güvenli tasarımını düzenlerken; ISO 6469-3 ise elektrikli araçlarda çalışanların yüksek voltaj devrelerine karşı korunmasına yönelik güvenlik gerekliliklerini tanımlamaktadır (IEC, 2017; ISO, 2018). Buna rağmen sahada yapılan araştırmalar, birçok ülkede istasyonların bakım süreçlerinde yetkisiz erişim, yetersiz topraklama ve KKD eksikliği nedeniyle kazaların yaşandığını göstermektedir (Hussein vd., 2021).

İSG Önlemleri:

- Yüksek voltajlı şarj sistemlerinde LOTO prosedürlerinin zorunlu uygulanması,
- Çalışanlar için ark flaşı koruyucu KKD (yanmaz giysi, yüz siperi, yalıtımlı eldiven),
- Düzenli termal kamera ile bakım kontrolleri (aşırı ısınma tespiti için),
- Şarj istasyonlarında acil kapatma butonları ve uzaktan izleme sistemleri,
- İşçi eğitim programlarında IEC 61851 ve ISO 6469-3 gerekliliklerinin yerleştirilmesi.

Sonuç olarak, elektrikli araçların şarj süreçleri, özellikle hızlı şarj teknolojileriyle birlikte, çalışanlar için yüksek voltaj maruziyeti, ark flaşı ve yangın gibi kritik riskler doğurmaktadır.

Bu risklerin yönetilmesi, yalnızca teknik standartların uygulanmasına değil, aynı zamanda çalışanların eğitimi ve düzenli bakım faaliyetlerine bağlıdır.

4.9.7. Batarya geri dönüşümü ve çalışan sağlığı

Elektrikli araç bataryalarının ömürlerinin sonunda geri dönüştürülmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve kritik hammadde geri kazanımı açısından önemlidir. Ancak bu süreç, çalışanlar için ciddi İSG riskleri barındırmaktadır. Batarya geri dönüşümünde kullanılan yöntemler genellikle mekanik parçalama, pirometalurjik işlemler (yüksek sıcaklıkta ergitme) ve hidrometalurjik işlemler (asit çözeltisiyle ekstraksiyon) olmak üzere üç ana kategoride toplanmaktadır (Mayyas vd., 2019).

Mekanik İşlemler; bataryaların mekanik parçalanması sırasında metal tozları ve elektrolit kalıntıları açığa çıkmaktadır. Bu tozlar solunduğunda pnömokonyoz, solunum yolları tahrişi ve cilt alerjilerine yol açabilmektedir (NIOSH, 2022). Ayrıca mekanik darbeler sırasında termal kaçak ve patlama riski de ortaya çıkabilmektedir.

Batarya geri dönüşüm süreçleri sırasında açığa çıkan Kobalt, Nikel ve Manganez gibi ağır metal tozları ve dumanları, çalışanlarda akciğer kanseri ve solunum yolu hastalıkları riskini artırmaktadır. Bu kimyasal tehlikelere karşı Mühendislik Kontrollerinin yanı sıra, Türkiye'deki Biyolojik İzleme Yönetmeliği kapsamında periyodik sağlık gözetimi zorunlu kılınmalıdır (T.C. Resmî Gazete, 2014). Bu, çalışanların idrar ve kan numunelerinde kobalt/nikel maruziyet seviyelerinin belirlenmesi ve yasal sınırlarla karşılaştırılması anlamına gelir.

Pirometalurjik İşlemler; pirometalurjik süreçlerde, batarya modülleri yüksek sıcaklıklarda ergitilerek kobalt, nikel ve bakır gibi metaller geri kazanılır. Bu işlem sırasında açığa çıkan ağır metal dumanları (özellikle kobalt ve nikel oksitler), işçilerde akciğer kanseri, astım ve cilt alerjisi riskini artırmaktadır (IARC, 2020). Yetersiz havalandırma ve KKD eksikliği durumunda maruziyet düzeyi çok yüksek olabilir.

Hidrometalurjik İşlemler; bu yöntemde, asidik çözeltiler (örn. sülfürik asit, hidroklorik asit) kullanılarak metaller çözeltiliye alınır. İşçiler bu aşamada asit buharı ve solvent gazlarına maruz kalabilmektedir. Ayrıca reaksiyon sırasında hidrojen florür (HF) açığa çıkabilmekte,

bu da ciddi solunum yolu hasarı ve kimyasal yanıklara neden olabilmektedir (Larsson vd., 2017).

İSG Önlemleri; Batarya geri dönüşüm tesislerinde çalışanların korunması için:

- Kapalı devre havalandırma sistemleri ve yerel emiş aspiratörleri,
- KKD kullanımı (asit dirençli eldiven, tam yüz maskesi, solunum koruyucular),
- Düzenli biyolojik izleme (idrar kobalt/nickel testleri),
- Patlama önleyici ekipman ve yangın güvenliği planları,
- İşçi eğitimi ve maruziyet sürelerinin sınırlanması zorunludur (Scaini vd., 2022).

Sonuç olarak, batarya geri dönüşümü çevresel ve ekonomik açıdan önemli bir süreçtir ancak uygun güvenlik önlemleri alınmadığında, çalışanlar için ağır metal maruziyeti, kimyasal yanık, solunum yolu hastalıkları ve patlama riski gibi ciddi tehditler doğurmaktadır. Bu nedenle, geri dönüşüm süreçlerinin yalnızca teknik verimlilik değil, aynı zamanda İSG kriterleri gözetilerek tasarlanması gerekmektedir.

4.9.8. Standartlar ve mevzuat perspektifi

Elektrikli araç bataryalarının güvenliği, yalnızca teknolojik çözümlerle değil, aynı zamanda uluslararası standartlar ve mevzuat ile de düzenlenmektedir. Bu düzenlemeler hem araç kullanıcılarının hem de üretim, bakım ve geri dönüşüm süreçlerinde çalışanların İSG açısından korunmasını hedeflemektedir.

Uluslararası Standartlar:

1. *ISO 6469-1 ve ISO 6469-3*: Elektrikli araçlarda bataryaların güvenliği için temel standartlardır. ISO 6469-1, genel güvenlik gerekliliklerini tanımlarken; ISO 6469-3, özellikle elektrik çarpmasına karşı koruma önlemlerini düzenler (ISO, 2018).
2. *IEC 62660 serisi*: Lityum-iyon hücrelerin performans ve güvenlik testlerini kapsamaktadır. Bu standartlar, özellikle aşırı şarj, kısa devre, termal stabilite ve mekanik darbe testleri ile batarya güvenliğini değerlendirmektedir (IEC, 2021).

3. *UN ECE R100*: Elektrikli araçlarda enerji depolama sistemlerinin güvenliğine dair küresel teknik düzenlemeleri içerir. Termal kaçak, elektriksel izolasyon ve mekanik dayanıklılık testleri ile araç güvenliğini artırmayı hedefler (UNECE, 2019).
4. *NFPA 855*: Enerji depolama sistemlerinin kurulumunda yangın güvenliği açısından ABD’de uygulanan temel standarttır. Özellikle batarya depolama tesislerinde yangın önleme ve itfaiye güvenliği için rehberlik etmektedir (NFPA, 2020).

Düzenleyici Kurumlar ve Rehberler:

- *OSHA (Occupational Safety and Health Administration)*: Batarya üretim ve geri dönüşüm tesislerinde çalışanların ağır metal, solvent ve elektriksel risklere karşı korunmasını zorunlu kılan iş güvenliği düzenlemeleri geliştirmiştir (OSHA, 2021).
- *EU-OSHA*: Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı, batarya üretimi ve geri dönüşümünde kimyasal maruziyetler, ergonomi ve yangın güvenliği risklerine dikkat çekmektedir (EU-OSHA, 2022).
- *NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)*: ABD’de batarya geri dönüşüm tesisleri için yayımladığı raporlarda, toz kontrolü, havalandırma sistemleri ve KKD kullanımı gibi önlemleri önermektedir (NIOSH, 2022).

İSG Perspektifi standart ve mevzuatların ortak noktası, batarya kaynaklı risklerin kaynağında önlenmesi ve çalışanların koruyucu önlemlerle desteklenmesidir. ISO ve IEC standartları teknik test yöntemlerine odaklanırken, OSHA ve EU-OSHA gibi kurumlar daha çok işçi güvenliği, eğitim ve maruziyet sınırları üzerinde durmaktadır. Dolayısıyla batarya güvenliği hem teknik hem de iş sağlığı boyutlarıyla bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

4.10. Batarya Yangınlarına Müdahale ve İSG Önlemleri

Elektrikli araç bataryalarından kaynaklanan yangınlar, yüksek sıcaklık, uzun yanma süresi ve toksik gaz salımı nedeniyle geleneksel araç yangınlarından farklı özellikler göstermektedir. Bu nedenle, müdahale ve İSG stratejileri, klasik yangın senaryolarına kıyasla özel önlemler gerektirir.

4.10.1. Müdahale zorlukları

Lityum-iyon batarya yangınlarının en belirgin özelliği, termal kaçak süreci nedeniyle yangının uzun süre devam etmesi ve tekrar tutuşabilmesidir. Sun, Bisschop, Niu ve Huang (2020), batarya yangınlarının söndürülmesinin binlerce litre su gerektirdiğini ve buna rağmen bataryaların tekrar alev alabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca, Larsson ve arkadaşları (2017), yangın sırasında açığa çıkan hidrojen florür ve benzeri toksik gazların, itfaiyeciler için ciddi solunum riski oluşturduğunu belirtmektedir.

Elektrikli araç yangınlarına müdahalede en kritik zorluklardan biri, yangın söndürüldükten saatler hatta günler sonra bataryanın içindeki "mahsur kalmış enerji" nedeniyle gerçekleşen yeniden tutuşma (re-ignition) riskidir. Ayrıca, lityum iyon batarya yangınları sırasında açığa çıkan duman, geleneksel yangınlardan farklı olarak yüksek konsantrasyonda Hidrojen Florür (HF), Fosforil Florür (POF₃) ve Siyanür gibi akut toksik gazlar içermektedir. Bu nedenle, itfaiye ekiplerinin müdahale sırasında standart solunum cihazlarını (SCBA) çıkarmaması ve yangın sonrası aracın, diğer yapılardan izole edilmiş güvenli bir alanda en az 48 saat karantinada tutulması hayati bir İSG prosedürüdür (Sun vd., 2020).

4.10.2. İtfaiye müdahale protokolleri

ABD’de National Fire Protection Association (NFPA 855: Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems), batarya yangınları için temel güvenlik protokolünü belirlemiştir. Bu standarda göre:

- Yangın sonrası batarya modülleri güvenli bir alanda soğutulmalı ve gözetim altında tutulmalıdır.
- Özel soğutma teknikleri (örn. batarya gövdesine doğrudan su verme, batarya soğutma kapları) kullanılmalıdır.
- Müdahale sırasında itfaiye personelinin tam yüz maskesi, kimyasal dayanımlı KKD ve HF’ye karşı özel filtreler kullanması zorunludur (NFPA, 2023).

Birleşik Krallık’ta yayımlanan National Fire Chiefs Council (NFCC) rehberleri, batarya yangınlarında kapalı otoparklarda havalandırma sistemlerinin aktif edilmesi, tahliye

prosedürlerinin hızla uygulanması ve yangın sonrası araçların özel depolama alanlarında izole edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (NFCC, 2022).

4.10.3. İSG önlemleri

Batarya yangınlarıyla ilişkili riskler, yalnızca itfaiye personeli değil, aynı zamanda bakım teknisyenleri, acil müdahale ekipleri ve kullanıcıları da kapsamaktadır. Bu nedenle, İSG önlemleri çok katmanlı bir yaklaşımla ele alınmalıdır:

- **Teknik Önlemler:** Araçlarda ve şarj istasyonlarında erken uyarı için gaz sensörleri, termal kameralar ve batarya izleme sistemleri kurulmalıdır.
- **Operasyonel Önlemler:** Yangın sonrası araçların en az 48–72 saat gözetim altında tutulması, yeniden tutuşma riskini azaltacaktır.
- **Eğitim:** İtfaiye ve bakım personeline özel eğitim verilerek, batarya yangınlarının dinamikleri ve müdahale yöntemleri konusunda farkındalık artırılmalıdır (Wang, Mao, Stoliarov ve Sun, 2019).
- **Kişisel Koruyucu Donanım:** Solunum cihazı, kimyasal dayanımlı eldiven ve giysiler yangın müdahalesinde zorunlu hale getirilmelidir.

Kapalı otoparklarda ve yeraltı şarj istasyonlarında meydana gelen elektrikli araç yangınlarında, duman tahliyesinin zorluğu ve yoğun su kullanımının altyapıya vereceği zarar göz önüne alındığında, 'Boğma Yöntemi' öncelikli bir ilk müdahale stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Yüksek ısıya dayanıklı (1000°C+) özel Yangın Battaniyelerinin kullanımı, alevlerin oksijenle temasını keserek yangının büyümesini engellemekte ve toksik gaz yayılımını (dumanı hapsederek) minimize etmektedir. Bu nedenle, kapalı şarj alanlarında her ünite grubunun yakınında, personelin kolayca erişebileceği yangın battaniyelerinin bulundurulması standart bir İSG donanım şartı olmalıdır (Choi ve Lee, 2025).

4.10. 4. Politika ve standart geliştirme

Türkiye bağlamında, batarya yangınlarına müdahale konusunda özel düzenlemeler henüz sınırlıdır. Ancak TSE'nin IEC 60364 ve IEC 61851 uyarlamaları ile EPDK'nın şarj altyapısı

regülasyonları, yangın güvenliği açısından ilk adımı oluşturmaktadır. İlerleyen dönemde, NFPA 855 ve NFCC rehberleri örnek alınarak Türkiye için ulusal düzeyde batarya yangını acil müdahale protokolleri hazırlanması önerilmektedir.

4.10.5. Batarya kaynaklı ve söndürülemeyen elektrikli araç yangınları: vaka incelemeleri

Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna sahip olsa da, bu durum yangın çıktığında müdahalenin güçleşmesine de yol açmaktadır. Uluslararası literatürde, batarya yangınlarının geleneksel yangınlara göre hem daha sıcak hem daha uzun sürebildiği, daha fazla su ve özel söndürme teknikleri gerektirdiği sıkça vurgulanmaktadır (Sutcliffe, akt. AAWSAT, 2023). Ayrıca yangın sonrası bataryaların saatler, günler hatta haftalar sonra yeniden tutuşabilme riski bulunmaktadır (University of Miami Miller School of Medicine, 2024).

Türkiye'de Bataryaya Bağlı ve Söndürülemeyen Yangın Vakası; Osmaniye, Türkiye (Temmuz 2025) — Osmaniye il merkezinde, Küçük Sanayi Sitesi içerisinde faaliyet gösteren bir işletmenin kapalı alanında park halinde bulunan elektrikli araçta, şarj işlemine bağlı olmaksızın ve henüz belirlenemeyen bir nedenle yangın meydana gelmiştir. İş yeri sahibine ait aracın batarya bölümünden dumanların yükselmesiyle başlayan olayda, itfaiye ekiplerinin yaklaşık iki saat süren yoğun müdahalesine rağmen yangın sönmelenememiştir. Olay yerindeki teknik ekipler ve servis yetkilileri, batarya paketindeki termal kaçak reaksiyonunun, enerji tamamen tükenene kadar devam ettiğini ve geleneksel söndürme yöntemlerinin (su ve köpük) bu süreçte etkisiz kaldığını belirtmiştir (İhlas Haber Ajansı [İHA], 2025). Bu vaka, batarya kaynaklı yangınların "kendi kendine oksijen üreten" kimyasal yapısı nedeniyle kapalı alanlarda oluşturduğu yüksek riski ve müdahale zorluğunu somut bir şekilde ortaya koymaktadır.

Uluslararası Ölçekte Söndürülemeyen Batarya Yangınları: Amerika Birleşik Devletleri EV yangın müdahaleleri; Bilimsel kaynaklara göre, EV yangınları nadir olmakla birlikte çok zordur. Lityum-iyon bataryalar uzun süre yüksek sıcaklıkta yanar, binlerce kimyasal buhar ve gaz açığa çıkarır; müdahale uzun sürer ve itfaiyeciler yüksek toksik maruziyete açıktır. Yangın sonrası araçların birkaç gün gözetim altında tutulması yaygındır (University of Miami Miller School of Medicine, 2024).

Güney Kore – Park Yeri Batarya Yangını; Finans Times (2024) kaynağına göre, Güney Kore’de bir apartmanın bodrum katında park halindeki bir Mercedes EV bataryasından çıkan yangın 880 aracın zarar görmesine yol açtı. Bu olay, batarya yangınlarının kontrolsüz iç ortamlarda nasıl yayılabileceğini ve yangının söndürülmesinin ne denli güç olduğunu göstermektedir (FT, 2024). Hükûmet bu olay sonrasında daha sıkı güvenlik regülasyonları ve pil tedarikçilerinin açıklanması taleplerini başlattı.

Diğer Durumlar – Genel Gözlemler:

- ABD itfaiye istatistiklerine göre, New York ve San Francisco gibi şehirlerde lityum-iyon bataryalı cihaz kaynaklı yangınlar hızla artıyor ve bu yangınlar zorlu müdahale gerektiriyor (CBS News, 2023).
- Elektrikli araç bataryalarının sel veya tuzlu suyla teması sonrası geç süreli yangınlar rapor edilmiştir; sel suları bataryada gecikmiş kısa devrelere yol açabilir (AP News, 2024).

4.10.6. Neden Söndürülmesi Zordur? İSG Açısından Değerlendirme

Elektrikli araç yangınları, geleneksel içten yanmalı motor yangınlarından farklı olarak, batarya kimyasının doğası gereği kendine özgü operasyonel zorluklar barındırmaktadır. Standart söndürme ajanlarının yetersiz kaldığı bu vakalar, hem yangının sönmemesi (termal kaçak döngüsü) hem de müdahale ekiplerinin karşılaştığı öngörülemez riskler nedeniyle İSG protokollerinde köklü değişiklikler gerektirmektedir. Aşağıdaki Çizelge, bu yangınların söndürülmesini güçleştiren temel faktörleri ve operasyonel kısıtları kategorize etmektedir.

Çizelge 4.9. Elektrikli araç batarya yangınlarının söndürülmesindeki temel zorluklar ve operasyonel engeller

Zorluk Alanı	Açıklama
Termal Kaçak ve Tekrarlanan Tutuşma	Bataryada meydana gelen bir hücrenin yanması diğer hücreleri tetikler; yangın uzun süre devam edebilir (AAWSAT, 2023).
Toksik Gazlar	Yangın sırasında ağır metaller, karbon monoksit ve hidrojen siyanür gibi toksik koşullar oluşur; itfaiyeciler ciddi solunum riski altındadır (Med University Miami, 2024).
Su ve Köpük Etkisizliği	Su, lityum ile reaksiyona girerek yanıcı gazlar üretir; köpükler yeterli soğutma sağlamaz. AVD püskürtme sistemleri geliştirilmektedir (news.com.au, 2024).
Kapsam ve Erişim Sorunları	Bodrum otopark gibi kapalı alanlarda mümkün olan gaz dolaşımı ve ısı izolasyonu, müdahaleyi zorlaştırır (FT, 2024).
Tedarik Şeffaflığı Eksikliği	Araç üreticilerinin batarya kimyasını ve tedarikçisini (ör. Farasis Energy) gizli tutması, itfaiyenin doğru söndürme stratejisini (köpük/su) belirlemesini engellemektedir (FT, 2024).

Çizelge 4.9’da özetlenen zorluklar, elektrikli araç yangınlarının standart bir itfaiye operasyonundan ziyade, bir 'Tehlikeli Madde (HAZMAT)' olayı olarak yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle suyun ve köpüğün batarya zırhı nedeniyle hücrelere ulaşamaması (erişim sorunu) ve 'yeniden tutuşma' riski, müdahale stratejilerinin 'hemen söndürme' odaklı yaklaşımdan, 'uzun süreli soğutma, izole etme ve kontrollü yanmaya bırakma' stratejilerine evrilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durum, acil durum ekiplerinin donanım ve eğitim standartlarının yeniden tanımlanması gerektiğini gösteren en somut İSG verisidir.

4.10.7. İSG perspektifiyle önerilen önlemler

Bu doğrultuda, lityum-iyon batarya yangınlarının yıkıcı etkilerini en aza indirmek ve müdahale süreçlerini güvenli hale getirmek amacıyla İSG perspektifiyle önerilen temel önlemler aşağıda sıralanmıştır:

- Erken algılama: Termal kameralar ve duman sensörleri ile yangın erken tespit edilmeli.
- Otomatik izolasyon ve söndürme: AVD (Aqueous Vermiculite Dispersion) gibi yeni teknolojiler geliştirilmeli.
- Kapalı alan güvenliği: Yeterli havalandırma, yangın peril zoning, tahliye yolları ve yangın perdeleri planlanmalı.
- İtfaiye eğitimi: Batarya yangınlarına özel eğitim ve KKD adaptasyonu yapılmalı.
- Regülasyonlar: Batarya tedarikçileri açıklanmalı, üretim ve kalite kontrol süreçleri sıkılaştırılmalı.

5. YAZILIM VE OTONOM SÜRÜŞ TEKNOLOJİLERİ

Elektrikli araçların gelişiminde yalnızca donanım ve enerji depolama teknolojileri değil, aynı zamanda yazılım sistemleri, otonom sürüş fonksiyonları ve siber güvenlik uygulamaları da kritik öneme sahiptir. Bu teknolojiler, araç güvenliği ile doğrudan ilişkili olup, İSG açısından yeni risk alanları ortaya çıkarmaktadır.

5.1. Yazılım Güvenliği

Elektrikli araçlarda kullanılan yazılımlar, araç kontrol sistemleri, batarya yönetimi ve insan-makine arayüzleri gibi kritik bileşenleri yönetmektedir. Yazılım hataları, doğrudan araç kontrol kaybına, ani duruşlara veya kazalara yol açabilmektedir.

ISO 26262 (2018) standardı, otomotiv yazılımlarında fonksiyonel güvenlik için en önemli referans dokümandır. Bu standarda göre yazılım hatalarının etkileri ASIL (Automotive Safety Integrity Level) seviyeleriyle sınıflandırılmakta ve her seviyede farklı güvenlik önlemleri öngörülmektedir (ISO, 2018).

Araştırmalar, yazılım güncellemelerindeki güvenlik açıklarının da ciddi riskler doğurduğunu göstermektedir. Checkoway ve arkadaşları (2011), araçların OBD-II ve CAN-Bus sistemlerinde yazılım tabanlı saldırıların uzaktan fren, hız kontrolü ve gösterge manipülasyonu gibi sonuçlara yol açabileceğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Bu nedenle güvenli yazılım geliştirme, düzenli güncelleme ve siber dayanıklılık testleri kritik önlemler arasında yer almaktadır.

Şarj istasyonlarının güvenli işletimi, sadece fiziksel donanıma değil, aynı zamanda OCPP (Open Charge Point Protocol) tabanlı merkezi yönetim yazılımlarının kararlılığına bağlıdır. Şarj istasyonu işletim sistemleri üzerine yapılan güncel tasarımlar, yetkilendirme (RFID/Mobil Uygulama) ve enerji akış kontrolünün yazılımsal olarak yönetildiğini, dolayısıyla bu yazılımlardaki bir güvenlik açığının veya iletişim kopukluğunun, şarj işleminin durdurulamaması veya aşırı akım çekilmesi gibi fiziksel İSG risklerine dönüşebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, şarj istasyonu kurulumlarında sadece elektriksel uygunluk değil, haberleşme protokolü güvenliği ve acil durum yazılım kesicileri de denetlenmelidir (Aydemir, 2024).

Geleneksel Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) genellikle basit voltaj ve sıcaklık eşiklerine dayanırken, yeni nesil güvenlik yaklaşımları Makine Öğrenimi ve Bulut Tabanlı Dijital İkiz teknolojilerini kullanmaktadır. Özellikle bataryanın Sağlık Durumu (SOH) ve Şarj Durumu (SOC) tahminlerinde Kalman Filtresi ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi gelişmiş algoritmaların kullanılması, hücre içindeki potansiyel kısa devreleri veya kapasite kayıplarını termal kaçağa dönüşmeden önce tespit edebilmektedir. Bu nedenle, İSG açısından güvenli bir batarya sistemi, sadece anlık hataları kesen değil, aynı zamanda kestirimci bakım verisi sağlayan akıllı bir BMS mimarisini zorunlu kılmaktadır (Kumar vd., 2024).

5.1.1. Yazılım hatalarının kazalara etkisi

Bu tür kazalar yalnızca trafikte değil, şarj altyapılarında görevli teknisyenler açısından da riskler taşır. Örneğin, yazılımın yanlış hata teşhisi veya şarj sistemini zamanında kesememesi, çalışanların yüksek voltaj maruziyeti yaşamasına neden olabilir. Bu durum, bakım personeli için ciddi elektrik çarpması ve ark flaşı riski anlamına gelmektedir (Bozdağ vd., 2020). Dolayısıyla yazılım güvenliği, yalnızca kullanıcı güvenliği değil, işyerinde çalışan güvenliği için de kritik bir konudur.

5.1.2. OBD-II ve CAN-Bus açıkları

Elektrikli araçlarda kullanılan OBD-II ve CAN-Bus sistemleri, şarj istasyonlarıyla iletişimde de rol oynayabilmektedir. Bu protokollerdeki kimlik doğrulama eksiklikleri, araç veya şarj ünitesi üzerinde yetkisiz komutların uygulanmasına zemin hazırlamaktadır (Koscher vd., 2010). 2015 yılında Miller ve Valasek'in gösterdiği Jeep hack vakasında, uzaktan erişimle direksiyon ve fren sistemlerinin manipüle edilmesi mümkün olmuştur (Miller ve Valasek, 2015). Benzer açıklar şarj istasyonlarında da çalışan güvenliği açısından kritik öneme sahiptir: kötü niyetli bir saldırı, şarjın kesilmesini engelleyerek bataryanın aşırı ısınmasına ve yangın riskine, dolayısıyla istasyonda görevli personelin hayatını tehdit eden durumlara yol açabilir.

Ayrıca, OBD-II dongle cihazları üzerinde yapılan araştırmalar, bu cihazların önemli bir kısmının en az iki kritik güvenlik açığı barındırdığını ve saldırıların CAN-Bus üzerinden

güvenlik kritik işlevlere ulaşabildiğini göstermiştir (Wen vd., 2020). Bu tür zafiyetler, yalnızca sürücüler değil, bakım ve onarım çalışanları açısından da risk teşkil etmektedir.

İSG Perspektifi: Yazılım güvenliğinin sağlanamaması, elektrikli araçlarda ve şarj istasyonlarında üç temel İSG riskine yol açmaktadır:

1. Elektriksel Riskler: Yazılım tabanlı hata veya saldırılar, şarj kesilmesini engelleyerek bakım personelinin yüksek voltaj maruziyetine açık bırakabilir.
2. Yangın ve Patlama Riskleri: Yanlış yönetilen yazılım süreçleri, bataryalarda termal kaçak tetikleyebilir ve yangın istasyon çalışanlarını tehdit edebilir.
3. Ergonomik ve Psikososyal Riskler: Yazılım tabanlı güvenlik açıklarının bilinmesi, çalışanlarda iş kaygısı yaratabilir; ayrıca sürekli alarm veya müdahale gerektiren sistemler çalışan yorgunluğunu artırabilir.

5.2. Otonom Sürüş

Otonom sürüş sistemleri, genellikle lidar, radar, kamera ve ultrasonik sensörlerin birleşimi ile çevresel algılama yapmaktadır. Ancak bu sensörlerdeki arızalar, algılama hataları ve yazılım kararsızlıkları kazalara yol açabilmektedir.

ISO 26262 standardı, otonom sürüş fonksiyonlarını da kapsamakta ve araç üreticilerinin bu fonksiyonları fonksiyonel güvenlik süreci içinde değerlendirmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca ISO/PAS 21448 (SOTIF – Safety of the Intended Functionality), yazılımın doğru çalışmasına rağmen sensör hataları ve çevresel faktörlerden kaynaklanan kazaların da güvenlik analizine dahil edilmesi gerektiğini belirtmektedir (ISO, 2019).

Bu güvenlik analizlerinin önemi, geçmişte yaşanan test kazalarıyla da doğrulanmıştır. Otomatik acil frenleme (AEBS) sistemlerinin test ve demonstrasyon aşamalarında, sistemin fonksiyonel kapsamına dair yanlış varsayımlar ciddi riskler doğurabilmektedir. Nitekim 2015 yılında gerçekleştirilen bir demonstrasyon sırasında, yaya algılama donanımı bulunmayan bir aracın kalabalığa çarpmasıyla sonuçlanan kaza, donanım-yazılım uyumsuzluğunun ve insan faktörünün yarattığı tehlikeyi somut bir şekilde ortaya koymuştur (CBS News, 2015). Bu tür risklerin yönetimi için UN ECE R152 düzenlemesi, sistemlerin

performans kriterlerini standartlaştırırsa da (UN ECE, 2020); üretim ve test sahalarında insan denekler yerine simülasyon ve mankenlerin kullanılması, saha izolasyonunun sağlanması ve çalışanların sistemin aktif güvenlik sınırları konusunda net bilgilendirilmesi kritik bir zorunluluktur.

Güncel araştırmalar, lidar ve kamera tabanlı sistemlerin farklı avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, lidar sensörleri gece ve düşük ışık koşullarında daha güvenilir sonuçlar verirken, Tesla gibi üreticiler kameraya dayalı yazılımların sürekli iyileştirilmesiyle daha kararlı performans elde edildiğini iddia etmektedir. Son yıllarda yapılan karşılaştırmalı testlerde, lidar tabanlı sistemlerin çarpışma önlemede daha başarılı, kamera tabanlı yazılımların ise maliyet ve ölçeklenebilirlik açısından avantajlı olduğu rapor edilmiştir (Fridman, 2023).

5.2.1. Otonom sürüş seviyeleri ve sorumluluk paylaşımı

Otonom sürüş teknolojilerinin İSG üzerindeki etkilerini analiz edebilmek için, Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE) tarafından belirlenen ve "J3016" standardı ile tanımlanan 6 otomasyon seviyesinin incelenmesi gerekmektedir. Bu seviyeler, aracın kontrolünün insandan makineye geçiş sürecini ve buna bağlı olarak kaza sorumluluğunun ve hesap verebilirliğin (Accountability) nasıl değiştiğini belirler. Özellikle yapay zeka etiği üzerine yapılan çalışmalar, otonom sistemlerin karar alma süreçlerinde makinelere atfedilen sorumluluğun, aslında bir "Etik Denetim (Ethical Auditing)" mekanizması ile tekrar insanlara (geliştiricilere ve denetçilere) aktarılması gerektiğini vurgulamaktadır (Bennett, 2023).

Sorumluluk devrinin pratikteki en çarpıcı örneklerinden biri, endüstriyel lojistik süreçlerinde hayata geçirilmiştir. Tesla'nın Yapay Zeka birimi tarafından paylaşılan verilerde, Fremont fabrikasındaki üretim bandından inen elektrikli araçların, herhangi bir insan müdahalesi veya harici sensör altyapısı olmadan, fabrika sahasındaki karmaşık rotayı otonom olarak katederek sevkiyat alanına gidip park ettiği görülmektedir (Resim 5.1). 'Tam Otonom Sürüş' (Full Self-Driving - FSD) yazılımının fabrika içi lojistikte kullanılması, araç kontrolünün tamamen yazılıma devredildiği senaryolarda İSG risklerinin (yaya çarpması, maddi hasar vb.) yönetiminin de teknolojik altyapıya kaydığını somut olarak göstermektedir (Tesla AI, 2025).



Resim 5.1. Tesla Fremont fabrikasında üretim hattından çıkan araçların otonom sevkiyat süreci.

Bu bağlamda, araç kontrolünün ve sorumluluğun kademeli olarak değiştiği seviyelerin İSG ve risk analizi aşağıda sunulmuştur:



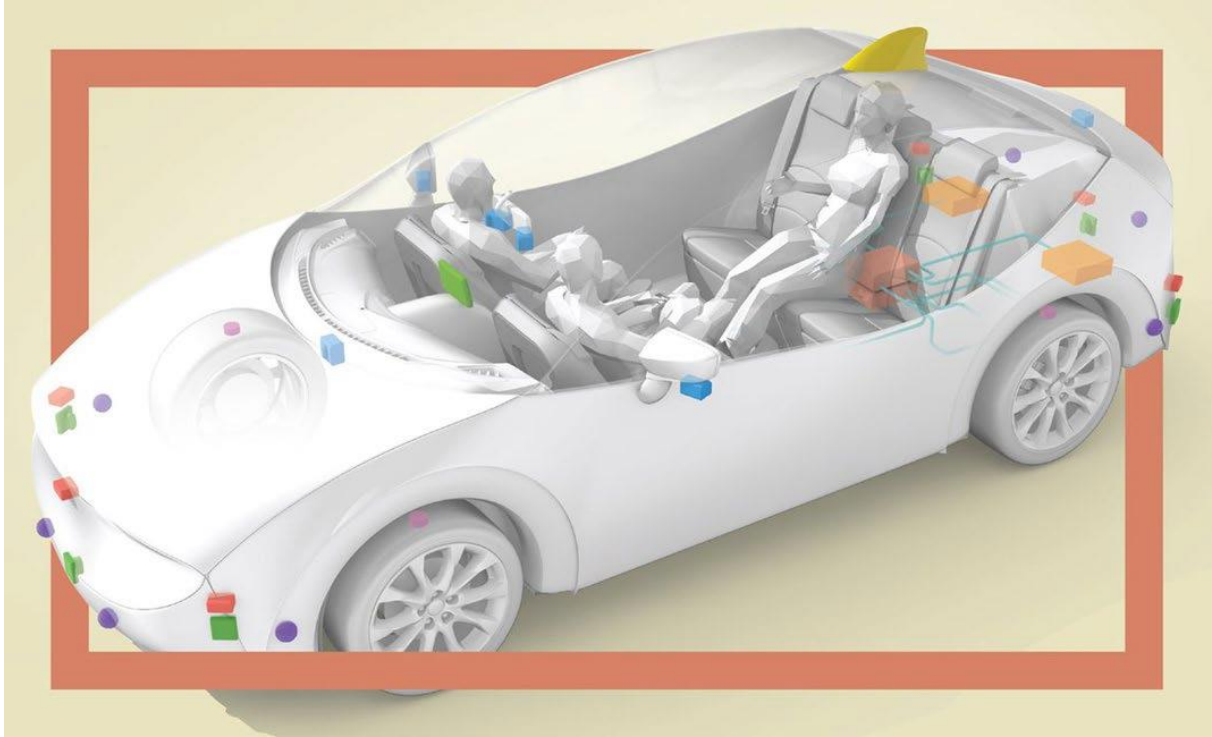
Şekil 5.1. Seviye 1’den seviye 5’e araç otonomisi

Şekil 5.1. ‘de verilen ve SAE International tarafından 2021 yılında yayınlanan “SAE Sürüş Otomasyonu Seviyeleri” sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

- Seviye 0 (Otomasyon Yok): Sürücü, tüm sürüş görevlerini (direksiyon, fren, gaz) anlık olarak yönetir. İSG riski tamamen insan hatası ve psikososyal faktörlere (yorgunluk, dikkat dağınıklığı) dayalıdır.
- Seviye 1 (Sürücü Yardımı): Araç, direksiyon veya hızlanma/yavaşlama fonksiyonlarından sadece birini (örneğin Adaptif Hız Sabitleyici) üstlenir. Sürücü her an tetikte olmak zorundadır.
- Seviye 2 (Kısmi Otomasyon): Araç, direksiyon ve hızlanmayı aynı anda kontrol edebilir (örneğin Şerit Takip + Hız Sabitleme). Ancak sürücünün elleri direksiyonda ve gözü

yolda olmalıdır. İSG açısından en büyük risk, sürücünün sisteme aşırı güvenip (over-reliance) dikkat körlüğü yaşamasıdır.

- Seviye 3 (Koşullu Otomasyon): Kritik bir eşik olan bu seviyede, araç belirli koşullarda (örneğin otoyolda) çevreyi izleyip sürüşü tamamen devralabilir. Ancak sistem bir hata algıladığında sürücünün müdahale etmesini ister.
- *İSG Riski*: "Devralma (Handover)" Sorunu: Sürücünün pasif durumdan aktif duruma geçiş süresi (reaksiyon süresi) kazaların en yoğun yaşandığı andır. Bu seviye, insan-makine etkileşimi açısından en riskli bölge olarak kabul edilir.
- Seviye 4 (Yüksek Otomasyon): Araç, belirli coğrafi sınırlarda veya koşullarda (örneğin kampüs içi ring araçları) insana ihtiyaç duymadan tüm sürüşü gerçekleştirir. Bir sorun olduğunda araç kendini güvenli bir yere çekebilir (Fail-Safe).
- Seviye 5 (Tam Otomasyon): Direksiyon veya pedalın bulunmadığı, her koşulda insan müdahalesine gerek duymayan sistemdir.
- *Sorumluluk Analizi*: Bu seviyede sürücü artık bir "yolcu" konumundadır. Dolayısıyla olası bir kaza veya yangın durumunda sorumluluk, tamamen yazılımın karar mekanizmasına ve donanım güvenilirliğine geçer. Ancak güncel yaklaşımlar, bu "makine kararının" da nihai olarak onu tasarlayan ve denetleyen insanlara (mühendislere/etik denetçilere) hesap verebilir olması gerektiğini savunmaktadır (Bennett 2023).



Resim 5.2. Şirket X Seviye 5 Araç Otonomisi için Görselleştirme

“Tamamen Otonom (Seviye 5) Arabaların Sahip Olması Gereken Teknoloji” başlıklı makaleden alıntıdır. Beard (2017). (This Is the Tech Fully Autonomous (Level 5) Cars Will Need To Have (caranddriver.com)).

Sonuç olarak; otonom sürüş seviyesi arttıkça, İSG risklerinin doğası "operasyonel insan hatasından", "sistemik yazılım hatasına" ve "etik karar alma süreçlerine" doğru kaymaktadır. Bu durum, geleceğin İSG uzmanlarının sadece fiziksel riskleri değil, algoritmik riskleri de denetlemesini zorunlu kılmaktadır.

5.2.2. Lidar, radar sistemleri arızası ve çarpışma riski

Otonom araçlarda LiDAR, radar ve kamera sensörleri temel algılama unsurlarıdır. Ancak bu sistemlerde yaşanan kalibrasyon hataları, donanım arızaları veya dışsal etkenlere bağlı enterferans çarpışma riskini artırabilmektedir. NTSB'nin 2018 Tempe kazasına ilişkin raporunda, aracın sensörleri yayayı algılamış olmasına rağmen yazılımın bunu doğru şekilde sınıflandıramadığı ve çarpışmanın engellenemediği belirtilmiştir (NTSB, 2019).

Sensör güvenilirliğinin zayıflığı, yalnızca yol kullanıcıları için değil, test pistlerinde çalışan mühendisler, bakım personeli ve şarj altyapısında görev yapan çalışanlar için de risk oluşturmaktadır. Örneğin, yanlış algılama sonucu aracın kontrolsüz hareket etmesi, test sahasında görevli işçilere veya bakım teknisyenlerine doğrudan çarpma riski taşır. Ayrıca şarj istasyonlarında, otonom park ve otomatik şarj sistemleri sırasında sensörlerin başarısız olması, istasyonda çalışan personelin yaralanmasına yol açabilecek kontrolsüz manevralara neden olabilir.

5.2.3. ISO 26262 (Functional Safety) değerlendirmeleri

ISO 26262 standardı, otomotiv elektrik/elektronik sistemlerinde işlevsel güvenliği düzenlemektedir. Standart, Tehlike Analizi ve Risk Değerlendirmesi (Hazard Analysis and Risk Assessment - HARA) ile potansiyel tehlikeleri tanımlamayı ve Otomotiv Güvenlik Bütünlük Seviyesi (Automotive Safety Integrity Level - ASIL) dereceleri üzerinden risk azaltıcı tedbirler geliştirmeyi zorunlu kılar (ISO, 2018). Otonom sürüş teknolojilerinde bu gereklilik, özellikle sensör algılaması, veri füzyonu ve karar algoritmaları için kritik hale gelmektedir.

İSG açısından bakıldığında, ISO 26262'nin uygulanmaması yalnızca yol güvenliği değil, aynı zamanda bakım teknisyenleri ve şarj istasyonlarında görevli çalışanlar için de doğrudan risk anlamına gelir. Örneğin, otonom park sırasında güvenlik protokollerinin eksik uygulanması, istasyondaki bir çalışanın aracın hareketinden zarar görmesine neden olabilir. Dolayısıyla, ISO 26262 yalnızca yol kullanıcılarının değil, araçla temas eden tüm iş gücünün güvenliği için bağlayıcı bir çerçeve sunmaktadır.

5.2.4. İSG Perspektifi

Otonom sürüş teknolojilerinde yazılım ve donanım hatalarının İSG üzerindeki etkileri üç başlıkta toplanabilir:

1. Çarpma ve Ezilme Riski: Otonom park veya test esnasında sensör arızaları, bakım/istasyon çalışanlarının doğrudan yaralanmasına yol açabilir.
2. Elektriksel Riskler: Sensörlerin veya kontrol yazılımının hatalı çalışması, şarj bağlantılarının kontrolsüz yapılmasına ve yüksek voltaj maruziyetine sebep olabilir.

3. Psikososyal Riskler: Otonom sistemlere güven eksikliği, çalışanlarda stres ve kaygı yaratabilir; bu da dolaylı olarak iş kazalarına zemin hazırlayabilir.

5.3. Siber Güvenlik

Elektrikli araçlar ve şarj istasyonları, giderek daha fazla bağlantılı cihaz haline gelmekte ve bu durum yeni siber güvenlik riskleri doğurmaktadır. İnsan-Makine Arayüzü (Human-Machine Interface - HMI) üzerinden gerçekleştirilebilecek saldırılar, sürücünün dikkatini dağıtma, yanlış bilgi verme ya da doğrudan araç kontrolünü ele geçirme gibi sonuçlara yol açabilir.

Uluslararası Standartlar Örgütü / Otomotiv Mühendisleri Derneği (International Organization for Standardization / Society of Automotive Engineers - ISO/SAE) 21434 (2021) standardı, araç yaşam döngüsü boyunca siber güvenlik mühendisliği gerekliliklerini belirlemekte; risk değerlendirmesi, tehdit analizi ve olay müdahale planlaması gibi adımları zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte, Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (United Nations Economic Commission for Europe - UNECE) WP.29 Regülasyonları (R155/R156), otomotiv üreticilerinin hem siber güvenlik yönetim sistemlerini kurmalarını hem de yazılım güncellemelerinin güvenliğini garanti etmelerini şart koşmaktadır (UNECE, 2021).

800V batarya sistemleri, genellikle 400V muadillerine göre iki kat daha fazla seri hücre ve dolayısıyla daha fazla Pıl Yönetim Sistemi (BMS) voltaj algılama kanalı gerektirmektedir (Aghabali vd., 2021). Bu artan BMS karmaşıklığı ve maliyeti, sistemin yazılımsal olarak daha hata eğilimli olmasına, dolayısıyla batarya denetiminde aksaklıklara ve potansiyel güvenlik açıkları yaratmasına neden olmaktadır. Organizasyonel olarak bu durum, bakım personelinin yazılım tabanlı arıza tespiti, BMS resetleme ve acil durum protokollerine yönelik yetkinliğini kritik hale getirmektedir.

ABD’de NHTSA (2022) tarafından yayımlanan rapor, modern araçlarda siber güvenliğin trafik güvenliğiyle doğrudan bağlantılı olduğunu vurgulamakta; siber saldırıların fiziksel kazalara yol açabileceği riskine dikkat çekmektedir. Ayrıca NIST IR 8473 (2023) raporu, elektrikli araçların aşırı hızlı şarj (XFC) altyapısı için siber güvenlik profili tanımlayarak,

şarj istasyonları ile araç arasındaki veri akışında alınması gereken önlemleri detaylandırmaktadır.

Günümüzde yapay zekâ tabanlı izleme sistemleri, şarj istasyonlarındaki yangın risklerinin erken tespitinde önemli rol oynamaktadır. Park vd. (2024), duman ve kıvılcım algılama için geliştirdikleri bilgisayarlı görü sisteminde, konvansiyonel sensörlere göre %92 doğruluk elde ettiklerini belirtmiştir. Bu tür sistemlerin IEC 61508 standardıyla entegre edilmesi, otomatik tahliye ve enerji kesme süreçlerinde güvenilirliği artırmaktadır.

Otonom sürüş ve akıllı şarj sistemlerindeki siber güvenlik açıkları, yalnızca veri hırsızlığı değil, aynı zamanda fiziksel İSG risklerine de neden olmaktadır (Checkoway vd., 2011). ISO/SAE 21434 ve ISO 26262 (Fonksiyonel Güvenlik) standartları kapsamında gerçekleştirilecek Tehdit Analizi ve Risk Değerlendirmesi (TARA), siber saldırıların LOTO prosedürünü atlama veya yüksek voltajı izole eden devre kesiciyi yeniden aktif etme gibi senaryolar üzerinden değerlendirilmesini gerektirmektedir (ISO, 2021). Yazılım tabanlı hatalar veya saldırılar sonucu şarj kesintisinin engellenmesi, bakım personeli yüksek voltaj maruziyetine ve ark flaşı riskine açık hale getirmektedir. Bu riskleri yönetmek için UN ECE R155 (Siber Güvenlik) ve R156 (Yazılım Güncelleme Yönetimi) regülasyonlarının Türkiye'deki otomotiv ve şarj altyapısı tedarikçileri için yasal zorunluluk haline getirilmesi önerilmelidir (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2020a, 2020b).

Checkoway vd. (2011) tarafından ortaya konan siber saldırıların fiziksel etkileri, güncel çalışmalarla genişlemiştir. Haces-Fernandez (2023) bu bağlamda, EV şarj altyapısında siber güvenlik ihlallerinin enerji kesme komutlarını geciktirerek operatörlerin yüksek voltaj altında çalışmasına yol açabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, İSG risk analizlerinde siber tehditlerin fiziksel maruziyet faktörü olarak ele alınması gereklidir. Benzer biçimde yapılan güncel çalışmalar, CAN-bus tabanlı ağların dış erişim ve komut manipülasyonlarına karşı yüksek düzeyde zafiyet taşıdığını göstermektedir (Khan vd., 2023; Oladimeji vd., 2023).

5.3.1. HMI (Human-Machine Interface) üzerinden olası saldırılar

Araç içi HMI sistemleri (dokunmatik ekranlar, sesli komutlar, kablosuz bağlantılar) kullanıcı deneyimini iyileştirirken, saldırganlar için potansiyel giriş noktaları da oluşturmaktadır. Literatürde HMI üzerinden yetkisiz erişimle aracın temel kontrol sistemlerine müdahale

edilebildiği ve bunun da çarpışma riski doğurabildiği rapor edilmiştir (Petit ve Shladover, 2015).

İSG açısından bakıldığında, bu tür saldırılar yalnızca sürücüleri değil, şarj istasyonlarında çalışan personeli de tehlikeye atmaktadır. Örneğin, HMI üzerinden yapılan bir saldırı ile şarj akımı kesilemeyebilir veya istasyon kontrolsüz biçimde devrede kalabilir. Bu durum, bakım sırasında çalışanların yüksek voltaj maruziyetine yol açarak elektrik çarpması ve ark flaşı risklerini artırabilir. Ayrıca, saldırılar sonucu batarya sistemlerinde aşırı ısınma meydana gelebilir; bu da şarj istasyonlarında yangın riski oluşturur ve çalışanların güvenliğini tehdit eder (NHTSA, 2022).

5.3.2. NIST ve ISO/SAE 21434 standartları çerçevesinde İSG etkisi

Elektrikli araçlarda siber güvenliğin sağlanması için uluslararası standartlar kritik öneme sahiptir. ISO/SAE 21434:2021, otomotiv siber güvenliği için tehdit analizi ve risk değerlendirmesi (TARA) süreçlerini tanımlamakta, özellikle tedarik zinciri ve yaşam döngüsü boyunca risklerin yönetimini zorunlu kılmaktadır. Bu standart, yalnızca araç içi güvenliği değil, şarj istasyonlarıyla olan iletişimin güvenliğini de kapsar (ISO ve SAE, 2021).

Öte yandan, NIST Cybersecurity Framework (CSF 2.0) kurumsal düzeyde bir risk yönetim yapısı sunarak, şarj istasyonu işletmecilerinin Govern–Identify–Protect–Detect–Respond–Recover fonksiyonlarını uygulamasını önerir (NIST, 2024). Bu yaklaşım sayesinde, şarj altyapısında görev yapan çalışanların siber saldırılar sonucu maruz kalabileceği elektriksel, yangın ve ergonomik riskler azaltılabilmektedir. Ayrıca NISTIR 8259A raporunda tanımlanan IoT cihaz güvenliği taban çizgisi, şarj istasyonu ekipmanlarının güvenliğini sağlamada ve bakım personelinin risklerini azaltmada tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir (NIST, 2020).

5.3.3. İSG Perspektifi

Siber güvenlik açıklarının İSG'ye etkisi üç temel boyutta değerlendirilebilir:

1. Elektriksel Riskler: Saldırıları sonucu şarj kesilmesinin engellenmesi, bakım personelinin yüksek voltaj maruziyetine açık bırakır.
2. Yangın ve Patlama Riski: Batarya yönetim sistemlerinin manipölasyonu, termal kaçaklara yol açarak istasyon çalışanlarını tehlikeye atabilir.
3. Psikososyal Riskler: Şarj altyapısında çalışan personelin sürekli siber saldırı tehdidi altında hissetmesi, iş stresi ve dikkat dağınıklığına sebep olabilir.



Çizelge 5.1. Elektrikli araç ekosisteminde dijitalleşme ve otonom sistemlerden kaynaklanan İSG risk matrisi ve ilgili standartlar

Alt Başlık	Başlıca Riskler	İSG'ye Etkileri	İlgili Standartlar / Bulgular
Yazılım Güvenliği	Yazılım hataları, OBD-II ve CAN-Bus açıkları	Trafikte çarpışma riski Bakım personeli için yüksek voltaj maruziyeti • Batarya yangını ve ark flaşı riski	-ISO 26262 (işlevsel güvenlik) -CAN güvenlik araştırmaları (Koscher vd., 2010; Miller ve Valasek, 2015) -OBD-II dongle zafiyetleri (Wen vd., 2020)
Otonom Sürüş	LiDAR/radar arızaları, sensör enterferansı ve spoofing	Test sahalarında çalışanlara çarpma riski • Şarj istasyonlarında otonom park sırasında kaza riski • Yüksek voltaj bağlantılarında kontrolsüz maruziyet	-ISO 26262 (ASIL/HARA yaklaşımı) -NTSB kazaları (Uber 2018 Tempe, Tesla 2018 Mountain View) -Sensör güvenilirliği çalışmaları (Matos vd., 2024)
Siber Güvenlik	HMI saldırıları, telematik açıklar, kötü amaçlı yazılım	Şarj kesilmemesi → bakım çalışanlarında elektrik şoku • Batarya manipülasyonu → yangın/patlama riski • Çalışanlarda stres, dikkat dağınıklığı	-ISO/SAE 21434 (araç siber güvenliği) -NIST CSF 2.0 (kurumsal çerçeve) -NISTIR 8259A (IoT cihaz güvenliği) -NHTSA (2022) rehberi

Çizelge 5.1’de sunulan bütünleşik risk analizi, elektrikli araçlardaki tehdit profilinin yalnızca teknik bir arıza olmaktan çıkıp, 'siber-fiziksel' bir İSG sorununa dönüştüğünü kanıtlamaktadır. Özellikle batarya yönetim sistemlerine (BMS) yapılabilecek siber müdahalelerin veya yazılım açıklarının, bakım personeli için doğrudan ölümcül elektrik

şoku ve yangın riskine dönüşebilmesi; ISO/SAE 21434 (Siber Güvenlik) standardının, klasik iş güvenliği önlemleriyle (ISO 45001) hibrit bir şekilde uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

5.4 Türkiye Bağlamında Yazılım ve Otonom Sürüş Teknolojileri

Türkiye’de elektrikli ve otonom araç teknolojileri hızla gelişmekte olup, bu süreçte standartların ulusal uyarlamaları ve regülasyonların İSG açısından kritik rol oynadığı görülmektedir.

TSE, uluslararası otomotiv standartlarının önemli bir kısmını TS EN serisi altında uyarlamaktadır. Bu kapsamda ISO/SAE 21434: Road vehicles—Cybersecurity engineering standardı, Türkiye’de TS EN ISO/SAE 21434 olarak yayımlanmıştır. Bu standardın ulusal uyarlaması, otomotiv üreticilerinin ürün yaşam döngüsü boyunca siber güvenlik risklerini değerlendirmesini, tehdit analizlerini yapmasını ve yazılım güncellemelerinin güvenliğini garanti etmesini şart koşmaktadır (TSE, 2022).

Ayrıca, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı ile Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı bünyesinde yürütülen Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) Strateji Belgesi (2020–2023), Türkiye’de otonom sürüş teknolojilerinin geliştirilmesinde yol haritası niteliğindedir. Bu belgede, özellikle siber güvenlik, veri güvenliği ve yol kullanıcılarının güvenliği boyutlarına dikkat çekilmektedir (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020).

Türkiye’deki E-Şarj ve TOGG projeleri, otonom sürüş yazılımlarıyla birlikte çalışacak sistemlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Ancak, mevcut 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve bağlı yönetmeliklerde, elektrikli araçların yazılım güvenliği ve otonom sürüşle ilgili özel düzenlemeler henüz bulunmamaktadır. Bu durum, uluslararası standartların ve iyi uygulamaların Türkiye’de uygulanmasının önemini artırmaktadır.

Dolayısıyla, Türkiye bağlamında yazılım güvenliği ve otonom sürüş teknolojilerinin İSG ile entegrasyonu, yalnızca teknik boyutta değil, aynı zamanda kurumsal ve yasal düzenlemeler boyutunda da geliştirilmelidir.

6. ŞARJ İSTASYONLARI

Elektrikli araç şarj istasyonları, elektromobilitenin güvenli ve sürdürülebilir şekilde yaygınlaşması için kritik altyapıyı oluşturmaktadır. Şarj istasyonlarının güvenliği, yalnızca kullanıcıların korunması açısından değil, aynı zamanda bakım-onarım personeli ve tesis işletmecileri için de hayati öneme sahiptir. Bu nedenle şarj istasyonlarının tasarım, kurulum ve işletme süreçlerinde uluslararası standartlara uyum, düzenli bakım prosedürleri ve kullanıcı eğitimi zorunlu hale gelmektedir.



Resim 6.1. Şarj istasyonu görseli temsili.

Şarj istasyonlarının güvenliğinde en çok dikkat edilmesi gereken hususlar; topraklama sistemlerinin güvenilirliği, kaçak akım korumalarının varlığı, kullanıcıların bilinçlendirilmesi ve tesisat güvenliğinin uluslararası standartlara uygunluğu olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca acil durum prosedürlerinin (acil durdurma butonları, yangın söndürme sistemleri) bulunması da güvenliğin ayrılmaz bir parçasıdır.

Elektrikli araç teknolojisinde giderek yaygınlaşan "Araçtan Şebekeye" (V2G) uygulamaları, şarj ünitelerinde İki Aşamalı Çift Yönlü Güç Dönüştürücülerin (Buck-Boost) kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu dönüştürücülerin tasarımı üzerine yapılan analizler, enerji akışının yön değiştirdiği anahtarlama anlarında oluşan yüksek voltaj stresi ve anahtarlama

kayıplarının, devre elemanlarında aşırı ısınmaya ve yalıtım delinmesine yol açabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, çift yönlü şarj istasyonlarının periyodik kontrollerinde, güç elektroniği bileşenlerinin termal yorgunluk testlerinin de İSG denetim listelerine eklenmesi gerekmektedir (Ekici vd., 2025).

Yüksek güçlü sıvı soğutmalı DC şarj kabloları, bakır kesitleri ve soğutma sıvısı ağırlığı nedeniyle kullanıcılar ve özellikle gün boyu bu kabloları idare eden istasyon görevlileri için ergonomik risk oluşturmaktadır. ISO 11228 (Elle Taşıma) standardı kapsamında, kablo askı sistemlerinin (cable management systems) ağırlığı nötrleyecek şekilde tasarlanması, İSG açısından bir konfor değil, zorunluluk olarak değerlendirilmelidir.

Ekim 2025 itibarıyla Türkiye'deki elektrikli araç şarj istasyonlarına ilişkin en güncel veriler, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve çeşitli sektörel raporlar tarafından sağlanmaktadır. EPDK'nın lisans verdiği ve sisteme kayıtlı olan toplam şarj noktası (soket) sayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler, mevcut altyapının genel durumunu ortaya koymaktadır (EPDK, 2025). Bu veriler, hem halka açık (aktif) hem de geçici olarak servis dışı veya özel kullanımda olan (pasif) tüm üniteleri kapsamaktadır.

Türkiye'de şarj altyapısının yaygınlaşmasını hızlandırmak amacıyla, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik kapsamında, elektrikli araç şarj ünitelerinin kurulumu için yapı ruhsatı aranma zorunluluğu kaldırılmıştır. Ancak, bu muafiyet, kurulumların İSG standartlarından bağımsız olduğu anlamına gelmemelidir. Yönetmelik, şarj ünitelerinin, patlayıcı ve yanıcı maddelerin depolandığı alanlara ve binaların ana girişlerine belirli güvenlik mesafelerinde (örneğin akaryakıt pompalarına en az 15 metre) kurulmasını şart koşturmaktadır. Bu durum, kurulum süreçlerinde yapısal denetimden ziyade, yer seçim risk analizinin kritik bir İSG parametresi haline geldiğini göstermektedir (Resmî Gazete, 2021).

Türkiye genelinde yaklaşık 9.100 adet elektrikli araç şarj istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlar, bir veya birden fazla şarj ünitesine sahip olan lokasyonlardan oluşmaktadır. Bu istasyonlarda bulunan toplam şarj noktası (soket) sayısı 20.000'i aşmıştır (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025). Bu rakam, Türkiye'nin elektrikli araç altyapısında önemli bir eşiği temsil etmekte olup, her yıl düzenli olarak artış göstermektedir.

Şarj noktalarının hızlarına göre dağılımı incelendiğinde; yaklaşık 15.500'ü AC (yavaş şarj), yaklaşık 4.500'ü ise DC (hızlı şarj) soketlerden oluşmaktadır (Enerji Ekonomisi, 2025). Bu oranlar, Türkiye'deki elektrikli araç şarj altyapısının hâlen büyük oranda AC tipi şarj sistemlerine dayandığını, ancak DC hızlı şarj altyapısının da son yıllarda hızla güçlendiğini göstermektedir (PwC Türkiye, 2025).

Türkiye'de elektrikli araç şarj istasyonlarının dağılımında akaryakıt istasyonları, altyapının en önemli ve en hızlı gelişen unsurlarından biri haline gelmiştir. Ekim 2025 itibarıyla, Türkiye genelinde yaklaşık 2.500 ila 3.000 akaryakıt istasyonunda en az bir adet elektrikli araç şarj ünitesi bulunmaktadır. Bu lokasyonlarda kurulu toplam şarj noktası (soket) sayısı 5.000 ila 6.000 civarındadır (Evcify, 2025).

Akaryakıt istasyonlarına kurulan şarj ünitelerinin büyük çoğunluğu DC (Doğru Akım) hızlı şarj özelliğine sahiptir. Türkiye genelinde mevcut yaklaşık 4.500 DC soketin %50'den fazlası bu istasyonlarda yer almaktadır (PwC Türkiye, 2025). Bu durum, şehirlerarası ulaşım güzergâhlarında ve ana arterlerde yer alan akaryakıt istasyonlarını, uzun mesafe seyahat eden kullanıcılar için stratejik hızlı şarj merkezleri haline getirmiştir (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025).

Sonuç olarak, akaryakıt istasyonları yalnızca fosil yakıt ikmal noktaları olmaktan çıkmış, aynı zamanda yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinin stratejik merkezleri haline gelmiştir. Bu dönüşüm, Türkiye'nin elektrikli araç ekosisteminde enerji arz güvenliği, altyapı sürdürülebilirliği ve ulaşımında karbon emisyonlarının azaltılması açısından kritik öneme sahiptir (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025).

6.1. Topraklama, Kaçak Akım, Kullanıcı Eğitimi

Elektrikli araç şarj istasyonlarının güvenli çalışması, büyük ölçüde doğru topraklama, kaçak akım koruma sistemleri ve kullanıcıların bilinçlendirilmesi ile mümkündür. Yanlış tesisat uygulamaları ya da standart dışı bağlantılar, hem kullanıcıların elektrik çarpması riskini artırmakta hem de yangın tehlikesine yol açabilmektedir.

Uluslararası düzeyde, IEC 60364-7-722 standardı, EA şarj tesisatlarının topraklama ve koruma önlemlerine ilişkin en temel düzenlemelerden biridir. Bu standarda göre şarj

devrelerinde, artık akım cihazlarının (RCD) kullanımı zorunludur ve AC şarj noktalarında en az 30 mA hassasiyetinde Tip A RCD tercih edilmesi gerekir. DC şarj istasyonları için ise Tip B RCD ya da 6 mA DC kaçak akım algılama özelliğine sahip RDC-DD cihazları tavsiye edilmektedir (International Electrotechnical Commission [IEC], 2018a; IEC, 2018b). Bu uygulama, özellikle IEC 62955:2018 standardı ile desteklenmiş olup, DC kaçak akımların tespiti ve sistemin otomatik olarak devre dışı bırakılmasıyla güvenliği artırmaktadır (IEC, 2018c).

Bunun yanı sıra IEC 62752:2024, taşınabilir şarj kablolarında kullanılan Integrated Control and Protective Device (IC-CPD) sistemleri için gereklilikleri tanımlayarak, özellikle ev tipi prizlerden yapılan şarjlarda kullanıcı güvenliğini güçlendirmektedir (IEC, 2024).

Ancak teknik önlemler tek başına yeterli değildir. Kullanıcıların bilinç düzeyi, güvenli şarj davranışlarının geliştirilmesi açısından kritik önemdedir. Araştırmalar, kullanıcıların sıklıkla hasarlı kablolarla şarj yapma, konnektörleri yanlış bağlama ve acil durum prosedürlerini bilmemek gibi hatalar yaptığını göstermektedir (Wang, Dehghanian, Wang, ve Mitolo, 2019; Jiang, Diao, Zhang, Zhang, ve Li, 2021). Bu nedenle şarj istasyonlarında açık görsel işaretlemeler, kolay erişilebilir acil durdurma butonları, kullanıcı kılavuzları ve düzenli denetimlerin zorunlu hale getirilmesi gerekmektedir.

ABD’de National Fire Protection Association (NFPA) 70 – National Electrical Code (NEC) standardı, kamuya açık şarj istasyonlarında acil durdurma butonlarının erişilebilir konumda olması gerektiğini açıkça belirtmektedir (NFPA, 2023). Ayrıca U.S. Fire Administration (USFA, 2025) tarafından yayımlanan rehberde, kullanıcı eğitiminin yangın risklerini önlemede temel unsurlardan biri olduğu vurgulanmaktadır.

Dolayısıyla, güvenli bir şarj altyapısının sağlanabilmesi için teknik koruma sistemlerinin uluslararası standartlara uygun şekilde uygulanması, yetkin denetimlerin yapılması ve kullanıcıların bilinçlendirilmesine yönelik sürekli eğitim programlarının devreye alınması zorunludur.

Şarj altyapısı, yalnızca fiziksel donanım güvenliği değil, aynı zamanda yazılımsal güvenlik açıklarının fiziksel tehlikeye dönüşme potansiyeli nedeniyle karmaşık bir İSG alanı sunmaktadır.

Şarj istasyonlarında elektrik çarpmasına karşı koruma, IEC 60364-7-722 standardı gereği, Tip B RCD veya RDC-DD kullanımı ile sağlanmalıdır (IEC, 2021). Mevcut ulusal tesisat yönetmeliklerinde sıklıkla sadece Tip AC/A RCD kullanımı zorunlu kılınmakta olup, bu durum kritik bir İSG açığı yaratmaktadır. Zira, araç bataryasından kaynaklanabilecek bir DC kaçak akımı, Tip AC/A RCD'yi körleştirerek korumasız kalmasına yol açar (Wang vd., 2019; Hussein vd., 2021). Bu durumun düzeltilmesi için, EPDK Şarj Hizmeti Yönetmeliği'nin ve ulusal elektrik tesisat standartlarının, IEC 60364-7-722 ve IEC 62955 gerekliliklerini açıkça ve zorunlu olarak içermesi tezde somut bir öneri olarak sunulmalıdır (T.C. Resmî Gazete, 2018).

Batarya yangınlarında, termal kaçağın henüz alevlenmeye dönüşmediği ilk evre, müdahale başarısı için 'Altın Süre' olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel duman dedektörleri bu süreyi kaçırabildiği için, şarj istasyonlarının güvenlik altyapısına, batarya sıcaklık değişimlerini anlık izleyen Termal Kameralar ve Alev Dedektörleri entegre edilmelidir. Bu sistemler, sıcaklık anomalilerini tespit ettiğinde şarj akımını otomatik keserek ve yangın söndürme sistemlerini (sprinkler/azot) tetikleyerek, felaketin büyümesini proaktif olarak engelleyebilir (Choi ve Lee, 2025).

6.2. IEC 62196 (şarj fişleri) ve IEC 60364 (tesisat güvenliği)

Elektrikli araç şarj altyapısının güvenliği, yalnızca enerji kaynağı ve koruma sistemleriyle sınırlı değildir; aynı zamanda araç ile şarj noktası arasındaki ara yüzlerin (fiş, priz, konnektör) ve tesisatın güvenli tasarımı da kritik önemdedir.

IEC 62196 serisi standartlar, elektrikli araçların şarj fişleri, prizleri, araç girişleri ve konnektörlerinin mekanik ve elektriksel özelliklerini tanımlamaktadır. Özellikle IEC 62196-2 standardı, Avrupa'da yaygın olarak kullanılan Tip 2 konnektörlerin tasarım ve güvenlik gerekliliklerini ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, IEC 62196-3, Combo (CCS) ve CHAdeMO gibi yüksek güçlü DC şarj sistemlerinde kullanılan konnektörlerin güvenlik standartlarını düzenlemektedir (IEC, 2016; IEC, 2022). Bu standartların amacı, farklı üreticiler arasında uyumluluğu ve güvenliği sağlamak, fişlerin yanlış kullanımına bağlı ark flaşı, aşırı ısınma veya temas kaynaklı kazaları önlemektir.

IEC 60364 serisi ise binalardaki alçak gerilim tesisatlarının güvenliğini düzenlemektedir. Özellikle IEC 60364-7-722, EA şarj sistemlerine özgü güvenlik kurallarını içermekte ve koruma topraklaması, aşırı akım koruması, gerilim düşümü sınırları ve devre seçimi konularında ayrıntılı hükümler getirmektedir (IEC, 2018). Bu standart hem özel konutlarda hem de ticari alanlarda şarj altyapısının güvenliğini garanti altına almak için uygulanmaktadır.

Literatür, uygunsuz fiş/konnektör kullanımı ve standart dışı tesisatların, yangın riski ve elektrik çarpması vakalarında kritik rol oynadığını göstermektedir. Örneğin, Wang, Dehghanian, Wang ve Mitolo (2019) yaptıkları çalışmada, büyük ölçekli EA şarj istasyonlarında konnektörlerin hatalı bağlantısı sonucu ısı artışı ve erime riskinin en sık karşılaşılan sorunlardan biri olduğunu vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Jiang, Diao, Zhang, Zhang ve Li (2021) yaptıkları derlemede, güvenli şarj için fişlerin uluslararası standartlarla uyumlu olması ve tesisat güvenliğinin düzenli olarak denetlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla, şarj fişleri ve tesisat güvenliği konusunda IEC 62196 ve IEC 60364 serilerinin uygulanması, yalnızca teknik uyumluluk değil, aynı zamanda kullanıcı güvenliği ve yangın önleme açısından da zorunludur.

6.3. Şarj Altyapısında Bakım, Üretim ve Otomasyon Kaynaklı İSG Riskleri

Elektrikli araç şarj ekosisteminin güvenliği, yalnızca son kullanıcı deneyimiyle sınırlı olmayıp; ekipman üretimi, kurulum ve periyodik bakım süreçlerini kapsayan geniş bir risk spektrumunu içermektedir. Bu bölümde, şarj altyapısının yaşam döngüsü boyunca çalışan sağlığını tehdit eden elektriksel, mekanik ve otomasyon kaynaklı tehlikeler, uluslararası standartlar (ISO, IEC, OSHA) ekseninde bütüncül bir yaklaşımla analiz edilmiştir.

6.3.1. Elektrik kesintisi, bakım personeli riski

Bakım çalışmaları sırasında en büyük tehlikelerden biri, beklenmedik enerjilenme ve elektrik kesintisi yönetimindeki yetersizliklerdir. ABD'deki Occupational Safety and Health Administration (OSHA) tarafından yayımlanan 29 CFR 1910.147 – The Control of Hazardous Energy (Lockout/Tagout) standardı, bu tür risklerin kontrolü için kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Buna göre bakım personeli, çalışmaya başlamadan önce ilgili devreleri kilitlemeli, etiketlemeli ve tüm enerji kaynaklarını güvenli şekilde izole etmelidir (OSHA,

n.d.). Bu prosedürlerin uygulanmaması durumunda elektrik çarpması, ark flaşı ve yangın gibi ciddi kazalar meydana gelebilmektedir.

ISO 12100:2010 standardı da benzer şekilde, makine ve elektrikli sistemlerin güvenli tasarımında risk değerlendirmesi ve risk azaltma hiyerarşisini ön plana çıkarmaktadır. Bu yaklaşıma göre bakım süreçleri, mühendislik kontrolleri (ör. izole edici devre kesiciler, otomatik kilitleme sistemleri), idari kontroller (ör. prosedürler, talimatlar) ve kişisel koruyucu donanım (ör. elektrik arkına dayanıklı KKD) ile desteklenmelidir (ISO, 2010).

Ayrıca IEC 62061:2021, güvenlik-ilişkili kontrol sistemlerinin fonksiyonel güvenliğini değerlendirerek bakım sürecinde çalışanların maruziyetini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu standart, elektrikli şarj istasyonlarındaki otomatik izolasyon sistemleri, acil durdurma fonksiyonları ve güvenlik röleleri gibi mühendislik çözümlerinin bakım faaliyetleri sırasında devre dışı bırakılmaması gerektiğini vurgulamaktadır (IEC, 2021).

Dolayısıyla bakım-onarım süreçlerinde, yalnızca teknik standartların uygulanması değil, aynı zamanda bakım personeline yönelik düzenli eğitimler, işletme prosedürlerinin netleştirilmesi ve iş sağlığı güvenliği kültürünün yerleşmesi de kritik önem taşımaktadır.

6.3.2. Ekipman Üretim Tesisleri

Elektrikli araç şarj istasyonlarının güvenliği yalnızca kullanım ve bakım süreçleriyle sınırlı değildir; bu istasyonların üretim aşaması da çalışanlar açısından ciddi İSG riskleri taşımaktadır. Şarj ekipmanlarının üretimi sırasında yüksek güçlü makineler, robotik otomasyon sistemleri ve kimyasal işleme süreçleri kullanılmaktadır. Bu nedenle, üretim tesislerinde İSG entegrasyonu tasarım aşamasında başlatılmalı ve üretim hattı boyunca uygulanmalıdır. Bu sistemlerin tasarımında, ISO 10218-1/-2 standartlarında belirtilen robot güvenliği ve acil durdurma gereklilikleri dikkate alınmalıdır (ISO, 2025).

Üretim tesislerinde en önemli riskler; mekanik sıkışma, elektrik çarpması, ergonomik yaralanmalar, kimyasal maruziyet ve otomasyon sistemlerine bağlı erişim kazalarıdır. Bu risklerin kontrol altına alınabilmesi için uluslararası makine güvenliği standartlarına uyum zorunludur.

6.3.3. Otomasyon sistemlerinde İSG entegrasyonu

Otomasyon sistemlerinin güvenli tasarımı ve işletilmesi, fonksiyonel güvenlik standartları çerçevesinde değerlendirilmelidir. Bu bağlamda:

- IEC 61508 standardı, güvenlik ile ilgili elektronik sistemlerin yaşam döngüsü boyunca risklerin tanımlanması ve güvenlik bütünlük seviyelerinin (SIL) belirlenmesini şart koşturmaktadır (IEC, 2010). Şarj ekipmanı üretiminde kullanılan robotik kollar ve yüksek güçlü test sistemleri, bu kapsama giren tipik örneklerdir.
- ISO 13849-1:2015, makinelerde güvenlik kontrol sistemlerinin tasarımında Performans Seviyesi (PL) kavramını öne çıkarmaktadır. Bu standart, otomasyonlu üretim hatlarında acil durdurma fonksiyonları, koruyucu bariyerler ve güvenlik röleleri gibi sistemlerin güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir (ISO, 2015).
- Endüstri 4.0 ile birlikte siber-fiziksel sistemler üretim hatlarında yaygınlaşmış, bu da hem operasyonel güvenlik hem de siber güvenlik-İSG kesişimini gündeme getirmiştir. Xu, Xu ve Li (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, akıllı üretim sistemlerinde insan-makine etkileşiminin artmasıyla birlikte, gerçek zamanlı izleme, dijital ikiz teknolojisi ve IoT tabanlı güvenlik çözümlerinin İSG entegrasyonunda kritik rol oynadığı vurgulanmaktadır.

Bu teknolojik gelişmeler, otomasyon sistemlerinin güvenlik potansiyelini artırmakla birlikte, özellikle test ve demonstrasyon aşamalarında mutlak güvenlik sağlanamayabileceğini de göstermektedir. Nitekim 2015 yılında gerçekleştirilen bir otomatik acil frenleme (Automatic Emergency Braking Systems – AEBS) demonstrasyonu sırasında, Volvo XC60 model bir aracın önünde bulunan kişileri algılayamaması sonucu iki gazeteciye çarpması, otomasyon sistemlerinin tasarım sınırlarını ortaya koyan önemli bir vaka olarak literatüre ve uluslararası basına yansımıştır. Olayın teknik incelemesinde, aracın yaya algılama fonksiyonunu içeren güvenlik donanımına sahip olmadığı ve bu nedenle otomatik fren sisteminin devreye girmediği rapor edilmiştir (CBS News, 2015). Bu vaka, otomasyon sistemlerinin test aşamalarında, sistem fonksiyonlarının kapsamına ilişkin yanlış varsayımların test sürücülerini ve saha personeli açısından ciddi iş sağlığı ve güvenliği riskleri doğurabileceğini göstermektedir.

Uluslararası düzenlemeler de bu sınırlılıkları dikkate alarak, otomatik frenleme ve benzeri sürücü destek sistemlerinin belirli algılama ve performans gerekliliklerini karşılama zorunlu kılmaktadır. Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UN ECE) tarafından yayımlanan R152 – Advanced Emergency Braking Systems (AEBS) düzenlemesi, araçların yaya ve araç algılama kabiliyetleri, sistem devreye girme eşikleri ve test senaryolarını ayrıntılı biçimde tanımlamaktadır (UN ECE, 2020). Bununla birlikte, bu düzenlemeler dahi otomasyon sistemlerinin test ve geçiş aşamalarında insan denekler üzerinde doğrudan denenmesini güvenli bir uygulama olarak önermemekte; kontrollü, simülasyon tabanlı veya manken destekli test prosedürlerini öne çıkarmaktadır.

Bununla birlikte, üretim tesislerinde İSG entegrasyonu yalnızca teknik önlemlerle sınırlı değildir. Operatör eğitimi, işyeri ergonomisi ve düzenli risk değerlendirmeleri, otomasyon sistemlerinin güvenli çalışmasını destekleyen tamamlayıcı unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle yüksek voltajlı test istasyonlarında LOTO prosedürlerinin uygulanması ve uygun kişisel koruyucu donanım kullanımının sağlanması zorunlu olmalıdır (OSHA, 2021).

Sonuç olarak, elektrikli araç şarj ekipmanlarının üretiminde İSG entegrasyonu; fonksiyonel güvenlik standartları (IEC 61508, ISO 13849), siber-fiziksel sistemlerin güvenliği, test süreçlerinin kontrollü biçimde yürütülmesi ve insan faktörünü merkeze alan eğitim ve organizasyonel önlemlerle birlikte ele alınması gereken çok katmanlı ve bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir.

7. BULGULAR

Elektrikli araç ekosisteminin hızla genişlemesi, şarj altyapısına yönelik güvenlik gereksinimlerini geleneksel tanımların ötesine taşımaktadır. Bu bölümde; ulusal (EPDK) ve küresel veriler ışığında altyapının nicel büyüklüğü, literatür destekli saha riskleri ve farklı coğrafyalarda meydana gelen gerçek kaza örnekleri (case studies) sentezlenerek, sektörün mevcut İSG olgunluk seviyesi çok boyutlu olarak analiz edilmiştir.

7.1 Türkiye’de Şarj Altyapısının Mevcut Durumu ve Yaygınlaşma Eğilimleri

Ekim 2025 itibarıyla Türkiye’de elektrikli araç şarj istasyonlarına ilişkin en güncel veriler, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve çeşitli sektörel raporlar tarafından sağlanmakta; EPDK’nın lisans verdiği ve sisteme kayıtlı toplam şarj noktası (soket) sayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler mevcut altyapının genel durumunu ortaya koymaktadır (EPDK, 2025). Bu verilerin, halka açık (aktif) ünitelerin yanı sıra geçici olarak servis dışı veya özel kullanımda olan (pasif) üniteleri de kapsamı, altyapının nicel büyüklüğünün değerlendirilmesinde kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Bu bağlamda, 18 Ağustos 2021 tarihli Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği’nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik kapsamında elektrikli araç şarj ünitelerinin kurulumu için yapı ruhsatı aranma zorunluluğunun kaldırılması, kurulumların hızlanmasına katkı sağlayan bir düzenleme olarak öne çıkmaktadır; ancak bu muafiyetin, kurulumların İSG standartlarından bağımsız olduğu anlamına gelmemesi gerektiği özellikle vurgulanmalıdır. Nitekim aynı düzenleme, şarj ünitelerinin patlayıcı ve yanıcı maddelerin depolandığı alanlara ve binaların ana girişlerine belirli güvenlik mesafelerinde (örneğin akaryakıt pompalarına en az 15 metre) kurulmasını şart koşmakta; böylelikle yapısal denetimden ziyade yer seçim risk analizini kritik bir İSG parametresi haline getirmektedir (Resmî Gazete, 2021).

Mevcut altyapının büyüklüğüne ilişkin bulgular, Türkiye genelinde yaklaşık 9100 adet elektrikli araç şarj istasyonu bulunduğunu; bu istasyonların bir veya birden fazla şarj ünitesine sahip lokasyonlardan oluştuğunu ve toplam şarj noktası (soket) sayısının 20.000’i aştığını göstermektedir (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025). Şarj noktalarının hızlarına göre dağılımı incelendiğinde yaklaşık 15.500’ünün Alternatif Akım (AC - yavaş şarj), yaklaşık 4.500’ünün ise Doğru Akım (DC - hızlı şarj) soketlerden oluştuğu; dolayısıyla altyapının hâlen büyük ölçüde AC tabanlı olmakla birlikte DC hızlı şarj kapasitesinin son

yıllarda belirgin biçimde güçlendiği anlaşılmaktadır (Enerji Ekonomisi, 2025; PwC Türkiye, 2025). Bu nicel görünüm, şarj ağının yaygınlaştığını ortaya koyarken, aynı zamanda yüksek güçlü şarj sistemlerine geçişin hızlanmasıyla birlikte İSG risk yönetiminin daha sistematik ele alınmasını gerektiren bir dönüşüme de işaret etmektedir.

Dağılımın mekânsal bileşenleri değerlendirildiğinde, akaryakıt istasyonlarının şarj altyapısının en önemli ve hızlı gelişen unsurlarından biri haline geldiği; Ekim 2025 itibarıyla Türkiye genelinde yaklaşık 2500 ila 3000 akaryakıt istasyonunda en az bir adet şarj ünitesi bulunduğu ve bu lokasyonlarda kurulu toplam şarj noktası sayısının 5000 ila 6000 civarında olduğu görülmektedir (Evcify, 2025). Akaryakıt istasyonlarına kurulan şarj ünitelerinin büyük çoğunluğunun DC hızlı şarj özelliğine sahip olması ve Türkiye genelindeki yaklaşık 4.500 DC soketin %50'den fazlasının bu istasyonlarda yer alması, bu lokasyonları şehirlerarası güzergâhlarda stratejik hızlı şarj merkezleri haline getirmiştir (PwC Türkiye, 2025; Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025). Dolayısıyla, akaryakıt istasyonlarının fosil yakıt ikmal noktaları olmanın ötesine geçerek yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinin stratejik merkezleri haline geldiği; bunun da enerji arz güvenliği, altyapı sürdürülebilirliği ve ulaşımdan kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılması bakımından kritik bir rol oynadığı değerlendirilmektedir (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025). Bu stratejik dönüşüm sürecinde, geleneksel risk analizlerinin yetersiz kalabileceği ve özellikle akaryakıt buharları ile yüksek voltajlı şarj arklarının etkileşimini modelleyen ileri yöntemlere ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu kapsamda McQueen (2022), akaryakıt istasyonları ve kapalı otoparklara kurulan şarj üniteleri için 'Bow Tie' (Papyon) risk analizi metodolojisini önermektedir. Yazar, bu modelin; potansiyel tehlikeleri (ark oluşumu, termal kaçak), önleyici bariyerleri (izolasyon, havalandırma) ve sonuç hafifletici önlemleri (acil müdahale, tahliye) tek bir şemada görselleştirerek, bu tür hibrit tesislerde İSG yönetimini standartlaştırdığını vurgulamaktadır.

7.2. Çevresel ve Solunum Riskleri

Elektrikli araç şarj istasyonlarındaki İSG riskleri genellikle elektriksel tehlikelerle sınırlı düşünülse de, son yapılan saha çalışmaları DC Hızlı Şarj (DCFC) ünitelerinin beklenmedik bir hava kirliliği kaynağı olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek güçlü şarj kabinlerini soğutmak için çalışan güçlü fanlar, yerdeki toz ve partikülleri havalandırarak istasyon çevresinde PM2.5 (İnce Partikül Madde) konsantrasyonunu, kentsel arka plan seviyelerine

göre önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durum, şarj istasyonlarında uzun süre görev yapan güvenlik veya bakım personelinin, egzoz gazı olmasa bile solunum yolu hastalıkları riski altında olabileceğini ve istasyon zemin temizliğinin bir İSG parametresi olarak görülmesi gerektiğini göstermektedir (Yao vd., 2025).

7.3. Bakım-Onarım Sürecine İlişkin Bulgular

Şarj altyapısının güvenli işletimi kadar, bakım ve onarım süreçleri de çalışanların maruz kaldığı iş sağlığı ve güvenliği riskleri açısından belirleyici bir role sahiptir. Özellikle yüksek voltajlı ekipmanlar üzerinde gerçekleştirilen bakım faaliyetleri, beklenmedik enerjilenme, elektrik çarpması ve ark flaşı gibi ciddi tehlikeler barındırmaktadır. Bu nedenle bakım faaliyetlerinin, enerji izolasyonunun eksiksiz sağlandığı, yalnızca yetkin personelin görevlendirildiği ve uygun KKD kullanıldığı kontrollü bir çerçevede yürütülmesi zorunludur. Büyük ölçekli elektrikli araç şarj istasyonlarının işletme güvenliğinde ise sıklıkla göz ardı edilen en kritik unsurlardan biri, tesisatın zamanla maruz kaldığı yıpranmayı ifade eden “Tesisat Degradasyonu” (Facility Degradation) sürecidir. Güç elektroniği bileşenleri, kablolar ve yalıtım malzemeleri; sürekli termal döngüler ve çevresel koşulların etkisiyle zamanla özelliklerini kaybetmekte, bu durum koruma rölelerinin hatalı çalışmasına (protection failure) veya ark hatalarının oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Bu nedenle İSG risk analizlerinde istasyonun yaşı bir risk çarpanı olarak ele alınmalı; periyodik kontrollerde yalnızca işlevsellik değil, aynı zamanda yalıtım yaşlanma testleri de uygulanmalıdır (Wang vd., 2019).

Bakım süreçlerinde karşılaşılan riskler, bakım teknisyenlerinin çoğu zaman “Yalnız Çalışan” (Lone Worker) statüsünde görev yapmaları nedeniyle daha da kritik hale gelmektedir. Olası bir elektrik çarpması veya ark flaşı vakasında personelin bilincini kaybetmesi durumunda, hızlı müdahale imkânı bulunmaması hayati sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle hareketsizlik algılayan sensörlerin (man-down cihazları) ve GPS tabanlı takip sistemlerinin kullanımı, şarj istasyonlarına yönelik İSG yönetim sisteminin ayrılmaz bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir. Uluslararası düzenlemeler de bu gereklilikleri açık biçimde ortaya koymaktadır. OSHA 29 CFR 1910.147 LOTO standardı, bakım sırasında enerjinin tamamen kesilmesini ve kilitletmesini zorunlu kılar; NFPA 70E standardı, bakım işlemleri için gerilimsiz çalışma teyidi, güvenli mesafe belirlenmesi, ark flaşı risk değerlendirmesi ve uygun KKD kullanımını şart koşmaktadır (NFPA, 2020; OSHA, 2021).

Yüksek voltajlı şarj sistemlerinde bakım-onarım faaliyetleri sırasında elektrik çarpması ve ark flaşı riski, özellikle yüksek güçlü DC sistemlerde daha da belirgin hale gelmektedir. NFPA 70E (Elektriksel Güvenlik Standardı) uyarınca, bu risklerin nicel olarak hesaplanması, ekipmanlar üzerine ark flaşı tehlike etiketlerinin (gerekli koruyucu giysi kategorisi) yerleştirilmesi ve bakım personelinin ark dereceli (AR) kişisel koruyucu donanım kullanması zorunludur (NFPA, 2024). Nitekim yüksek güçlü şarj sistemlerinde meydana gelen ark flaşı olaylarının, enerji depolama sistemleriyle etkileşimi analitik olarak modellenmiş ve olası sonuçları literatürde değerlendirilmeye başlanmıştır (Chen vd., 2022). Bu tür kontrol ve koruma sistemlerinin tasarımında ISO 13849-1 standardının esas alınması gerekmektedir (ISO, 2023). Bununla birlikte, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan Şarj Hizmeti Yönetmeliği, şarj ağı işletmecilerini kurdukları altyapının güvenliğinden ve sürekliliğinden birinci derecede sorumlu tutmakta; şarj ünitelerinin TS EN 61851 serisi standartlara uygunluğunu ve birlikte çalışabilirlik esaslarını zorunlu kılmaktadır. İSG perspektifinden değerlendirildiğinde bu düzenleme, olası bir elektriksel kaza veya yangın durumunda yalnızca donanım üreticisinin değil, aynı zamanda servis sağlayıcı işletmecinin de “güvenli hizmet sunma yükümlülüğü” (duty of care) kapsamında hukuki sorumluluk taşıdığını açık biçimde ortaya koymaktadır (EPDK, 2022).

7.4. Şarj İstasyonları Kaynaklı Yangınlar: Uluslararası ve Türkiye’den Vaka İncelemeleri

2024 yılı Ekim ayında, Şanlıurfa’nın Viranşehir ilçesinde bir evin bahçesinde şarj edilen Togg T10X elektrikli araç, yangın sonucu tamamen yanarak kullanılamaz hale gelmiştir. Yangında can kaybı yaşanmamıştır. Olay sonrası yapılan teknik incelemelerde, batarya kaynaklı bir arıza olmadığı, yangının aracın şarj edildiği kaçak elektrik bağlantısından kaynaklandığı belirlenmiştir (Yeni Şafak, 2024; İHA, 2024).

TOGG yetkilileri, aracın detaylı teknik inceleme için Gemlik Kampüsü’ne götürüldüğünü açıklamış; Dicle Elektrik (DEDAŞ) ise evin elektrik bağlantısında kaçak kullanım tespit edildiğini kamuoyuna duyurmuştur (Dicle Elektrik, 2024).

7.4.1. İSG açısından değerlendirme

Bu vaka, elektrikli araçların güvenli şarj edilmesinde standart dışı uygulamaların nasıl ciddi riskler doğurabileceğini göstermektedir. Özellikle:

1. Kaçak elektrik kullanımı, elektrik tesisatında aşırı ısınmaya, kısa devreye ve izolasyon zafiyetine yol açarak yangın riskini artırmaktadır.
2. Ev tipi şarjın standartlara uygun yapılmaması, IEC 60364 tesisat güvenliği hükümlerine aykırıdır.
3. Yangın sırasında açığa çıkan toksik gazlar (ör. batarya yakınında yangın olsa da bataryadan kaynaklanmayan alevlerde bile plastik izolasyonların yanması), hem kullanıcılar hem de itfaiye personeli için solunum riski oluşturmaktadır.
4. Bu tür olaylar, kullanıcı eğitiminin ve lisanslı şarj altyapısının önemini ortaya koymaktadır.

7.4.2. İSG Önlemleri

Elektrikli araçların şarj sürecinde güvenliğin sağlanmasına yönelik alınması gereken başlıca güvenlik önlemleri aşağıdaki gibidir;

1. Yasal ve teknik gereklilik: Şarj işlemleri yalnızca IEC 60364-7-722 ve IEC 62196 standartlarına uygun tesisatlar üzerinden yapılmalıdır.
2. Kaçak elektrik tespiti: Elektrik dağıtım şirketleri düzenli denetimlerle kaçak kullanımı tespit etmeli, kullanıcılar bilgilendirilmelidir.
3. Ev tipi şarj altyapısı: Evlerde uygun RCD (30 mA) ve Tip B kaçak akım koruma cihazları kullanılmalıdır.
4. Kullanıcı farkındalığı: Elektrikli araç sahiplerine, kaçak elektrik kullanımının yalnızca hukuki değil aynı zamanda can güvenliği riski taşıdığı anlatılmalıdır.
5. İtfaiye hazırlığı: Benzeri olaylarda hızlı müdahale için yerel itfaiyelerin elektrikli araç yangınları konusunda özel eğitim alması önemlidir.

Çizelge 7.1. Vaka Analizi Tablosu

Kategori	Detay
Olay	Togg T10X aracının şarj sırasında yanması (Şanlıurfa, 2024)
Sebebe	Kaçak elektrik kullanımı (standart dışı bağlantı)
Hasar	Araç tamamen yandı, maddi kayıp oluştu
Can Güvenliği	Can kaybı yaşanmadı
Yetkili Açıklamaları	TOGG: Batarya arızası yok; DEDAŞ: Kaçak elektrik tespiti yapıldı
İSG Açısından Sorun	Standart dışı tesisat, kullanıcı eğitimsizliği, denetim eksikliği
Önerilen Önlemler	IEC standartlarına uygun tesisat, RCD kullanımı, denetim ve eğitim

Çizelge 7.1’de sunulan vaka analizi, kamuoyundaki genel algının aksine, şarj esnasındaki yangınların birincil nedeninin her zaman batarya teknolojisi olmadığını; altyapı yetersizliği ve standart dışı şebeke bağlantılarının (kaçak kullanım) çok daha kritik bir risk faktörü olduğunu somutlaştırmaktadır. Bu bulgu, elektriksel güvenliğin araçtan önce binanın tesisatında sağlanması gerektiğini kanıtlamaktadır.

Ev tipi (Seviye 1/2) şarj işlemlerinde meydana gelen yangınların çoğu, aracın bataryasından ziyade, bina tesisatının yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. ABD İtfaiye İdaresi (USFA), elektrikli araç şarjı için mevcut prizlerin kullanılmaması gerektiğini, bunun yerine doğrudan panodan çekilen, başka hiçbir cihazın bağlı olmadığı 'Müstakil/Özel Hat' (Dedicated Circuit) kurulumunu şart koşmaktadır. Ayrıca, bu hat üzerinde Artık Akım Cihazı (RCD) bulunması, olası bir izolasyon hatasında yangın çıkmadan enerjinin kesilmesi için hayati önem taşımaktadır. (U.S. Fire Administration [USFA], 2025).

7.4.3 Uluslararası vaka örnekleri

Hindistan – E-rikşa Şarj İstasyonu Yangınları; 2025 yılında Hindistan’ın Delhi kentinde, e-rikşaların (elektrikli üç tekerlekli araçlar) şarj edildiği küçük ölçekli istasyonlarda iki ayrı yangın meydana gelmiştir. Shahdara bölgesinde çıkan yangında iki kişi hayatını kaybetmiş, çok sayıda araç tamamen kullanılamaz hale gelmiştir. Kısa süre sonra Dilshad Garden bölgesinde meydana gelen benzer bir olayda da iki kişi yanarak ölmüştür (Hindustan Times,

2025; Times of India, 2025). Yapılan incelemelerde bu şarj merkezlerinin çoğunun standart dışı, düşük maliyetli ve kontrolsüz şekilde kurulduğu belirlenmiştir. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yetersiz denetim ve standart eksikliğinin ölümcül sonuçlara yol açabileceğini ortaya koymaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri, Google Kampüs Yangını; 2025 yılı Mayıs ayında ABD'nin California eyaletinde, Google'ın Mountain View kampüsünde bulunan bir otoparkta, şarj halindeki bir Jeep Wrangler 4xe plug-in hibrit alev almıştır. Yangın kısa sürede büyüyerek yakında park halinde bulunan iki Tesla ve bir Honda aracına daha sıçramıştır. Olayda herhangi bir yaralanma yaşanmamış olsa da yaklaşık 275.000 ABD doları tutarında maddi hasar meydana gelmiştir (City of Mountain View, 2025; Mountain View Voice, 2025). Bu vaka, hızlı şarj sırasında meydana gelen termal kaçakların yalnızca ilgili aracı değil, çevredeki araç ve donanımları da etkileyebileceğini göstermektedir.

Amerika Birleşik Devletleri, Walnut Creek Olayı; Eylül 2025'te, Kaliforniya eyaletinin Walnut Creek bölgesinde bulunan bir şarj istasyonunda birden fazla aracın alev aldığı yangın meydana gelmiştir. Yangın sırasında yoğun duman oluşumu nedeniyle çevredeki insanlar tahliye edilmiş, olay yerine tehlikeli madde (HazMat) ekipleri sevk edilmiştir (Claycord, 2025). Bu vaka, şarj istasyonlarının yalnızca yangın değil aynı zamanda kimyasal ve toksik gaz salınımı riskleri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Birleşik Krallık, atölye yangını; Ocak 2025'te Birleşik Krallık'ın Stockton-on-Tees kentinde bulunan bir Jaguar Land Rover servisine ait atölyede yangın çıkmıştır. İtfaiye raporlarına göre, yangının başlangıç noktasının EV şarj ünitesi olabileceği belirtilmiştir. Yangın sonrası işletme geçici olarak kapatılmak zorunda kalmıştır (AM-Online, 2025; Car Dealer Magazine, 2025). Bu olay, şarj altyapısının yalnızca kamusal alanlarda değil, aynı zamanda bakım-onarım tesislerinde de ciddi riskler barındırdığını ortaya koymaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri, Tesla Supercharger istasyonunda kundaklama; Mart 2025'te ABD'nin Massachusetts eyaletinde, bir Tesla Supercharger sahasında çıkan yangının kasıtlı olarak çıkarıldığı açıklanmıştır. Yetkililer olayın kundaklama şüphesiyle soruşturulduğunu duyurmuştur (Business Insider, 2025). Bu örnek, tüm yangınların teknik arızalardan kaynaklanmadığını; vandalizm ve kasıtlı saldırıların da risk analizi kapsamında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

7.4.4. İSG açısından ortak bulgular

Bu vakalar karşılaştırmalı olarak ele alındığında şu çıkarımlar yapılabilir:

1. Standart dışı bağlantılar (Türkiye’de kaçak hat, Hindistan’daki kontrolsüz e-rikşa merkezleri) yangınların en temel sebeplerindendir.
2. Yetersiz koruma sistemleri (örneğin Tip B RCD veya 6 mA RDC-DD eksikliği) hata akımlarının tespitini geciktirerek olayların şiddetini artırmaktadır.
3. Yüksek güçlü DC hızlı şarj sistemleri, yangın ve ark flaşı riskini büyütmede; acil izolasyon ve termal izleme sistemleri zorunlu hale gelmektedir.
4. Kapalı otoparklarda meydana gelen yangınlarda, toksik gazların yayılması ek bir risk oluşturmaktadır.
5. Bazı olaylarda kasıtlı saldırılar da söz konusu olabilmektedir; bu nedenle güvenlik kameraları ve fiziksel güvenlik önlemleri de önem arz etmektedir.

Brzezinska ve Bryant (2022), CFD temelli yangın simülasyonları kullanarak, kapalı otoparklarda EV yangını sırasında duman tabakası kalınlığının 9 dakikada kritik seviyeye ulaştığını göstermiştir. Bu bulgu, tahliye süreleri ve sprinkler sistemlerinin performans bazlı tasarımı için önemli bir referans oluşturmaktadır.

Yukarıda sunulan bulgular, elektrikli araç şarj altyapısının tasarım, kurulum, kullanım, bakım ve işletme aşamalarında çok boyutlu iş sağlığı ve güvenliği riskleri barındırdığını; bu risklerin yalnızca teknik donanım ile sınırlı olmayıp insan faktörü, organizasyonel süreçler, çevresel koşullar ve mevzuat uygulamalarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Literatür, mevzuat analizleri ve ulusal/uluslararası vaka incelemelerinden elde edilen bu bulgular, teorik düzeyde risk alanlarını tanımlamakla birlikte, gerçek saha koşullarında bu risklerin nasıl somutlaştığını ve mevcut önlemlerin ne ölçüde etkin olduğunu değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, bir sonraki bölümde, tipik bir elektrikli araç şarj istasyonu seçilerek yerinde inceleme yaklaşımıyla yapılan örnek bir şarj istasyonu

değerlendirmesine yer verilmiş; belirlenen İSG riskleri, mevcut kontrol önlemleri ve iyileştirme alanları bulgularla ilişkilendirilerek analiz edilmiştir.



8. ÖRNEK ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU İNCELEMESİ (SAHA DEĞERLENDİRMESİ)

8.1. İncelemenin Amacı ve Kapsamı

Bu bölümün amacı, önceki bölümlerde literatür, mevzuat ve vaka analizleri yoluyla ortaya konulan İSG risklerinin, gerçek bir elektrikli araç şarj istasyonu örneği üzerinden saha koşullarında nasıl somutlaştığını değerlendirmektir. Bu kapsamda incelemeye konu olan şarj istasyonunda; elektriksel güvenlik, yangın ve termal riskler, ergonomik riskler, bakım-onarım süreçleri ve organizasyonel önlemler bütüncül bir İSG yaklaşımıyla ele alınmıştır. Saha değerlendirmesi, uluslararası standartlar (IEC, ISO, NFPA), ulusal mevzuat ve literatürde tanımlanan iyi uygulamalar temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

8.2. İncelenen Şarj İstasyonunun Genel Özellikleri

İncelemeye konu olan elektrikli araç şarj istasyonu, bir üniversite yerleşkesi içerisinde bulunan otopark alanında konumlandırılmış olup, öncelikli olarak resmî araçların kullanımına yönelik olarak tasarlanmıştır. İstasyon, aynı anda üç adet elektrikli aracın şarj edilebildiği bir kapasiteye sahiptir. Kamuya açık ticari şarj istasyonlarından farklı olarak, kullanıcı profili büyük ölçüde kontrollü olmakla birlikte, üniversite kampüsü içerisinde yer alması nedeniyle yaya ve araç trafiğinin birlikte bulunduğu bir ortamda hizmet vermektedir. Bu durum, istasyonu İSG açısından hem öngörülebilir hem de çoklu risk etkileşimlerinin gözlemlenebileceği tipik bir saha örneği haline getirmektedir.



Resim 8.1. Örnek İstasyon İncelemesi



Resim 8.2. Örnek İstasyon İncelemesi

8.3. Elektriksel Güvenlik ve Topraklama Sistemlerinin Değerlendirilmesi

İstasyonun elektriksel güvenliği; topraklama sistemi, kaçak akım koruma düzenekleri, aşırı akım koruması ve enerji sürekliliği açısından değerlendirilmiştir. Şarj altyapısının, fotovoltaik sistemlerle entegre bir yapı sunması nedeniyle elektriksel güvenlik yalnızca şarj üniteleriyle sınırlı kalmayıp, üst yapı üzerinde yer alan GES bileşenleri ve inverter sistemiyle birlikte ele alınmıştır. Saha incelemesinde, fotovoltaik sistemin enerji dönüşümünde S5-GR3P(3–20)K serisi üç fazlı seri dizi invertörün kullanıldığı tespit edilmiştir. İki MPPT girişine sahip olan bu invertör, değişken güneşlenme koşullarında sistem verimliliğini artırmakla birlikte, yüksek gerilim altında çalışması nedeniyle aşırı ısınma ve arıza riskleri açısından düzenli izleme ve bakım gerektiren kritik bir ekipman olarak değerlendirilmiştir.

8.4. Yangın Güvenliği ve Termal Risklerin İncelenmesi

Yangın güvenliği değerlendirmesi kapsamında, istasyonda iki adet büyük boy yangın söndürme cihazının erişilebilir konumlarda bulundurulduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, erken müdahale açısından olumlu bir uygulama olmakla birlikte, istasyonda GES, invertör ve enerji depolama sistemlerinin birlikte bulunması, yangın senaryolarını daha karmaşık hale getirmektedir. İnceleme sırasında ayrıca istasyonda bir enerji depolama bataryasının bulunduğu, ancak bu bataryanın şarj ünitelerinden ve araç kullanım alanlarından fiziksel olarak uzak bir konumda yerleştirildiği tespit edilmiştir. Bu yerleşim yaklaşımı, batarya kaynaklı termal kaçak veya yangın durumunda kullanıcıların ve personelin maruziyetini azaltan önemli bir mühendislik kontrolü olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, enerji depolama sistemlerine özgü termal risklerin sürekli izlenmesi ve uygun yangın senaryolarına hazırlıklı olunması İSG açısından kritik önem taşımaktadır.

8.4.1. Güneş enerjisi sistemi (GES), invertör ve enerji depolama ünitesine yönelik Fine–Kinney risk değerlendirmesi

Bu bölümde, incelenen elektrikli araç şarj istasyonunda yer alan güneş enerjisi sistemi (GES), üç fazlı seri dizi invertör ve enerji depolama bataryasına ilişkin başlıca iş sağlığı ve güvenliği riskleri, Fine–Kinney risk değerlendirme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Fine–Kinney yöntemi; olasılık (P), maruziyet sıklığı (F) ve sonuç şiddeti (S) parametrelerinin çarpımına dayalı olarak risklerin nicel biçimde önceliklendirilmesine

imkân tanımakta ve özellikle enerji sistemleri gibi çoklu tehlike barındıran altyapılarda uygulanabilirliği yüksek bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Değerlendirme kapsamında, fotovoltaik panellerin üst yapı üzerinde konumlandırılması, S5-GR3P(3–20)K serisi üç fazlı invertörün varlığı, enerji depolama bataryasının şarj alanından fiziksel olarak ayrılmış olması ve sahada mevcut yangın söndürme ekipmanları dikkate alınmıştır. Olası tehlikeler; elektriksel temas, aşırı ısınma, termal kaçak, yangın ve mekanik hasar senaryoları çerçevesinde ele alınmış; mevcut kontrol önlemleri göz önünde bulundurularak risk seviyeleri hesaplanmıştır.

Çizelge 8.1. Fine–Kinney Risk Değerlendirme Tablosu (GES – İnvörtör – Batarya)

Tehlike Kaynağı	Tehlikenin Tanımı	Olası Sonuç	P	F	S	Risk Skoru (R=PX FXS)	Risk Seviyesi	Mevcut Kontroller	Önerilen İlave Önlemler
GES panelleri	PV panellerde izolasyon arızası veya hasar	Elektrik çarpması, yangın	2	3	15	90	Orta	Üst yapı koruması, kablo kanalları	Periyodik izolasyon testleri, termal kamera ile izleme
İnvörtör	Aşırı ısınma / havalandırma yetersizliği	Yangın, sistem arızası	3	3	15	135	Orta–Yüksek	Yüksek verimli invertör, doğal havalandırma	Aktif sıcaklık izleme, alarm sistemi
İnvörtör (yüksek gerilim)	Bakım sırasında enerjinin kesilmemesi	Elektrik çarpması, ark flaşı	2	2	40	160	Yüksek	Yetkili personel	LOTO prosedürlerinin yazılı hale getirilmesi
Batarya (enerji depolama)	Termal kaçak riski	Yangın, patlama, toksik gaz	2	2	40	160	Yüksek	Şarj alanından uzak konumlandırma	Yangın algılama, sıcaklık sensörü, bağımsız havalandırma
Batarya alanı	Yetkisiz erişim	Maruziyet, ikincil kazalar	2	2	15	60	Düşük–Orta	Fiziksel mesafe	Kilitli alan, uyarı levhaları
Yangın söndürme	Uygun olmayan müdahale	Yangının büyümesi	1	2	40	80	Orta	2 adet büyük boy söndürücü	Personel eğitimi, batarya uyumlu söndürücü

Çizelge 8.1'deki analiz sonuçlarına göre; sistemin en kritik noktaları, R=160 puanla 'Yüksek Risk' grubunda yer alan batarya ünitesi (termal kaçak) ve invertör bakım süreçleridir (ark flaşı). Mevcut fiziksel ayırma önlemlerinin ötesinde, bu risklerin kabul edilebilir seviyeye indirilmesi için ortama aktif gaz/sıcaklık sensörleri ve bağımsız havalandırma sistemlerinin entegre edilmesi; bakım süreçlerinde ise insan hatasını elimine edecek LOTO prosedürlerinin uygulanması zorunludur. Invertör aşırı ısınma (R=135) ve panel kaynaklı diğer riskler ise ilave alarm sistemleri ve periyodik termal kontrollerle yönetilebilir düzeydedir.

8.4.2. Risk değerlendirmesinin yorumlanması

Fine–Kinney analizi sonuçları, incelenen şarj istasyonunda en yüksek risk skorlarının, invertör ve enerji depolama bataryası kaynaklı senaryolarda ortaya çıktığını göstermektedir. Özellikle yüksek gerilim altında çalışan invertörlerde bakım sırasında enerji izolasyonunun yetersiz olması ve batarya sistemlerinde termal kaçak olasılığı, yüksek şiddet (S) katsayısı nedeniyle kritik risk alanları olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, bataryanın şarj ünitelerinden ve kullanıcı alanlarından fiziksel olarak uzak bir konumda bulunması, maruziyet ve olası sonuçların sınırlandırılması açısından etkili bir mühendislik kontrolü olarak değerlendirilmiştir.

GES panelleri ve invertör sistemlerine ilişkin riskler genel olarak orta ile orta-yüksek seviyede olmakla birlikte, bu risklerin büyük ölçüde periyodik bakım, sürekli izleme ve organizasyonel önlemlerle kontrol altında tutulabileceği görülmektedir. Yangın söndürme ekipmanlarının sahada mevcut olması olumlu bir unsur olmakla birlikte, enerji depolama sistemlerine özgü yangın senaryoları göz önüne alındığında, ekipman uygunluğunun ve personel eğitimlerinin İSG yönetim sistemi kapsamında düzenli olarak gözden geçirilmesi gerekmektedir.

8.4.3. Genel değerlendirme (Saha İncelemesi ile Uyum)

Bu Fine–Kinney risk değerlendirmesi, incelenen şarj istasyonunda yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji depolama sistemlerinin, operasyonel faydalarının yanında ilave İSG riskleri de doğurduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu risklerin, uygun mühendislik kontrolleri, etkin bakım-onarım prosedürleri ve çalışan eğitimleriyle yönetilebilir nitelikte

olduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, elektrikli araç şarj istasyonlarında GES ve batarya entegrasyonunun İSG perspektifiyle birlikte ele alınmasının, güvenli ve sürdürülebilir altyapı tasarımı açısından vazgeçilmez olduğunu göstermektedir.

8.5. Ergonomik Riskler ve Fiziksel Güvenlik

İstasyonda kullanılan şarj üniteleri ve kablolar, kullanıcı ve görevli personel açısından ergonomik ve fiziksel riskler çerçevesinde değerlendirilmiştir. Şarj alanında yalnızca elektrikli araçların bulunmasına yönelik yatay yer işaretlemelerinin bulunduğu; şarj ünitelerinin araç çarpmasına karşı korunması amacıyla plastik dubaların kullanıldığı gözlemlenmiştir. Plastik dubalar, görsel uyarı ve yönlendirme açısından temel bir koruma sağlamakla birlikte, mekanik dayanım açısından sınırlı bir pasif güvenlik önlemi olarak değerlendirilmektedir. Üniversite otoparkı gibi hem araç hem de yaya trafiğinin bulunduğu alanlarda, bu tür fiziksel önlemlerin yeterliliğinin düzenli olarak gözden geçirilmesi gerekmektedir.

8.6. Bakım-Onarım Süreçleri ve Çalışan Güvenliği

İstasyonda bakım ve onarım faaliyetleri, enerji kesintisi, yetkili personel kullanımı ve kişisel koruyucu donanım uygulamaları açısından değerlendirilmiştir. Fotovoltaik sistem, invertör ve enerji depolama bataryasının birlikte bulunması, bakım süreçlerini daha karmaşık hale getirmekte; bu durum bakım personelinin elektriksel ve termal risklere aynı anda maruz kalma olasılığını artırmaktadır. Bu nedenle bakım faaliyetlerinin, LOTO uygulamaları ve yetkin personel görevlendirmesi gibi organizasyonel önlemlerle desteklenmesi, saha güvenliği açısından kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

8.7. Bulguların Literatür ve Mevzuat ile Karşılaştırılması

Saha incelemesinden elde edilen bulgular, önceki bölümlerde sunulan literatür, mevzuat hükümleri ve vaka analizleri ile karşılaştırıldığında; üniversite yerleşkesi içerisinde konumlandırılmış, GES ve enerji depolama sistemiyle entegre şarj istasyonlarının, klasik şarj altyapılarına kıyasla daha karmaşık bir İSG risk profiline sahip olduğu görülmektedir. Özellikle elektriksel güvenlik, yangın riski ve bakım süreçleri açısından belirlenen hususlar, literatürde tanımlanan risk alanlarıyla büyük ölçüde örtüşmektedir.

8.8. Genel Değerlendirme ve İyileştirme Önerileri (Köprü Bölüm)

Örnek şarj istasyonu incelemesi, elektrikli araç şarj altyapısında İSG'nin yalnızca teknik standartlara uyumla sağlanamayacağını; tasarım, enerji entegrasyonu, işletme, bakım ve insan faktörünü birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşımın zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır. Üniversite kampüsü gibi yarı kamusal alanlarda kurulan bu tür entegre şarj istasyonları, iyi uygulama örnekleri içermekle birlikte, sürekli izleme ve iyileştirme gerektiren dinamik riskler de barındırmaktadır. Bu bulgular, bir sonraki bölümde sunulacak sonuçlar ve politika önerileri için uygulamaya dayalı güçlü bir zemin oluşturmaktadır.



9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölüm, tezin temel araştırma sorusu olan "Elektrikli Araçlar ve Şarj İstasyonlarının yaşam döngüsündeki kritik İSG riskleri, mevcut ulusal mevzuat çerçevesinde etkin bir şekilde yönetilebilmekte midir?" sorusu ışığında elde edilen tüm bulguları bilimsel bir dille özetler, Türkiye'deki İSG mevzuatındaki boşlukları netleştirir ve ilgili düzenleyici kurumlara yönelik detaylı, eyleme dönük politika önerileri sunar.

Bu yüksek lisans tezi, elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarının yaşam döngüsünün, geleneksel endüstriyel İSG paradigmalarının ötesine geçen, üç boyutlu (elektriksel, kimyasal ve siber) yeni ve karmaşık bir risk profili sunduğunu bilimsel literatür ve sistem analiziyle kanıtlamıştır. Çalışmanın bulgularına göre, Türkiye'deki mevcut ulusal İSG mevzuatının (6331 Sayılı Kanun ve bağlı yönetmelikler), elektromobilité teknolojilerinin getirdiği yüksek voltaj, termal kaçak, kompleks kimyasallar ve siber-fiziksel tehlikeler karşısında proaktif ve yeterli bir koruma çerçevesi sunmadığı tespit edilmiştir.

Ek olarak, uluslararası literatür incelemesi göstermiştir ki, IEC 61851 (Electric Vehicle Conductive Charging System) ve IEC 60364-7-722 (Low Voltage Electrical Installations – EV Supply Equipment) standartları, elektrikli araç altyapısında elektriksel güvenliğin temel referanslarını oluşturmakta; ancak bu standartların Türkiye'deki uygulama karşılıkları sınırlı kalmaktadır. Benzer şekilde, elektromanyetik alan maruziyeti yönetiminde TSE EN 50499:2019 standardı çerçevesinde düzenli ölçüm yapılması gerektiği halde, şarj istasyonları özelinde bu uygulamaların sürdürülebilir biçimde denetlenmediği görülmüştür. Tezin ana bulguları, EA yaşam döngüsünün farklı aşamalarında şu kritik riskleri ve yönetim boşluklarını ortaya koymaktadır.

Batarya elektrot üretiminde kullanılan ve reproduktif toksisite içeren NMP gibi solventler ile özellikle geri dönüşüm süreçlerinde ortaya çıkan kobalt ve nikel gibi ağır metaller, çalışanlar için en önemli mesleki maruziyet risklerini oluşturmaktadır (Sarıkay, 2024). Bu risklerin etkin yönetimi, yalnızca havalandırma sistemlerine güvenmek yerine, ilgili yönetmeliklerde belirtilen Mesleki Maruziyet Sınır Değerleri çerçevesinde sağlanmalı; ayrıca mevzuat, geri dönüşüm çalışanlarının maruziyetini nesnel verilerle takip edebilmek adına biyolojik izleme zorunluluğunu içerecek şekilde düzenlenmelidir. Kimyasal risklerin yanı sıra, Gigacasting gibi yeni nesil üretim metotlarının getirdiği yüksek basınç ve mekanik

ezilme tehlikelerine karşı da önlem alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, Türkiye’deki standart dışı uygulamaların önüne geçebilmek ve yasal bir zemin oluşturmak adına, bakım işlemlerinde enerji izolasyonunu sağlayan OSHA LOTO standartları ile makine emniyetine odaklanan ISO 12100/11228 standartlarına tam uyum sağlanması zorunludur (Triller vd., 2023). Öte yandan, olası bir termal kaçak durumunda bataryalardan yayılan Hidrojen Florür (HF) gazının akut toksisitesi, acil durum ekipleri için en yüksek İSG tehdidi olarak tanımlanmaktadır (Larsson vd., 2017). Bu tehlike, acil durum planlarına NFPA 855 gerekliliklerinin entegre edilmesini ve HF’ye karşı spesifik bir önlem olan Kalsiyum Glukonat bulundurulmasını zorunlu hale getirirken; güncel çalışmalar, sıvı ve hibrit soğutma sistemlerinin termal kaçak riskini minimize etmede ve hücre ömrünü uzatmada en etkili yöntemler olduğunu göstermektedir (Rawat ve Kumar, 2024).

Üretim sahasındaki bu çok boyutlu risklerin ötesinde, araçların günlük kullanımına olanak tanıyan şarj altyapısı da kendine özgü elektriksel ve dijital güvenlik açıklarını beraberinde getirmektedir.

Şarj istasyonlarında elektrik güvenliği bağlamında, IEC 60364-7-722 standardı elektrik çarpmasına karşı Tip B RCD kullanımını net bir şekilde şart koşmasına rağmen, ulusal elektrik tesisat yönetmeliklerinde bu konuda halen bir hüküm bulunmaması önemli bir yasal boşluk oluşturmakta; bu durum, araç bataryasından kaynaklanabilecek DC kaçak akımlarının standart Tip AC RCD’leri körleştirerek yangın ve elektrik çarpması riskini artırmasına yol açmaktadır (Wang vd., 2019). Altyapı güvenliğindeki bu eksikliğe ek olarak, bakım süreçlerindeki yüksek voltaj kaynaklı Ark Flaşı tehlikesinin yönetiminde de ulusal standartlar yetersiz kalmakta olup, personel güvenliği için NFPA 70E standardına uygun tehlike hesaplamaları ve AR (Arc-Rated) koruyucu donanım kullanımı şarttır; nitekim son çalışmalar, çalışan maruziyetini kontrol altında tutmak için yüksek güçlü sistemlerde ark flaşı enerjisinin matematiksel modellenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır (Chen vd., 2022). Diğer taraftan, tezin siber-fiziksel riskler konusundaki yenilikçi bulguları, yazılım tabanlı hataların veya siber saldırıların doğrudan fiziksel İSG risklerine dönüşebildiğini göstermektedir (Checkoway vd., 2011). Saldırıların, bakım sırasında LOTO prosedürlerini atlayarak veya uzaktan şarj kesintisini engelleyerek personeli yüksek voltaja maruz bırakabilmesi, siber risklerin mühendislik kontrolleri üzerindeki etkisinin analizini zorunlu kılmakta; bu çerçevede ISO/SAE 21434 standartlarının uyarlanması ile UN ECE R155 ve

R156 regülasyonlarının Türkiye'deki üretici ve işletmeciler için yasal zorunluluk haline getirilmesi hayati önem taşımaktadır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, Türkiye'deki ÇSGB, EPDK ve TSE gibi ilgili düzenleyici kurumların acilen uygulaması gereken somut politika önerileri kapsamında; EPDK ve ilgili bakanlıkların, Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği'ne açıkça atıf yaparak tüm AC ve DC şarj noktalarında IEC 60364-7-722 ve IEC 62955 gerekliliklerine uygun Tip B RCD veya eşdeğer RDC-DD cihazlarının kullanımını derhal zorunlu kılması, bu zorunluluğun kurulum ve periyodik denetim süreçlerine entegre edilerek TEDAŞ tarafından denetlenmesi gerekmektedir. Yüksek voltajlı sistemlerin bakım-onarım süreçlerinde ise, NFPA 70E standardına uygun Ark Flaşı Risk Analizi yapılmasını, tehlike etiketlemesini ve AR (Arc-Rated) KKD kullanımını yasal zorunluluk haline getiren mevzuat değişiklikleri hayata geçirilmelidir; zira NFPA 70E (2023), risk hesaplaması ve etiketleme konusunda uluslararası bir ölçüt oluşturmakta olup, Türkiye'deki mevzuatın bu hükümler temelinde güncellenmesi personel güvenliği için kritiktir (NFPA, 2023). Sigorta sektörü analizleri de artan elektrikli araç yoğunluğunun bakım atölyelerinde yangın ve enerji kazası riskini yükselttiğini vurgulamakta (The Risk of EVs in the Auto Service Industry, 2024), bu da geleneksel mevzuatın NFPA 70E (2021) ile uyumlanmasını ve AR sertifikalı ekipmanlara dair uluslararası rehberlerin (KKD for Electrical and Hybrid Vehicle Maintenance, 2025) dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, yüksek voltajlı ekipmanlarda hata durumunda güvenli kapanmayı sağlamak adına kontrol sistemlerinin tasarımı ISO 13849-1 (2023) standardına uygun yürütülmelidir (ISO, 2023).

Kimyasal maruziyet ve sağlık gözetimi açısından ÇSGB, batarya geri dönüşüm tesislerinde çalışanlar için Kobalt ve Nikel gibi ağır metallere yönelik periyodik biyolojik izleme zorunluluğunu yönetmelik kapsamına almalı; termal kaçak riski taşıyan tesislerin acil durum planlarında HF maruziyetine karşı Kalsiyum Glukonat bulundurulması ve müdahale ekiplerinin donanımlarının standardizasyonu şart koşulmalıdır. Yangın müdahalesi sırasında oluşan toksik atık suyun çevresel felaketlere yol açmasını önlemek adına, kapalı otopark ve şarj projelerinde sızdırmaz toplama havuzlarının tasarlanması İSG ve Çevre Mevzuatı açısından zorunlu hale getirilmelidir (Javor vd., 2025). Standardizasyon ve siber güvenlik tarafında ise TSE iş birliğiyle UN ECE R155 ve R156 regülasyonları ulusal tip onay süreçlerinde zorunlu tutulmalı, NIST IR 8473 (Grayson vd., 2023) ise veri güvenliği rehberi

olarak değerlendirilmelidir. Lityum-iyon depolama tesisleri için NFPA 855:2023 standardı yangın güvenliği yönetimi referansı olarak TSE tarafından hızla uyarlanmalıdır.

Avrupa Birliği ve ABD mevzuatları incelendiğinde, şarj istasyonu güvenliği için farklı ancak tamamlayıcı yaklaşımlar sergiledikleri görülmektedir. Buca vd. (2022) AB’de 2009/104/EC ve 2016/35/EU direktifleri ile mekanik ve elektriksel risklerin önceden tanımlandığını, Haces-Fernandez (2023) ise ABD’de OSHA ve NFPA standartlarının saha bazlı risk değerlendirmesiyle entegre edildiğini belirtmektedir. Bu bağlamda yapılan karşılaştırmada; enerji izolasyonu konusunda AB Directive 2009/104/EC ve ABD OSHA 1910.147’yi uygularken Türkiye’de 6331 sayılı Kanun’da sadece genel atıflar bulunmakta, elektriksel korumada AB IEC 60364-7-722’yi, ABD NFPA 70E’yi esas alırken Türkiye TSE 60364’e kısmen uyum sağlamak ve şarj cihazı tip testlerinde ise AB EN 61851-23 ve ABD UL 2202 standartlarını kullanırken Türkiye’de henüz tam bir uyarılma bulunmamaktadır. Türkiye’de bu yaklaşımların harmanlandığı ulusal bir İSG rehberi oluşturulmalı ve EPDK ile SGK iş birliğinde, ABD’deki NFIRS benzeri (U.S. Fire Administration, 2025) merkezi bir kaza veri tabanı kurulmalıdır. Üretim hatlarında robotik sistemlerin güvenliği için ISO 10218-1/2 (2025) standardı (ISO, 2025) uyarlanmalı, şarj istasyonlarının şebeke üzerindeki termal stres etkisini yönetmek için akıllı şebeke teknolojileri ve harmonik filtreleme zorunluluğu getirilmelidir (Turan, 2023). TMMOB Makina Mühendisleri Odası’nın raporuyla (TMMOB MMO, 2024) örtüşen bu öneriler, İşyeri Açma ve Çalışma Ruhsatlarına İlişkin Yönetmelik’te TS 13274 standardına uygunluğun bağlayıcı kılınması (Resmî Gazete, 2020) gibi adımlarla desteklenmelidir. Son olarak, OZEV (2023) rehberliğinde olduğu gibi, kapalı otoparkların yapısal bütünlüğünün EV yangınlarının termal şokuna dayanıklılığı analiz edilmeli ve şarj alanları taşıyıcı elemanlardan izole edilmelidir.

Yasal düzenlemelere ek olarak, operasyonel risk yönetiminin sürdürülebilirliğini sağlamak adına eğitim ve metodolojik stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, elektrikli araçlar ve şarj altyapısı üzerinde çalışacak bakım personelinin yetkinliğini garantilemek için TÜV SÜD veya VDE tarafından önerilen üç seviyeli Yüksek Voltaj (HV) güvenlik eğitim modeli (HV Farkındalık, HV Yetkili Olmayan Kişi, HV Uzman Kişi) Türkiye’de zorunlu sertifikasyon standardı haline getirilmelidir. Otomotiv servislerinin işleyişini ve çalışanların teknik beceri gereksinimlerini köklü biçimde değiştiren bu dönüşüm (The electric cars era transforming the car repairs and, 2024), yüksek voltaj riskine karşı yetkinlikleri uluslararası standartlarda tanımlarken; ISO 45001 ve IEC 60364-7-722

eğitim modülleriyle entegrasyonu mühendislik ve İSG eğitiminin birleştirilmesini sağlamaktadır. Avrupa genelinde yaygınlaşan bu modelin (TÜV SÜD, 2024; VDE, 2023) Türkiye’de uygulanması çalışanların farkındalığını artıracak, ayrıca bakım ortamlarında hava kalitesinin sürekli izlenmesi (Smart Air Quality Monitoring for Automotive Workshop Environments, 2024) ve 800 V sistemlerdeki yalıtım mesafesi gereklilikleri nedeniyle personelin yüksek gerilim farkı yönetimi konusunda sertifikalı eğitim alması önerilmektedir (Yılmaz vd., 2020). Bu eğitimlere ek olarak, KKD seçiminin ark riski ve yüksek gerilime uygunluğu sektörel kılavuzlarla uyumlu olmalıdır (KKD for Electrical and Hybrid Vehicle Maintenance, 2025).

Risk değerlendirme süreçlerinde ise tek bir yöntem yerine, karmaşık sistemler için Fine-Kinney, HAZOP ve FMEA’nın hibrit kullanımı teşvik edilmelidir. Çünkü, FMEA bileşen arızalarını, HAZOP ise proses risklerini analiz ederek risk yönetimini derinleştirirken, IEC 61511 standardı bu analizlere mühendislik bütünlüğü kazandırmaktadır. Ayrıca, İSG profesyonellerinin siber güvenlik ekipleriyle iş birliği içinde ISO/SAE 21434 temelinde İSG Odaklı Tehdit Analizi ve Risk Değerlendirmesi (TARA) yapması zorunluluğu getirilerek, siber tehditlerin LOTO gibi sistemler üzerindeki fiziksel etkileri analiz edilmeli ve İSG risk puanlamasına entegre edilmelidir. Kullanıcı tarafında ise, Togg yangın vakası gibi olaylarda görülen standart dışı bağlantı risklerini azaltmak için güvenli şarj (Tip B RCD) ve acil durum prosedürleri hakkında sürekli ve görsel eğitim kampanyaları yürütülmeli; bu kampanyalar üreticiler ve işletmeciler tarafından ortaklaşa finanse edilmelidir.

Yangınla mücadele stratejilerinde de güncel çalışmalar EV yangınlarının klasik yöntemlerden farklı ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır; Supri vd. (2024), 230 yangın olgusunu inceleyerek en yüksek etkinliğin (%91) su sisi ve köpük ajanı kombinasyonu ile sağlandığını, suyun tek başına %58 etkinlikte kaldığını belirlemiştir. Ayrıca, bataryalarda yeniden tutuşma riskine karşı soğutma işleminin 24 saat boyunca sürdürülmesi gerektiği vurgulanmakta (U.S. Fire Administration, 2025), suyun kolay ulaşılabilir olmasına rağmen yüksek yeniden tutuşma riski taşıdığı, su sisi + köpük kombinasyonunun ise yüksek maliyetine rağmen kalıcı soğutma sağladığı belirtilmektedir. Kuru toz kullanımı ise %63 etkinlik ve 5 saatlik yeniden tutuşma süresi ile elektriksel uyumluluk sunsa da kimyasal kalıntı bırakması dezavantaj olarak öne çıkmaktadır; bu bulgular batarya yangınları için müdahale stratejilerinin yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Geleceğe yönelik İSG politikası trendleri incelendiğinde, elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümünde küçük ölçekli ve denetimsiz işletmelerden kaynaklanan riskleri yönetmek için "Kooperatif Geri Dönüşüm Modeli" stratejik bir çözüm olarak öne çıkmakta; bu model, atık bataryaların yönetimini merkezi bir denetim ve standart güvenlik prosedürleri altında birleştirerek, yüksek maliyetli İSG önlemlerinin ortak kullanımıyla güvenli ve mevzuata uyumlu bir endüstriyel ekosistem oluşturulmasını sağlamaktadır (Yılmaz, 2024). Geri dönüşüm sürecindeki bir diğer kritik risk olan bataryanın geçmiş termal ve mekanik stres verilerinin bilinmezliği sorununa karşı ise Blokzincir tabanlı "işbirlikçi geri dönüşüm platformu" önerilmekte; bataryanın tüm verilerini "Dijital Pasaport" olarak saklayan bu sistem sayesinde söküm personeli, geçmişteki riskli olayları önceden görerek uygun KKD ve prosedürlerle müdahale edebilmektedir (Koca ve Yılmaz, 2023). Operasyonel süreçlerin ötesinde, batarya modüllerindeki termal kaçak riskini kaynağında önlemek adına sıcaklık homojensizliğini gideren Biyomimetik Termal Yönetim Sistemleri geliştirilmekte; doğadan esinlenen bu akış kanalları, batarya yüzeyinde eşit sıcaklık dağılımı sağlayarak aktif korumadan ziyade "tasarımla güvenli" bir yapıya geçişin önemli bir adımını oluşturmaktadır (Chen vd., 2024). Sektördeki bu hızlı gelişim devam ederken, teknik literatür İSG yönetimi açısından iki kritik dönüşüme hazırlıklı olunması gerektiğini vurgulamaktadır (Aghabali vd., 2021). İlki, ticari araçlarda 800V mimarinin standartlaşmasıyla birlikte şarj ve bakım alanlarının 1000V DC üzeri gerilime uygun hale getirilmesi ve mevzuatın ağır vasıtalarla özgü yüksek voltajlı LOTO prosedürleri ile Ark Flaşı risk analizlerini kapsayacak şekilde genişletilmesidir. İkincisi ise, yangın riskini azaltma potansiyeli taşıyan Katı Hal Bataryalarına geçiş sürecidir. Bu yeni teknoloji, üretim ve geri dönüşüm aşamalarında kullanılan yeni kimyasallar ve yüksek basınç teknikleri nedeniyle henüz tanımlanmamış maruziyet riskleri barındırdığından, İSG otoritelerinin süreçleri yakından izleyerek kimyasal güvenlik ve biyolojik izleme standartlarını proaktif bir yaklaşımla hazırlaması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Alptekin, B. (2020). *The Assessment of Microfactory Concept to Manufacture New Generation Electric Vehicles*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Amer, M., Masri, J., Dababat, A., Sajjad, U., ve Hamid, K. (2024). Electric vehicles: Battery technologies, charging standards, AI communications, challenges, and future directions. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100751.
- Annamalai, M. C., ve Prabha, N. A. (2023). A comprehensive review on isolated and non-isolated converter configuration and fast charging technology for battery and plug in hybrid electric vehicle. *Heliyon*, 9(3), e13808.
- Aslan, İ. (2024). *Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Sisteminin Analizi ve Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bai, K. (2021). *Advanced components for electric vehicle system: Vehicle-to-grid metering, vehicle-to-vehicle charging, and high-power charge circuit interrupting devices* [Doktora tezi, University of Delaware]. ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Bayraktar, D. O. (2023). *Synthesis and electrochemical performance of high entropy oxides as an anode for lithium-ion batteries* Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bennett, S. (2023). *Defining AI ethical oversight: Transferring responsibility and accountability from machines to humans* [Doktora tezi, Capitol Technology University]. ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Bhosale, A. P., Bodke, K., Babhulkar, A., Amale, S., Mastud, S. A., ve Chavan, A. B. (2023). Comparative environmental assessment of different battery technologies used for electric vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1446–1456.
- Birleştirici, A., Şalcı, M. S., Dikkulak, A., Güler, F., ve Turhan, E. (2015). *Elektrikli araç şarj istasyonları*. Gersan Elektrik Tic. ve San. A.Ş.
- Brzezinska, D., ve Bryant, P. (2022). Performance-based analysis in evaluation of safety in car parks under electric vehicle fire conditions. *Energies*, 15(2), 649.
- Buica, G., Antonov, A. E., Beiu, C., Pasculescu, D., ve Dobra, R. (2022). Occupational risk management of equipment intended for charging electric vehicles. *MATEC Web of Conferences*, 354, 00004.
- Burggräf, P., Bergweiler, G., Kehrer, S., Krawczyk, T., ve Fiedler, F. (2024). Mega-casting in the automotive production system: Expert interview-based impact analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 918–935.
- Cardoso, L. A. L. d. S. (2023). *Dynamic inductive wireless power transfer for lightweight electric vehicles*. Doktora Tezi, Universidade do Minho.

- Chang, H. (2023). *The science behind regulating uncertain harms of lithium-ion batteries: Second harmonic generation spectroscopy and Environmental Protection Agency* Doktora tezi, Northwestern University, Illinois
- Chen, H., Zhang, T., Han, Z., Huang, H., Chen, H., ve Gao, Q. (2024). Battery thermal management enhancement based on bionics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 157, 107779.
- Checkoway, S., McCoy, D., Kantor, B., Anderson, D., Shacham, H., Savage, S., Koscher, K., Czeskis, A., Roesner, F., ve Kohno, T. (2011). Comprehensive experimental analyses of automotive attack surfaces. In *Proceedings of the 20th USENIX Security Symposium* (pp. 77–92). USENIX Association.
- Choi, J. A., ve Lee, J.-S. (2025). A study on the fire in charging facilities of electric vehicles. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(208).
- Creswell, J. W., ve Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Çınar, R. G. (2014). *Applying smart grid technologies to the secondary distribution system* Yüksek Lisans Tezi, University of California, Irvine.
- Davies, C. (2024). South Korea rushes to defuse EV safety fears after Mercedes fire. *Financial Times*. <https://www.ft.com/>
- Dehghani, P., DiDomizio, M., Sauer, N., ve Barowy, A. (2025). Heat exposure from electric vehicle fires: Experimental results and analysis. *Fire Safety Journal*, 158, 104535.
- Ekici, E., Koroglu, T., ve Çelik, Ö. (2025). Design and analysis of two-stage bidirectional power converter for vehicle-to-grid technology with fuel cell-battery electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 106, 114792.
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2022). *Şarj hizmeti yönetmeliği* (Resmî Gazete, Sayı 31797).
- European Agency for Safety and Health at Work. (2023). *Consolidated annual activity report 2022*. EU-OSHA.
- Gharehghani, A., Rabiei, M., Mehranfar, S., Saeedipour, S., Andwari, A. M., García, A., ve Reche, C. M. (2024). Progress in battery thermal management systems technologies for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114654.
- Gibson, R. (2024). *The effect of a nitrogen flush on a lithium-ion battery module for fire prevention* [Yüksek lisans tezi, University of Louisiana at Lafayette]. ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Gül, M., Yücesan, M., ve Ak, M. F. (2022). Control measure prioritization in Fine-Kinney-based risk assessment: A Bayesian BWM-Fuzzy VIKOR combined approach in an oil station. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 59385–59402.

- Haces-Fernandez, F. (2023). Risk assessment framework for electric vehicle charging station development in the United States as an ancillary service. *Energies*, 16, 8035.
- Hakimian, A. (2015). *Economic and environmental impact analysis of MWCNT lithium nickel manganese cobalt oxide batteries manufacturing considering worker safety* [Doktora tezi, Northeastern University]. ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Husaini, M., ve Sulistiyowati, I. (2024). IoT integrated electric vehicle fire detection system: Case study of IMEI TEAM UMSIDA. *Jurnal Sistem Cerdas*, 7(2).
- International Electrotechnical Commission. (2017). *Electric vehicle conductive charging system—Part 1: General requirements* (IEC 61851-1:2017). <https://webstore.iec.ch/publication/33644>
- International Electrotechnical Commission. (2018). *Low-voltage electrical installations—Part 7-722: Requirements for special installations or locations—Supplies for electric vehicles* (IEC 60364-7-722, Ed. 2.0).
- International Electrotechnical Commission. (2021). *Electric vehicle conductive charging system—Part 1: General requirements* (IEC 61851-1:2021).
- International Electrotechnical Commission. (2024). *In-cable control and protection device (IC-CPD) for mode 2 charging of electric road vehicles* (IEC 62752:2024).
- International Organization for Standardization. (2018). *Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use* (ISO 45001:2018).
- International Organization for Standardization. (2021). *Electrically propelled road vehicles—Safety specifications—Part 3: Protection of persons against electric shock* (ISO 6469-3:2021).
- International Organization for Standardization, ve International Electrotechnical Commission. (2019). *Risk management—Risk assessment techniques* (ISO/IEC 31010:2019).
- İnternet: CBS News. (2015, 25 Mayıs). *Volvo mows down journalists during demo, driver didn't buy "pedestrian detection" option*. CBS San Francisco. <https://www.cbsnews.com/sanfrancisco/news/volvo-mows-down-journalists-during-demo-driver-didnt-buy-pedestrian-detection-option/> Son Erişim Tarihi: 17.06.2025
- İnternet: Claycord. (2025, 2 Eylül). *Smoke and flames erupt from vehicles at Walnut Creek electric vehicle charging station*. Claycord. <https://www.claycord.com/2025/09/02/smoke-and-flames-erupt-from-vehicles-at-walnut-creek-electric-vehicle-charging-station/> Son Erişim Tarihi: 16.10.2025
- İnternet: Cousin, Y. (2025). Elektrikli araç lityum pillerinin geri dönüşümü: Yeniden kullanım hakkında bilmeniz gereken her şey. *Mute Energy*. <https://www.mute-energy.com/en/blog/recyclage-batteries> Son Erişim Tarihi: 20.11.2025

- İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025, Ekim 21–Kasım 24). *Şarj hizmeti piyasası aylık istatistikleri*. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-16205/sarj-hizmeti-piyasasi-aylik-istatistikleri-eylul> Son Erişim Tarihi: 21.10.2025
- İnternet: Idra Group. (n.d.). *Giga press*. <https://idragroup.com/en/gigapress> (Erişim tarihi: 14.12.2025).
- İnternet: İhlas Haber Ajansı. (2025, July 31). Park halindeyken yanmaya başlayan elektrikli araçtaki yangın 2 saat boyunca söndürülemedi. *İHA*. <https://www.ihha.com.tr/osmaniye-haberleri/park-halindeyken-yanmaya-baslayan-elektrikli-aractaki-yanin-2-saat-boyunca-sondurulemedi-277310816> (Erişim tarihi: 12.12.2025).
- İnternet: Şarkul Avasat. (2023). Elektrikli otomobil yangınları neden engellenemiyor? *Al-Şark Al-Awsat*. <https://turkish.aawsat.com/home/article/3445601/elektrikli-otomobil-yan%C4%B1nlar%C4%B1-neden-engellenemiyor> Son Erişim Tarihi: 17.08.2025
- İnternet: Tesla AI [@Tesla_AI]. (2025, January 29). FSD driving Tesla vehicles from end of line to logistics lot [Video]. X. https://x.com/Tesla_AI/status/1884457749226090590 Son Erişim Tarihi: 17.06.2025
- Javor, D., Krstić, D., Raičević, N., Petrović, N., Suljović, S., ve Procopio, R. (2025). Analysis of the causes and environmental consequences of electric vehicle fires. In *EUROSA 2025 Conference Proceedings*.
- Jiang, L., Diao, X., Zhang, Y., Zhang, J., ve Li, T. (2021). Review of the charging safety and charging safety protection of electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 12, 184.
- Kim, J., Jeong, D., ve Park, M. (2024). Development of enhanced computer vision-based monitoring technology to respond to fire accidents at electric vehicle charging stations. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 24(4), 29–35.
- Kinney, G. F., ve Wiruth, A. D. (1976). *Practical risk analysis for safety management* (No. 5865). Naval Weapons Center.
- Kurt, E. (2022). *Physics based modeling of lithium-ion batteries for electrified vehicle simulations* Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., ve Mellander, B.-E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific Reports*, 7(1), 10018.
- Liu, M., Zhou, H., Tao, Z., ve Zhou, B. (2025). Experimental study on thermal runaway in 18650 lithium-ion battery modules within a confined space: Effects of PVS and top partitions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 75, 107010.
- McGee, R. T. T. (2020). *RIVER: Roaming inverter vehicle energy resource* [Doktora tezi, University of Delaware]. ProQuest Dissertations & Theses Global.

- McQueen, J. (2022). Risk management of electric vehicle charging on fuel forecourts and enclosed car parks. In *PCIC Europe* (Paper No. EUR22_04).
- National Fire Protection Association. (2021). *NFPA 70E: Standard for electrical safety in the workplace*. NFPA.
- National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 70E: Standard for electrical safety in the workplace*. NFPA.
- National Fire Protection Association. (2023). *TIA 1767 to NFPA 70 National Electrical Code (2023 edition)*. NFPA.
- Occupational Safety and Health Administration. (2021). *Control of hazardous energy (lockout/tagout)* (29 CFR § 1910.147). U.S. Department of Labor.
- Occupational Safety and Health Administration. (2024). *Protecting employees from electric-arc flash hazards* (Publication No. 4472-11). U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov>
- Office for Zero Emission Vehicles. (2023). *Covered car parks: Fire safety guidance for electric vehicles*. ARUP.
- Olona, A., ve Castejon, L. (2025). Full-scale experimental analysis of the behavior of electric vehicle fires and the effectiveness of extinguishing methods. *Fire*, 8, 301.
- Ouyang, D., Weng, J., Chen, M., ve Wang, J. (2023). Risk assessment of electric vehicle fire accidents based on real-world data. *Heliyon*, 9(6), e16612.
- Rawat, S. S., ve Kumar, R. (2024). Techno-economic analysis of cooling technologies used in electric vehicle battery thermal management: A review. *Journal of Energy Storage*, 103, 114135.
- Resmî Gazete. (2020). *İşyeri açma ve çalışma ruhsatlarına ilişkin yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik* (Sayı 31284).
- Resmî Gazete. (2021). *Planlı alanlar imar yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik* (Sayı 31429).
- Resmî Gazete. (2021, March 25). *Otopark yönetmeliği'nde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik* (Sayı 31434). T.C. Cumhurbaşkanlığı İdari İşler Başkanlığı.
- Saleh, S. A. G. (2021). *An investigation on the comparison of the performance of lithium-ion batteries and nickel metal hydride batteries used in electric vehicles* Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Sarıkaş, E. (2024). *Development of LVP cathode materials and its effect on LFP in lithium ion batteries* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

- Shahed, M. T., ve Rashid, A. B. M. H. (2024). Battery charging technologies and standards for electric vehicles: A state-of-the-art review, challenges, and future research prospects. *Energy Reports*, 11, 5978–5998.
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., ve Huang, X. (2020). A review of battery fires in electric vehicles. *Fire Technology*, 56, 1361–1410.
- Supri, S., Saputra, S. T., ve Nugraha, W. (2024). Use of various fire extinguishing agents in handling electric vehicle fires. *Langit Biru: Jurnal Ilmiah Aviasi*, 17(2), 84–95.
- Suresh, C., Awasthi, A., Kumar, B., Im, S.-K., ve Jeon, Y. (2025). Advances in battery thermal management for electric vehicles: A comprehensive review of hybrid PCM-metal foam and immersion cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115021.
- Şahin, R. Ç. (2022). *Numerical investigation of various heat transfer mechanisms on thermal management of a lithium-ion battery pack* Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Thakur, N. (2017). *Effect of battery storage technology on the construction of electric vehicle charging stations*, Yüksek Lisans Tezi, Michigan State University, Michigan.
- TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2024). *Elektrikli araçların kullanımı ve yangın güvenliği raporu*. TMMOB.
- U.S. Fire Administration. (2025). *Electric vehicle charging safety tips*. FEMA.
- United Nations Economic Commission for Europe. (2013). *Regulation No. 100: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train*. United Nations.
- United Nations Economic Commission for Europe. (2016). *Regulation No. 138: Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility*. United Nations.
- United Nations Economic Commission for Europe. (2020). *UN Regulation No. 152: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to advanced emergency braking systems (AEBS)*. United Nations.
- United Nations Economic Commission for Europe. (2020a). *UN Regulation No. 155: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to cyber security and cyber security management system*. United Nations.
- United Nations Economic Commission for Europe. (2020b). *UN Regulation No. 156: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to software update and software update management system*. United Nations.
- University of Miami Miller School of Medicine. (2024, September 9). Electric vehicle fire staged to study environmental, health ramifications.

<https://news.med.miami.edu/electric-vehicle-fire-staged-to-study-environmental-health-ramifications/>

- Wang, B., Dehghanian, P., Wang, S., ve Mitolo, M. (2019). Electrical safety considerations in large-scale electric vehicle charging stations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 6603–6612.
- Wang, H. (2024). *Toward enabling robotic visual perception for assembly tasks: An application in wire harness assembly onto electric vehicles* [Licentiate thesis, Chalmers University of Technology].
- Wen, H., Chen, Q. A., ve Lin, Z. (2020). Plug-N-Pwned: Comprehensive vulnerability analysis of OBD-II dongles as a new over-the-air attack surface in automotive IoT. In *29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20)* (pp. 949–965). USENIX Association.
- Willis Towers Watson. (2022). *Powering the future: Managing the risks of electric vehicle charging infrastructure*. WTW.
- Xiao, L., Ouyang, Y., Lin, Q., ve Guo, Y. (2024). Cooperative recycling strategy for electric vehicle batteries considering blockchain technology. *Energy*, 313, 134062.
- Xu, L. D., Xu, E. L., ve Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962.
- Yilmaz, M., ve Krein, P. T. (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151–2169.
- Yang, J., Liu, B., Shu, D., Yang, Q., ve Hu, T. (2025). Vehicle giga-casting Al alloys technologies, applications, and beyond. *Journal of Alloys and Compounds*, 1013, 178552.
- Yao, Y., Niu, M., Chen, H., Yu, Q., Wu, Q., Li, Y., Zhang, Y., Ozcan, A., Jerrett, M., ve Zhu, Y. (2025). Fine particulate matter emissions from electric vehicle fast charging stations. *Environment International*, 201, 109581.
- Yao, Z., Yin, R., ve Peng, Q. (2025). A review on thermal management system and employed biomimetic technology to enhance lithium-ion battery packs for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 111, 115399.
- Zang, Y., ve Wang, Y. (2022). Robotic disassembly of electric vehicle batteries: An overview. In *2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (pp. 1–6). IEEE.
- Zang, Y., Qu, M., Pham, D. T., Dixon, R., Goli, F., Zhang, Y., ve Wang, Y. (2024). Robotic disassembly of electric vehicle batteries: Technologies and opportunities. *Computers & Industrial Engineering*, 198, 110727.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Emrah BEŞİKTAŞLI
ORCID : 0009-0001-1051-1440

2009 Yılında Sakarya Üniversitesi Kaynarca Seyfettin Selim Meslek Yüksekokulu Önlisans İşletme Bölümünden Mezun oldum.

2013 Yılında Anadolu Üniversitesi Lisans İşletme Bölümünden Mezun oldum.

2020 Yılında Amasya Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığından mezun oldum.

2012 Yılında Amasya Üniversitesi'nde memur olarak atandım. Halen atandığım kurumda Daire Başkanı olarak görev yapmaktayım.

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

- 1-) E. Beşiktaşlı ve A. Yurtcu, “İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Elektrikli Araçların ve Şarj İstasyonlarının Değerlendirilmesi”, Amesia , cilt 6, sayı 1, s. 1–15, Haziran 2025, doi: 10.54559/amesia.1729996 .