

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

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ ELEKTROMANYETİK ALAN MARUZİYET
SEVİYELERİNİN ÖLÇÜMÜ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet BENTLİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV

ARALIK 2025

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

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ ELEKTROMANYETİK ALAN MARUZİYET
SEVİYELERİNİN ÖLÇÜMÜ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet BENTLİ
Öğr.no 36223615926**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV

ARALIK 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübeleriyle her aşamada yolumu aydınlatan değerli danışmanım Prof. Dr. Tahmuraz ABBASOV'a teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin yönlendirmeleri ve desteği bu çalışmada benim için büyük bir rehber olmuştur.

Akademik hayatım boyunca desteğini ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Turgay SEÇKİN hocama da teşekkür ederim. Bu süreçte gösterdiği anlayış ve katkılar benim için çok kıymetlidir.

Ayrıca bana varlığı ile manevi olarak güç veren her zaman yanımda olan sevgili eşim Beyzanur Bentli'ye sonsuz teşekkür ederim. Onun sabrı, sevgisi ve inancı bu yolculuğu benim için çok daha anlamlı kılmıştır.

Her zaman yanımda olan, dualarıyla ve sevgileriyle beni bugünlere getiren babam Yaşar Bentli ve annem Nuray Bentli'ye gönülden teşekkür ediyorum. Onların fedakârlıkları ve inançları, benim için en büyük motivasyon kaynağı olmuştur.

Desteğini ve sevgisini hissettiğim kardeşlerim Ceyhun, Betül, Halidcan, Oğuz Bentli ve Serdar Akın Maraş'a ve Semih Ünlü'ye de içten teşekkürlerimi sunarım. Varlığınız ve desteğiniz benim için her zaman çok değerliydi.

Son olarak, destekleri ve katkıları ile her zaman yanımızda olan Turgut Özal Üniversitesi Rektörü Sayın Prof. Dr. Recep BENTLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın tamamlanmasında emeği, desteği ve katkısı bulunan herkese teşekkür eder, varlıklarının benim için ne kadar değerli olduğunu bir kez daha ifade etmek isterim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “**Elektrikli araçlardaki elektromanyetik alan maruziyet seviyelerinin ölçümü ve değerlendirilmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ahmet BENTLİ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi	2
1.1.1. Tezin amacı	2
1.1.2. Tez çalışmasının önemi	3
1.2. Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri Üzerindeki Kısa Litaretür Analizi	5
1.3. Manyetik Alanın İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri	5
1.4. Düşük Frekanslı Manyetik Alanların Etkileri.....	5
1.5. Yüksek frekanslı manyetik alanların etkileri	9
1.6. Manyetik alan maruziyeti için uluslararası sınır değerleri	12
2. KAVRAMLAR	14
2.1. Temel Kavramlar	15
2.1.1. Elektrik alan:	15
2.1.2. Manyetik alan.....	17
2.1.3. Elektromanyetik alan.....	22
2.1.4. SAR ve elektromanyetik maruziyet	24
2.1.5. Manyetik alan ölçüm yöntemleri.....	27
2.2. Manyetik Alan Kaynakları	30
2.2.1. Doğal kaynaklar:	30
2.2.2. Yapay manyetik alanlar.....	31
2.2.3. Elektrikli araçlarda ki elektrik sistemleri:	35
3. MATERYAL ve METOD.....	38
3.1. Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri Ölçülen Araçlar	39
3.2. Elektromanyetik Maruziyet Seviyesi Ölçüm Cihazı	48
3.3. Yakın ve Uzak Alan Etkilerinin değerlendirilmesi:	49
3.4. Araçlarda Manyetik Alan Kaynakları	51
3.5. Araçlardaki Alanın Karakteristikleri: Frekans ve Şiddet	51
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	53
4.1. Araçlarda Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi	53
4.1.1. MG luxury 4 aracında yapılan ölçümler:	53
4.1.2. 2023 Toyota corolla multidrive S aracında yapılan ölçümler:	57
4.1.3. Toyota corolla cross hybrid aracında yapılan ölçümler:	62
4.1.4. TOGG TX10 aracında yapılan ölçümler:	66
4.1.5. Kia EV3 aracında yapılan ölçümler:	71
4.1.6. Seres 3 aracında yapılan ölçümler:	76
4.1.7. QASHQAI 2023 e-power aracında yapılan ölçümler:	79
4.1.8. Hyundai accent admire aracında yapılan ölçümler	85

4.2.	Karşılaştırmalı Elektromanyetik Maruziyet Seviye Analizi	89
4.3.	Mesafeye Bağlı Manyetik Alan Analizi	92
4.4.	İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi	99
4.5.	ICNIRP/WHO Limitleri ile Karşılaştırma	100
4.6.	Dağılım ve Hotspot Analizi.....	101
4.7.	Neden Analizi.....	101
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	103
	KAYNAKLAR.....	108
	ÖZGEÇMİŞ	113



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: SAR Sınır Değerleri Örnekleri	26
Çizelge 2.2: Ev aletlerin farklı mesafelere göre etki ettiği manyetik alanlar.....	32



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Manyetik ölçüm araştırmalarının yıllara göre dağılımı. (Kaynak: Web of Knowledge, Arama terimi: ‘cancer’, Arama tarihi: Aralık 2024).....	4
Şekil 2.1: Manyetik Alan Çizgileri.....	17
Şekil 2.2: Düz Telin Oluşturduğu Manyetik Alan.....	20
Şekil 2.3: Manyetik ve Elektrik Alan Çizgileri.....	21
Şekil 2.4: Elektromanyetik spektrum.....	24
Şekil 2.5: Yüksek Gerilim Hatlarının Oluşturduğu Manyetik Alan Çizgileri.....	33
Şekil 2.6: Baz İstasyonlarının Oluşturduğu Manyetik Alan Çizgileri.....	34
Şekil 2.7: Cep Telefonlarının Oluşturduğu Manyetik Alan Çizgileri.....	36
Şekil 2.8: Elektrikli Araçların Oluşturduğu Manyetik Alan Çizgileri.....	40
Şekil 3.1: İncelemelerde Kullanılan Togg Marka Araç.....	42
Şekil 3.2: İncelemelerde Kullanılan Kia EV3 Marka Araç.....	43
Şekil 3.3: İncelemelerde Kullanılan MG 4 Luxury Marka Araç.....	44
Şekil 3.4: İncelemelerde Kullanılan Seres 3 Marka Araç.....	45
Şekil 3.5: İncelemelerde Kullanılan Hyundai Accent Admire Marka Araç.....	46
Şekil 3.6: İncelemelerde Kullanılan Toyota Corolla Marka Araç.....	47
Şekil 3.7: İncelemelerde Kullanılan Toyota Corolla Cross Hybrid Marka Araç.....	48
Şekil 3.8: İncelemelerde Kullanılan Nissan Qashqai E-Power Marka Araç.....	50
Şekil 3.9: İncelemelerde Elektromanyetik Maruziyet Seviye Ölçüm Cihazı MESTEK EMF02R.....	51
Şekil 4.1: MG Luxury 4 Aracının Statik Durumda Araç Dışı Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	55
Şekil 4.2: MG Luxury 4 Aracının Dinamik Durumda Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	56
Şekil 4.3: MG Luxury 4 Aracının Dinamik ve Statik Durumda Yayıdığı Araç İçi Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	57
Şekil 4.4: MG Luxury 4 Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	58
Şekil 4.5: Toyota Corolla Multidrive S Aracının Statik Durumda Araç Dışı Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	59
Şekil 4.5: Toyota Corolla Multidrive S Aracının Statik Durumda Araç İçi Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	60
Şekil 4.6: Toyota Corolla Multidrive S Aracının Dinamik Durumda Araç İçi Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	62
Şekil 4.7: Toyota Corolla Multidrive S Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	63
Şekil 4.8: Toyota Corolla Cross Hybrid Aracının Statik Durumda Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	64
Şekil 4.9: Toyota Corolla Cross Hybrid Aracının Dinamik Durumda Araç İçi Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	65
Şekil 4.10: Toyota Corolla Cross Hybrid Aracının Dinamik Durumda Araç İçi Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	66
Şekil 4.11: Toyota Corolla Cross Hybrid Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	67
Şekil 4.12: TOGG TX10 Aracının Statik Durumda Araç İçi Yayıdığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	68

Şekil 4.13: TOGG TX10 Aracının Ani Hızlanma/Frenleme Durumunda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	69
Şekil 4.14: TOGG TX10 Aracının Ani Hızlanma/Frenleme Durumunda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	70
Şekil 4.15: TOGG TX10 Aracının Dinamik Durumda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	71
Şekil 4.16: TOGG TX10 Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	72
Şekil 4.17: Kia EV3 Aracının Statik Durumda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	73
Şekil 4.18: Kia EV3 Aracının Dinamik Durumda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	74
Şekil 4.19: Kia EV3 Aracının Ani Hızlanma Durumunda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	75
Şekil 4.20: Kia EV3 Aracının Ani Frenleme Durumunda Araç İçi Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	76
Şekil 4.21: Kia EV3 Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	76
Şekil 4.22: Seres 3 Aracının Şarj Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	77
Şekil 4.23: Seres 3 Aracının Dinaik Durumda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	78
Şekil 4.24: Seres 3 Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	79
Şekil 4.25: QASHQAI 2023 E-POWER Aracının Statik Durumda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	80
Şekil 4.26: QASHQAI 2023 E-POWER Hız 20 Km Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	81
Şekil 4.27: QASHQAI 2023 E-POWER Hız 40 Km Durumunda Elektrik Motoru Devredeyken Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	82
Şekil 4.28: QASHQAI 2023 E-POWER Hız 40 Km Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	82
Şekil 4.29: QASHQAI 2023 E-POWER Ani Hızlanma Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	83
Şekil 4.30: QASHQAI 2023 E-POWER Ani Frenleme Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	84
Şekil 4.31: QASHQAI 2023 E-POWER Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	85
Şekil 4.32: Hyundai Accent Admire, Statik Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	86
Şekil 4.33: Hyundai Accent Admire, Dinamik Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	87
Şekil 4.34: Hyundai Accent Admire, Ani Hızlanma/Frenleme Durumunda Yaydığı Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	88
Şekil 4.35: Hyundai Accent Admire Aracının Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerine Göre Modellenmesi.....	89
Şekil 4.36: Benzinli ve Hibrit Araçlar İçin Düşük Elektromanyetik Maruziyet Bölgeleri ve Seviyeleri.....	90
Şekil 4.37: Benzinli ve Hibrit Araçlar İçin Yüksek Elektromanyetik Maruziyet Bölgeleri ve Seviyeleri.....	91

Şekil 4.38: Elektrikli Araçlarda İçin Yüksek Elektromanyetik Maruziyet Bölgeleri ve Seviyeleri.....	92
Şekil 4.39: Elektrikli Araçlarda İçin Düşük Elektromanyetik Maruziyet Bölgeleri ve Seviyeleri.....	92
Şekil 4.40: TOGG TX10 ve Seres 3 Elektrikli Araçlarında Mesafeye Göre Değişen Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	93
Şekil 4.41: Toyota Corolla Multidrive S Aracında Mesafeye Göre Değişen Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	94
Şekil 4.42: Peugeot E-208 Aracında Mesafeye Göre Değişen Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri.....	97
Şekil 5.1: Peugeot E-208 ve Toyota Corolla araçlarının motor ve akü bölgelerinin karşılaştırmalı analizi	104
Şekil 5.2: Peugeot E-208 ve Toyota Corolla araçlarının sinyal ve güç kabloları bölgelerinin karşılaştırmalı analizi.....	106



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

μT	:Mikrotesla
Hz	: Hertz Freknan Brimi
W/kg	: Kilogram başına Watt
E	: Elektrik Alanı,
F	: Elektriksel Kuvvet
q	:Birim Yükün Büyüklüğü
(V/m)	:Volt/Metre
k	:Coulomb sabiti
Q_{enc}	:Toplam Yük
r	:Uzaklık
(Φ)	:Elektrik Akısı
ϵ_0	:Boşluk Geçirgenliği
ℓ	:Devre Boyunca Alınan Yol Elemanı,
B	:Manyetik Alan
A	:Yüzeyin Alan Vektörü
Wb	: Manyetik Akının Birimi
T	:Tesla
v	:Parçacığın Hız Vektörü
I	:Akım
λ	:Dalga Boyu
σ	:Dokunun Elektriksel İletkenliği
m	:Kütle
ρ	:Doku yoğunluğu
V	:Hacim

<i>G</i>	:Gauss
<i>kWh</i>	:Kilowatt saat
<i>Nm</i>	:Newton metre
<i>Wh/kg</i>	:Kilogram başına Watt-saat
<i>n</i>	:Alanın Uzaklıkla Azalma Hızı
μ_0	:Manyetik Sabit (Boşluğun Manyetik Geçirgenliği $4\pi 10^{-7}$ H/m)
μ	:Manyetik Geçirgenlik
EMA	:Elektro Manyetik Alan
BEV	:Bataryalı Elektrikli Araç
HEV	:Hibrit Elektrikli Araç
WHO	:Dünya Sağlık Örgütü
ICNIRP	:Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Koruma Komisyonu
IEEE	:Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
EMF	:Elektro Motor Kuvveti
MRI	:Manyetik Rezonans Görüntüleme
ELF-MA	:Düşük Frekanslı Manyetik Alanların
ROS	:Reaktif Oksijen Türleri
NADPH	:Nikotinamid adenin dinükleotid fosfat
SOD	:Süperoksit Dismutaz
DFMA	:Düşük Frekanslı Manyetik Alanlar
GSM	:Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
SSR	:Sistemik Senkronizasyon Rezonans
LFMF	:Düşük Frekanslı Manyetik Alan
MDA	:Oksidatif Stres Ürünü
TOS	:Oksidan Yük Göstergesi
GST	:Antioksidan enzim

YFMA	:Yüksek Frekanslı Manyetik Alan
VGCC	:Voltaj Kapılı Kalsiyum Kanalı
BDNF	:Beyin Kaynaklı Nörotrofik Faktör
EEG	:Beynin Elektriksel Aktivitesini
IARC	:Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı
RF	:Radyo Frekans
SAR	:Spesifik Emilim Oranı
SMF	:Statik Manyetik Alanlar
IPT	:Endüktif Şarj Sistemi
EHS	:Elektromanyetik Aşırı Duyarlılık
AC	:Alternatif Akım
DC	:Doğru Akım
EMC	:Elektromanyetik Uyumluluk
IEC	:Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
FDTD	:Elektromanyetik Alanların Zaman ve Mekânda Çözümlemesi
MRI	:Manyetik Rezonans Görüntüleme
FCC	:ABD Federal İletişim Komisyonu
PPM	:Proton Precesyon Manyetometre
GMR	:Dev Manyetorezistans
IMF	:Gezegenler Arası Manyetik Alan
EA	:Elektrikli Araçlar
RMS	:Değişken Manyetik Alanın Ölçü Birimi
PWM	:Darbe Genişlik Modülasyonu
EMI	:Elektromanyetik Girişim
BMS	:Batarya Yönetim Sistemleri
IPT	: Endüktif Güç Transfer

WLTP	:Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Prosedürü
RWD	:Arka Tekerlekten Çekiş
EV	:Elektrikli Araç
PMSM	:Mıknatıslı Senkron Motor
ABS/ESC	:Kilitlenme Önleyici Fren Sistem
WLTP	:Dünya Geneline Uyumlu Hafif Araç Test Prosedürü
KERS	:Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDAKİ ELEKTROMANYETİK ALAN MARUZİYET SEVİYELERİNİN ÖLÇÜMÜ VE DEĞERLENDİRİLMESİ AHMET BENTLİ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

XVI+112 sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. TAHMURAZ ABBASOV

Bu çalışma, Elektrikli araçlar (BEV), hibrit araçlar (HEV) ve geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar (ICE) arasındaki araç içi elektromanyetik maruziyet seviyelerinin mekânsal karakteristikleri incelenmiştir. Araçlarda gerçekleştirilen deneysel ölçümler; motorun çalışır halde sabit (durağan) konumu, hızlanma (ivmelenme) ve frenleme senaryoları, 20, 40 ve 60 km/s sabit hızlarda sürüş ile rejeneratif frenleme sisteminin aktif olduğu durumları içerecek şekilde kurgulanmıştır. Bu bağlamda, çalışma tasarımında söz konusu tüm sürüş senaryolarına yer verilmiştir. Araştırmanın temel motivasyonu, elektrikli sistemlerin (batarya, inverter, kablolar, kablosuz şarj, rejeneratif frenleme vb.) oluşturduğu elektromanyetik alanların yolcu maruziyeti üzerindeki potansiyel etkileri üzerindeki literatür boşluğunu doldurmaktır.

Çalışma metodu ve yöntemsel yaklaşım şu şekilde özetlenebilir. İncelenen araç örnekleri arasında TOGG TX10, Kia EV3, MG 4 Luxury, Seres 3 ile farklı model hibrit ve benzinli araçlar Toyota Corolla Cross Hybrid, Qashqai e-Power, Hyundai Accent yer almaktadır. Araç içindeki referans noktalar arasında sürücü ve yolcu bölgesi ile yüksek akım taşıyan batarya-kablolar ve motor/inverter ünitelerinin yakını gibi kritik bölgeler bulunmaktadır.

Alan profillemeye amacıyla bu referans noktaların etrafında ve farklı yüksekliklerde ölçüm noktaları oluşturulmuş, her bir senaryoda bu noktaların çevresindeki manyetik alan dağılımı detaylı olarak kaydedilmiştir. Ölçümler MESTEK EMF02R elektromanyetik radyasyon detektörü ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm protokolü, yakın/uzak alan etkilerinin belirlenmiş. Tekrarlı ölçümlerle araç içerisindeki elektromanyetik maruziyet seviyelerinin haritalandırılması her araç için ayrı ayrı yapılmıştır.

Analizler, manyetik alan dağılımının kaynağın türüne, kablolama düzenine ve cihazların yerleşim yerlerine bağlı olduğu, mesafeye bağlı azalma ve yakın-alan etkilerinin elektromanyetik maruziyet seviyeleri açısından belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca hibrit araçlarda elektrikli/benzinli mod geçişleri sırasında dalgalanmalar ve şarj sırasındaki yükselmelerin sistematik olarak incelenerek farklı çalışma senaryolarının maruziyet profiline etkisi gösterilmiştir. Ölçüm verilerinin haritalama ve modelleme yöntemleri ile detaylı analizleri yapılmıştır.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, ileriye dönük daha geniş kapsamlı çalışmalara, uzun dönem maruziyet analizlerine ve biyolojik etkilerin epidemiyolojik değerlendirmelerine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Hibrit Araçlar, Kabin İçi Manyetik Alan, Manyetik Maruziyet, Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)

ABSTRACT

Master Thesis

MEASUREMENT AND EVALUATION OF MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN ELECTRIC VEHICLES

AHMET BENTLİ

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

XVI+112 pages

2025

Supervisor: Prof. Dr. TAHMURAZ ABBASOV

This study examined the spatial characteristics of in-vehicle electromagnetic exposure levels between electric vehicles (BEV), hybrid vehicles (HEV), and conventional internal combustion engine vehicles (ICE). Experimental measurements conducted in the vehicles were designed to include scenarios where the engine was stationary (idling), acceleration (deceleration), and braking, driving at constant speeds of 20, 40, and 60 km/h, and situations where the regenerative braking system was active. In this context, all of the aforementioned driving scenarios were included in the study design. The primary motivation for the research was to fill a gap in the literature regarding the potential effects of electromagnetic fields generated by electrical systems (batteries, inverters, cables, wireless charging, regenerative braking, etc.) on passenger exposure.

The working method and methodological approach can be summarized as follows: The vehicle models examined include the TOGG TX10, Kia EV3, MG 4 Luxury, Seres 3, and various hybrid and gasoline-powered models such as the Toyota Corolla Cross Hybrid, Qashqai e-Power, and Hyundai Accent. Reference points inside the vehicle include critical areas such as the driver and passenger areas, high-current battery cables, and the vicinity of the motor/inverter units. For field profiling, measurement points were established around these reference points and at different heights, and the magnetic field distribution around

these points was recorded in detail for each scenario. Measurements were performed using the MESTEK EMF02R electromagnetic radiation detector. The measurement protocol determined near/far field effects. Repeated measurements mapped the electromagnetic exposure levels inside the vehicle separately for each vehicle.

Analyses have revealed that the magnetic field distribution depends on the type of source, wiring configuration, and device placement; distance-dependent attenuation and near-field effects are decisive in terms of electromagnetic exposure levels. Furthermore, fluctuations during electric/gasoline mode transitions in hybrid vehicles and systematic increases during charging were examined to demonstrate the impact of different operating scenarios on the exposure profile. Detailed analyses of the measurement data were performed using mapping and modeling techniques.

The results obtained from the thesis study will contribute to future broader studies, long-term exposure analyses, and epidemiological assessments of biological effects.

Keywords: Electric Vehicles, Hybrid Vehicle, Cabin-Interior Magnetic Field, Magnetic Exposure, Electromagnetic Compatibility (EMC)

1. GİRİŞ

Şehir merkezlerinde, elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, elektromanyetik maruziyet seviyeleri aynı oranda arttığı gözlemlenmektedir. Elektrikli araçlar, çalışma prensipleri gereği batarya sistemleri, elektrik motorları ve güç dönüştürücüleri nedeniyle çevreye manyetik alan yaymaktadır. Aynı teknolojiyi belirli bir oranda kullanan hibrit elektrikli araçlar (Hybrid Electric Vehicle – HEV) ise; elektrikli ve içten yanmalı modlar arasında geçiş sırasında, hem batarya hem de içten yanmalı motor sistemlerinin etkileşiminden doğan dinamik manyetik alan dalgalanmalarına maruz kalmaktadır. Öte yandan, klasik içten yanmalı motorlu araçlar yüksek akımlı kablolar ve ateşleme sistemleri nedeniyle, özellikle motor blok etrafında ve enerji dağıtım sistemleri çevresinde manyetik alan üretmektedir. Bu manyetik alanlar, hem araç içerisinde bulunan yolcular hem de şehir içinde yayalar ve diğer sürücüler için manyetik bir maruziyet oluşturmaktadır. Özellikle trafik yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde ve elektrikli araç sürücü ve yolcularında bu manyetik çevreye maruz kalma süresi ve etkileri daha da önemli hale gelmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve ICNIRP gibi kurumlar, düşük frekanslı manyetik alanlar için $200 \mu T$ 'ye kadar sınır değerler önermektedir; ancak uzun süreli ve tekrarlı maruziyetin olası nörolojik, kardiyovasküler ve kanserojen etkileri hâlen tam olarak belirlenmemiştir.

Manyetik alan ölçümleri, elektrikli, hibrit ve benzinli araçlardan kaynaklanan elektromanyetik maruziyet seviyelerinin tespiti, insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerin değerlendirilmesi ve elektromanyetik uyumluluk sorunlarının analiz edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Literatürde, (literatür kaynağı ekle) elektrikli araçlarda araç içi manyetik alan haritaları incelendiğinde yeterli sayıda örnekle sunulmadığı görülmektedir. Hibrit ve benzinli araçlarla doğrudan kıyaslamalar nadiren ele alınmıştır. (bu cümlelerin literatür kaynağını bul) Benzinli araçtaki yapılan elektromanyetik maruziyet seviyeleri ölçümlerinin tümünün standart sınır değerlerin altında kalmış olmasına rağmen farklı sistemler arasındaki yapılan mukayeseler yetersiz değerlendirilmiştir. Elektrikli hibrit ve benzinli araçların iç ortamlarında sürücü ve yolcuların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin belirlenmesi, bireysel sağlık üzerindeki olası etkiler bağlamında bu tür

Çalışmaların önemi daha da artırmaktadır. Ayrıca araç içinde bulunan bireyler, motor ve batarya sistemlerine yakınlıkları nedeniyle sürekli olarak değişen manyetik alanlara maruz kalabilmektedir. Bu durum, özellikle uzun süreli araç kullanan sürücüler için potansiyel sağlık etkileri açısından değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Bu tez çalışmasında bezinli hibrit ve elektrikli araçların iç ortamında oluşan elektromanyetik maruziyet seviyeleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu maruziyet seviyeleri sürücü ve yolcular üzerindeki olası etkilerini değerlendirilmiştir. Böylece elde edilen veriler doğrultusunda, elektrikli araçlardan yayılan manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini ortaya konulması hedeflenmiştir.

Tez, dört farklı elektrikli, iki farklı benzin ve iki farklı hibrit araç modellerinde manyetik alan ölçümlerinden elde edilen verilerin analizi ve yorumlanmasını içermektedir. Bu tez, dört farklı elektrikli, iki farklı benzinli ve iki farklı hibrit araç modelinde gerçekleştirilen manyetik alan ölçümlerinden elde edilen verilerin analizini ve yorumlanmasını içermektedir. Elde edilen bulgular ve metodolojik yaklaşımlar, uluslararası bilimsel platformlarda da paylaşılmıştır: 8. *International Mediterranean Scientific Research and Innovation Congress*'ta bir bildiri, 7. *Başkent International Conference on Multidisciplinary Studies*'te iki ayrı sunum ve *ICCPEAS 2025 (International Conference on Current Problems in Engineering and Applied Sciences)*'ta bir sunum olmak üzere toplam dört ayrı uluslararası seminer/konferansta sunulmuştur.

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

1.1.1. Tezin amacı

Bu tez çalışması, elektrikli, hibrit sistemli ve benzinli araçlarda ortaya çıkan elektromanyetik maruziyet seviyeleri ölçümlerin yapılmasını ve maruziyet seviyelerinin profillerinin analizini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Araç içindeki farklı bölgelerde tekrarlı ölçümler ve analizlerle, özellikle şarj süreçleri, ani hızlanma, frenleme ve sabit hız gibi dinamik çalışma koşullarında sistematik manyetik alan değişimleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Ölçümler, manyetik izolasyonun sağlandığı alanlardan elde edilen veriler ile elektromanyetik maruziyetin yoğun gözlemlendiği bölgelerden alınan ölçümler aracılığıyla gerçekleştirilerek, mevcut elektronik sistemlerin (GPS, kablosuz şarj, araç içi iletişim sistemleri ve güç elektroniği birimleri vb.) oluşturduğu ek elektromanyetik etkiler

de kapsamlı biçimde incelenmiştir. Ayrıca, enerji kaynaklarının (yenilenebilir vs. fosil) ve şarj altyapısının araç içindeki elektromanyetik ortam üzerindeki etkileri, yüksek frekanslı parazitler ve kablolama düzenlemeleri de bu ölçüm ve analiz süreçlerine entegre edilerek, uluslararası standartlar (ICNIRP, IEEE, Avrupa Birliği Direktifleri) ile karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.

Günümüzde elektromanyetik alanlara maruziyet, elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması ve batarya teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte çevresel ve sağlık açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, sadece araç içi elektromanyetik maruziyet seviyelerinin detaylandırılmasını sağlamakla kalmayıp, şarj süreçleri, sürüş dinamikleri ve enerji kaynaklarının etkilerini de ele alarak alandaki literatüre önemli katkılar sunmayı hedeflemiştir. Ölçüm sonuçlarının farklı araç tipleri arasındaki karşılaştırmalı analizler yapılarak, sürücü ve yolcuların uzun dönem maruziyetinin potansiyel etkileri değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, aşağıdaki temel problemlerin incelenmesi hedeflenmiştir:

1. Farklı araç türlerine göre elektromanyetik maruziyet seviyelerinin ölçümü ve değerlendirilmesi.
2. Farklı araç türlerinde çeşitli bileşenlerin yaydıkları manyetik alanın yüksek olduğu bölgelerin belirlenmesi ve bu bölgelerdeki elektromanyetik maruziyet seviyelerinin ulusal ve uluslararası standartlarda belirlenen güvenlik seviyeleri ile kıyaslanması.
3. Araçların ve sistemlerin ani dinamik dalgalanmalarının oluşturdukları manyetik alanın darbe değişimlerinin uzun süreli maruziyet etkilerinin ölçülmesi ve bu değişimlerin insan sağlığına olası potansiyel etkilerinin değerlendirilmesi
4. Araçlarda sürücü ve yolcular üzerindeki kararlaşmış manyetik alan maruziyetinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi.
5. Elde edilen deneysel ve numerik hesaplamalara göre farklı araç türlerinin iç bölgelerinde açığa çıkan manyetik alan seviyelerinin azaltılması için yöntemlerin önerilmesi.

1.1.2. Tez çalışmasının önemi

Manyetik alanlar üzerine yapılan bilimsel araştırmalar, özellikle düşük frekanslı manyetik alanların uzun süreli maruziyeti ile bazı nörolojik, kardiyovasküler ve kanserojen etkiler arasında olası bağlantıları ortaya koymaktadır [1]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve

Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) gibi kuruluşlar, elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmakta ve belirli maruziyet limitleri önermektedir [2]. Ancak, bu konularda yapılan ve literatürde sunulan çok sayıda çalışmalar olmasına rağmen, elektrikli araçlar içindeki manyetik alan maruziyeti üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması bu konu üzerinde bilimsel çalışmaların eksikliğini ortaya koymaktadır. Aşağıdaki şekil 1.1 farklı yıllara göre genel olarak manyetik alan seviyelerinin ölçülmesi üzere elde edilen istatistik değerlendirmeler sunulmuştur. Şekil 1.1 de görüldüğü gibi elektromanyetik maruziyet seviyeleri artan bir eğilim ile değişmektedir. Dolayısıyla yeni teknolojilerin ve sistemlerin gelişmesi ile elektromanyetik alan maruziyet seviyelerinin artış dinamiğinin daha da yükseleceği ve bu alanların maruziyetinin artacağı kaçınılmazdır. Bu nedenle manyetik alan maruziyetinin daha da geniş kapsamda incelenmesi, değerlendirilmesi ve bu maruziyetten koruma yöntemlerinin geliştirilmesi günümüzde büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda yapılan tez çalışmasının önemi aşağıda belirtilen konular altında incelenmiştir.



Şekil 1.1: Manyetik ölçüm araştırmalarının yıllara göre dağılımı. (Kaynak: Web of Knowledge, Arama terimi: 'manyetik ölçüm', Arama tarihi: Aralık 2024).

- Farklı araçlar modellerinin iç ortamındaki manyetik alan seviyeleri değişimleri belirlenmiştir.
- Elde edilen sonuçlar araçların içinde oluşan bu manyetik alan değişimlerinin sürücü ve yolcular üzerinde olası sağlık risklerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

- Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin, WHO, ICNIRP gibi uluslararası kuruluşların belirlediği sınır değerlerle karşılaştırılması imkânı sağlamıştır.
- Elektrikli araç tasarımlarında kullanılabilecek kaynak oluşturulmuş, araç bileşenlerinden kaynaklanan manyetik alan seviyelerinin azaltılmasına yönelik mühendislik çözümlerine ve tasarım iyileştirmelerine katkı sağlanmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması literatürde yeterince incelenmemiş olan elektrikli hibrit ve benzinli araç kullanan bireylerin manyetik alan maruziyetine ait boşlukların doldurulmasına yardımcı olacaktır.

1.2. Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri Üzerindeki Kısa Literatür Analizi

Elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerine ilişkin, maruziyet frekansı, şiddeti ve maruziyet süresine göre farklı etkiler göstermektedir. Düşük frekanslı manyetik alanlar (ELF) üzerine yapılan çalışmalar bazı nörolojik bozukluklara, belirli kanser türleri ve uyku sorunlarına neden olduğu öne sürölmektedir. Yüksek frekanslı alanlar ise akademik çalışmalarda ağırlıklı olarak termal etkiler ve dokularda ısı birikimi üzerine yoğunlaşmış; farklı tür etkiler henüz kanıtlanmamış olsa da araştırmalar ve çalışmalar devam etmektedir [2]. Elektromanyetik maruziyet seviyeleri konusuna ilişkin literatür çalışmaları aşağda belirtilen başlıklar kapsamında incelenmiştir.

1.3. Manyetik Alanın İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Manyetik alanlar, doğal ve yapay kaynaklardan yayılabilen elektromanyetik alanların bir bileşenidir. Günümüzde, elektrikli cihazlar, yüksek gerilim hatları, manyetik rezonans görüntöleme (MRI) cihazları ve kablosuz haberleşme sistemleri gibi birçok kaynak, insanları manyetik alanlara maruz bırakmaktadır [3]. Manyetik alanların biyolojik sistemler üzerindeki etkileri, frekans, şiddet, maruziyet süresi ve bireysel hassasiyete bağlı olarak değişebilir [4].

1.4. Düşük Frekanslı Manyetik Alanların Etkileri

Düşük frekanslı manyetik alanların (ELF-MA) insan sağlığı üzerindeki etkileri akademik incelemelere konu olmuştur [5, 6]. Özellikle, ELF-MA'lara uzun süre maruz kalmanın nörolojik, kardiyovasküler ve kanserojenik etkileri araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalar,

ELF-MA'nın biyolojik sistemler üzerindeki akut ve kronik etkilerini belgeleyerek, özellikle sinir sistemi ve hücresele seviyede çeşitli fizyolojik değişiklikler meydana getirebileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, düşük frekanslı manyetik alan maruziyetinin özellikle çocuklar için lösemiye sebep olabileceği düşünülmektedir [5]. Avrupa çapında yapılan bir risk değerlendirmesine göre, ELF-MA'ların çocuk lösemi vakalarının %1,5 ila %2'sine neden olabileceği tahmin edilmektedir [5, 6]. Bu bulgular, özellikle uzun süreli maruziyetin sağlık üzerindeki olası etkilerini daha iyi anlamak için epidemiyolojik (olayları tanımlamak ve görölme sıklığını ölçmek, hastalık ya da kazaların nedenlerini inceleyen çözümleyici çalışmalar yapmak) araştırmalara duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır [5, 6]. Fakat yapılan literatür çalışmalarında EMA'ların insan sağlığı üzerine etkilerine ait netleşmiş sonuçlar bulunmamaktadır ve hatta birçok durumlarda bu sonuçlar bir birleri ile çelişki oluşturmaktadır. Bu çelişkili bulgular nedeniyle, ELF-MA'ların insan sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik daha kapsamlı çalışmaların yapılması gereksinim duyulmaktadır.

i. Hücresele ve moleküler düzeyde etkiler

Düşük frekanslı manyetik alanların hücresele düzeydeki etkileri, manyetik alanların dokularla fiziksel etkileşim mekanizmaları çerçevesinde değerlendirilebilir. Statik manyetik alanların biyolojik sistemler üzerindeki etkileri incelendiğinde, dokuların manyetik duyarlılığındaki farklılıklar hücrelere etki eden manyetik kuvvetlerde de farklılık olmasına neden olduğu görölmektedir [7]. Örneğin, hemoglobin gibi para manyetik moleküller içeren kırmızı kan hücreleri üzerindeki manyetik kuvvetlerin etkileri yerçekimi ve viskoz kuvvetlere kıyasla oldukça zayıf olduğu hesaplanmıştır [7]. Benzer şekilde, manyetik alanların kimyasal reaksiyon hızları veya hücre zarı üzerindeki etkilerinin, ısı ve elektrostatik etkileşimlerin yanında önemsiz kaldığı gözlemlenmiştir [8]. Ancak, özellikle yüksek manyetik alan şiddetlerinde (≥ 4 T) hareketle ilişkili indüklenen elektrik alanların vestibüler sistem veya sinir hücrelerinde geçici baş dönmesi, metalik tat gibi etkilere yol açabileceği kanaatına varılmıştır [8, 9]. Düşük frekanslı manyetik alanların ise statik alanlara kıyasla daha düşük enerji seviyelerine sahip olması, hücresele düzeydeki etkilerinin de sınırlı kalmasına sebep olur [9]. Bununla birlikte, yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda manyeto hidrodinamik etkiler veya indüklenen akımların hücre metabolizması üzerindeki uzun vadeli sonuçlarının yetersiz olduğu ve halen bu konularda ciddi araştırmaların yapıldığı gözlemlenmektedir. Mevcut veriler, manyetik alanların hücrelerde doğrudan yapısal hasara yol açmadığını, ancak yüksek şiddetlerde hareketle ilişkili fizyolojik adaptasyon gerektirebileceğini göstermektedir [7-9].

ii. Oksidatif stres üzerindeki etkiler

Oksidatif stres termal olmayan etkiler üzerinde incelenmektedir. Para manyetik moleküllerin (ör., demir içeren sitokromlar veya serbest radikaller) elektron spin durumlarının manyetik alanlar tarafından modüle edilmesi, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırabilir [10]. Bu durum, "radikal çift mekanizması" ile açıklanmaktadır; ancak deneysel veriler bu hipotezi tutarlı şekilde desteklememektedir [11]. Literatürde sunulan çalışmalarda, yan etkiler arasında, manyetik alanların hücre zarı potansiyelini veya voltaj kapılı iyon kanallarını etkileyerek hücre içi kalsiyum (Ca^{2+}) seviyelerini yükseltmesi ve NADPH (tüm canlı organizmalarda bulunan önemli bir elektron vericisidir.) oksidaz aracılı ROS üretimini tetiklediği sonucuna varılmıştır [12]. Antioksidan sistemler üzerindeki etkiler ise belirsizdir. Bazı çalışmalar süperoksit dismutaz (hücre oksidatif hasarını önleyen savunma sistemi SOD) ve katalaz (Hücreyi reaktif oksijen türlerinin neden olduğu oksidatif hasardan korumada çok önemli bir enzimdir. CAT) aktivitesinde azalma bildirirken, başka etkileri hakkında yeterli verilere sahip olmadığı görülmüştür [11]. Bu yapılan çalışmalarda ki deneysel bulgular, maruziyet parametrelerine (şiddet, süre, hücre tipi) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin, fare modellerinde karaciğer ve beyinde lipid peroksidasyonu (yağların bileşimlerindeki doymamış moleküllerin yükseltgenmesi ile bozulması) artışı rapor edilmiş, ancak insan hücre kültürlerinde benzer etkiler araştırılmaktadır [12]. Mevcut kılavuzlar (ICNIRP, IEEE), DFMA'nın oksidatif stres üzerindeki etkilerini "kanıtlanmamış" olarak sınıflandırmakta ve maruziyet sınırlarını termal etkilere dayandırmaktadır [12]. Ancak, özellikle kronik maruziyet ve hassas popülasyonlarda (ör., çocuklar, immün yetmezliği olan bireyler) oksidatif stresin uzun vadeli sonuçlarına ilişkin belirsizlikler devam etmektedir [10-12]. Sonuç olarak bu konuda yapılan çalışmalar dikkate alındığında bu belirsizlikleri gidermek için standardize edilmiş deneysel protokoller ve moleküler mekanizmaları aydınlatacak çalışmaların etkisini artırılması gerekmektedir.

iii. Hücre tipine ve dalga formuna özgü etkiler

İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik alanların (EMF) biyolojik etkileri, maruziyetin frekansı, modülasyon tipi ve hedef hücrenin özellikleri gibi parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle hücre tipine bağlı duyarlılık, genetik ve metabolik aktivitelerin farklılığından kaynaklanır. Örneğin, insan fibroblastlarının (hücre dışı kolajen yapımından sorumlu bir hücre türü) ve nöroblastom

(sinir dokusundan kaynaklanan bir kanser türü) hücrelerinin RF-EMF'ye karşı DNA hasarı ve oksidatif stres açısından lenfositlere veya astrositlere göre daha hassas olduğu gösterilmiştir. Benzer şekilde, dalga formu ve modülasyon da kritik bir rol oynar. GSM (Global System for Mobile Communications) gibi genlik modülasyonlu sinyallerin (örneğin, 217 Hz modülasyonlu 1.8 GHz), DNA zincir kırıkları üzerinde etkileri olduğu saptanmıştır. Yapılan çalışmalarda PC12 hücrelerinde GSM-217 Hz sinyalinin HSP70 gen ekspresyonunu artırdığını, ancak aynı taşıyıcı frekanslı dalga veya konuşma modülasyonlu sinyallerin benzer etkiye sahip olmadığını gözlemlemiştir [13, 14].

iv. Sinir sistemi üzerindeki etkiler

Düşük frekanslı manyetik alanların (ELF-MA) sinir sistemi üzerindeki etkileri, nöromodülasyon (sinir sisteminin aktivitesini değiştirmek için uygulanan bir dizi tıbbi teknik) mekanizmaları ve potansiyel terapötik (ilaçların kan plazma konsantrasyonunun içinde ölçülmesi) uygulamalar açısından önemli bir araştırma alanıdır. Araştırmalar Manyetik alanların nöronal aktiviteyi nasıl etki ettiğini inceleyerek, "manyetogenetik" yaklaşımların optogenetik ile benzer prensiplere sahip olduğunu ancak biyomoleküler etkileşimlerdeki enerji sınırlamaları nedeniyle fiziksel uygulanabilirliğin etkilerinin henüz bilinmediği vurgulamıştır. Sentetik manyetik nanoparçacıkların mekanik kuvvet, ısı veya elektriksel stimülasyon yoluyla nöronal kanalları aktive etmesi gibi yöntemler, derin dokulara non-invazif (tanı ya da tedavi amacıyla derinin delinmesi) oluşumu sağlama potansiyeli taşır. Merkezi ve periferik (merkezi sinir sisteminin dışında kalan sinir sistemi) sinir sistemleri arasındaki elektromanyetik alan senkronizasyonunu analiz edilmiş; beyin ve mide (0,05 Hz), kalp (0,1 Hz) ve retina (3-4 Hz) çalışma frekansına sahip iken organlar arasında mesafe arttıkça rezonans frekansının azaldığını (SSR Mesafe arttıkça rezonans frekansı düşmesi prensibi) gözlemlemiştir. Bu dinamikler, bilincin oluşumunda beden-beyin etkileşimine etki ettiğini işaret eder. Yapılan deneylerde 50 Hz ELF-MA'ya 4 hafta maruz kalan sıçanlarda frontal korteks, hipokampus ve beyin sapı gibi yapılarda oksidatif stresde MDA (Oksidatif stres ürünü), TOS (ksidan yük göstergesi) değişim olmadığını, ancak glutatyon-S-transferaz GST (Antioksidan Enzim) gibi antioksidan enzim aktivitelerinde düşüşler tespit etmiştir. Bu bulgular, LFMF (Düşük frekanslı manyetik alan maruziyeti)'in akut toksisitesinin düşük olduğunu ancak kronik maruziyetin biyokimyasal adaptasyonlar gerektirebileceğini düşündürmektedir. ELF-MA'nın nöral sistem üzerindeki etkileri mekanizma, frekans ve maruziyet süresine bağlı olarak değişmekte olup, terapötik

potansiyel ile biyolojik risklerin dengelenmesi için daha fazla çalışmalara ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir [15-17].

1.5. Yüksek Frekanslı Manyetik Alanların Etkileri

Yüksek frekanslı manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri, özellikle çocukluk lösemisi ve diğer kronik hastalıklarla ilişkisi bağlamında uzun süredir tartışılmaktadır. Yapılan araştırmalar, 0.3 μ T'nin üzerindeki manyetik alan maruziyetinin çocukluk lösemisi riskinde artış olduğunu ortaya koyarken, düşük seviyeli maruziyetlerin ise daha fazla araştırılması gerekmektedir. En son yapılan çalışmalar, manyetik alanların biyolojik sistemlerde reaktif oksijen türleri (ROS) üzerinde modülasyon etkisi yaparak hücre büyümesi, DNA hasarı ve oksidatif stresi tetikleyebileceğini göstermektedir. Mevcut sağlık kılavuzları, termal olmayan etkileri yeterince dikkate almamakta ve uzun süreli düşük doz maruziyetin sonuçlarına ilişkin belirsizlikler devam etmektedir. Bu nedenle, özellikle 5G gibi yeni teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte, maruz kalınma sürelerinin gözden geçirilmesi ve yeni araştırmalarla biyolojik etkilerinin netleştirilmesi kritik önem taşımaktadır [18, 19].

i. Hücresel ve moleküler düzeyde etkiler

Yüksek frekanslı manyetik alanların biyolojik etkileri, hem termal hem de termal olmayan kaynaklar aracılığıyla ortaya çıkmaktadır. Termal etkiler, elektromanyetik dalgaların doku tarafından emilmesi sonucu lokal ısı artışına yol açarak protein konformasyonunda (Isıl hareketler veya bir dış etki sonucu moleküllerdeki değiştirmeler) değişiklik, enzim aktivitesinde bozulma ve hücresel metabolizmanın etkilenmesi gibi durumları beraberinde getirmektedir. Öte yandan, termal olmayan etkiler; hücre zarındaki lipit düzeninin ve iyon kanallarının fonksiyonlarının değişmesi ve hücre içi Ca^{2+} sinyalizasyonunda ki artış ile ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda, YFMA (Yüksek Frekanslı Manyetik Alan) maruziyetinin mitokondriyal elektron taşıma zincirinde elektron kaçaklarına neden olarak ROS üretimini tetiklediği ve oksidatif stresin artışına yol açtığı ileri sürülmektedir. Ayrıca, DNA replikasyonu ve tamir süreçlerinde meydana gelen bozulmalar, genetik modifikasyonlar ve uzun süreli inflamatuvar (vücudun hasara karşı verdiği yanıt) yanıtlar, YFMA'nın hücresel ve moleküler düzeyde olası patofizyolojik etkilerini destekleyen bulgulardan bazılarıdır. Mevcut uluslararası kılavuzlar temel olarak termal etkiler üzerinden maruziyet sınırlarını belirlerken, termal olmayan mekanizmaların etkilerinin daha net ortaya

konulabilmesi için standartize edilmiş in vitro ve in vivo modellerle desteklenen uzun vadeli epidemiyolojik çalışmaların gerekliliği vurgulanmaktadır. Bu doğrultuda, özellikle 5G teknolojisiyle birlikte artan YFMA maruziyetinin, kronik epigenetik değişiklikler ve inflamasyon gibi süreçler üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması, alanın gelecekteki risk değerlendirmeleri ve güvenlik standartlarının güncellenmesi açısından kritik önem taşımaktadır [20, 21].

ii. Sinir sistemi üzerindeki etkiler

Yüksek frekanslı manyetik alanların sinir sistemi üzerindeki etkileri, hem termal hem de termal olmayan durumlarda ortaya çıkan karmaşık bir patofizyolojiye işaret etmektedir. Termal durumlarda, elektromanyetik dalgaların doku tarafından absorbe edilmesi sonucu meydana gelen lokal ısı artışına bağlı olarak, nöron membranlarının geçirgenliğinde bozulmalara, protein yapılarında de organize olmuş konformasyonlara ve sinaptik iletimin modülasyonuna neden olmaktadır. Öte yandan, termal olmayan etkiler; özellikle voltaj kapılı kalsiyum kanallarının (VGCC) aktivasyonu yoluyla hücre içi Ca^{2+} konsantrasyonlarında artış, mitokondriyal elektron transport zincirinde meydana gelen elektron kaçakları ile tetiklenen ROS üretimi ve bunların yol açtığı oksidatif stresin nöronal lipid peroksidasyonu ve DNA hasarına yol açması gibi mekanizmalarla ilişkilendirilmektedir. Araştırmalar, maruziyet parametrelerinin (frekans, modülasyon, süre) ve etkilenen beyin bölgelerinin (ör., hipokampus, serebral korteks) bu etkilerin şiddetini belirlemede kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. Örneğin, fare modellerinde kronik yüksek frekanslı manyetik alan maruziyetinin, hipokampal BDNF (beyin kaynaklı nörotrofik faktör) ekspresyonunu azaltarak hafıza bozukluklarıyla ilişkili olabileceği bildirilmiştir; ancak, insan EEG çalışmalarında benzer patofizyolojik değişikliklerin tutarlı bir şekilde gözlemlenememesi, maruziyetin dozaj ve modülasyon özelliklerine bağlı olarak farklı organizmalarda farklı tepkiler üretebileceğini göstermektedir. Özellikle 5G teknolojisiyle birlikte yaygınlaşan milimetre dalga frekanslarının kan-beyin bariyeri permeabilitesi ve mikrogial aktivasyon üzerindeki potansiyel etkileri konusundaki belirsizlikler, sinir sistemine yönelik risklerin ve farklı doku ve hücreler arası etkileşimleri araştırmalarla netleştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, uluslararası düzenleyici kuruluşların temelde termal etkilere dayalı maruziyet sınırları belirlediği göz önüne alındığında, nöral kök hücre modelleri, in vivo dinamik sinyal analizleri ve uzun vadeli epidemiyolojik çalışmalarla desteklenen araştırmaların, sinir sistemi üzerindeki termal olmayan etkilerin aydınlatılması açısından büyük önem taşıdığı vurgulanmaktadır [22-24].

iii. Cep telefonlarının beyin üzerindeki etkileri:

Cep telefonlarından yayılan elektromanyetik ve statik manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri, özellikle kanser riski ve nörobiyolojik etkileri hakkında akademik araştırmalar yapılmaktadır. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC), cep telefonlarından kaynaklanan radyofrekans (RF) elektromanyetik alanları "muhtemel kanserojen" (Grup 2B) olarak sınıflandırmıştır; ancak mevcut epidemiyolojik ve deneysel çalışmaların sonuçları hakkında kesin bir sonuca varılamamıştır. Özellikle hayvan deneylerinde yüksek SAR (Spesifik Emilim Oranı) değerlerinde artış gözlemlenmiş olsa da, bu bulgular insanların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin çok üzerinde gerçekleştirilen deneylerden çıkan sonuçlardır. Diğer yandan, cep telefonlarının yüzeyine yakın bölgelerde ölçülen statik manyetik alanlar (SMF) militesla (mT) seviyelerine ulaşabilmekte, bu alanların deri ve yüzey dokularında lokal ısınma veya manyetik gradient etkileri yoluyla biyolojik etkileri olabileceği öne sürülmektedir. Örneğin, SMF'lerin reaktif oksijen türleri üretimini tetiklemesi veya nöronal aktiviteyi modüle etmesi gibi etkileri tartışılabilir, bu etkilerin insan sağlığına zararlı olup olmadığı netleşmemiştir. Mevcut çalışmalar, ICNIRP tarafından belirlenen güvenlik sınırlarının altında kalan maruziyet seviyelerinin termal olmayan etkilerinin sınırlı olduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, özellikle genç bireylerde maruziyet süresinin uzaması ve 5G gibi yeni teknolojilerin yaygınlaşması nedeniyle, uzun vadeli etkilerin değerlendirilmesi ve daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır [25, 26].

iv. Elektrikli araçlardaki manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri:

Literatür çalışmalarında elektrikli araçlarda manyetik alan emisyonlarının, özellikle düşük frekanslı (ELF-EMF) ve yüksek frekanslı (RF-EMF) aralıklarda insan sağlığı üzerinde potansiyel etkilere sahip olduğunu kanıtlamıştır. (ICNIRP), manyetik akı yoğunluğu için 27 μ T ve elektrik alan şiddeti için 4.05 V/m üst sınırlar belirlemiş olsa da yüksek güçlü endüktif şarj sistemleri (IPT) veya dinamik şarj sırasında bu değerlerin aşılabildiği gözlemlenmiştir. Özellikle 20–100 kHz frekans aralığında çalışan IPT sistemleri, dokulara nüfuz eden manyetik alanlar üreterek hücresel düzeyde iyon kanal aktivasyonu ve oksidatif stres gibi biyolojik etkilere yol açabildiği görülmüştür. Hamileler, çocuklar ve kalp pili gibi elektronik tıbbi cihaz kullanan bireyler, bu alanlara karşı daha hassastır. Yapılan 3B elektromanyetik modellemeler, araç içindeki sürücü ve yolcuların maruz kaldığı manyetik akı yoğunluklarının, özellikle şarj sırasında ICNIRP sınırlarını lokal olarak aşılabildiğini

göstermektedir. Bu riskleri azaltmak için, ferrit tabanlı ekranlama, bobin tasarımında simetrik yerleşim ve manyetik malzemelerin kullanımı gibi teknikler önerilmektedir. Ayrıca, araç üreticilerinin manyetik alan emisyonlarını düzenli olarak test etmesi ve maruziyet süresinin sınırlandırılması, uzun vadeli sağlık risklerinin önlenmesinde kritik rol oynayabileceği düşünülmektedir [27, 28]. Bununla beraber literatürdeki yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda elektrikli araçlardaki farklı noktalardaki yerel manyetik alan seviyelerinin farklı kullanım koşullarında farklı değerlere sahip olduğu kanaatine varılmıştır. Dolayısıyla bu konularda uzun vadeli ve geniş kapsamlı ölçümlerin yapılması ve değerlendirilmesinin halen aktüel olduğu açıkça görülmektedir.

v. Elektromanyetik hipersensitivite :

Elektromanyetik alanlara (EMA) maruz kalan bireylerde baş ağrısı, yorgunluk, uyku bozuklukları ve konsantrasyon güçlüğü gibi nonspesifik semptomların ortaya çıkardığı düşünülmektedir. Üç temel hipotez ile bu durumu açıklamayabiliriz: Elektromanyetik hipotez, EMA'nın biyolojik etkilerini merkeze alır; ancak deneysel çalışmalar, EMA maruziyeti ile semptomlar arasında doğrudan bir ilişki saptanamamıştır, ayrıca termal olmayan biyofiziksel etkileri hakkında kesin bir sonuç bulunamamıştır. Nocebo etkisi ve EMA'nın zararlı olduğuna dair inançların semptomları tetiklediğini öne sürer; ancak bu etkilerin yüksek risk algısına sahip popülasyonlarda bile EHS prevalansının (nüfusta var olan hasta sayısı) düşük olduğu gözlemlenmiştir. Atıf hipotezi ise EHS'yi, tıbben açıklanamayan semptomların nedeni olduğu düşünülmektedir. Fibromiyalji gibi fonksiyonel somatik sendromlarla benzer epidemiyolojik ve psikolojik özelliklere (kadınlarda anksiyete yaygınlığı) dikkat çeker. Mevcut araştırmalar, EHS'ye maruziyet ölçümündeki metodolojik zorluklar (ör., kişisel dozimetre sınırlamaları) ve farklı hasta profilleri ve insanlarda meydana gelen etkilerin farklılık göstermesi nedeniyle kesin sonuçlara ulaşamamıştır. Hiçbir hipotez tek başına EHS'yi tam olarak açıklayamasa da, multidisipliner yaklaşımlar, bu karmaşık durumun anlaşılmasını kolaylaştırabilir [29, 30].

1.6. Manyetik Alan Maruziyeti İçin Uluslararası Sınır Değerleri

İyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik alanların (EMF) insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini sınırlandırmak amacıyla, uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen maruziyet sınır değerleri, termal ve termal olmayan etkiler temel alınarak oluşturulmuştur. Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu

(ICNIRP) ve IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü), rehberlik yapan kurumlardır. ICNIRP'nin 2020 güncellemesine göre, halk için çok düşük frekanslı (ELF) manyetik alanların (50/60 Hz) sınır değeri 200 μ T (mikrotesla) olarak belirlenmiştir. Bu değer, akut maruziyet durumunda sinir sisteminde indüklenen akımların fizyolojik eşiği hesap edilerek oluşturulmuştur. Radyo frekansı (RF) aralığında (örneğin, 100 kHz–300 GHz) ise (SAR) üzerinden limitler tanımlanır. İnsanlardaki 10-gram doku için 2 W/kg ve mesleki maruziyet değeri ise 0,4 W/kg (tüm vücut ortalaması) tespit edilmiştir. IEEE C95.1-2019 standardı da benzer değerleri benimser, ancak bazı frekans bantlarında ICNIRP'den daha geniş sınırlar önerir. Ancak bu sınırlar, termal etkilerin ötesindeki biyolojik mekanizmaları (ör., oksidatif stres, DNA hasarı) tam olarak dikkate almaz. Yapılan bazı çalışmalarda SAR 0,1–1 W/kg düzeylerinde bile genotoksik etkiler rapor edilmiştir. Bazı ülkeler (İsviçre, Rusya) daha katı limitler uygulayarak halk sağlığını korumayı hedefler. Sonuç olarak, uluslararası sınır değerleri akut termal zararı önlemede etkili olsa da, özellikle gebelik, çocukluk gibi gelişimin fazla olduğu dönemlerde ve uzun süreli maruziyetler için daha geniş çapta araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır [31-33].

2. KAVRAMLAR

Bu çalışma, elektrikli araçlardaki elektromanyetik maruziyet kaynakları, dağılımı ve ölçüm tekniklerini teorik ve pratik boyutlarıyla incelemektedir. Elektromanyetik alan maruziyet seviyelerinin, özellikle yüksek akım taşıyan sistemlerin (batarya paketleri, elektrik motorları, şarj devreleri) neden olduğu istenmeyen manyetik alan yayılımını ifade eder. Araç içerisinde bulunan elektronik sistemlerde elektromanyetik maruziyeti oluşturan başlıca etmenlerden olup bu alanlar, insan sağlığı üzerindeki biyolojik etkileri önemli bir araştırma konusudur. Çalışmamızda, doğal ve yapay manyetik alan kaynaklarının analizi incelenmiş olup. Doğal kaynaklar arasında Dünya'nın jeomanyetik alanı ve Güneş kaynaklı manyetik aktiviteler incelenirken, yapay kaynaklar kapsamında elektrikli araçların dinamik bileşenleri detaylandırılmıştır. Örneğin, elektrik motorlarında kullanılan AC/DC dönüştürücülerin harmonikleri ve batarya sistemlerindeki yüksek doğru akım (DC), düşük frekanslı (50 Hz–10 kHz) manyetik alanların başlıca kaynaklarıdır.

Elektrik alan ve manyetik alan kavramları, Coulomb ve Gauss yasaları temelinde tanımlanarak elektrikli araçlardaki yük dağılımları ve akım yolları ile ilişkilendirilmiştir. Lorentz Kuvvet Yasası, araç içindeki hareketli yüklerin (örneğin motor sargılarındaki elektronlar) manyetik alanlarla etkileşimini açıklarken, Biot-Savart Yasası ve Ampère Yasası, yüksek akımlı kabloların ve motorların çevresinde oluşan manyetik alanın hesaplanmasında kullanılmıştır. Manyetik akı kavramı, bu alanların araç kabini veya batarya kompartımanı gibi belirli bölgelerdeki yoğunluğunu incelemek için kritik öneme sahiptir.

Elektromanyetik alan teorisi, elektrikli araçlardaki zamanla değişen akımların hem elektrik hem manyetik bileşenlerini bütünlük bir şekilde ele alır. Bu bağlamda, Maxwell Denklemleri, araçtaki elektromanyetik maruziyetin dinamik davranışını hesaplamak için temel çerçeveyi sağlar. Özellikle Faraday'ın İndüksiyon Yasası, değişen manyetik alanların araç gövdesinde indüklenen girdap akımlarını ve bunun enerji kaybına etkisini açıklar.

Son olarak, elektromanyetik maruziyetin azaltılmasına yönelik ekranlama teknikleri (manyetik malzemelerin kullanımı, kablo yerleşim optimizasyonu) ve EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) genellikle bu testler pratik çıktıları arasında yer alır. Bu çerçevede, elektrikli araçların güvenli ve sürdürülebilir bakımından gereken teorik bilgi açığını kapatılmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Elektromanyetik alanların canlılar ve sistemler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için elektromanyetik alan teorisinin aşağıdaki esas kavramları kullanılır.

2.1. Temel Kavramlar

2.1.1. Elektrik alanı:

Elektrik alanı, elektrik yüklerinin çevresinde oluşan bir alandır. Bir elektrik yükü, çevresinde diğer elektrik yüklerine kuvvet uygulayan bir alan oluşturur. Elektrik alanı, bir noktadaki elektriksel kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü tanımlar.

Matematiksel olarak elektrik alanı, E harfi ile gösterilir ve birim yük başına etki eden kuvvet olarak tanımlanır. Formülü ise:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (2.1)$$

Burada E elektrik alanı şiddeti vektörü, F elektriksel kuvvet ve q birim yükün büyüklüğüdür. Elektrik alanı, genellikle volt/metre (V/m) birimi ile ifade edilir.

Elektrik alanı, yüklerin pozitif veya negatif olmasına göre farklı yönlerde etkili olur.

Pozitif bir yük etrafında elektrik alanı dışarı doğru, negatif bir yük etrafında ise içeri doğru yönelir.

Coulomb Yasası: Elektrik yüklerinin hareketini ve etkileşimlerini anlamada önemli bir rol oynar. İki noktasal yük q1 ve q2 arasındaki elektrostatik kuvvet şu formülde ifade edilir:

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.2)$$

Burada:

F → Yükler arasındaki elektrostatik kuvvet (Newton)

k → Coulomb sabiti ($8.99 \times 10^9 \frac{Nm}{C^2}$)

q_1, q_2 → Yüklerin büyüklüğü (Coulomb)

$r \rightarrow$ Yüklere arasındaki uzaklık (metre)

Coulomb Kuvvetinin Özellikleri:

Ters Kare Yasası: Uzaklık (r) iki katına çıkarsa, kuvvet $\frac{1}{4}$ oranında azalır. Uzaklık yarıya inerse, kuvvet 4 katına çıkar.

Vektörel Bir Kuvvettir: Yüklere arasındaki kuvvet doğrusal bir yönde etki eder.

Newton'un üçüncü yasasına (etki-tepki prensibi) uyar.

Süperpozisyon İlkesi Geçerlidir: Birden fazla yük varsa, her bir yükün oluşturduğu kuvvet vektörel olarak toplanır.

Gauss Yasası:

Gauss yasası, elektrik alanının (E) kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısının (Φ), yüzey içinde hapsolan toplam yük (Q_{enc}) ile orantılı olduğunu belirten temel bir elektromanyetizma yasasıdır. Matematiksel olarak, gauss yasası integral formda aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\oint E \cdot dA = Q_{enc} / \epsilon_0 \quad (2.3)$$

$\oint E \cdot dA$: S kapalı yüzeyi boyunca elektrik alanının yüzey elemanları ile skaler çarpımının integrali (toplam akı) anlamına gelir.

Q_{enc} : kapalı yüzeyin içerisinde bulunan toplam yüküdür.

ϵ_0 : boşluk geçirgenliği (elektromanyetik sabit) olup yaklaşık $8.854 \times 10^{-12} F/m$ değerindedir [34]. Diferansiyel formda ise $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$ olarak yazılır ve bu, elektrik alanının diverjansının uzaydaki yük yoğunluğu (ρ) ile ilişkisini gösterir. Gauss yasası, simetrik yük dağılımlarında (küresel, silindirik, düzlemsel) elektrik alanının hesaplanmasını kolaylaştırır ve Coulomb yasasının matematiksel bir sonucu olarak kabul edilir. Maxwell denklemlerinin de bir bileşeni olarak, elektrik ve manyetik alanların kaynaklarını tanımlayan bu yasa, elektrostatikten plazma fiziğine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Örneğin, iletkenlerin yüzeyindeki yük dağılımını analiz etmek veya yalıtkan malzemelerin polarizasyonunu modellemek için kullanılır. Noktasal yük için, $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ denklemi kullanılırken, Homojen küresel yük dağılımı için, dış bölgede aynı ifade elde edilirken, iç bölgede $\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^3} \cdot \mathbf{r}$ formülleri ile hesaplanır [35].

Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası:

Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası, değişen manyetik akının bir kapalı devre üzerinde elektromotor kuvvet oluşturduğunu matematiksel olarak tanımlar. İntegral formda ifade edildiğinde, yasa şu denkleme uyar:

$$\oint_{\partial \Sigma} \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \oint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.4)$$

Burada $\mathbf{E}$ devre üzerindeki elektrik alanı, $d\boldsymbol{\ell}$ devre boyunca alınan küçük yol elemanı, $\mathbf{B}$ manyetik alanı ve $d\mathbf{A}$ ise devreyi saran yüzey elemanıdır. Negatif işaret, Lenz yasası olarak bilinen prensibi yansıtır; yani indüklenen emf, orijinal manyetik akının değişimine karşı koyacak şekilde yönelir. Diferansiyel formda ise Faraday yasası,

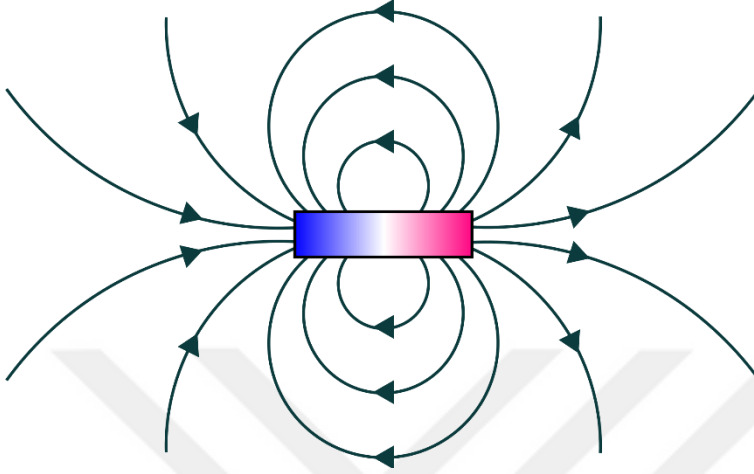
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

Olarak ifade edilir; bu form, her noktada elektrik alanının kırılmasının (rotasyonu), manyetik alanın zamana bağlı değişim hızına eşit olduğunu belirtir. Faraday'ın bu keşfi, bir mıknatısın bir tel bobin çevresinde hareket ettirilmesiyle bobinde gözlemlenen indüklenmiş akımın deneysel olarak doğrulanmış; bu durum, elektrik ve manyetizma arasındaki derin ilişkiyi ortaya koymuştur. Bu yasa, hem laboratuvar ölçeğinde hem de jeneratör, transformatör ve diğer modern elektromanyetik uygulamalarda temel rol oynamakta, ayrıca elektromanyetik dalgaların boşlukta ışık hızında yayılmasını sağlayan Maxwell denklemlerinin ayrılmaz bir bileşeni olarak teorik altyapıyı oluşturur.

2.1.2. Manyetik alan

Manyetik alan kavramı, yüklü parçacıkların, "spin" adı verilen elektronların özelliğinden kaynaklanır. Bu açısal momentum, bir manyetik momentin oluşmasına yol açar. Her bir parçacığı, minyatür bir mıknatıs haline dönüştürür. Bu manyetik momentler düzenli bir şekilde hizalandığında, "manyetik alan" olarak adlandırılan bir alan oluştururlar. Basit şekilde söylemek gerekirse mıknatısların ve hareket eden elektriklerin çevresinde "görülmez bir güç alanı" oluşur. İşte bu alana manyetik alan denir. Bu alan, diğer yakınlardaki manyetik nesnelere bir kuvvet uygular, onları belirli bir şekilde hizalamalarına veya ölçülebilir etkiler

deneyimlemelerine neden olur. Yani, manyetik alan, elektronların hareketinden doğan dik kuvvetlerin etkili olduğu bölge olarak düşünülebilir [36, 37]



Şekil 2.1: Manyetik alan çizgileri

Manyetik akı: manyetik kuvvetin belirli bir yüzeyden geçen toplam manyetik alan çizgilerinin sayısını ifade eden fiziksel bir büyüklüktür. Manyetik akı, manyetik alan vektörü (B) ile bu alanın etki ettiği yüzeyin alan vektörü (A) arasındaki skaler çarpımın integrali ile hesaplanır ve genellikle Φ sembolü ile gösterilir. Matematiksel olarak, $\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ şeklinde ifade edilir. Manyetik akının birimi Weber (Wb) olarak bilinir ve 1 Wb, 1 Tesla (T) manyetik alanın 1 metrekarelik bir yüzeyden dik olarak geçmesi durumunda oluşan akıya eşdeğerdir. Manyetik akı, elektromanyetizma ve elektrik mühendisliği gibi alanlarda önemli bir kavramdır ve özellikle Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasında temel bir rol oynar. Bu yasaya göre, kapalı bir devrede manyetik akının zamanla değişimi, devrede bir elektromotor kuvvet (EMF) indüklenmesine neden olur [34].

Lorentz Kuvvet Yasası: Elektromanyetik alanlar içerisinde hareket eden yüklü bir parçacığa etki eden kuvveti tanımlayan temel bir fizik yasasıdır. Bu yasa, adını Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz'den alır ve klasik elektrodinamiğin temel denklemlerinden biridir. Matematiksel olarak:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.6)$$

F: Parçacığa etki eden toplam kuvvet (Newton, N),

q: Parçacığın elektrik yükü (Coulomb, C),

E: Elektrik alan şiddeti (Volt/metre, V/m)

v: Parçacığın hız vektörü (metre/saniye, m/s),

B: Manyetik akı yoğunluğu (Tesla, T) olarak tanımlanır.

$\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ terimi, manyetik kuvvetin hız ve manyetik alan vektörlerinin vektörel çarpımıyla belirlendiğini ve bu kuvvetin her iki vektöre de dik yönde (sağ el kuralı ile) oluştuğunu gösterir. Elektrik alan kaynaklı kuvvet ($q\mathbf{E}$), yükün hareketinden bağımsızken; manyetik kuvvet, yalnızca yük hareket halindeyse ortaya çıkar ve parçacığın yörüngesini dairesel veya sarmal şekillere dönüştürebilir. Bu yasa, parçacık hızlandırıcıları, elektrik motorları ve manyeto hidrodinamik gibi uygulamalarda kritik rol oynar [34, 38].

Biot-Savart Yasası: elektrik akımı taşıyan bir iletkenin çevresinde oluşan manyetik alanı hesaplamak için kullanılan temel bir elektromanyetizma yasasıdır. Bu yasa, Jean-Baptiste Biot ve Félix Savart tarafından 1820'lerde deneysel gözlemlerle formüle edilmiş ve Ampère Yasası ile birlikte klasik magnetostatikğin temelini oluşturur. Matematiksel olarak, sabit bir akım elemanından ($I \cdot d\mathbf{l}$) kaynaklanan manyetik alan, uzayda bir P noktasında şu şekilde ifade edilir:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (2.7)$$

$d\mathbf{B}$: Akım elemanının P noktasında oluşturduğu sonsuz küçük manyetik alan vektörü (Birim: Tesla, T)

μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği = $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

I : İletkenden geçen elektrik akımı

$\hat{\mathbf{r}}$: Akım elemanından P noktasına yönelen birim vektör

$d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}$ Terimi, manyetik alanın yönünün sağ el kuralı ile belirlendiğini gösterir: Başparmak akım yönünü (I), diğer parmaklar manyetik alanın dairesel yönünü temsil eder. Toplam manyetik alan ($\mathbf{B}$), tüm akım elemanları üzerinden integral alınarak $\mathbf{B} = \int d\mathbf{B}$ hesaplanır. Bu yasa, özellikle bobinler, düz iletkenler ve halka şeklindeki akım taşıyıcıların manyetik

alanlarının modellenmesinde kritik rol oynar. Biot-Savart Yasası Yalnızca kararlı akımlar (zamanla değişmeyen) için geçerlidir. Coulomb Yasası'nın manyetizma karşılığı olarak düşünülebilir, ancak manyetik alan vektörel ve akıma dik bir büyüklüktür [38, 39].

Ampère Yasası: Ampère Yasası, elektromanyetizmanın temel prensiplerinden biri olup, elektrik akımlarının oluşturduğu manyetik alanın uzaysal dağılımını tanımlayan denklemlerdir. Bu yasa, kapalı bir eğri boyunca hesaplanan manyetik alan integrali ile bu eğri tarafından çevrelenen net elektrik akımının orantılı olduğunu belirtir; matematiksel olarak aşağıda ki şekilde ifade edilir.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \cdot I_{enc} \quad (2.8)$$

I_{enc} : ilgili akımın kapalı eğri tarafından çevrelenen kısmını temsil eder.

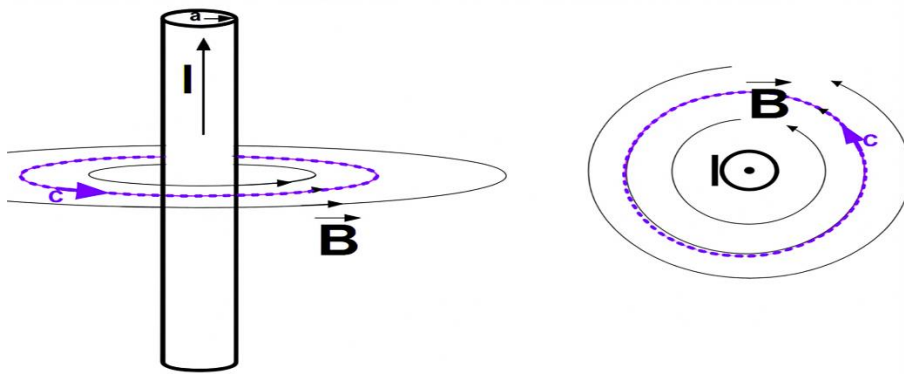
Ampère Yasası, yüksek simetriye sahip akım dağılımlarında manyetik alanın hesaplanmasında pratik çözümler sunmasının yanı sıra, Maxwell denklemlerinin düzenlenmesinde kritik bir rol oynayarak modern elektromanyetizma teorisinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu ilke, hem teorik analizlerde hem de deneysel çalışmaların sonuçları ile desteklenmiş olup, elektrik ve manyetizma arasındaki etkileşimin anlaşılmasında ve ilgili mühendislik uygulamalarının geliştirilmesinde vazgeçilmez bir yer tutmaktadır. Sabit akım dağılımına sahip bir düz telin iç bölgesinde (yani, tel yarıçapı R 'nin, ölçüm noktasına olan mesafe r 'den büyük olduğu, $R > r$ durumu Ampère yasası uygulanarak manyetik alanın şiddeti,

$$\mathbf{B} = (\mu_0 I r) / (2 \pi R^2) \quad (2.9)$$

İfadesiyle tanımlanır. Bu durumda, telin kesit alanı içerisinde ölçüm noktasına kadar olan dairesel alanın, toplam alanla oranı $I_{enc} = I / (r^2 / R^2)$ şeklinde bulunur; böylece Ampère döngüsü üzerinde alınan integral, manyetik alanın merkezden uzaklaştıkça lineer olarak arttığını gösterir. Sağ el kuralı ile belirlenen yön, akımın yarattığı manyetik alan çizgilerinin simetrik dairesel yapısını destekler. Teorik olarak baktığımız zaman, Biot-Savart ve Ampère yasalarının temel prensiplerinin bir birlerini destekledikleri görülürken, deneysel veriler de bu iç bölgeye özgü lineer manyetik alan dağılımının elektromanyetizmanın temelleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Böylece, düz akım taşıyan telin iç bölgesinde oluşturulan manyetik alanın analizi, hem teorik modellemelerde

hem de pratik uygulamalarda elektromanyetik alanların davranışının anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

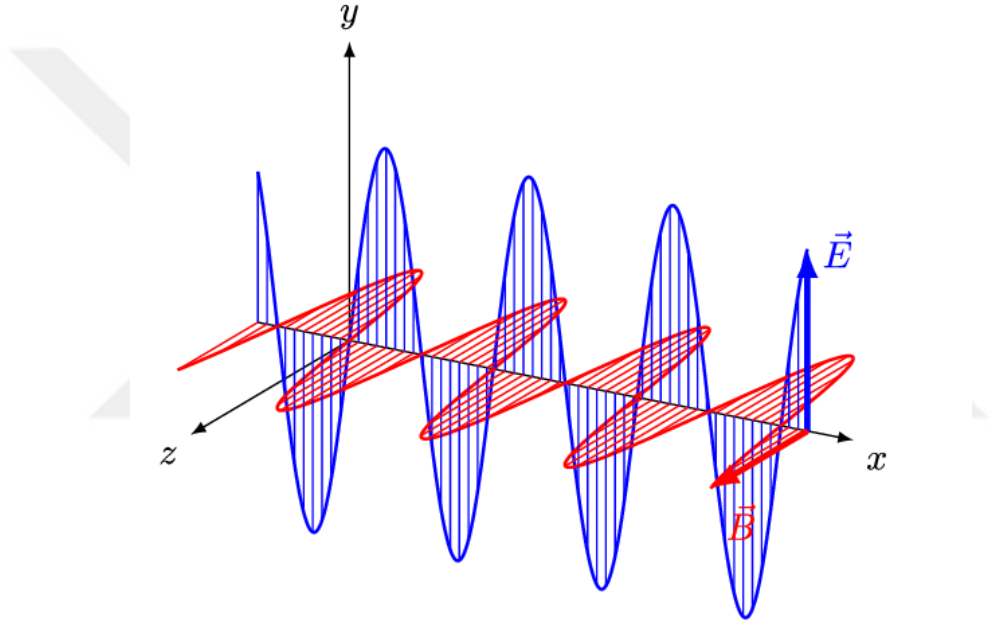
Sabit akım dağılımına sahip düz tel ve ideal sonsuz uzun solenoid, elektromanyetizmanın temel prensipleri çerçevesinde manyetik alan dağılımının anlaşılmasında merkezi bir rol oynar; düz tel örneğinde, telin kesit yarıçapı R olarak kabul edildiğinde, ölçüm noktasının tel içinde kalması durumu ($r < R$) için seçilen dairesel Ampère yolunun çevrelediği akım, $I_{enc} = I/(r^2/R^2)$ oranıyla belirlenmekte ve bu durumda Ampère yasası (1.8)'den yola çıkarak manyetik alanın şiddeti (1.9) ifadesiyle tanımlanmakta, böylece manyetik alan, merkezden uzaklaştıkça doğrusal artış göstermekte ve sağ el kuralı ile belirlenen yön, alanın dairesel ve simetrik yapısını ortaya koymaktadır; telin dış bölgesinde $R < r$ ise Ampère döngüsü tüm tel kesitini çevrelediği için $I_{enc} = I$ alınmakta ve manyetik alan, $B = \mu_0 I / (2 \pi r)$, ölçüm noktasına olan mesafe arttıkça ters orantılı olarak azalan bir yapıda olduğu görülmektedir; benzer şekilde, ideal sonsuz uzun bir solenoidin iç kısmında, birim uzunluktaki sarım sayısı n ve her bir sarımdan geçen akım I temel alınarak Ampère yasası uygulanır ve manyetik alan $B = \mu_0 n I$ ifadesiyle sonsuz olarak varsayılan solenoidin dışındaki sabit, homojen ve solenoidin eksenine boyunca yönlü bir dağılım sergileyen manyetik alanın etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir; bu teorik modeller, hem Biot–Savart hem de Ampère yasalarının temellerine dayanmakta, elektromanyetik alanların kontrolü, yönlendirilmesi ve pratik uygulamalarda kullanılabilmesi açısından kritik öneme sahiptir [40, 41].



Şekil 2.2: Düz telin oluşturduğu manyetik alan

2.1.3. Elektromanyetik alan

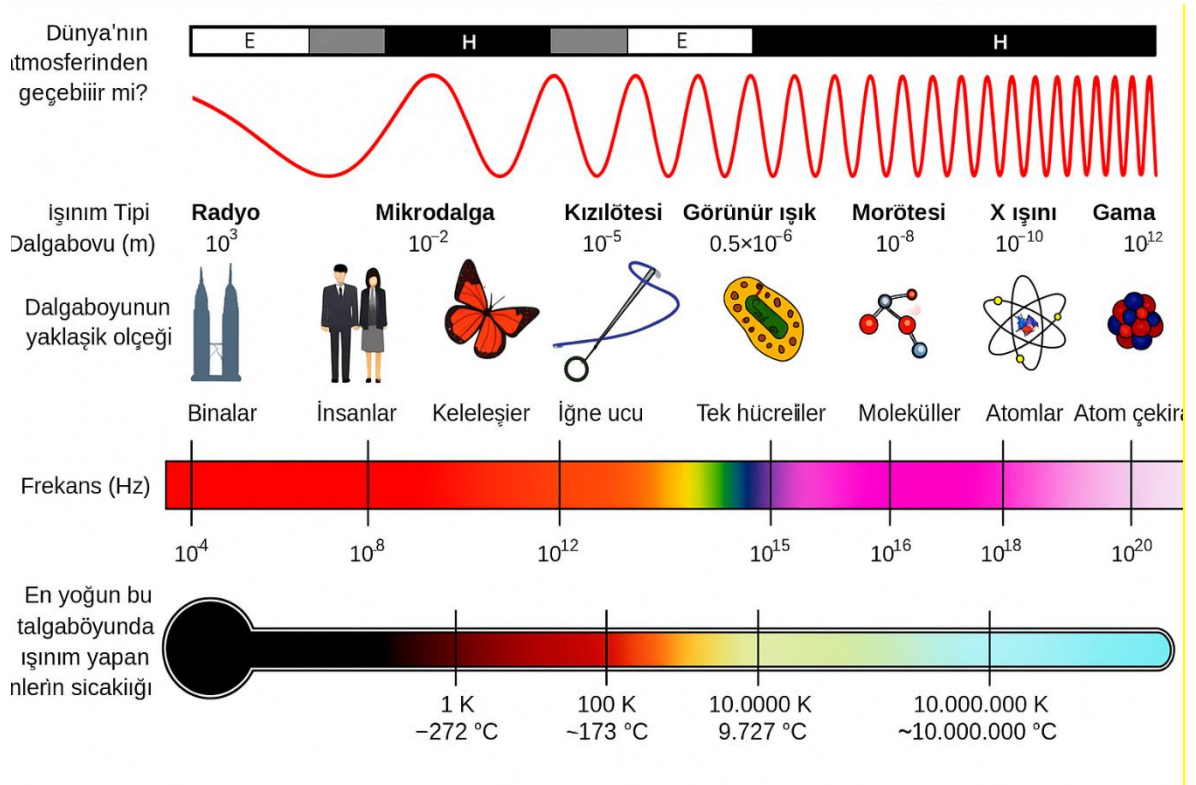
Elektromanyetik alan, elektrik yüklerinin varlığı ve hareketi sonucu ortaya çıkan, elektriksel ve manyetik bileşenlerden oluşur. James Clerk Maxwell tarafından formüle edilen Maxwell denklemleri, statik durumlarda yalnızca elektrik alanının, hareket halindeki yüklerde ise hem elektrik hem de manyetik alanlardan meydana geldiğini ortaya koyarak, bu alanların dinamik etkileşimlerini açıklamaktadır. Lorentz kuvvet yasası çerçevesinde yüklü parçacıkların bu alanlarla etkileşimi ve kuantum elektrodinamiğinin foton değişimine dayalı modelleri enerji, momentum ve bilgi aktarımının temel mekanizmasını oluşturur.



Şekil 2.3: Manyetik ve elektrik alan çizgileri

Elektromanyetik spektrumda ise dalga boyu (λ) ile frekans (f), arasındaki temel bağlantı, ışık hızının ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) $c = \lambda f$ denklemiyle ifade edilir. İvmelenen yüklerin oluşturduğu değişken elektrik ve manyetik alan salınımları, birbirine dik şekilde yayılan elektromanyetik dalgaları meydana getirir. Örneğin, anten içerisindeki elektronların periyodik hareketi, belirli bir salınım periyoduna bağlı olarak radyo frekanslarında (kHz'den GHz'ye kadar) elektromanyetik dalga yayar; bu durumda dalga boyu, antenin fiziksel boyutu ve elektronların salınım frekansı ile doğrudan ilişkilidir [42]. Yüksek enerjili fotonlar, örneğin X-ışınları, atomik kabuklardaki elektron geçişleri veya hızlandırılmış yüklü parçacıkların (senkrotron radyasyonu) hareketleri sonucunda ortaya çıkarken, kuantum elektrodinamiği

perspektifinde her frekans Planck sabiti (h) ile orantılı olarak foton enerjisi ($E = hf$) taşımaktadır [43]. Pratikte, frekans arttıkça dalga boyunun kısalması gözlemlenir; örneğin, 1 GHz frekansta dalga boyu yaklaşık 30 cm iken, görünür ışık spektrumunda bu değer 400–700 nm arasındadır. Ayrıca, elektromanyetik spektrumun farklı bölgeleri, maddelerle etkileşimleri (soğurma, saçılma, kırınım gibi) bakımından çeşitlilik gösterir ve bu özellikler iletişim, tıbbi görüntüleme gibi teknolojik uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Elektromanyetik dalgaların temel özellikleri, salınım yapan elektrik yüklerinin oluşturduğu değişken alanların etkisiyle ortaya çıkmakta olup, klasik elektrodinamikten kuantum elektrodinamiğe kadar uzanan teorik yaklaşımlarda enerjinin ve bilginin nasıl iletiltiğinin açıklanmasında merkezi bir rol oynamaktadır [44].



Şekil 2.4: Elektromanyetik spektrum.

2.1.4. SAR ve elektromanyetik maruziyet

Elektromanyetik alanlarına maruz kalan insan dokusunun birim kütle başına (kg) emdiği enerji miktarını Watt/kg cinsinden tanımlayan temel bir dozimetri parametresidir. Şu şekilde tanımlanır:

$$SAR = \frac{1}{m} \int V \sigma(r) |E(r)|^2 / \rho(r) dV \quad (2.10)$$

σ : dokunun elektriksel iletkenliği,

E: elektrik alan şiddeti,

ρ : doku yoğunluğu,

m: kütle (kg)

V: hacimdir

SAR, dokuda birim kütlede emilen enerjinin (ısıya dönüşen gücün) ölçüsüdür. Özellikle mobil cihazlar gibi yakın alan RF kaynaklarında, insan vücut modelleri laboratuvar koşullarında SAR dağılımı ölçülür veya sayısal olarak hesaplanır. SAR vücutta oluşturduğu termal etkiye bağlı güvenlik limitlerinin belirlenmesinde temel parametre olarak kullanılır [45].

i. SAR seviyesinin insan sağlığı üzerindeki termal ve olası biyolojik etkileri

SAR'a bağlı birincil sağlık etkisi termal etkilerdir. RF enerjisi dokuda ısınmaya neden olur; ICNIRP ve IEC gibi kurumlar, doku sıcaklığındaki artışı ölçmek ve derecelendirmek için SAR sınırları belirlemiştir. Termal etkilerin ötesinde non-termal (biyolojik) etkileri araştırılmaya devam etmekte. Yapılan akademik araştırmalara göre, belirlenen sınır değerlerin altındaki maruziyetlerin sağlık üzerinde bilinen bir zararlı etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Dünya Sağlık Örgütü ve ICNIRP incelemeleri, ICNIRP limitlerinin altındaki RF maruziyetinin bilinen bir sağlık sonucu yaratmadığını bildirmiştir olmasına rağmen bu konu üzerinde akademik çalışmalar devam etmektedir. Bununla birlikte bazı araştırmacılar, SAR'ın yalnızca termal etkileri yansıttığını, non-termal mekanizmaların göz ardı edildiğini ileri sürer [46]. Yapılan akademik çalışmalarda, ölçülen biyolojik etkilerin çoğunun SAR ölçüm yöntemiyle değil, frekans, modülasyon gibi başka alan

parametreleriyle ilişkili olduğunu savunmaktadır. Ancak genel bilimsel görüş, bugüne dek düşük yoğunluklu RF maruziyetinde (SAR sınırları içinde) kanıtlanmış bir sağlık zararı bulunmadığı yönündedir. Fakat kronik uzun süreli maruziyetin sağlık açısından herhangi bir zararı olup olmadığı araştırılmaya devam etmektedir [47].

ii. SAR ölçüm yöntemleri ve laboratuvar teknikleri

SAR ölçümleri genellikle insan başı veya gövde simülasyonu yapan phantom modellerde gerçekleştirilir. Ölçümler, doku benzeri sıvı dolu bu phantoma özel ölçüm probu ile elektrik alan taraması yapılarak elde edilir. Doku simüle edici sıvının iletkenlik değerleri ilgili frekanslarda insan dokusuna benzetilir. SAR'ın deneysel olarak belirlenmesinde en yaygın yöntem, motorize bir sistemle phantom içinde ayrıntılı E-alan dağılımını ölçmektir. Literatürde seviye olarak düşük güç sistemlerine sahip olan telefonlar için SAR değerlendirmesi, doku içinde ölçüm yapılan bir E-alan probu ve doku modelleri ile yapılabilir. Ayrıca SAR'ın doğrudan doku sıcaklığı değişiminden hesaplanması da mümkündür. Ölçüm standartları için belirlenen protokoller, güç seviyeleri ve ölçüm hassasiyeti konularında detaylı ve hassas ölçümler gerekmektedir. Örneğin, uygun ısı kameraları ve fiber optik termometreler kullanılarak phantom yüzeyindeki sıcaklık artışı izlenebilir [48].

Günümüzde SAR hesaplamalarında en çok tercih edilen yöntem sonlu farklar zamanı (FDTD) esaslı elektromanyetik simülasyonlardır. 1987 yılında Gandhi ve ekibi tarafından biyomanyetik alanların incelenmesine tanıtılan FDTD yöntemi, 100 MHz üzeri RF alan hesaplamalarında de-facto standart hâline gelmiştir. Sayısal çalışmalar, tıbbi görüntüleme verilerinden türetilen anatomik insan modelleri üzerinde yürütülür. Örneğin, 900 MHz'de çalışan GSM telefon anteninin baş etrafındaki SAR dağılımı, MR görüntüsünden alınan bir baş modeliyle FDTD hesaplanmıştır. Benzer simülasyonlar günümüzde 5G mm dalga anten tasarımlarında, giyilebilir cihaz maruziyet analizlerinde ve medikal cihazlara yönelik maruziyet çalışmalarında yaygın olarak kullanılır. İlkel çağlarda kullanılan basit küresel modellerin yerini, organ-segmentli ve doku katmanlı yüksek çözünürlüklü modeller almıştır. Termal etkiyi değerlendirmek için elektromanyetik simülasyon sonuçları Pennes'in biyolojik ısı denklemi gibi ısı transferi modelleriyle birleştirilir [49]. Yüksek alanlı MRI çalışmaları için lokal dokudaki SAR ve sıcaklık artışı dinamik hesaplamalar ile güvenli sınır değerleri hesaplanmaktadır. Özellikle yeni araştırmalarda, alıcı-verici (MIMO) yapıdaki 5G

antenlerinin yönlendirilmiş ışın yapılarının insan üzerindeki SAR etkileri incelenmekte, çevresel maruziyet dağılımını istatistiksel yöntemlerle hesaplama yaklaşımları önerilmektedir [50].

iii. SAR değerleri için ulusal ve uluslararası düzenlemeler

Elektromanyetik alan güvenliği alanında en çok referans verilen kuruluşlar ICNIRP, IEEE, IEC, FCC ve WHO'dur. ICNIRP 1998 ve 2020'de RF alanda temel limitleri belirlemiştir; bu limitler genellikle tüm dünyada kabul görmüştür. Örneğin ICNIRP 2020'ye göre genel nüfus için baş/gövdeye lokal SAR limiti 2 W/kg (10 g doku), tüm vücut ortalaması SAR limiti 0.08 W/kg (6 dakika ort.) olarak belirlenmiştir [51]. ABD FCC yönetmelikleri (CFR 47 Part 1.1310) ise genel halk için 1,6 W/kg (1 g doku) SAR limitini öngörür. ICNIRP 2020 kılavuzu, 1998 limitlerini büyük oranda korumuş; yapılan değişiklikler, özellikle 6 GHz üstü alanlar ve zaman ölçeği ile ilgili ufak revizyonlardır [51]. Bu çerçevede yeni teknolojiler için ek önlemler de eklenmiştir. Türk Standartları genellikle AB/IEC'ye uyumlu olup, mobil cihaz üreticileri Avrupa'daki 2 W/kg (10 g) limiti veya ABD 1,6 W/kg (1 g) standardını karşılamak durumundadır.

iv. SAR sınır değerleri, standartlar ve regülasyonun evrimi

SAR limitleri kuruluşlara göre farklılık gösterir. Örneğin, ICNIRP 2020 kılavuzunda genel nüfus için baş/gövde lokal SAR limiti 2 W/kg (10 g) iken, FCC (ABD) bu değeri 1,6 W/kg (1 g) olarak belirlemiştir [47]. Aşağıdaki tabloda bazı temel değerler özetlenmiştir [51].

Çizelge 2.1: Sar sınır değerleri örnekleri

Düzenleyici ve Standart	Tüm-vücut SAR (W/kg)	Baş/Gövde Lokal SAR (W/kg)	Doku Avr.
ICNIRP (2020) – Genel Halk	0,08 (6 dk ort.)	2,0 (10 g)	Küp 10 g
ICNIRP (2020) – Mesleki	0,4 (6 dk ort.)	10 (10 g)	Küp 10 g
FCC (ABD) – Genel Halk	0,08 (6 dk ort.)	1,6 (1 g)	Toplam 1 g

FCC (ABD) – Mesleki	0,4 (6 dk ort.)	8,0 (1 g)	Toplam 1 g
IEEE C95.1-1982	–	8,0 (1 g) *	1 g
CENELEC/IEC (AB mobil cihaz)	–	2,0 (10 g)	Küp 10 g

v. Elektromanyetik alan özellikleri ile SAR ilişkisi

SAR, maruz kalan EM alanın frekansı, polarizasyonu, mesafe ve dokunun elektriksel özellikleri ile doğrudan bağlantılıdır. Frekans arttıkça dokuda elektromanyetik dalgaların penetrasyon derinliği azalır; örneğin 900 MHz’de birkaç santimetre olan penetrasyon 28 GHz mm-dalgasında milimetre altına düşer. Bu nedenle düşük frekanslı alanlar tüm vücut SAR’ına neden olabilirken, çok yüksek frekanslar yalnızca derinin yüzeyini ısıtır [52]. Yüksek su içerikli, iletken dokular (kas, beyin) RF enerjisini yoğun emerek baş yüzeyinde sıcak noktalara sebep olurken. Yağlı ve kemikli dokuların emilimi daha azdır. Yakın-uzak alan farkı da önemlidir: Yakın alan antenlerde girişimli, düzensiz alan dağılımları oluşur; telefon gibi kaynaklarda SAR başın yüzeye yakın kısımlarında pik yapar. Buna karşılık uzaktan gelen düzgün dalgalar tüm vücutta daha homojen SAR üretir. Alanın modülasyon biçimi ve geçici yapısı da bazı araştırmalarda biyolojik etkinin belirleyicileri olarak öne sürülmüştür [53]. Ancak bu görüş genel literatürde henüz kabul edilmiş bir değerlendirme kriteri haline dönüşmemiştir.

2.1.5. Manyetik alan ölçüm yöntemleri

Manyetik ölçüm; çevredeki manyetik alanların büyüklüğü ve yönünün sayısal olarak belirlenmesi işlemidir. Manyetometre (gaussmetre/teslametre) adı verilen cihazlar, bir noktadaki manyetik alan vektörünün şiddetini ve yönünü ölçebilir. Bu cihazlar Dünya’nın manyetik alanının ölçümünde, coğrafik ve jeolojik araştırmalarda, denizaltı tespitinde ve metal deteksiyonunda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ölçülen manyetik alan Tesla veya CGS biriminde Gauss ile ifade edilir. Günümüz teknolojisinde gaussmetre ve teslametrede

kullanılan sensörler genellikle benzer olup ölçülen birimin büyüklüğü farklı olduğu için farklı adlarla anılırlar [54].

i. Proton manyetometre

Proton precesyon manyetometre (PPM), manyetik alan ölçümünde nükleer manyetik rezonans ilkesini kullanan bir cihazdır. Cihazda genellikle hidrojen zengin bir sıvı (ör. su veya kerosen) içindeki protonlar, harici bir bobin tarafından uygulanan güçlü bir sabit akımla hizalanır. Akım ani olarak kesildiğinde, protonlar Dünya'nın manyetik alanına uyum sağlamak için kendi etrafında salınım (precesyon) hareketi yapar; bu hareketin frekansı doğrudan manyetik alan şiddetiyle orantılıdır. Hareket eden protonlar, algı bobininde zayıf bir voltaj indükler; bu gerilim elektronik olarak yükseltip dijital frekans sayıcıya beslenerek manyetik alan değerine dönüştürülür. PPM'ler teorik olarak 0.1–1.0 nT aralığında çok hassas ölçümler yapabilir, pratikte ise birkaç μT (örn. ~ 3000 nT) düzeyine kadar duyarlı cihazlar mevcuttur. Bu tip manyetometreler özellikle maden aramalarında, arkeolojik kazı çalışmalarında ve manyetik araştırmalarda kullanılmıştır. Günümüzde PPM'ler genellikle Overhauser veya optik pompalı (alkali buhar) manyetometrelere göre daha az tercih edilse de, prensiplerinin basitliği ve kalibrasyon kolaylığı nedeniyle temel manyetik ölçüm tekniklerinden biri olarak bilinir [55].

ii. İndüksiyon bobini

İndüksiyon bobini (search-coil) manyetometre, manyetik alanın zamanla değişen bileşenlerini ölçen bir sensördür. Bu cihaz Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasıyla çalışır: zamanla değişen manyetik akı, bobinin uçlarında bir gerilim indükler. Bu amaçla binlerce dönüşe sahip uzun silindir veya çubuk bobinler kullanılarak bobinin etkin alanı ve duyarlılığı artırılır. Örneğin düşük frekanslı (0.1–40 Hz) jeomanyetik dalgalanmaları ölçmek için tasarlanan bir indüksiyon bobini magnetometresi, algılanan voltaj sinyalini yükselteç ve band geçiren filtrelerden geçirerek zayıf manyetik sinyalleri tespit eder. Endüstride veya araştırmalarda, geniş bantlı indüksiyon bobini manyetometreleri, özellikle Dünya'nın manyetik alanındaki hızlı değişimleri ve elektromanyetik dalga geçişlerini izlemek amacıyla

geliştirilmiştir. İndüksiyon bobinleri statik (DC) alanları ölçemez, ancak AC bileşenler ve geçici olaylar konusunda çok yüksek hassasiyet sağlar [56].

iii. Manyetorezistif (MR) sensörler

Manyetorezistif sensörler, ferromanyetik bir malzeme üzerindeki elektriksel direnç değişimine dayanır. Bir MR sensör şeridi içine sabit bir akım uygulandığında, harici manyetik alan şeridin manyetizasyon yönünü değiştirir ve bu değişim şeridin direncinde bir fark yaratır. Direnç değişimi genellikle Wheatstone köprüsü ile ölçülerek hassas manyetik alan bilgisi elde edilir. Bu sensörler özellikle düşük güçlü ve kompakt elektronik pusula uygulamalarında (mobil cihazlar, araç navigasyonu vb.) yaygın kullanılır. MR sensörler, düşük frekanslı (neredeyse DC) manyetik alan değişimlerini yüksek duyarlılıkla algılayabilir; darbesiz (low-noise) çıkışları ve titreşime dayanıklı tasarımları nedeniyle de endüstriyel ve otomotiv uygulamalarında tercih edilir. Dezavantaj olarak sıcaklık bağımlılığı ve sıfırlama ihtiyacı olsa da, kompanzasyon devreleri ve entegre tasarımlarla bu kısıtlamalar giderilebilir [57].

iv. Fluxgate manyetometre

Fluxgate (akı geçidi) manyetometreler, yumuşak manyetik bir nüve etrafına sarılmış birincil (uyarıcı) ve ikincil (algılama) bobinleri içeren hassas bir ölçüm cihazıdır. Birinci bobine alternatif akım uygulandığında nüve periyodik olarak manyetik doygunluğa ulaşır; nüve bu döngüde manyetik alanı asimetrik bir biçimde yansıtır. Ortamda dış manyetik alan yokken algılama bobininden sıfıra yakın bir voltaj elde edilirken, dış alan varlığında nüvenin doyma karakteristiğinin kayması sonucu algılama bobininden bir sinyal elde edilir. Fluxgate manyetometreler genellikle yaklaşık 0.5–1.0 nT çözünürlükte çok hassas ölçümler yapabilir. Basit ve kararlı yapıları sayesinde hem yeryüzü manyetik haritalamalarında, hem askeri/uzay uygulamalarında hem de kompaz ve endüstriyel manyetik ölçümlerde geniş kullanım alanı bulmuştur. Yüksek duyarlılıkları fluxgate cihazlarının elektromanyetik maruziyeti ve geomanyetik değişkenlik ölçümlerinde doğru ölçümler yapmasını sağlar [58].

v. Dev manyetorezistans (GMR) etkisi

Dev manyetorezistans (Giant Magnetoresistance – GMR) kuantum mekaniğinde kullanılan, çok ince katmanlı manyetik yapılar üzerindeki manyetik değerleri ölçmektedir. Üst üste

dizilmiş ferromanyetik ve iletken katmanlarda, katmanların manyetik yönleri arasındaki spin bağımlı etkileşimler, elektrik iletkenliğini büyük ölçüde değiştirir. GMR etkisi, uygulanan manyetik alan sayesinde katmanların manyetik yönleri paralel veya zıt hale gelir, bu durum elektrik direncinde büyük farklar oluşturur. Bu özellik yüksek hassasiyetli manyetik alan algılayıcılarının geliştirilmesini sağlamıştır. Örneğin günümüz hard disklerinde, okuma kafaları GMR sensörlerini kullanarak manyetik bitleri algılayarak verileri okur. GMR bazlı sensörler aynı zamanda biyosensörlerde ve MEMS titreşim detektörlerinde de kullanılmakta; nanometre ölçekli yapıları sayesinde çok düşük manyetik alan değişimlerinin bile tespitini mümkün kılmaktadır [59].

2.2. Manyetik Alan Kaynakları

Manyetik alanlar genel olarak **doğal** ve **insan kaynaklı** olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

2.2.1. Doğal kaynaklar:

i. Güneşin manyetik alanı

Güneşin Manyetik Alanı: Güneş'in Genel Özellikleri: Güneş, Hertzsprung-Russell diyagramında ana kol üzerinde yer alan bir yıldızdır. Kütlesi 2.0×10^{30} kg, yarıçapı 7.0×10^5 km'dir. Teorik modellere göre, Güneş'in parlaklığı 4.6 milyar yıl önceki oluşumundan bu yana yaklaşık %30 artmıştır [60].

ii. Dünyanın manyetik alanı

Dünyanın manyetik alanının kökenine dair tarihsel ve teorik gelişmeleri özetlemek gerekirse. William Gilbert (1600'ler), Dünya'nın manyetik alanının kökeninin Dünya'nın içinde olduğunu ve bunun lodestone (doğal mıknatıs taşı) kaynaklı olabileceğini öne sürmüştür. René Descartes (17. yy), manyetik alanı "threaded parts" (ipliksi parçalar) ve vortekslerle açıklamaya çalışmıştır. Albert Einstein (1905 sonrası), Dünya'nın manyetik alanının kökenini fiziğin en önemli beş bilinmeyen probleminden biri olarak görmüştür. Blackett (1947), büyük astronomik cisimlerin manyetik momentlerinin açısız momentumlarına bağlı olduğu hipotezini test etmiştir, ancak deneysel olarak yanlış olduğu görülmüştür. Inglis (1955), sıcaklık ve basınç gradyanlarının büyük manyetik alanlar üretemeyeceğini belirlemiştir. Joseph Larmor (1919), manyetik alanların kendi kendini uyaran bir dinamo sürecinden kaynaklanabileceğini öne sürdü, ancak Cowling (1934) tarafından anti-dinamo teoremi ile bu görüşe şüpheyile yaklaşıldı. Elsasser (1946) ve Bullard

(1949), modern dinamo teorisini geliştirerek manyetik hidro-dinamik (MHD) kavramlarını bulmuşlardır. Alfvén (1940), donmuş alan konsepti ve MHD dalgaları kavramlarıyla Dünya'nın manyetik alanına dair en önemli teorik katkılardan birini sunmuştur.

Yukarıda belirtilen tarihsel teorik yaklaşımlar, Dünya'nın manyetik alanının kökenine dair ilk ipuçlarını ortaya koymuş; bu birikim, günümüzde manyetik hidro-dinamik (MHD) dinamo teorileriyle daha ayrıntılı ve kapsamlı açıklamalar getiren modern modellerin temelini oluşturmuştur. Tarihsel teorik yaklaşımların sunduğu temelleri göz önüne alarak, şimdi günümüzün modern dinamo teorilerine bakalım [60].

2.2.2. Yapay manyetik alanlar

Yüksek Gerilim Hatları: Yüksek voltajlı enerji hatları, alternatif akımın iletimi nedeniyle elektromanyetik alanlar üretir ve manyetik alan yoğunluğu esas olarak akım büyüklüğüne ve kaynaktan uzaklığa bağlıdır. Çalışmalar, doğrudan bu tür hatların altında manyetik alana maruz kalmanın 400 kV iletim hatları için 10 ila 100 miligauss (mG) arasında değişebileceğini ve mesafeyle önemli ölçüde azaldığını bildirmiştir. Wertheimer ve Leeper tarafından yapılan araştırmalarda riskin arttığını öne sürmüştür; ancak sonraki araştırmalar, maruziyetin yanlış sınıflandırılması ve karıştırıcı değişkenlerle ilgili endişelerle birlikte tutarsız bulgular ortaya çıkmıştır. Çok sayıda araştırmaya rağmen, potansiyel riskleri açıklığa kavuşturmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu düşünülmektedir [61, 62].



Şekil 2.5: Yüksek gerilim hatlarının oluşturduğu manyetik alan çizgileri

Ev Aletleri ve Elektronik Cihazlar: Son zamanlarda yapılan akademik araştırmalar, ev aletleri ve elektronik cihazlar tarafından üretilen elektromanyetik alanları incelemiş ve

günlük ortamlarda hem maruziyet seviyelerinin hem de potansiyel sağlık etkilerinin ölçülmesi zorunluluğunun altını çizmiştir. Yayınlanan çalışmalar, buzdolapları, mikrodalga fırınlar ve bilgisayarlar gibi yaygın cihazların, artan mesafeyle hızla zayıflayan düşük frekanslı EMA'lar yaydığını göstermektedir; ancak, elektrik motorları veya indüksiyonlu ısıtma elemanları içeren cihazlar, nispeten yüksek alan yoğunlukları sergileyen lokalize bölgeler oluşturabilir. Hem zaman alanı hem de frekans alanı ölçüm tekniklerini kullanan metodolojiler, gözlemlenen maruz kalma seviyelerinin, başta Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) olmak üzere uluslararası düzenleyici kurumlar tarafından belirlenen güvenlik eşiklerine uygun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut literatür, özellikle bebek ve çocuklar arasında uzun süreli düşük seviyeli EMA maruziyetinin kümülatif etkilerini aydınlatmak için daha fazla araştırmanın gerekliliğini vurgulamaktadır [63].

Çizelge 2. 2: Ev aletlerin farklı mesafelere göre etki ettiği manyetik alanlar.

Cihaz	3 cm Mesafede (μ T)	30 cm Mesafede (μ T)	1 m Mesafede (μ T)
Elektrikli Tıraş Makinesi	15 - 1500	0.08 - 9	0.01 - 0.03
Elektrikli Matkap	400 - 800	2 - 3.5	0.08 - 0.2
Saç Kurutma Makinesi	60 - 2000	0.01 - 7	0.01 - 0.03
Elektrikli Süpürge	200 - 800	2 - 20	0.13 - 2
Mikrodalga Fırın	73 - 200	4 - 8	0.25 - 0.6
Çamaşır Makinesi	0.8 - 50	0.15 - 3	0.01 - 0.15
Bulaşık Makinesi	2 - 20	0.2 - 3	0.1 - 0.2
Televizyon (CRT)	25 - 50	0.4 - 2	0.01 - 0.15

Baz İstasyonları: Baz istasyonları, kablosuz iletişim ağlarının temel bileşenlerinden biridir ve elektromanyetik spektrumun radyo frekans (RF) aralığında çalışarak veri iletişimi sağlar. Bu istasyonlar, elektrik akımının antenler üzerinden geçmesiyle elektromanyetik alanlar oluşturur ve bu alanlar, RF dalgaları şeklinde yayılır. Manyetik alanın şiddeti, istasyonun teknik özelliklerine (güç, frekans, anten yapısı) ve ölçüm noktasına olan mesafeye bağlı olarak değişkenlik gösterir. yapılan ölçümler, baz istasyonlarının yakın çevresinde manyetik alan şiddetinin genellikle 0,1 ila 10 mikrottesla (μ T) aralığında olduğunu göstermektedir [64, 65].



Şekil 2.6: Baz istasyonlarının oluşturduğu manyetik alan çizgileri

Cep Telefonları: Cep telefonları, kablosuz iletişim teknolojilerinin en yaygın kullanılan örneklerinden biridir ve baz istasyonlarıyla etkileşim halinde çalışarak elektromanyetik dalgalar yayar. Bu cihazlar, radyo frekans (RF) aralığında çalışır ve iletişim sırasında manyetik alanlar oluşturur. Cep telefonlarından yayılan manyetik alanın şiddeti, cihazın gücüne, kullanılan frekans bandına ve baz istasyonuna olan mesafeye bağlı olarak değişkenlik gösterir. Uluslararası standartlar, özellikle ICNIRP ve FCC (Federal İletişim Komisyonu), cep telefonlarının yaydığı elektromanyetik alanlar için belirli maruziyet sınırları belirlemiştir. Bu sınırlar, özellikle özgül soğurma oranı (SAR) üzerinden ifade edilir ve cep telefonlarının insan vücudu tarafından soğurulan enerji miktarını sınırlandırmayı amaçlar. Örneğin, ICNIRP tarafından önerilen SAR değeri, 10-gram doku başına 2 watt/kilogram (W/kg) olarak belirlenmiştir. Modern cep telefonları, bu sınırların altında kalacak şekilde tasarlanmıştır ve tipik SAR değerleri genellikle 0,1 ila 1,5 W/kg aralığında değişir. Yapılan bilimsel çalışmalar, bu seviyelerdeki manyetik alan maruziyetinin insan sağlığı üzerinde kısa vadede ölçülebilir bir risk oluşturmadığını göstermektedir. Ancak, uzun vadeli maruziyetin potansiyel etkileri, özellikle beyin tümörleri veya diğer sağlık sorunlarıyla ilişkisi üzerine tartışmalar devam etmektedir. Bu nedenle, özellikle çocuklar ve gençler gibi hassas gruplar için cep telefonu kullanımının sınırlandırılması ve kulaklık gibi araçlarla maruziyetin azaltılması önerilmektedir. Ayrıca, teknolojinin gelişmesiyle birlikte düşük radyasyonlu cihazların üretilmesi ve kullanıcıların bilinçlendirilmesi, potansiyel risklerin minimize edilmesi açısından önemlidir [66].



Şekil 2.7: Cep telefonlarının oluşturduğu manyetik alan çizgileri

Elektrikli araçlar:

Elektrikli araçlar (EA), içten yanmalı motorlara kıyasla düşük işletme emisyonu ve yüksek enerji verimliliği sunmaları nedeniyle ulaşımın dönüşümünde merkezi bir rol oynamaktadır; bununla birlikte EA'ların güç elektroniği elemanları, yüksek akımlı batarya bağlantıları, elektrik motorları ve şarj altyapısı düşük frekanslı (ELF) ve harmonik içerikli manyetik alan bileşenleri üreterek çevresel manyetik alan dağılımını etkiler. Bu manyetik alanlar, kaynağın geometrisi ve araçtaki bileşenlerin konumuna bağlı olarak uzak-alan ve yakın-alan özellikleri gösterir; ayrıca hızlanma, rejeneratif frenleme, sabit hız ve şarj gibi işletim koşullarına göre hem genlik hem de spektral içerik değişir. Literatürde manyetik maruziyetin değerlendirilmesinde RMS ve spektral analiz, haritalama ile istatistiksel modelleme gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmakta; ölçümlerin doğruluğu için sensör tipi, kalibrasyon ve ölçüm protokollerinin standardizasyonu önem taşımaktadır. Elektrikli araçlardaki elektromanyetik maruziyet seviyeleri insan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili çalışmalar sınırlı ve sonuçlar değişken olduğundan, maruziyet değerlendirmeleri hem kısa dönem hem de kronik maruziyet senaryolarını kapsayacak şekilde daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüksek lisans çalışmasında, farklı çalışma koşullarında araç içi ve araç çevresindeki manyetik alanların ölçülmesi ile içten yanmalı ve hibrit araçlarla karşılaştırmalı

değerlendirmesi yapılacak; elde edilen bulgular, maruziyet seviyelerinin yorumlanması ve ileriye dönük ölçüm-politikalarının belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

2.2.3. Elektrikli araçlarda ki elektrik sistemleri:

Elektrikli araçlar (EA'lar), sürdürülebilir ulaşımın önemli bir bileşeni olmasına rağmen, çalışma sırasında çeşitli bileşenlerden kaynaklanan manyetik alan emisyonları üretir. Bu emisyonların başlıca kaynakları arasında elektrik motorları, batarya sistemleri ve güç elektroniği (inverter/DC-DC dönüştürücüler) yer almaktadır. Özellikle elektrik motorları, yüksek akımlı bobinler ve kalıcı mıknatıslar nedeniyle düşük frekanslı (50 Hz–10 kHz) manyetik alanlar yayar. Batarya sistemleri ise şarj/deşarj döngüleri sırasında, özellikle yüksek güç transferi esnasında, 100–300 Hz aralığında manyetik alan seviyeleri oluşturur. Ayrıca, güç elektroniği bileşenlerinin çalışma frekansları yapılan çalışmalar incelendiği zaman farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Şarj sistemleri ve yüksek gerilim kabloları da alternatif akım taşınması nedeniyle çevresel elektromanyetik maruziyete neden olur. Bu emisyonların insan sağlığı ve elektronik cihazlar üzerindeki etkileri, uluslararası standartlarda belirlenen sınır değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmekte ve tasarım aşamasında ekranlama veya topraklama gibi tekniklerle kullanılarak azaltılmaya çalışılmıştır [27, 67, 68].

Elektrikli Araçlarda Manyetik Alan Yayan Kısımlar:

Endüktif Güç Transfer (IPT) Sistemleri: Endüktif Güç Transfer (IPT) sistemleri, elektrikli araçların kablosuz şarjında kullanılan temel teknolojilerden biridir. Bu sistemler, birincil (yer tabanlı) ve ikincil (araç tabanlı) bobinler arasında manyetik rezonans yoluyla enerji aktarımı sağlar. Ancak, büyük hava aralıkları (genellikle 15–25 cm) ve zayıf manyetik kuplaj, kaçak manyetik alanların oluşmasına neden olur. Özellikle yüksek güçlü (3–22 kW) ve yüksek frekanslı (20–100 kHz) IPT sistemlerinde, manyetik akı yoğunlukları 50–200 μT seviyelerine ulaşabilir, bu değerler uluslararası güvenlik standartlarının belirlediği sınırların (27 μT) üzerinde olabilir. Dinamik şarj sistemlerinde ise, araç hareket halindeyken birincil bobinlerin sürekli değişen pozisyonu, manyetik alan dağılımında dalgalanmalara ve daha geniş bir maruziyet alanına yol açar. Bu emisyonlar, araç içindeki yolcular ve yakın çevredeki bireyler için potansiyel sağlık riskleri oluşturmalarının yanı sıra, araç elektroniğinde elektromanyetik girişim (EMI) sorunlarına neden olabilir. [68, 69]

Elektrik Motorları ve Güç Elektroniği: Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları, temel manyetik alan kaynaklarından biridir. Senkron ve asenkron motorlar, bobinlerdeki yüksek akım geçişleri ve kalıcı mıknatısların etkileşimi sonucu 50 Hz–10 kHz aralığında değişen manyetik alanlar üretir. Özellikle AC motorlar, alternatif akımın doğası gereği sürekli değişen manyetik akı nedeniyle harmonik alanlar yayar. Güç elektroniği bileşenleri (inverterler ve DC-DC dönüştürücüler), motorların çalışma frekansını kontrol ederken yüksek anahtarlama hızlarına (20 kHz’e kadar) bağlı olarak elektromanyetik girişim (EMI) kaynağı haline gelir. Bu bileşenlerin neden olduğu harmonikler, 100 kHz’e varan frekanslarda manyetik akı yoğunluklarını 5–50 μ T seviyelerine çıkarabilir. Özellikle inverter çıkışındaki PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyallerinin, motor besleme hatlarında yüksek dv/dt oranlarına ve dolayısıyla çevredeki kablolarda endüklenen gerilimlere yol açtığını göstermektedir. Bu emisyonların azaltılması için, motor tasarımında kapalı manyetik devrelerin kullanılması, güç elektroniği devrelerinde EMI filtrelerinin entegrasyonu ve topraklama stratejilerinin optimize edilmesi değerlendirilmektedir. Ayrıca, manyetik malzemelerin kullanımı, kaçak akıların sınırlandırılmasında etkili bir çözüm sunar [67, 70].

Batarya Sistemleri ve Yüksek Gerilim Kabloları: Elektrikli araçlarda kullanılan batarya sistemleri, şarj ve deşarj döngüleri sırasında yüksek akımlar nedeniyle düşük frekanslı (100–300 Hz aralığında) manyetik alanlar üretir. Lityum-iyon hücrelerin seri/paralel bağlanmasıyla oluşan batarya paketleri, özellikle hızlı şarj sırasında yüksek güç transferi gerçekleştirirken, akım dalgalanmalarına bağlı olarak manyetik akı yoğunlukları 10–30 μ T seviyelerine ulaşabilir. Batarya yönetim sistemleri (BMS) içindeki kontrol devreleri de düşük seviyeli harmonik emisyonlara yol açarak çevresel elektromanyetik girişim (EMI) riskini artırır. Yüksek gerilim kabloları ise, taşıdıkları alternatif akım (AC) nedeniyle çevrelerinde döngüsel manyetik alanlar oluşturur. Özellikle kablo demetlerinin simetrik olmayan dizilimi veya topraklama hataları, bu alanların 50 Hz temel frekansta 5–15 μ T seviyelerinde yayılmasına neden olur. Bu emisyonların azaltılması için, kablolarda bükülü çiftlerin kullanılması, batarya paketlerinin manyetik olarak ekranlanması ve kablo yalıtım malzemelerinin yüksek geçirgenlikli ferrit tabakalarla desteklenmesi gibi teknikler geliştirilmiştir [27, 68].

Güç Elektroniği (Inverter ve AC-DC Dönüştürücüler): Elektrikli araçlarda kullanılan güç elektroniği bileşenleri (inverter ve AC-DC dönüştürücüler), enerji dönüşümü sırasında yüksek frekanslı anahtarlama işlemleri nedeniyle önemli manyetik alan emisyonları üretir. İnverterler, bataryadan gelen doğru akımı (DC), elektrik motorunu beslemek üzere alternatif akıma (AC) dönüştürürken, AC-DC dönüştürücüler voltaj seviyelerini regüle eder. Bu süreçlerde kullanılan yüksek anahtarlama frekansları (genellikle 20 kHz'e kadar), hızlı akım değişimlerine ve dolayısıyla harmonik bileşenli manyetik alanlara yol açar. Özellikle seri rezonans devreleri ve yarı-iletken anahtarlama elemanları (IGBT, MOSFET), elektromanyetik girişim kaynağı olarak öne çıkar. Yapılan ölçümler, bu bileşenlerin çevresinde 50 Hz–100 kHz aralığında ölçülebilir manyetik akı yoğunlukları ($1\text{--}50\ \mu\text{T}$) tespit etmiştir. Bu emisyonlar, araç içi elektronik sistemlerde (ör. ABS, eğlence sistemleri) parazitlere neden olabilirken, uluslararası standartlar (ICNIRP) tarafından belirlenen maruziyet sınırlarını aşmamak için pasif ekranlama (ferrit tabakalar) ve topraklama teknikleri gibi uygulamalar geliştirilmiştir. Ayrıca, rezonans frekanslarının optimize edilmesi ve yüksek frekanslı harmoniklerin filtrelenmesi, elektromanyetik maruziyet seviyelerinin azaltılmasında kritik rol oynar [27, 70].



Şekil 2.8: Elektrikli araçların oluşturduğu manyetik alan çizgileri

3. MATERYAL ve METOD

Bu tez çalışmasının materyal ve yöntem kısmında, elektrikli araçlardaki elektromanyetik maruziyet seviyelerinin farklı koşullarda (durağan, çalışır ve şarj halinde) ile konumsal dağılımı arasındaki ilişkiyi niceliksel olarak analiz etmeye yönelik ölçümler yapılmıştır. Aynı zamanda bazı araç modellerinde mesafeye göre elektromanyetik maruziyet seviyeleri ölçülmüş ve bu ölçümlerin mesafeye göre değişimleri analiz edilmiştir, bunun yanı sıra Araç içi ve dışı kritik bölgelerde gerçekleştirilen ölçümler kapsamında, Türkiye ve global pazarda öne çıkan BEV, HEV ve benzinli araç test modelleri olarak TOGG TX10, Kia EV3, MG Luxury 4, Seres 3, Hyundai Accent 2005, Nissan Qashqai e-Power 2023, Toyota Corolla Cross Hybrid 2023 ile Toyota Corolla Multidrive S 2023 seçilmiştir. Araç içi ölçümler, sürücü ve yolcu bölgeleri (baş, kalp, diz hizası; gösterge paneli altı, akıllı ekran çevresi ve kablosuz şarj noktaları) ile motor kontrol ünitesi, batarya yönetim sistemi gibi elektromanyetik maruziyet seviyelerinin yoğun olduğu alanlarda, dış ölçümler ise batarya bölmesi, motor bölgesi, şarj üniteleri, sinyal lambaları gibi kritik noktalarda, belirlenen noktalar üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 30 MHz – 8 GHz frekans aralığında manyetik alan şiddetini (μT) ölçebilen, $\pm 0.1 \mu\text{T}$ hassasiyetli MESTEK EMF02R triaksiyel manyetometre ile 48 MP çözünürlüğe sahip yüksek çözünürlüklü kamera yardımıyla ölçümler yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Çalışmada, düşük frekans kaynaklı (motor ve batarya etkileri) ve yüksek frekanslı (kablosuz şarj, GPS, radar gibi) etkenlerin ICNIRP 2020 ve IEEE gibi uluslararası standartlarla uyumlu maruziyet analizleri çerçevesinde değerlendirilmesi hedeflenirken, elektrikli araçların dinamik operasyonel durumlarında meydana gelen elektromanyetik maruziyet seviyelerinin “sıcak noktaları”, benzinli araçlarla (örneğin, 2005 model Hyundai Accent Admire ve 2023 model Toyota Corolla Multidrive S) karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu metodoloji, hem BEV hem de HEV ve benzinli araçlar arasında yapılan ölçümler ile elde edilecek konumsal risk haritaları ve tasarım önerileri (örneğin, MG Luxury 4 modelinde kablosuz şarj ünitesinin yeniden konumlandırılması veya Toyota Corolla Cross Hybrid 2023 modelinde batarya yalıtımında manyetik kalkanlama uygulamalarının geliştirilmesi) yoluyla, elektrikli araç teknolojilerinde tasarım, güvenlik standartları ve regülasyonların optimize edilmesine yönelik uluslararası

boyutta akademik ve endüstriyel çalışmalarında faydalanabilmesi hedeflenmiş literatürdeki boşluğa katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

3.1. Elektromanyetik Maruziyet Seviyeleri Ölçülen Araçlar

TOGG TX10 V2 Uzun Menzil Paketi, elektrikli araç teknolojisinde enerji verimliliği ve uzun menzilli performans hedefleri doğrultusunda geliştirilmiş bir model olarak öne çıkmaktadır. Araç, 88.5 kWh kapasiteli lityum-iyon batarya sistemi ile donatılmış olup, WLTP (Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Prosedürü) standartlarına göre 523 km menzil sunmaktadır. Bu performans, yüksek enerji yoğunluklu batarya tasarımı, termal yönetim optimizasyonu ve 400V elektrik mimarisinin entegrasyonu ile desteklenmektedir. Arka tekerlekten çekiş (RWD) konfigürasyonu, enerji tüketimini 16.9 kWh/100km seviyesinde tutarak menzil artışına katkı sağlarken; 160 kW motor gücü, 350 Nm tork ve 218 beygir gücü ile 0-100 km/s hızlanmayı 7.8 saniyede tamamlamaktadır. Bataryanın araç altında merkezi konumlandırılması, ağırlık dağılımını iyileştirerek dinamik sürüş karakteristiğini optimize etmiş, aynı zamanda manyetik alan maruziyetinin yolcu kabini ve şarj üniteleri gibi kritik bölgelerde kısmen kontrol edilebilir seviyelerde kalmasını sağlamıştır. DC hızlı şarj desteği, batarya dolum sürelerinin kısaltılmasına olanak tanımaktadır [71].



Şekil 3.1: İncelemelerde kullanılan TOGG marka araç.

KIA EV3, elektrikli araç (EV) teknolojisindeki yenilikleri entegre eden bir model olarak, 64 kWh kapasiteli lityum iyon polimer (Li-ion) batarya sistemi ile öne çıkmakta ve bu sistem, yaklaşık 450 kilometrelik menzile sunarken yüksek enerji yoğunluğu (250-300 Wh/kg) ve termal stabilite avantajları sağlamaktadır. Batarya, modüler tasarımı ve gelişmiş batarya yönetim sistemi (BMS) ile optimize edilmiş olup, 400 voltluk çoklu şarj mimarisi ve sıvı soğutmalı termal yönetim sistemi sayesinde hem hızlı şarj kabiliyeti hem de uzun ömürlülük hedeflenmiştir. Araçta kullanılan mıknatıslı senkron motor (PMSM), 150 kW güç çıkışı ile 0-100 km/s hızlanmayı 7-8 saniyede tamamlarken, elektrikli sürüş modülleri (e-Drive), harmonik filtreleme ve gürültü azaltma algoritmalarıyla enerji verimliliğini artırmaktadır. Özellikle rejeneratif frenleme sistemi, kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek şehir içi sürüşte enerji geri kazanım oranını %25-30'a çıkarmakta ve "i-Pedal" modu ile tek pedal kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu sistem, hidrolik frenler ve ABS/ESC gibi güvenlik mekanizmalarıyla entegre çalışarak ani duruşlarda bile enerji toplama verimliliğini korurken, batarya termal yönetimi ile senkronize algoritmalar yüksek gerilimli (400V) döngülerde bile batarya sağlığını desteklemektedir. Akademik çalışmalar, bu tür sistemlerin enerji tüketimini km başına 0.1-0.2 kWh azalttığını ve CO₂ emisyonlarını %15-20 düşürdüğünü vurgulamaktadır. Tüm bu bileşenler, KIA'nın E-GMP platformu ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır [72].



Şekil 3.2: İncelemelerde kullanılan Kia Ev3 marka araç.

MG4 Luxury, elektrikli araç teknolojisinde rekabetçi bir model olarak 64 kWh kapasiteli lityum iyon batarya sistemi ile dikkat çeker. Bu sistem, 435 km WLTP menzil sunarken, arkadan itişli platform ve modüler şasi tasarımı ile performans ve verimliliği dengeler. Batarya, sıvı soğutmalı termal yönetim sistemi ve gelişmiş batarya yönetim teknolojisi (BMS) sayesinde hem hızlı şarj (DC ile %80 şarj 28 dakika) hem de uzun ömürlülük sağlar. Araçta kullanılan 150 kW (204 beygir) elektrik motoru, 250 Nm tork üretir ve 0-100 km/s hızlanmayı 7,1 saniyede tamamlar. 4 seviyeli Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi (KERS), sürüş moduna bağlı olarak kinetik enerjiyi elektriğe dönüştürerek şehir içi kullanımda enerji verimliliğini artırır. Bu sistem, "Adaptif Geri Kazanım" moduyla sürücünün tek pedal kullanımına olanak tanır ve frenleme sırasında enerji toplama verimliliğini optimize eder. 400V elektrik mimarisi, hızlı şarj desteğiyle uyumlu olup, Continental fren sistemi ve ABS/ESC entegrasyonu gibi güvenlik mekanizmalarıyla senkronize çalışır [73].



Şekil 3.3: İncelemelerde kullanılan Mg 4 Luxury marka araç.

Seres 3, elektrikli araç teknolojisindeki yenilikleri entegre eden bir model olarak, 53.6 kWh kapasiteli lityum demir fosfat (LiFePO_4) batarya sistemi ile öne çıkmaktadır. Bu sistem, WLTP standartlarına göre yaklaşık 301 kilometrelik bir menzil sunarken, termal stabilite ve güvenli batarya avantajları sağlamaktadır. Batarya, zemin altına yerleştirilmiş olup, araç ağırlık merkezini düşürerek yol tutuşunu iyileştirmektedir. Araçta kullanılan senkron elektrik motoru, 120 kW (163 bg) güç ve 300 Nm tork üreterek, 0'dan 100 km/s hıza 8.9 saniyede ulaşmasını sağlamaktadır. Önden çekişli bu sistem, enerji verimliliğini artırmak amacıyla gelişmiş sürüş modülleri ve gürültü azaltma algoritmalarıyla optimize edilmiştir. Seres 3, rejeneratif frenleme sistemi sayesinde kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek, enerji geri kazanımına olanak sağlamaktadır. Bu sistem, hidrolik frenler ve ABS gibi güvenlik mekanizmalarıyla entegre olarak çalışarak, ani duruşlarda bile enerji toplama verimliliğini korumaktadır. Ayrıca, araçta bulunan 70 kW hızlı şarj desteği ile bataryanın %20'den %80'e kadar şarj edilmesi yaklaşık 30 dakika sürmektedir. Bu özellik, kullanıcıların şarj sürelerini minimize ederek, günlük kullanımda pratiklik sağlamaktadır [74].



Şekil 3.4: İncelemelerde kullanılan Seres 3 marka araç.

Hyundai Accent Admire 2004, benzinli motorunun yanı sıra temel elektrik sistemleriyle de dikkat çeken bir modeldir. Araçta, 12V kurşun-asit aküsü (Group 24F/35, 560 CCA) marş motorunu ve elektrikli bileşenleri beslerken, 70-90 amper alternatör ile şarj döngüsünü sürdürür. Bu sistem, aydınlatma (far, sinyal, stop lambaları), hidrolik destekli elektrikli fan, pencereleri, ve merkezi kilit gibi temel elektrikli aksamalara enerji sağlar. Araç içinde analog göstergeler ve temel bilgi ekranı, sürücüye yakıt seviyesi, motor devri ve hız gibi kritik verileri iletir. Elektronik kontrol ünitesi, motorun enjeksiyon ve ateşleme sistemini optimize ederek yakıt verimliliğini artırır. ABS fren sistemi, tekerlek hız sensörleriyle entegre çalışarak kaygan zeminlerde frenleme güvenliğini destekler. Ayrıca, elektrikli yakıt pompası ve oksijen sensörü, emisyon değerlerinin kontrolüne katkıda bulunur. Radyo/CD çalar ve 4 hoparlörlü ses sistemi mevcut olup. Sigorta kutusu, aracın elektrik devrelerini aşırı yükten korurken, kablolama mimarisi basit ve dayanıklı bir tasarıma sahiptir. Elektrikli silecekler ve dış ayna ayar düğmeleri gibi elektrikli sistemlere sahip olup. Temel ancak sağlam bir elektrik altyapısıyla kullanıcılarına sorunsuz bir kullanılabilirlik sunmaktadır. Bu özellikleriyle hem günlük kullanımda pratiklik hem de düşük bakım maliyetleri sunar [75].



Şekil 3.5: İncelemelerde kullanılan Hyundai Accent Admire marka araç.

2023 Toyota Corolla Multidrive S, 2023 Toyota Corolla Multidrive S, modern elektrik sistemleri ve teknolojik entegrasyonla öne çıkan bir kompakt sedan olarak tasarlanmıştır. Araçta, 12V kurşun-asit aküsü marş motorunu ve elektrikli bileşenleri beslerken, yüksek verimli bir alternatör (100-120 amper aralığında) şarj döngüsünü sürdürür. Bu sistem, LED aydınlatma paketi (far, gündüz farları, sinyal ve stop lambaları), elektrikli klima kompresörü, otomatik camlar, anahtarsız giriş ve merkezi kilit gibi gelişmiş özellikleri destekler. Araç içinde 7 inç TFT dijital göstergeler ve renkli baş üstü ekran, sürücüye yakıt seviyesi, seyir hızı, motor verimliliği ve güvenlik uyarıları gibi kritik bilgileri anlık olarak iletir. Toyota Safety Sense 3.0 paketi kapsamında, elektronik kontrol ünitesi, motor enjeksiyonunu ve hibrit tahrik sistemini optimize ederek hem performansı hem de yakıt ekonomisini artırır. ABS ve EBD (Elektronik Fren Kuvveti Dağıtımı) ile entegre çalışan tekerlek hız sensörleri, kaygan yüzeylerde ve acil fren durumlarında sürüş güvenliğini maksimum seviyeye taşır. Elektrikli yakıt enjeksiyon sistemi ve çift oksijen sensörü, emisyon değerlerinin düşük tutulmasını sağlarken, 8 inç dokunmatik multimedya ekran ile 6 hoparlörlü premium ses sistemini sahip olup. Akıllı sigorta kutusu ve modüler kablolama mimarisi, elektrik devrelerini aşırı yük ve kısa devreye karşı korurken, sistemin dayanıklılığını sağlamaktadır. Ek olarak, yağmur sensörlü otomatik silecekler, elektrikli katlanabilir dış aynalar ve sürücü destek sistemleri (şerit takip asistanı, adaptif hız sabitleyici) gibi özellikler, aracın elektrik altyapısının kapsamlı entegrasyonunu gösterir. Bu sistemler, hem günlük kullanımda konfor hem de uzun vadeli güvenilirlik sunar [76].



Şekil 3.6: İncelemelerde kullanılan Toyota Corolla marka araç.

Toyota Corolla Cross Hybrit 2023, modern elektrik sistemleri ve teknolojik entegrasyonun otomotiv mühendisliğindeki en güncel uygulamalarını temsil eden kompakt crossover segmentinde yer almaktadır. Bu modelde, hibrit güç aktarım ünitesi; 12V kurşun-asit aküsü ile marş motoru ve diğer düşük voltajlı elektrik bileşenlerinin beslenmesini sağlarken, yaklaşık 100–120 amper aralığında çalışabilen yüksek verimli alternatör tarafından desteklenen sürdürülebilir bir şarj döngüsü tesis edilmektedir. Dahası, entegre yüksek voltajlı hibrit batarya sistemi (genellikle lityum iyon temelli olup, araç altına monte edilmiştir) enerji yönetiminde optimum verimliliği hedefleyerek, ağırlık merkezinin alçaltılması ve dinamik yol tutuşunun iyileştirilmesi yönünde mühendislik avantajları sunmaktadır. Araç, LED aydınlatma paketi kapsamında far, gündüz farları, sinyal ve stop lambalarının entegre edilmesiyle; enerji tüketiminin minimize edilmesi ve görsel algıda üstün performans sağlanması ilkelerini benimsemektedir. Elektrikli klima kompresörü, otomatik cam sistemleri, anahtarsız giriş ve merkezi kilit uygulamaları, kullanıcı konforunun yanı sıra operasyonel verimliliğin artırılmasına yönelik ileri mühendislik çözümleri olarak ele alınmaktadır. İç mekanda yer alan 7 inç TFT dijital gösterge paneli ve dokunmatik multimedya ekranı, sürücünün yakıt durumu, seyir hızı, motor verimliliği ve çeşitli güvenlik uyarıları gibi kritik bilgileri anlık olarak sunarak, bilgiye dayalı karar alma süreçlerini desteklemektedir. Toyota Safety Sense paketi kapsamında entegre edilen elektronik kontrol ünitesi, motor enjeksiyonu ve hibrit tahrik sisteminin senkronize çalışmasını sağlayarak performans ile yakıt ekonomisi arasında denge kurulmasına olanak tanımaktadır. Güvenlik perspektifinde, ABS ve Elektronik Fren Kuvvet Dağıtımı (EBD) sistemlerinin yanı sıra, aktif tekerlek hız sensörleri; ani frenlemelerde ve kaygan yol koşullarında maksimum stabilite sağlamakta, böylece sürüş güvenliğini artırmaktadır. Elektrikli yakıt enjeksiyon sistemi ve entegre çevre sensörleri, emisyon değerlerinin düşürülmesi çerçevesinde kritik bir rol oynamaktadır. Ek olarak, yağmur sensörlü otomatik silecekler, elektrikli katlanabilir dış aynalar ve gelişmiş sürücü destek sistemleri (örneğin, şerit takip asistanı ve adaptif hız sabitleyici) aracın geniş kapsamlı elektrik altyapısının entegrasyonunu ve uzun vadeli operasyonel dayanıklılığı ortaya koymaktadır [77, 78].



Şekil 3.7: İncelemelerde kullanılan Toyota Corolla Cross Hybrit marka araç.

2023 Nissan Qashqai e-Power, modern hibrit aktarma organları ile donatılmış olup, elektrik sistemleri ve teknolojik entegrasyon açısından otomotiv mühendisliğinin çağdaş uygulamalarını yansıtan kompakt crossover segmentinde konumlandırılmaktadır. Bu araçta, içten yanmalı motor yalnızca enerji üretim fonksiyonu üstlenirken, Sürüş gücü tamamen elektrik motorundan elde edilmektedir, bu teknoloji aracılığıyla elektrikli sürüş karakteristiği sunulmaktadır. Bu sistemde, 12V kurşun-asit yardımcı batarya, marş motoru, aydınlatma birimleri, multimedya, iklimlendirme ve sürücü destek sistemleri gibi düşük voltajlı tüm elektrik bileşenlerinin beslenmesini sağlamakta olup, sistemin genel enerji dengesi, entegre güç dönüştürücü modüller (inverter ve DC-DC dönüştürücü) ile sürdürülebilir şekilde yönetilmektedir. Yüksek voltajlı lityum-iyon batarya paketi ise, aracın alt bölümüne yerleştirilmiş olup hem ağırlık merkezinin düşürülmesini sağlamakta hem de yol tutuş dinamiklerini iyileştirmektedir. Bu batarya, rejeneratif frenleme sistemi ile fren anlarında geri kazanılan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek depolamakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Batarya ve inverter sistemi, 140 kW güç üretebilen elektrik motorunu sürekli beslemekte, böylece sürüş sırasında içten yanmalı motor devreye girmeksizin tam elektrikli sürüş sağlanmaktadır. Aracın elektriksiz mimarisi içerisinde yer alan yüksek kapasiteli alternatör, içten yanmalı motor çalışırken 12V sistemin şarjını desteklemektedir. Elektronik kontrol ünitesi (ECU) ve entegre enerji yönetim modülü, hibrit

güç aktarım sistemi ile araç dinamikleri arasındaki dengeyi yönetmekte ve sürüş verimliliğini optimize etmektedir. Aydınlatma sistemi, düşük enerji tüketimi ve yüksek ışık verimi sağlayan LED farlar, gündüz farları, sinyal lambaları ve stop lambaları ile donatılmıştır. Bu sistem, aracın hem enerji tüketim profilini optimize etmekte hem de görsel güvenliğini artırmaktadır. Ayrıca, elektrikli klima kompresörü, otomatik cam sistemleri, anahtarsız giriş, elektrikli bagaj kapağı ve merkezi kilit uygulamaları, konfor ve işlevsellik açısından elektrik altyapısının güçlü entegrasyonunu yansıtmaktadır. İç mekânda, 7 inç dijital TFT gösterge paneli, 9 inç dokunmatik multimedya ekranı, Apple CarPlay/Android Auto entegrasyonu, sürüş modları göstergeleri, hibrit sistem enerjisi akışı, batarya durumu ve enerji geri kazanım düzeyi gibi bilgileri kullanıcıya gerçek zamanlı olarak sunarak istenilen bilgiye anında elde etme imkanı sağlarken konforlu bir sürüş imkanı sağlamaktadır. Nissan Intelligent Mobility çerçevesinde entegre edilen sürücü destek sistemleri arasında; ProPILOT adaptif hız sabitleyici, şerit takip asistanı, çarpışma önleme sistemi, yaya algılama destekli acil frenleme, 360° çevre görüş kamerası, şerit ihlali uyarı sistemi, kör nokta uyarısı ve sürücü yorgunluk algılama sistemi yer almakta ve bu sistemlerin tamamı elektrikli sensörler, radarlar ve kameralar aracılığıyla çalışmaktadır. Elektrik altyapısının güvenlik boyutunda ise, akıllı sigorta kutuları, modüler kablo demetleri, termal koruma elemanları, yüksek akım röleleri ve araç içi elektriksel hata tanılama sistemleri, elektriksel güvenliğin ve sistem dayanıklılığının sürekliliğini sağlamaktadır [79, 80].



Şekil 3.8: İncelemelerde kullanılan Nissan Qashqai E -Power marka araç.

3.2. Elektromanyetik Maruziyet Seviyesi Ölçüm Cihazı

MESTEK EMF02R, yüksek frekanslı (30 MHz–8 GHz) elektromanyetik alanların ölçümü için tasarlanmış, taşınabilir bir manyometredir. Cihaz, elektrik alan şiddetini (1–1999 V/m) ve manyetik akı yoğunluğunu (0,1–199,9 mG veya 0,01–19,99 μ T) ölçebilmektedir. Ölçüm hassasiyeti, elektrik alan için V/m, manyetik alan için ise 0,1 mG/0,01 μ T çözünürlüğe sahiptir. Üç eksenli sensörüyle çok yönlü veri toplama kapasitesi sunmaktadır. Cihaz, renkli VA ekranı ve analog grafik gösterimi sayesinde kullanıcı dostu bir arayüz sunar. Sesli ve ışıklı alarm özelliği, önceden ayarlanmış eşik değerleri (örneğin >40 V/m veya >4,0 mG) aşıldığında kullanıcıyı uyarır. Ayrıca ortam sıcaklığı (0–50°C) ve nem (%0–90 RH) ölçüm fonksiyonlarına sahiptir. Dahili lityum-iyon bataryası, USB Type-C şarj girişi ile yaklaşık 4 saatte tam dolmuş sağlarken, 15 dakikalık otomatik kapanma özelliği enerji verimliliğini artırır. Hafif tasarımı (220 g) ve kompakt boyutları (204x63x32 mm) sayesinde taşınabilirlik ön plandadır. Örnekleme hızının 0,4 saniyeden kısa olması, gerçek zamanlı veri izleme imkânı sağlar. Cihaz, endüstriyel standartlara uygun olarak 2000 m yükseklikte ve geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilmektedir [81].



Şekil 3.9: İncelemelerde elektromanyetik maruziyet seviyesi ölçüm cihazı Mestek Emf02r.

Ayrıca güncel akademik literatüre dayandırılarak yapılan çalışmalar, elektromanyetik alan maruziyetinin insan ve çevre güvenliği açısından önemini vurgulamaktadır. ICNIRP yönergeleri, 0 Hz ile 300 GHz frekans aralığında, elektrik alan şiddeti (V/m) ve manyetik alan yoğunluğu (μT) bazında belirlenen maruziyet limitleri ile hem mesleki hem de genel halkın korunmasına yönelik temel referansları oluştururken, Avrupa Birliği'nin 2013/35/EU Direktifi de işyerlerinde elektromanyetik alan maruziyetini sınırlamak için teknik ve idari önlemleri zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede, araç içi ve dışı kritik noktalarda üç eksenli manyetometreler kullanılarak yapılan ölçümlerin nasıl gerçekleştirileceğini detaylandırırken, IEEE C95.1-2019 gibi standartlar maruziyet süresi, frekans bağımlılığı ve biyolojik etkileri (hem termal hem de termal olmayan) göz önüne alarak risk analizlerini desteklemektedir.

Elektrikli araçlar örneğinde yapılan ölçümler, motor, batarya ve güç kablolarının oluşturduğu elektromanyetik alanların ICNIRP tarafından belirlenen 200 μT üst sınırının oldukça altında seyrettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, literatürde özellikle çok düşük frekanslı (ör. 50 Hz) elektromanyetik alanların, uzun süreli maruziyet durumlarında çocukluk çağı lösemi gibi risklerle ilişkilendirilebileceği de rapor edilmiştir. Bu bağlamda, elektrikli araç üreticileri, elektromanyetik kalkanlama, enerji iletim sistemlerinin optimizasyonu ve uygun bileşen yerleşimi gibi mühendislik çözümleriyle maruziyeti minimize etmeyi hedeflemekte; böylece, güncellenen uluslararası güvenlik protokolleri ve regülasyonlar çerçevesinde hem insan sağlığının hem de çevre güvenliğinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmalar, maruziyetin ölçüm protokollerinin standardizasyonu ve biyolojik etkilerin kapsamlı analizine dayanan yaklaşımların, güvenlik standartlarının sürekli olarak iyileştirilmesinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır [82-85].

3.3. Yakın ve Uzak Alan Etkilerinin Değerlendirilmesi:

Elektromanyetik alanlar, kaynaklarından olan uzaklıklarına göre yakın alan ve uzak alan olmak üzere iki bölgeye ayrılmaktadır. Uzak alan bölgesinde (far-field) elektrik ve manyetik alanlar birbirine bağlı olarak düzlem dalga formuna ulaşır ve aralarındaki oran, boşluğun karakteristik empedansı olan yaklaşık 377 Ω değerine eşittir. Bu bölgede enerji yayılımı daha kararlı ve öngörülebilir bir şekilde gerçekleşir. Buna karşılık, yakın alan bölgesinde (near-field) elektrik ve manyetik alan bileşenleri kaynak özelliklerine göre birbirinden bağımsız davranır ve çoğunlukla reaktif karakter gösterir; yani enerjinin büyük bir kısmı

kaynağın çevresinde depolanır ve etkin bir şekilde uzaklara iletilmez. Hertzyen kısa dipol anten incelendiğinde, yakın alanda sabit kaynak akımları ve yük ayrımı tarafından üretilen alan terimleri $E, H \propto \frac{1}{r^2}$ veya $\frac{1}{r^3}$ şeklinde azalarak egemen olurken, uzak alanda değişen akımın yarattığı yayılım terimleri $E, H \propto \frac{1}{r}$ şeklinde yayılır [86]. Sonuç olarak, yakında reaktif enerji depolayan (kapasitif/indüktif) alanlar baskınken, uzakta serbest yayın yapan (yayınım) alanlar baskındır. Yakın ve uzak alan sınırı genellikle yayılan dalga boyu λ ve yayıcı boyutuna göre belirlenir. Örneğin büyük (D boyutu) bir anten için Fraunhofer mesafesi $d_F = 2D^2/\lambda$ formülüyle verilir. Bu mesafenin çok üzerindeki bölgede, alanlar bir düzlem dalga gibi davranır ve E/H oranı sabit bir karakteristik ile ilişkilidir [87].

Otomobillerde motor, invertör ve yüksek akım kabloları başta olmak üzere elektrikli bileşenler, düşük frekansta (50–60 Hz) harmonikler ve 10–20 kHz düzeyindeki PWM (darbe genişliği modülasyonu) sinyalleri aracılığıyla güçlü yakın alan manyetik (H) maruziyet üretir. Güçlü akımlı bir kaynak yakın alanında manyetik alan H baskın olup $H \propto \frac{1}{r^3}$ ve $E \propto \frac{1}{r^2}$ oranında azalırken, yüksek gerilimli bir kaynakta elektrik alan E baskın olup $E \propto \frac{1}{r^3}$, $H \propto \frac{1}{r^2}$ oranında azalır. Uzak alanda ise hem E hem H alanları $\frac{1}{r}$ ile, dolayısıyla güç yoğunluğu $\frac{1}{r^2}$ oranında azalır düzlem dalga özelliği kazanarak güç yoğunluğu $S = E \times H \propto \frac{1}{r^2}$ modeline uyar [88]. Yakın alanda ölçülen değerler genellikle birkaç μT aralığında olup, bazı çalışmalarda kabin içinde invertör yakınında $10 \mu T$ 'ya kadar ulaşabildiği, ayağa yakın ölçümlerde ise bu değer ICNIRP sınırlarının yaklaşık %20'sine varabildiği rapor edilmiştir. Baş seviyesinde ölçümler ise çok daha düşük olup, genellikle sınırların %2'si düzeyindedir. Uzak alan bileşenler, araç gövdesinin Faraday kafesi etkisiyle bastırılırken, yüksek frekans harmonikleri EMI sorunları ortaya çıkarabilir. Elektromanyetik yayılımın sağlık açısından daha az zararlı duruma gelmesi için filtreleme ve kalkanlama gerekmektedir. Ayrıca kısa mesafe yakın alan şiddeti $\frac{1}{r^3}$ etkisiyle ivmeli şekilde azaltmakta, kablo yönlendirme, ferrit kalkanlama gibi mühendislik çözümleriyle elektromanyetik maruziyet seviyeleri daha da kontrol altına alınabilmektedir. Yakın ve uzak alan manyetik

etkileri, yalnızca sayısal sınırlar içinde değil, aynı zamanda araç içi elektromanyetik ortamın güvenli ve uygun şekilde tasarlanması açısından da kritik öneme sahiptir [89].

3.4. Araçlarda Manyetik Alan Kaynakları

Hibrit araçlarda manyetik alanlar esas olarak yüksek gerilim devrelerindeki akımlardan kaynaklanır. Yüksek gerilim bataryası, invertör, motor ve bu bileşenleri birbirine bağlayan kalın kablolar çekiş akımı yollarını oluşturur. Hızlı ivmelenme, rejeneratif frenleme ve hızlı şarj gibi durumlarda bu akımlar yüzlerce amperi bulabilir ve güçlü manyetik alanlar oluşturur. Örneğin, elektrikli otomobillerde yüksek batarya akımları ve güçlü motorlar özellikle kalkış/duraklama esnasında yüksek manyetik alanlar üretir [90]. EMI testi kaynakları açısından, invertörler kesme frekanslarında yüksek frekanslı parazit, elektrik motorları ise hızla değişen çok düşük frekanslı parazit üretir. Araç yapısı (gövde) Faraday kafesi gibi davranıp yüksek frekanslı radyasyonu görece bastırır da düşük frekans manyetik alanlar kolayca nüfuz eder ve araç içindeki elektromanyetik maruziyet seviyeleri yolcuları etkileyebilir [91].

3.5. Araçlardaki Alanın Karakteristikleri: Frekans ve Şiddet

Araçlardaki manyetik alanlar genellikle çok düşük frekanslı (ELF) alanlardır. Motor sürücülerinde, batarya-depolama ve inverter sinyallerinde 50–60 Hz harmonikleri ile on binlerce Hz'e kadar PWM bileşenleri görülür. Çekiş akımı devreleri DC veya düşük frekans bileşenlere sahipken, invertör çıkışında 10–20 kHz seviyesinde anahtarlama frekansı bulunur. Alan şiddeti kaynaklara çok yakındır ve uzaklaştıkça hızla düşer [92]. Literatürde tipik araç içi manyetik akı yoğunlukları birkaç mikrottesla (μT) mertebesinde. Kabin içinde ölçülen en yüksek manyetik alan $64 \mu T$ olarak rapor edilmiş, bu değer IEC/ICNIRP referans sınırının altında kalmıştır. Ön yolcu ayak hizasında ve 50 km/s'da birkaç μT düzeyleri elde edilmiştir [93]. Invertör üstü ölçümlerde 30 cm uzaklıkta 100 Hz'de yaklaşık $1-3 \mu T$, 20 cm'de $\sim 3-4 \mu T$ şiddetinde alanlar saptanmıştır. Kaynağa 10 cm yakınlıkta, 58 A yükte invertör üzerinde ölçülen manyetik akı yoğunluğu $\sim 10.6 \mu T$ 'yi bulmuştur [67]. (Alman radyasyon koruma ofisi) verilerine göre, araç içinde en yüksek manyetik alan genellikle önde ayak boşluğunda, yolcuların başından ise görece düşük seviyede görülür. Bu dağılımda batarya kabloları arka koltuk altında ise arka kısımda da yüksek değerler

ölçülebilir, ancak tüm durumlarda ölçülen maksimum değerler ICNIRP sınırının %70 kadar altındadır [91].



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Araçlarda Elektromanyetik Maruziyet Seviyelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi

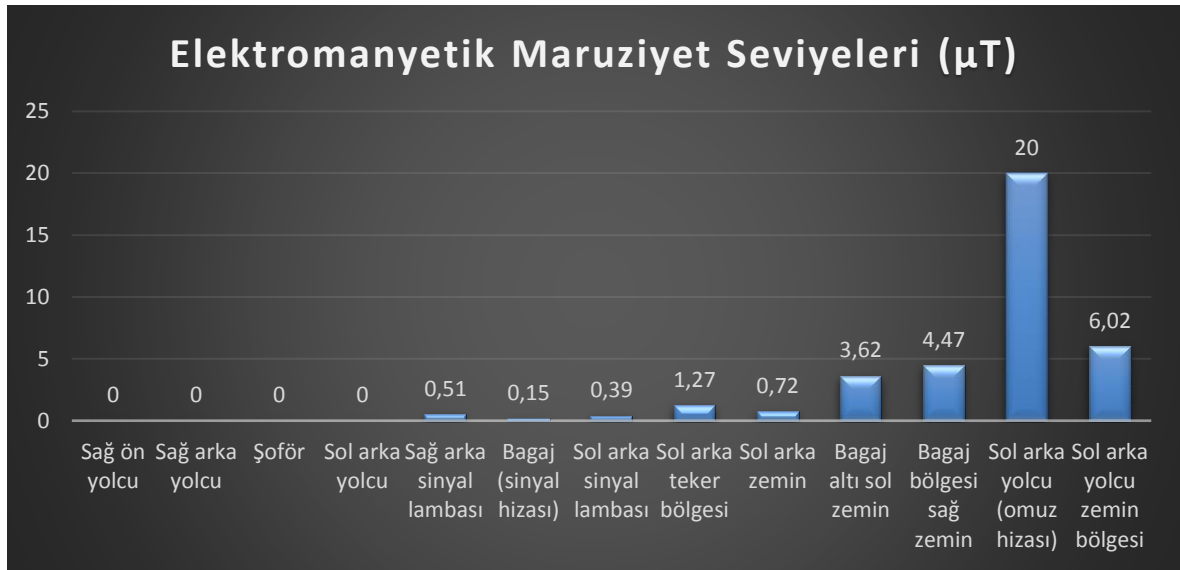
Bu çalışmada farklı yakıt sistemlerine sahip (tam elektrikli, hibrit ve içten yanmalı) araçlar seçilmiş olup araç içi ile araç çevresindeki manyetik alan dağılımlarının karşılaştırmalı analizi ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Her bir model için ölçüm noktaları; kabin içi yolcu bölgeleri, sürücü konumu, batarya ve şarj portu çevresi gibi kritik, yolcuların etkilenebileceği bölgeler seçilmiştir. Ölçümler hem sabit (şarj/bekleme) hem de dinamik (sabit hız, ani ivmelenme, frenleme) koşullarda, MESTEK EMF02R dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Piyasada yaygın olan ve farklı elektrik-elektronik mimarileri barındıran modeller içeren çalışmamızda elde edilen veriler, kaynağa göre maruziyet farklılıkları, yakın/uzak alan etkileri ve farklı sürüş senaryolarının yolcu maruziyetine etkileri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda aşağıdaki araç modelleri üzerinde elektromanyetik maruziyet seviyeleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

- MG 4 Luxury
- 2023 Toyota Corolla Multidrive S
- Toyota Corolla Cross Hybrid
- TOGG TX10
- Kia EV3
- Seres 3
- QASHQAI 2023 E-POWER
- Hyundai Accent Admire

4.1.1. MG luxury 4 aracında yapılan ölçümler:

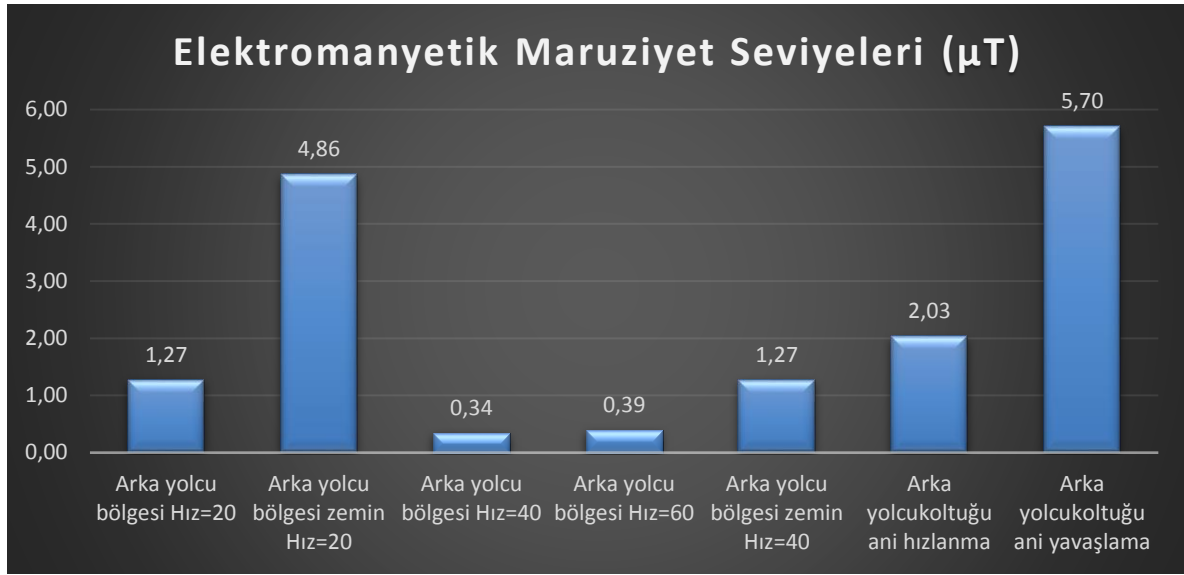
MG Luxury 4 elektrikli aracında, MESTEK EMF02R cihazı kullanılarak yapılan manyetik alan ölçümleri, MG Luxury 4 elektrikli aracın çalışır durumda fakat hareket etmediği esnada, dış bölgelerde gerçekleştirilen ölçümlerde sağ ön yolcu, sağ arka yolcu, şoför ve sol arka yolcu bölgelerinde anlamlı bir manyetik alan tespitine rastlanmamıştır. Ancak, sağ arka sinyal lambası bölgesinde 0.51 μ T, sinyal lambalarının hizasındaki bagaj kısmında 0.15 μ T

ve sol arka sinyal lambası alanında $0.39 \mu\text{T}$ değerlerine ulaşılmıştır. Buna ek olarak, sol arka teker bölgesinde ve sol arka zeminde sırasıyla $1.27 \mu\text{T}$ ve $0.72 \mu\text{T}$; bagaj altı sol zemin ve bagaj bölgesi sağ zeminde ise $3.62 \mu\text{T}$ ve $4.47 \mu\text{T}$ 'lık daha yüksek manyetik alan şiddetleri gözlemlenmiştir. Özellikle, sol arka yolcu omuz hizasında burada şarj ünitesi ile batarya arasındaki bağlantıyı sağlayan kablo hattının etkisi belirgin olup, ölçümlerin $20 \mu\text{T}$ 'ya varan seviyelere çıktığı, sol arka yolcu bölümünün zemin kısmında ise $6.02 \mu\text{T}$ 'ya ulaşmasının kayda değer olduğu saptanmıştır. Ölçümler, aracın yüzeyine maksimum 3 cm mesafeden yapılmıştır.



Şekil 4.1: Mg Luxury 4 aracının statik durumda araç dışı yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Araç içi ölçümlerde ise, sağ ön yolcu koltuğunda, yolcunun vücut ve bacak bölgesine yaklaşık 25 cm mesafedeki noktalarda; aracın çalışır haldeyken, 20 km/sabit seyrinde, hızlanma ve ani hızlanma esnasında sırasıyla $0.26 \mu\text{T}$, $0.34 \mu\text{T}$, $0.92 \mu\text{T}$ ve $2.01 \mu\text{T}$ değerleri elde edilmiştir. Dokunmatik ekranın, kablosuz şarj bölmesinin ve sinyal lambası açılış modlarının farklı durumlarında $1.57 \mu\text{T}$ ile $3.92 \mu\text{T}$ arasında değişen manyetik alan seviyeleri ölçülürken, 40 km/sabit seyir, 60 km/sabit seyir, ani hızlanma ve yavaşlama durumlarında ise ilgili bölgesel ölçümlerde $0.46 \mu\text{T}$ ile $5.7 \mu\text{T}$ arasında lokal değişimler gözlemlenmiştir. Bu ölçümler, özellikle aracın yüksek voltajlı şarj ve batarya bağlantı noktalarına yakın bölgelerde ortaya çıkan anormal yüksek manyetik alan yoğunluklarını göstermektedir.



Şekil 4.2: Mg Luxury 4 aracının dinamik durumda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

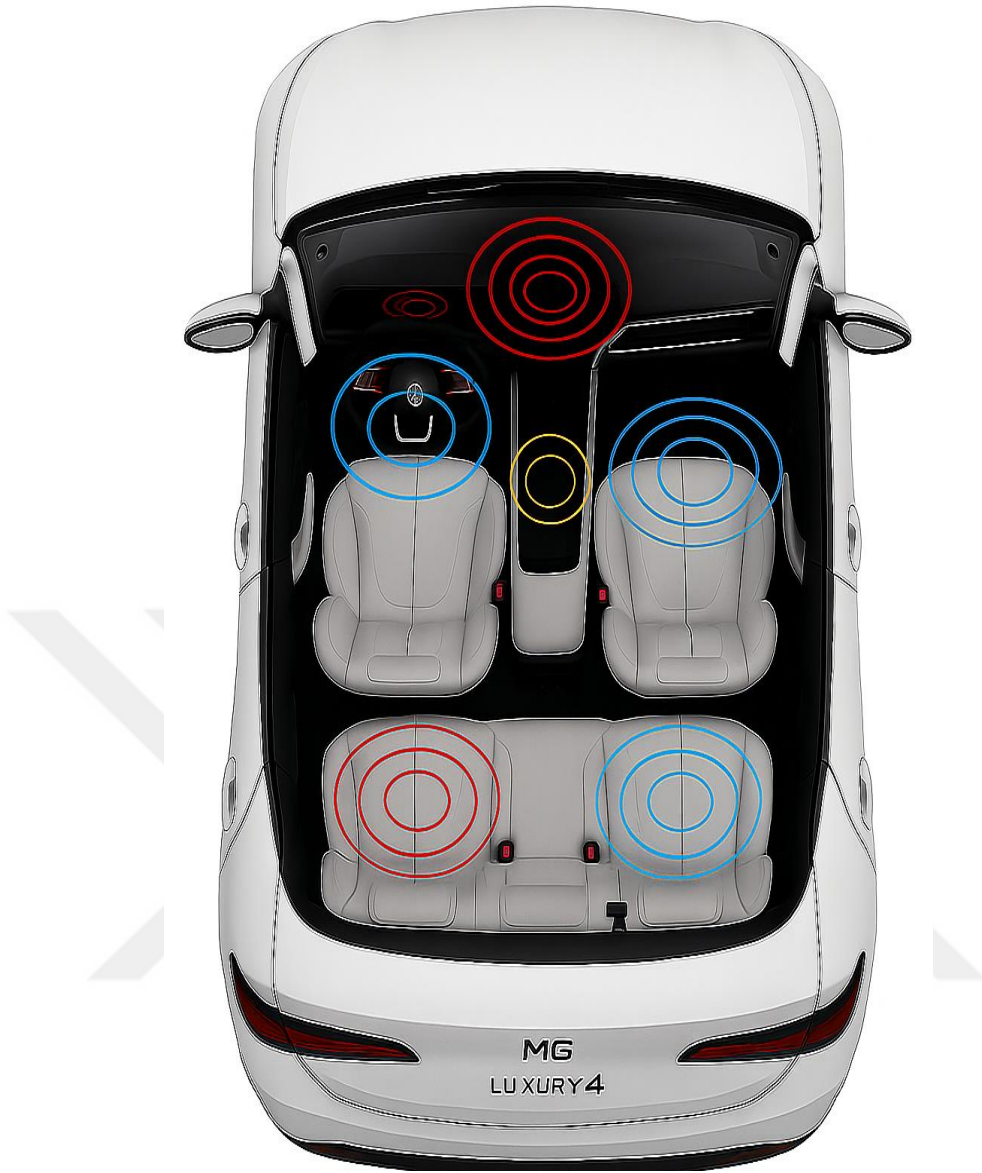
Araç içi ölçümler, farklı dinamik durumlar altında manyetik alan şiddetinin bölgesel dağılımını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sağ ön yolcu koltuğu çevresinde, aracın çalışır halde olup hareket etmediği durumda ölçülen manyetik alan değeri 0.26 μT olarak belirlenmiştir. Aracın 20 km/sabit seyir halinde hareket etmeye başlaması durumunda bu değer 0.34 μT 'ye yükselirken; hızlanmanın etkisiyle yaklaşık 0.92 μT 'ye ulaşılmış, ani hızlanma esnasında ise 2.01 μT 'lık artış gözlemlenmiştir. Dokunmatik ekrana 3 cm mesafeden yapılan ölçümlerde 1.57 μT ; kablosuz şarj bölgesine 3 cm uzaklıktaki ölçümlerde ise 3.92 μT manyetik alan şiddeti kaydedilmiştir. Sağ ön sinyalin aktive edilmesiyle 0.7 μT değerine ulaşılırken, dörtlü sinyal modunun devreye girmesi durumunda elde edilen sonuç, sağ sinyal verildiği anki ölçüm ile benzerlik göstermiştir. Aracın farklı hızlarda sabit seyrinde yapılan ölçümlerinde, 40 km/saatte 0.46 μT , 60 km/saatte ise 0.54 μT değerleri elde edilirken; zemine yakın bölgede gerçekleştirilen ölçümlerde, 40 km/saat sabit seyir halinde 0.14 μT , ani hızlanma ve yavaşlama durumlarında ise sırasıyla 1.08 μT ve 0.65 μT gibi değerler gözlemlenmiştir. Sağ arka yolcu bölgesinde, aracın çalışır ancak durağan olduğu durumda 0.66 μT , hızlanmaya başlanmasıyla ise 1.22 μT elde edilirken; sol arka yolcu gövde hizasında, araç çalışır haldeyken 0.81 μT , sol yolcunun bulunduğu zemin bölgesinde ise 4.27 μT 'lık değer ölçülmüştür. Ayrıca, 20 km/saat sabit hızda seyir halinde, sol arka yolcu gövde bölgesinde 1.27 μT , zemin bölümünde 4.86 μT ; 40 km/saatte sırasıyla 1.30 μT ve 4.97 μT ; 60 km/saatte ise gövde bölgesinde 1.36 μT , ani yavaşlama anında 2.03 μT ve zeminde 5.7 μT manyetik alan şiddeti tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, aracın farklı iç bölgelerinde ve hız durumlarında meydana gelen manyetik alan durumlarının, araç tasarımının ve çalışma

modlarının etkisini ortaya koymakta, aynı zamanda elektrikli araçların iç ortam etkilerinin değerlendirilmesinde önemli veriler sunmaktadır. Manyetik alanın dalgalanmaları düzenek ve sistemlerdeki elektrik akımının değişimi ile açıklanabilir.



Şekil 4.3: MG LUXURY 4 aracının dinamik ve statik durumda yaydığı araç içi elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Elde edilen veriler, MG Luxury 4 elektrikli araç içerisinde gerçekleştirilen ölçümlerde, sağ ön yolcu koltuğu yakınında ve diğer belirli noktalarda tespit edilen manyetik alan şiddeti değerlerinin, genel halk için belirlenen ICNIRP ve WHO limitleri ile karşılaştırıldığında düşük olduğu değerlendirilmiştir. ICNIRP'nin 50/60 Hz frekans bandı için genel halka yönelik maruziyet sınırının yaklaşık 200 μT olarak tanımlanması dikkate alındığında, iç mekanda maksimum 20 μT 'yı aşan ölçümlerin ise (şarj ünitesi ile batarya arasındaki bağlantıyı barındıran bölgede) ICNIRP verilerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, WHO tarafından da desteklenen mevcut bulgular, kısa süreli ve düşük şiddetli elektromanyetik alan maruziyetlerinin sağlık üzerinde akut bir etki oluşturmadığını belirtirken, çocukların ve hamile kadınların uzun süreli maruziyetinden ortaya çıkabilecek sağlık sorunları ile ilgili ilişkilendirilebilecek çocukluk çağı kanseri gibi durumlar açısından hassas alt grupların değerlendirilmesine ilave dikkat gösterilmesi gerekliliğini vurgulanmaktadır. Bu çerçevede, elde edilen manyetik alan verilerinin, mevcut uluslararası güvenlik standartlarına göre güvenli sınırlar içerisinde kalmasına rağmen, özellikle hassas nüfus gruplarının maruziyetlerinin uzun vadedeki etkilerinin net olarak ortaya konulabilmesi adına, ileri düzey epidemiyolojik ve fizyolojik araştırmalara ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır.

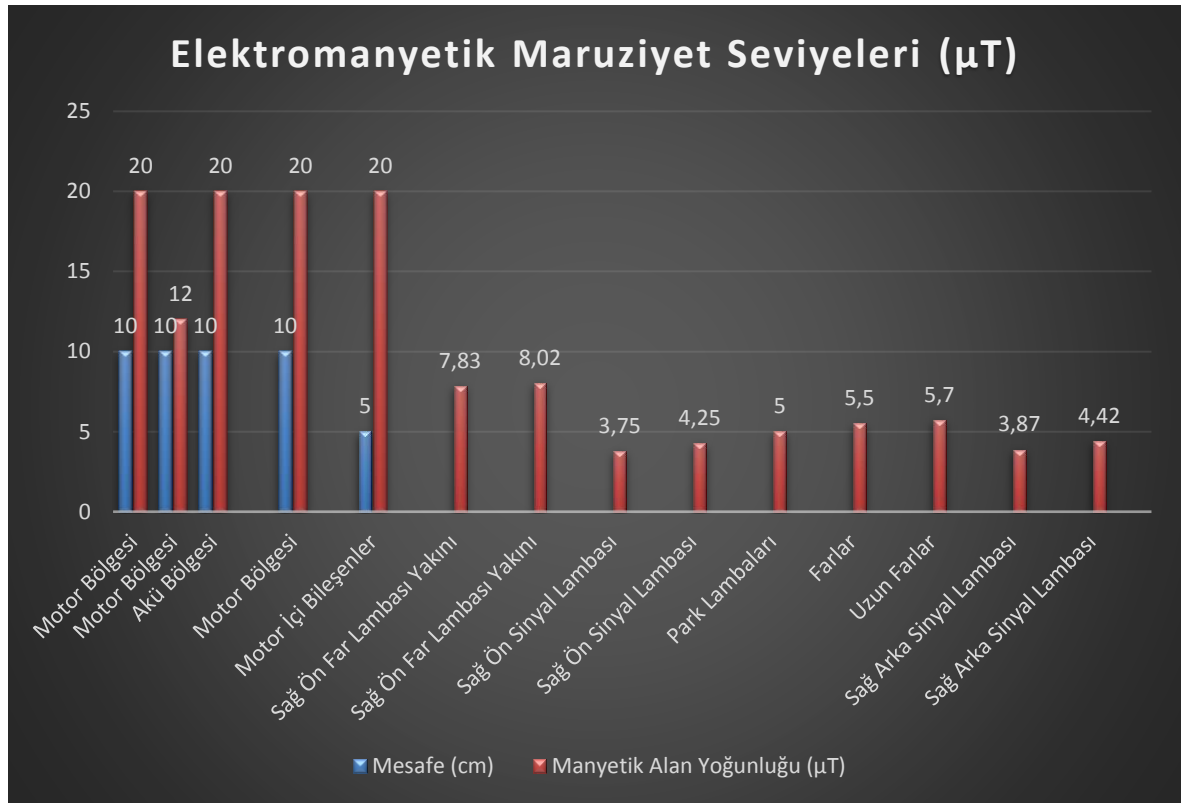


Şekil 4.4: Mg Luxury 4 aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.2. 2023 Toyota Corolla Multidrive S aracında yapılan ölçümler:

2023 Toyota Corolla Multidrive S, model aracın kaput bölgesinde yapılan manyetik alan ölçümlerinde, motor çalışma başlangıcında 10 cm mesafede 20 μ T seviyesinde elektromanyetik maruziyet seviyesi tespit edilmiştir. Motorun kararlı çalışma moduna geçişiyle bu değerin 12 μ T'ya düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak akü bölgesine 10 cm yakınlıkta manyetik alan şiddetinin tekrar 20 μ T'yı aştığı ve motor bölgesinde de 10 cm mesafede 20 μ T seviyesinde benzer bir maruziyetin kaydedildiği belirlenmiştir. Motor içi bileşenlere 5 cm mesafede manyetik alan yoğunluğunun 20 μ T seviyesinde sabit kaldığı görülmüştür. Aracın sağ ön bölgesinde, far lambası yakınında temel manyetik alan şiddeti 7,83 μ T olarak ölçülürken, sinyal aktif edildiğinde bu değer 8,02 μ T'a yükselmiştir. Sağ ön

sinyal lambası bölgesinde sinyal kapalıyken 3,75 μ T, aktifken 4,25 μ T ölçülmüş; park ve aydınlatma sistemleri devreye alındığında elektromanyetik maruziyet seviyelerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir (park lambaları: 5 μ T, farlar: 5,5 μ T, uzun farlar: 5,7 μ T). Sağ arka sinyal bölgesinde ise sinyal kapalıyken 3,87 μ T, aktifken 4,42 μ T değerleri kaydedilmiştir. Araç gövdesinin sağ tarafında, far ve sinyal harici bölgelerde anlamlı elektromanyetik maruziyet seviyeleri tespit edilmemiştir. Bu sonuçlar, elektrikli bileşenlerinin manyetik alan dağılımını doğrudan etkilediğini ve maruziyet sınır değerleri açısından kritik bölgelerin belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5: Toyota Corolla Multidrive S aracının statik durumda araç dışı yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

araçta sol arka sinyal lambasının bulunduğu nokta ve çevresindeki manyetik alan yoğunlukları incelenmiş; sol arka sinyal lambası bölgesinde 20 μ T, bagajın sol arka bölümünde de yine 20 μ T olarak ölçülmüştür. Bagajın sağ tarafında 2,02 μ T, orta bölümünde ise 7,02 μ T değerleri tespit edilmiştir. Aracın sol kapı bölgesinde 2,03 μ T, zemin bölümünde 12,05 μ T manyetik akı yoğunluğu kaydedilirken, sürücü bölgesindeki ana dikme bölümünde ve zeminde 20 μ T seviyesinde ani artışlar gözlemlenmiştir. Sürücü koltuğu yüzeyinde 3,63 μ T, merkezi dokunmatik ekran üzerinde 4,70 μ T, kablosuz şarj istasyonunda 7,54 μ T ölçülmüş; sürücü bölgesinin zemin tarafında yeniden 20 μ T’lik bir maruziyetin

olduğu belirlenmiştir. Sağ yolcu tarafında 0,64 μT , vites çevresinde 4,45 μT değerleri elde edilmiş, sol arka yolcu bölgesinde 4,74 μT , sol arka zemin bölgesinde 11,04 μT ; sağ arka yolcu bölgesinde 0,95 μT ve zemininde 0,78 μT manyetik akı yoğunlukları kaydedilmiştir. Araç gövdesinin sağ tarafında, far ve sinyal harici bölgelerde kayda değer bir elektromanyetik maruziyet seviyesi tespit edilmemiştir. Bu bulgular, araç içindeki farklı yapı ve elektronik bileşen konumlarının manyetik alan dağılımını doğrudan etkilediğini ve özellikle sürücü bölmesi ile bagaj alanındaki kritik maruziyet noktalarının belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, ölçülen manyetik alan yoğunluklarındaki artışların, söz konusu bölgelerdeki kablolama düzeni ve güç dağıtım hatlarının konfigürasyonu ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür.

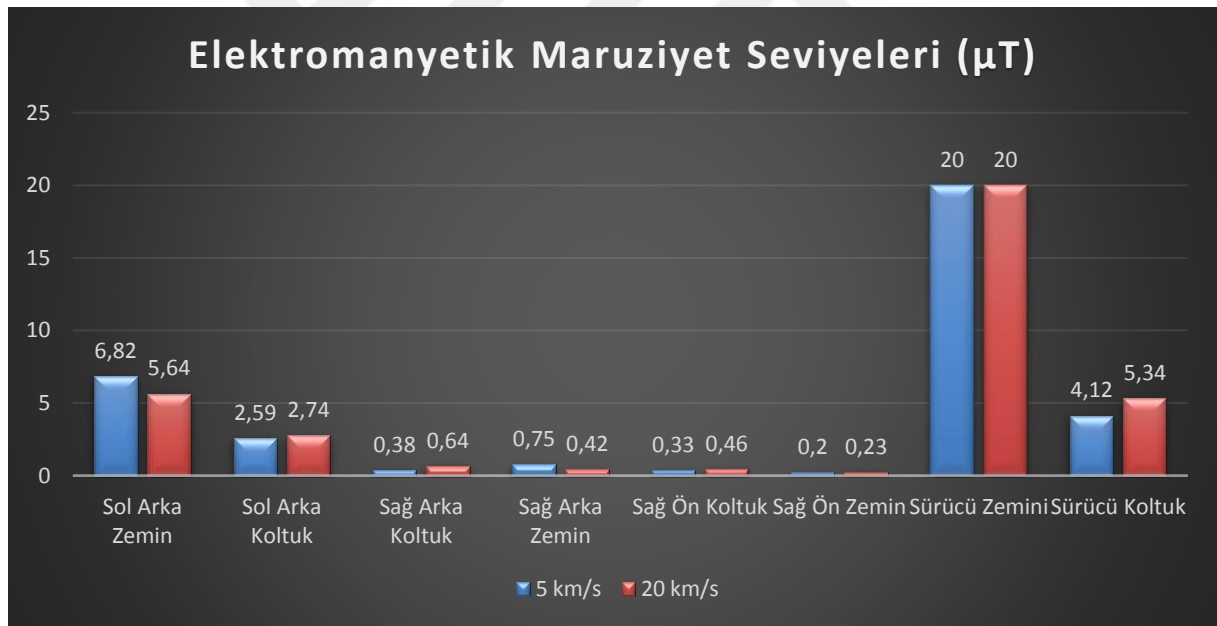


Şekil 4.5: Toyota Corolla Multidrive S aracının statik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Araç içi manyetik alan ölçümleri, hızın artışına bağlı olarak oturma ve zemin bölgelerinde farklı dinamikler sergilemiştir. 5 km/s hızda, sol arka zemin bölgesinde en yüksek değer olan 6,82 μT ölçülürken, aynı bölgenin yolcu koltuğunda 2,59 μT , sağ arka yolcu koltuğunda 0,38 μT ve zemininde 0,75 μT olarak kaydedilmiştir. Ön yolcu koltuğununda 0,33 μT , zemininde 0,20 μT 'ye ulaşırken, sürücü bölgesinde zemin 20 μT , koltuk ise 4,12 μT seviyesinde bulunmuştur. Hız 20 km/s'ye çıkarıldığında, sol arka zeminde 5,64 μT 'ye gerileme gözlenmiş, yolcu koltuğu değeri ise 2,74 μT 'ye hafifçe artmıştır. Sağ arka yolcu koltuğunda oturma bölgesindeki manyetik alan 0,64 μT 'ye; zemin bölgesi 0,42 μT 'ye

yükselmiş; sağ ön koltuk ve zeminde sırasıyla 0,46 μ T ve 0,23 μ T; sürücü zemini yine 20 μ T, oturma bölgesi ise 5,34 μ T olarak ölçülmüştür.

Bu bulgular, aracın hareket hızının elektromanyetik maruziyet seviyelerinin profiline doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Yüksek hızda ön yolcu ve sürücü oturma bölgelerindeki artışlar, araç içi elektrik tüketen bölgelerinde (motor, inverter ve güç elektroniği üniteleri) daha yoğun akım geçişine maruz kalmasından kaynaklanabilir. Buna karşın sol arka zemin bölgesindeki azalmanın, metalik yapının veya koltuk altı bağlantı kablolarının elektromanyetik maruziyet seviyelerini kısmen sönmülmesiyle açıklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, sürücü zemini sabit 20 μ T değeri, araç altı batarya paketinin konumlandırılmasının yüksek bir manyetik alan kaynağı oluşturduğuna işaret etmektedir. Elde edilen veriler; elektrikli araçlarda hız, iç manyetik alan dağılımı ve yolcu maruziyeti arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, ileri dönemde elektromanyetik maruziyet seviyelerini azaltmaya yönelik tasarım ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) önlemlerinin geliştirilmesine kaynak olacaktır.

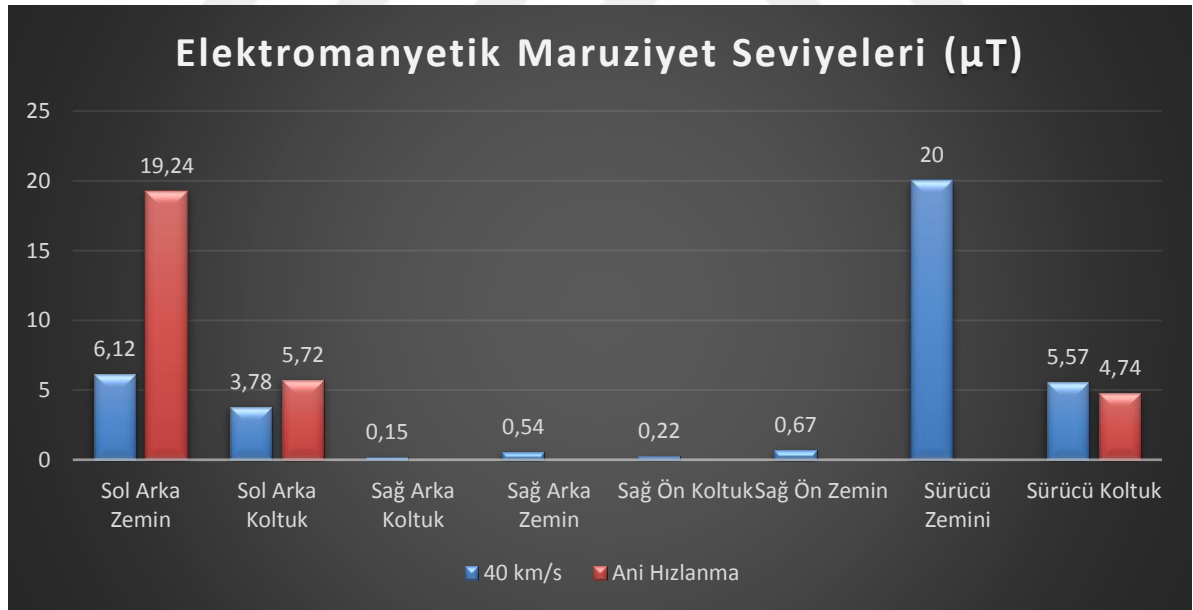


Şekil 4.6: Toyota Corolla Multidrive S aracının dinamik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

40 km/s hız koşulunda elde edilen manyetik alan değerleri, aracın iç bölümlerindeki dağılımın hızla ilişkisinin devam ettiğini göstermektedir. Sol arka zemin bölgesinde 6,12 μ T'ye azan değerler gözlemlenirken, yolcu koltuğu bölgesinde 3,78 μ T'ye yükselen; sağ arka yolcu koltuğunda 0,15 μ T ve zemin bölgesinde 0,54 μ T ölçülmüştür. Sağ ön yolcu koltuğu oturma bölgesinde 0,22 μ T, zemin bölgesinde ise 0,67 μ T'ye ulaşmıştır. Sürücü

alanında, zemin bölgesi 20 μT seviyesinde sabit kalırken, koltuk bölgesinde 5,57 μT olarak tespit edilmiştir. Bu veriler, öndeki yolcu ve sürücü konumundaki manyetik alanın yüksek hızlarda artış eğiliminde olduğunu; arka koltuk ve zemin bölgelerinde ise araç içi yapısal yalıtımın etkisiyle daha karmaşık bir değişim profili sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ani hızlanma sırasında ölçülen değişimler, elektrikli araç bileşenlerinin dinamik akım geçişlerindeki ani artışların manyetik alan değerlerine doğrudan yansıdığını göstermektedir. Sol arka zemin bölgesinde olağan 6,82 μT 'den 19,24 μT 'ye çıkan değer, bu bölgedeki kablo demetleri ve batarya bağlantılarının ani yük altındaki manyetik alan yoğunluğunu belirgin düzeyde artırdığını değerlendirilmektedir. Aynı şekilde sol arka yolcu koltuğu bölgesindeki değer 2,59 μT 'den 5,72 μT 'ye, sürücü koltuğu bölgesindeki alan ise 4,12 μT 'den 4,74 μT 'ye yükselmiş; bu da ateşleme sistemi ve inverter ünitesinin geçici kısa süreli tepe akımlarının yolcu bölgesine yakın noktalarda belirgin alan artışlarına yol açtığını işaret etmektedir. Bu bulgular, ani yük değişimlerinin iç mekân manyetik alan dağılımı üzerinde hem genlik hem de lokalizasyon bakımından kritik etkiler oluşturduğu ve EMC tasarım kriterlerinin bu dinamik senaryoları da kapsayacak şekilde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6: Toyota Corolla Multidrive S aracının ani hızlanma/frenleme durumunda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

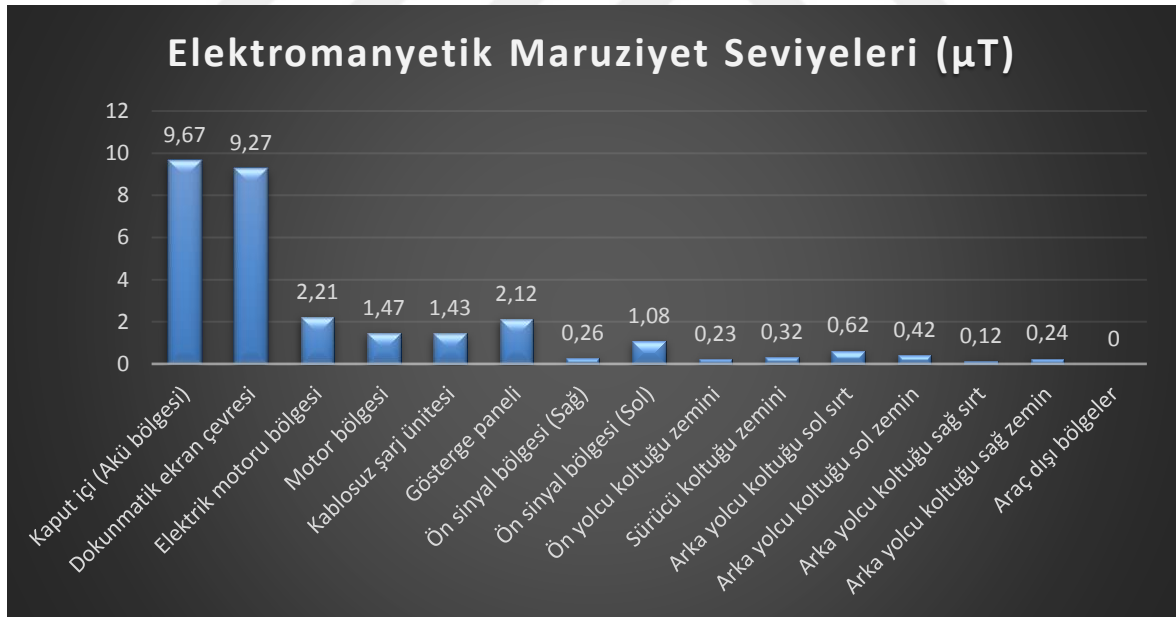


Şekil 4.7: Toyota Corolla Multidrive S aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.3. Toyota Corolla Cross Hibrit aracında yapılan ölçümler:

Toyota Corolla Cross Hibrit 2023, sabit durumda çalıştırılırken çeşitli iç ve dış bölge manyetik alan yoğunlukları mikrotresla (μT) cinsinden ölçülmüştür. Bulgulara göre en yüksek manyetik alan değeri, araç kaputu altında bulunan akü bölgesinde $9,67 \mu\text{T}$; bunu dokunmatik ekran çevresindeki $9,27 \mu\text{T}$ ve elektrik motorunun yer aldığı bölgedeki $2,21 \mu\text{T}$ izlemiştir. Motor bölgesinde $1,47 \mu\text{T}$, kablosuz şarj ünitesinde $1,43 \mu\text{T}$, gösterge panelinde $2,12 \mu\text{T}$ ölçülürken; ön sinyal bölgelerinde sağda $0,26 \mu\text{T}$, solda $1,08 \mu\text{T}$; ön yolcu koltuğu

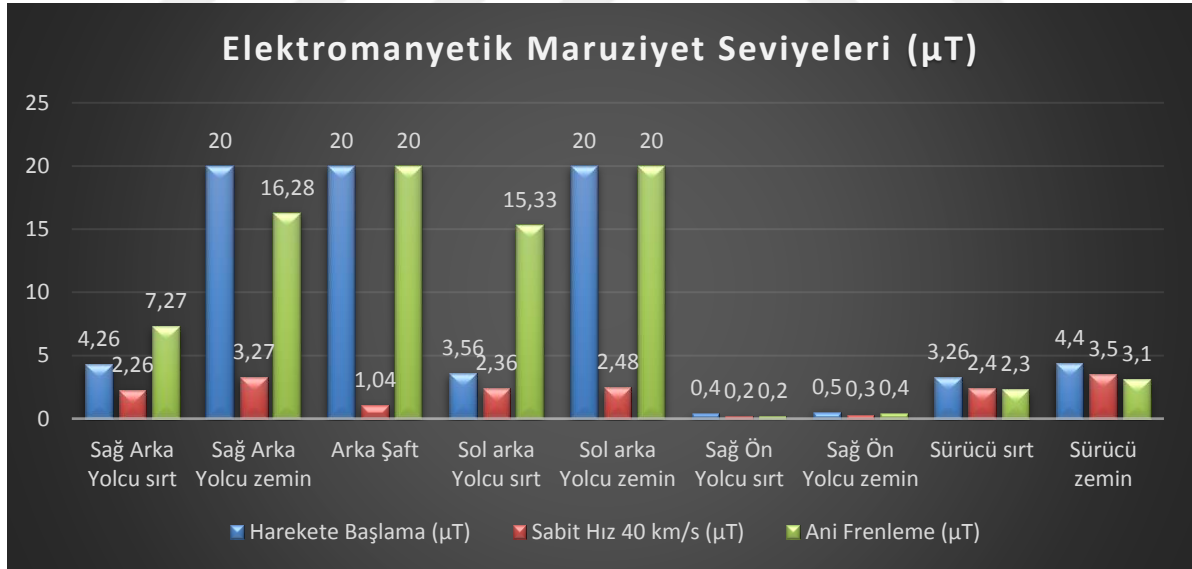
zeminde 0,23 μT , sürücü koltuğu zeminde 0,32 μT aralığında değerler kaydedilmiştir. Arka yolcu koltuklarında ise sol tarafta 0,62 μT (koltuk sırtı) ve 0,42 μT (zemin), sağ tarafta 0,12 μT (koltuk sırtı) ve 0,24 μT (zemin) ölçülmüştür. Araç dışındaki tüm inceleme noktalarında ise ölçülebilir manyetik alan artışı gözlenmemiştir. Akü ve kontrol elektroniğinin yüksek akım geçişine bağlı olarak oluşturduğu alan kuvvetli “sıcak noktalar” (hotspot) meydana getirdiği; dokunmatik ekran ve yüksek gerilim hatları gibi bileşenlerin de lokal olarak manyetik alan yoğunluğunu artırdığı anlaşılmaktadır. Ölçülen maksimum değerler, literatürde bildirilen elektrikli araç maruziyet sınırlarının (örneğin ICNIRP’nin 100 μT referans değeri) oldukça altında kalmakla birlikte, sürücü ve yolcuların uzun süreli konumlanma bölgelerinde (özellikle akü ve ekran civarı) manyetik alan maruziyetinin diğer bölgelere kıyasla çok daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, hibrit ve elektrikli araç tasarımlarında; özellikle yüksek akım çeken bölgelerin yerleşimi, ekran ve kablo yollarının gömülme derinliği gibi faktörlerin optimize edilmesi, kabin içi manyetik alanın daha da düşürülmesi açısından önem taşımaktadır.



Şekil 4.8: Toyota Corolla Cross Hibrit aracının statik durumda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Aracın hareket esnasındaki dinamik manyetik alan dağılımı, hem hızlanma (harekete başlama) hem de frenleme koşullarında yolcu kabinindeki farklı noktalarda mikrottesla (μT) cinsinden ölçülmüştür. İlk harekete başlama anında en yüksek alan şiddeti, hem sağ arka yolcu koltuğu zemini hem de arka şaft bölgesinde 20 μT olarak kaydedilmiş; koltuk sırtında

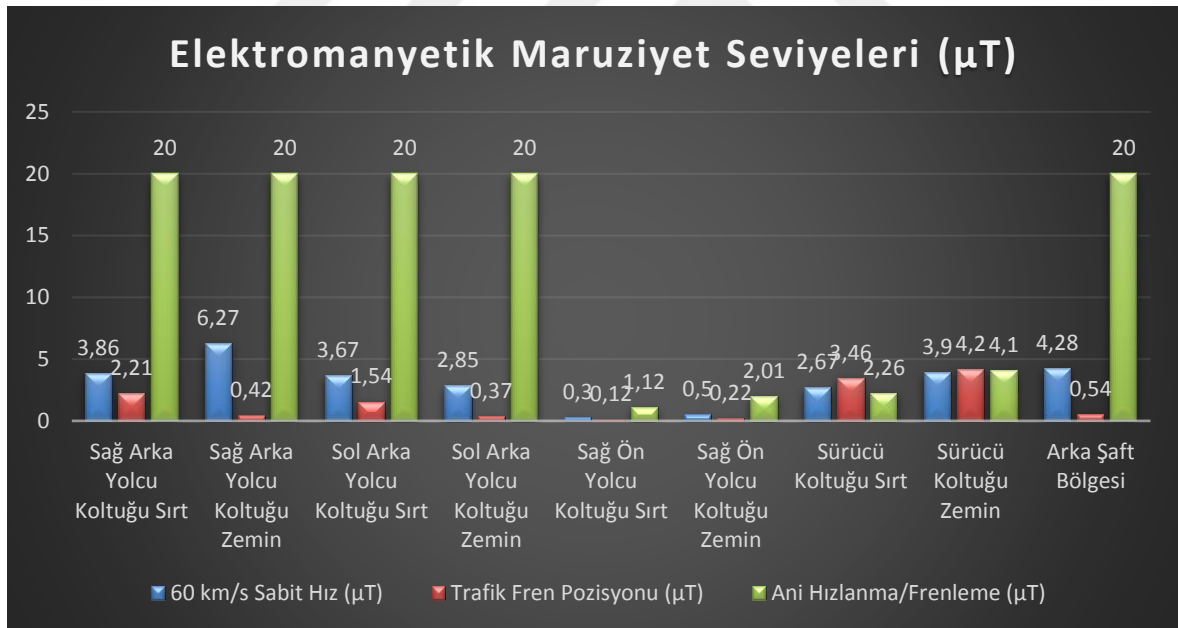
ise sırasıyla 4,26 μT ölçülmüştür. Frenleme anında bu değerler şaft bölgesinde 9,24 μT ve sağ arka zeminde 7,22 μT 'ye düşerken, koltuk sırtında 2,04 μT 'ye gerilemiştir. Aynı koşullarda sol ön yolcu koltuğunda 3,56 μT (koltuk sırtı) ve 20 μT (zemin), sağ ön yolcu koltuğunda 0,48 μT (koltuk sırtı) ve 0,52 μT (zemin), sürücü koltuğunda ise 3,26 μT (koltuk sırtı) ve 4,42 μT (zemin) değerleri tespit edilmiştir. Araç 40 km/s sabit hızda ilerlerken ölçülen manyetik alanlar, genel olarak hızlanma anına kıyasla belirgin biçimde düşük seyretmiş; sağ arka zeminde 3,27 μT , şaft bölgesinde 1,04 μT , sol arka zeminde 1,86 μT ve sol ön koltukta 1,78 μT 'ye kadar inmiştir. Sabit hızda ani frenleme uygulandığında ise sağ arka koltuk sırtında 7,27 μT , sağ ön yolcu bölgesinde 0,24 μT (koltuk sırtı) ve 0,36 μT (zemin), sürücü koltuğunda 2,24 μT (koltuk sırtı) ve 3,34 μT (zemin) değerleri yeniden yükselme göstermiştir. Yüksek akım darbelerinin; özellikle motoru-şaft birleşimindeki geçiş dirençlerinden ve batarya çıkış hatlarından kaynaklanan “hotspot” etkisiyle dinamik koşullarda kısa süreli fakat yüksek manyetik alan zirveleri oluşturduğu; sabit hızda ise bu etkilerin büyük ölçüde dengelendiği vurgulanabilir. Ayrıca frenleme sırasında rejeneratif sistemin geri beslemesi nedeniyle şaft ve zemin bölgelerinde orta düzeyde ek manyetik alan artışları gözlenmesi, sürücü ve yolcu güvenliği açısından bu bölgelere yönelik ek gölgeleme veya izolasyon malzemesinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.9: Toyota Corolla Cross Hibrit aracının dinamik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Aracın farklı dinamik sürüş koşullarında kabin içi manyetik alan dağılımı mikrottesla (μT) cinsinden incelenmiştir. Araç 60 km/s sabit hızla ilerlerken sağ arka yolcu koltuğu sırtında 3,86 μT , zeminde 6,27 μT ; sol arka yolcu koltuğu sırtında 3,67 μT , zeminde 2,85 μT ; sağ

ön yolcu koltuğu sırtında 0,32 μ T, zeminde 0,46 μ T; sürücü koltuğu sırtında 2,67 μ T ve zeminde 3,84 μ T ölçülmüştür. Trafik içinde dur-kalk gerektiren fren pozisyonunda ise sol arka koltukta 1,54 μ T; sağ arka koltuğun sırtında 2,21 μ T, zeminde 0,42 μ T; arka şaft bölgesinde 0,54 μ T; kabin sol taraf zeminde 0,48 μ T değerleri kaydedilmiştir. Ani hızlanma ve ani frenleme senaryolarında, sol ve sağ arka yolcu koltukları ile zemin ve şaft bölgelerinde zirve 20 μ T'ye kadar yükselirken; sağ ön yolcu koltuğunda sırt 1,12 μ T, zemin 2,01 μ T; sürücü koltuğunda sırt 2,26 μ T ve zeminde 4,12 μ T değerlerine ulaşılmıştır. Tartışma aşamasında, sabit hızda ölçülen değerlerin orta seviyede seyretmesi; trafik frenlemelerinde ise rejeneratif frenleme ve düşük akım darbelerinin sınırlı artışlara neden olması dikkat çekmektedir. Ani hızlanma ve frenleme koşullarında ortaya çıkan 20 μ T'ye varan kısa süreli “hotspot” zirvelerinin, özellikle motor-şaft birleşimindeki geçiş dirençleri ve batarya geri besleme devrelerindeki yüksek akım darbelerinden kaynaklandığı; bu nedenle hibrit araç tasarımında şaft hattı ile akü çıkış hatlarının gölgelendirilmesi ve kritik bileşenlerin yerleşim optimizasyonunun sürücü ile yolcuların maruziyetini azaltmak açısından kritik olduğu vurgulanmalıdır.



Şekil 4.10: Toyota Corolla Cross Hibrit aracının dinamik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.



Şekil 4.11: Toyota Corolla Cross Hibrit aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.4. TOGG TX10 aracında yapılan ölçümler:

TOGG TX10 model aracın çalışır durumda gerçekleştirilen elektromanyetik maruziyet seviyeleri ölçümleri, ön kabin bölgesinde belirgin bir elektromanyetik maruziyetin olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek değer $20 \mu\text{T}$ ile elektrikli bileşenlerin (batarya yönetim sistemi kabloları ve güç elektroniği üniteleri) yoğunlaştığı sağ ön torpido bölgesinde kaydedilirken, multimedya sistemlerinin konumlandığı ekran çevresinde $6,15\text{--}7,24 \mu\text{T}$ aralığında orta seviyeli manyetik alanlar tespit edilmiştir. Ön yolcu koltuğu zemininde $5,82 \mu\text{T}$, koltuk üstünde $2,12 \mu\text{T}$, sürücü bölgesinde (direksiyon: $1,82 \mu\text{T}$; zemin: $2,46 \mu\text{T}$) ve kablosuz şarj ünitesinde $2,87 \mu\text{T}$ ölçülen değerler, bu alanlardaki manyetik aktivitenin bileşenlerin dağılımıyla ilişkili olduğunu desteklemektedir. Buna karşılık, arka yolcu koltuklarında ve zemin bölgelerinde ($0,06\text{--}0,14 \mu\text{T}$) ölçülen değerlerin çevresel arka plan seviyesine yakın olması, manyetik alanların ön kabinle sınırlı kaldığını ve aracın dış yapısında sinyal bölgeleri

dahil kayda değer bir maruziyet gözlemlenmemesi, tasarımın elektromanyetik izolasyon açısından etkinliğini yansıtmaktadır.

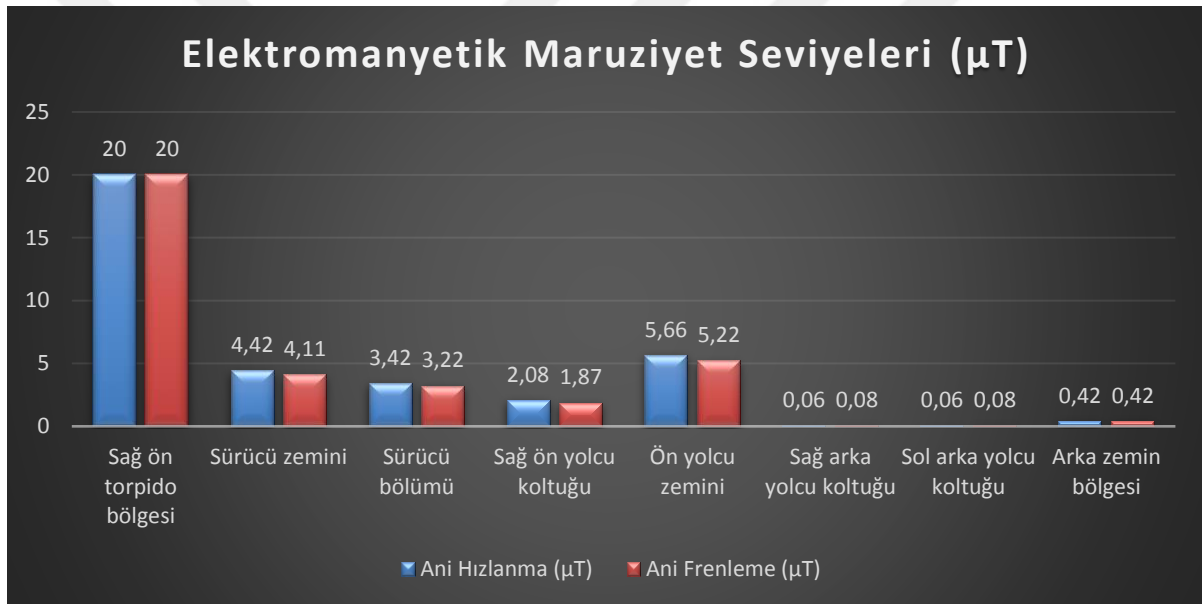


Şekil 4.12: TOGG Tx10 aracının statik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Tüm ölçümler, ICNIRP'in 50 Hz için belirlediği 200 μ T halk sağlığı limitinin altında kalarak akut risk taşımamakla birlikte, özellikle torpido ve ekran çevresindeki lokalize yüksek değerlerin kronik maruziyet bağlamında değerlendirilmesi önerilmektedir. Elde edilen veriler, elektrikli araç literatüründe motor/torpido bölgelerinde 10–30 μ T, kabin içinde 1–10 μ T aralığında bildirilen değerlerle uyumludur. Bu sonuçlar, insan-bilgisayar etkileşiminin yoğun olduğu bölgelerde elektromanyetik maruziyet seviyelerinin minimize edilmesi için yerleşim stratejilerinin ve ekran/enformasyon sistemlerinin optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

Ani hızlanma ve frenleme dinamikleri sırasında gerçekleştirilen manyetik alan ölçümleri, elektromanyetik maruziyet seviyelerinin bölgesel dağılımının operasyonel koşullardan minimal düzeyde etkilendiğini göstermektedir. Ani hızlanma durumunda, en yüksek değer sağ ön torpido bölgesinde sabit 20 μ T olarak kaydedilirken, sürücü zemin bölgesi 4,42 μ T, sürücü bölümü 3,42 μ T, ve sağ ön yolcu koltuğu 2,08 μ T seviyelerinde ölçülmüştür. Ani frenleme sırasında ise aynı torpido bölgesindeki değer korunurken (20 μ T), sürücü zemininde hafif bir düşüş (4,11 μ T) ve sürücü bölümünde 3,22 μ T gözlemlenmiştir. Ön yolcu zeminindeki değerlerin hızlanmada 5,66 μ T, frenlemede 5,22 μ T olarak ölçülmesi, bu bölgedeki manyetik aktivitenin kısmen dinamik süreçlerle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Arka kabinde ise hem hızlanma hem frenleme senaryolarında manyetik alan seviyeleri 0,06–0,42 μT aralığında kalarak çevresel arka plan değerlerine yakın bir değer gözlemlenmiştir. Özellikle arka yolcu koltuklarının her iki durumda da 0,06–0,08 μT gibi son derece düşük seviyelerde kalması, elektromanyetik maruziyet seviyelerin ön kabinle sınırlı olduğunu ve arka bölgelerde elektromanyetik izolasyonun etkinliğini desteklemektedir. Tüm ölçümler, ICNIRP’in 50 Hz için 200 μT olan halk sağlığı limitinin altında kalmakla birlikte, sürücü zemin ve torpido bölgelerindeki lokal yüksek değerlerin (4,42 μT ve 20 μT) uzun vadeli maruziyet etkilerinin araştırılması önerilmektedir. Bu bulgular, elektrikli araçlarda manyetik alan dağılımının dinamik sürüş koşullarında bile ön kabindeki elektronik bileşenlerin konumuna bağlı olarak şekillendiğini ve literatürdeki 10–30 μT (ön bölgeler) ile 1–5 μT (sürücü alanı) aralıklarıyla tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.



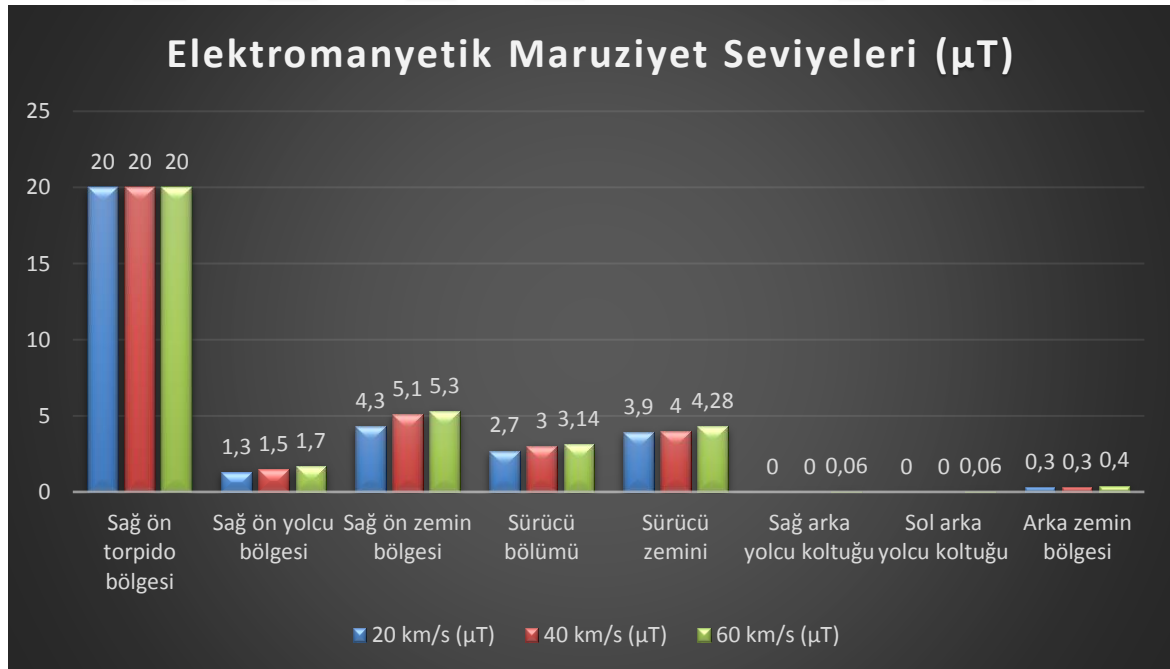
Şekil 4.13: TOGG Tx10 aracının ani hızlanma/frenleme durumunda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Aracın sabit hız koşullarında gerçekleştirilen manyetik alan ölçümleri, hız artışıyla birlikte ön kabindeki belirli bölgelerde elektromanyetik maruziyet seviyelerinin kademeli olarak yükseldiğini ortaya koymuştur. Sağ ön torpido bölgesi, tüm hız aralıklarında sabit 20 μT değeriyle en yüksek manyetik aktiviteyi sergilerken, bu durum bölgedeki elektrikli bileşenlerin (güç elektroniği, batarya kablolaması) sürekli çalışma prensibiyle açıklanabilir. Sağ ön yolcu koltuğunda manyetik alan, hızla doğrusal bir ilişki göstererek 20 km/s'de 1,26 μT , 40 km/s'de 1,47 μT ve 60 km/s'de 1,72 μT olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, sağ ön zemin bölgesindeki değerler 20 km/s'de 4,26 μT 'den 60 km/s'de 5,24 μT 'ye yükselmiş, bu

da motor ve batarya sistemlerinden kaynaklanan elektromanyetik emisyonların hızla artan güç talebine bağlı olarak yoğunlaştığını düşündürmektedir.

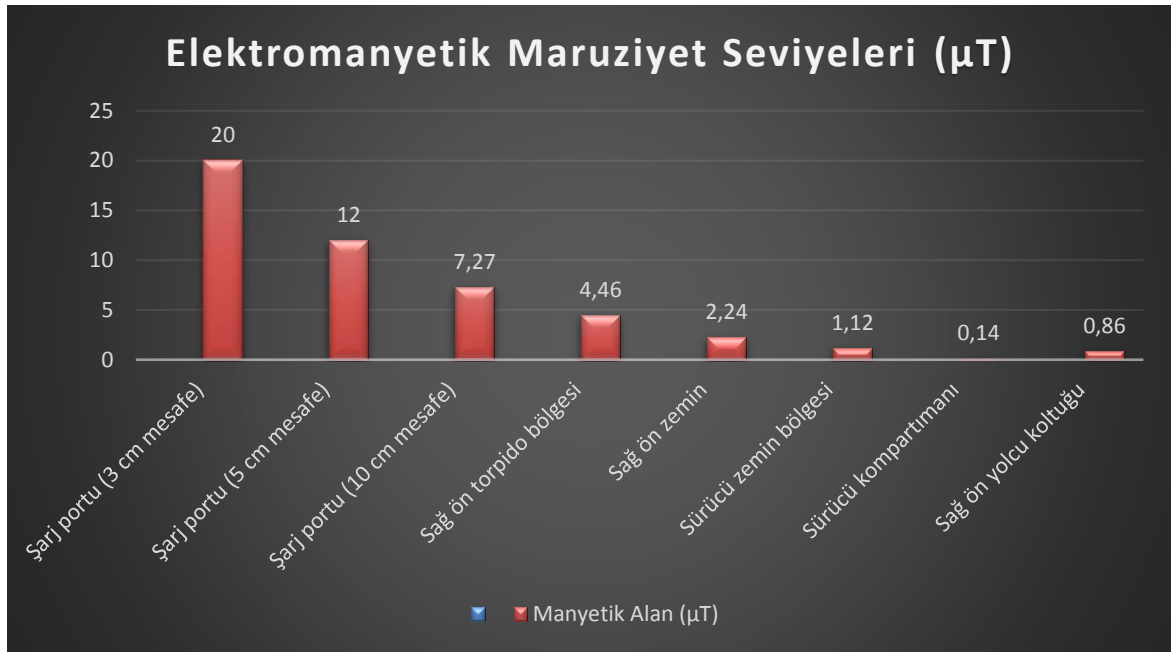
Sürücü bölümünde manyetik alan seviyeleri, hız artışıyla paralel olarak zemin bölgesinde 20 km/s'de 3,87 μ T'den 60 km/s'de 4,28 μ T'ye, sürücü kompartımanında ise 2,72 μ T'den 3,14 μ T'ye yükselmiştir. Bu artış, sürücü altındaki güç dağıtım sistemleri ve direksiyon mekanizmasının dinamik yüklenme profiliyle ilişkilendirilebilir. Buna karşılık, arka yolcu koltuklarında (0,03–0,06 μ T) ve arka zemin bölgelerinde (0,28–0,42 μ T) ölçülen değerler, çevresel arka plan seviyelerine yakın kalarak aracın arka kabininde manyetik izolasyonun etkinliğini doğrulamaktadır.

Tüm hız senaryolarında ölçülen maksimum değerler, ICNIRP'in 50 Hz için 200 μ T olan halk sağlığı limitinin altında kalmakla birlikte, ön kabindeki artan elektromanyetik maruziyet seviyelerinin kronik maruziyet bağlamında değerlendirilmesi önerilmektedir. Elde edilen veriler, elektrikli araçlarda sabit hızın manyetik alan şiddeti üzerinde ölçülebilir ancak sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ve literatürdeki 10–30 μ T (ön bölgeler) ile 1–5 μ T (sürücü alanı) aralıklarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, özellikle yüksek hızlı sürüşlerde ön kabindeki elektronik bileşenlerin yerleşim optimizasyonunun manyetik maruziyeti azaltmada kritik rol oynayabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4.14: TOGG Tx10 aracının ani hızlanma/frenleme durumunda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Şarj sürecinde gerçekleştirilen manyetik alan ölçümleri, en yüksek elektromanyetik maruziyet seviyelerinin şarj portu ve güç ünitesi çevresinde lokalize olduğunu ortaya koymuştur. Şarj portuna 3 cm mesafede kaydedilen 20 μT değeri, mesafe arttıkça hızla azalarak 5 cm'de 12 μT ve 10 cm'de 7,27 μT seviyelerine düşmüştür. Bu durum, manyetik alan şiddetinin mesafeyle ters kare ilişkisine uygun olarak azaldığını ve yüksek güçlü DC şarj sistemlerinin karakteristik emisyon profiliyle tutarlılık gösterdiğini işaret etmektedir. Aracın iç mekânında ise sağ ön torpido bölgesi (4,46 μT) ve sağ ön zemin (2,24 μT), batarya ile güç dağıtım sistemlerine yakınlığı nedeniyle nispeten yüksek değerler sergilerken, sürücü zemin bölgesi 1,12 μT , sürücü kompartımanı 0,14 μT ve sağ ön yolcu koltuğu 0,86 μT olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.15: TOGG Tx10 aracının dinamik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Arka kabinde manyetik alan seviyeleri (arka koltuklar: 0,02 μT ; zemin: 0,11 μT), çevresel arka plan değerlerine yakın kalarak, kabin içi elektromanyetik izolasyonun şarj sırasında dahi etkinliğini kanıtlamaktadır. Şarj ünitesine 5 cm mesafede ölçülen 20 μT değeri, bu bölgede teknik personel veya kullanıcılar için geçici maruziyet sınırlarının revize edilmesi gerekliliğini düşündürse de, tüm değerler ICNIRP'in 50 Hz için 200 μT halk sağlığı limitinin altında kalmaktadır. Literatürde elektrikli araç şarj sistemlerinde 15–25 μT (yakın mesafe) ve 1–5 μT (kabin içi) aralığında bildirilen değerlerle uyumlu olan bu bulgular, şarj altyapısı tasarımında manyetik sızıntıyı minimize eden malzeme kullanımının ve güvenlik protokollerinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle şarj portu çevresindeki yüksek lokal

değerler, kronik maruziyet riski taşıyan mesleki gruplar için çalışma prosedürlerinin gözden geçirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

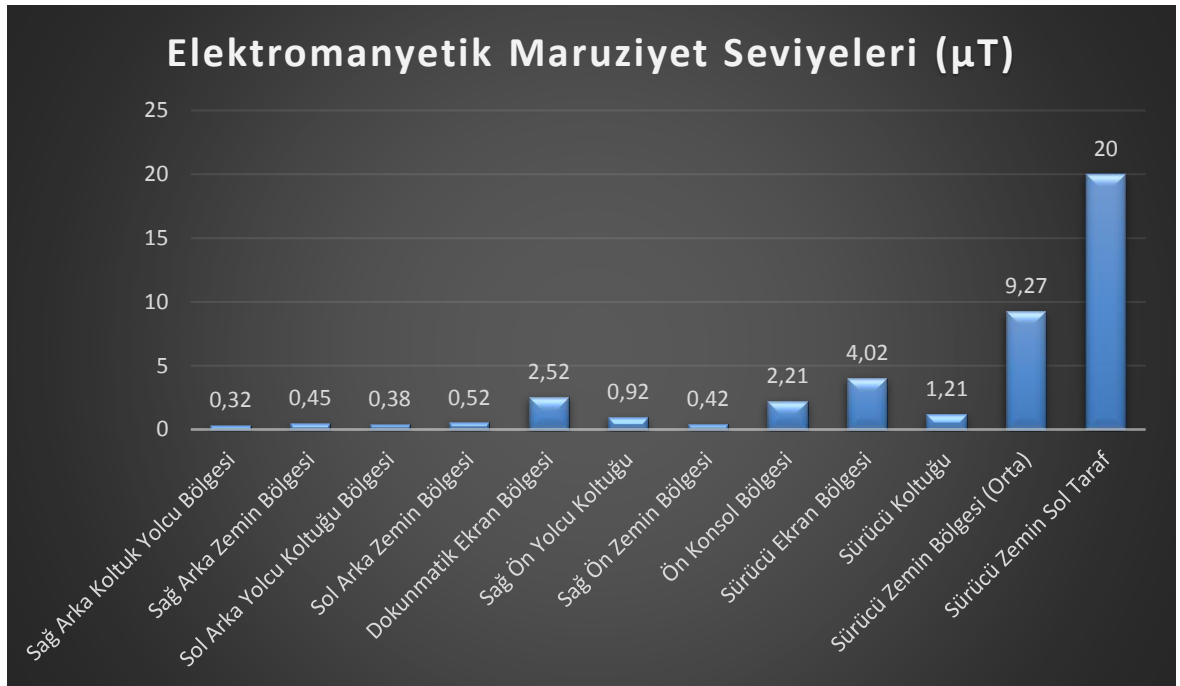


Şekil 4.16: TOGG TX10 aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.5. Kia EV3 aracında yapılan ölçümler:

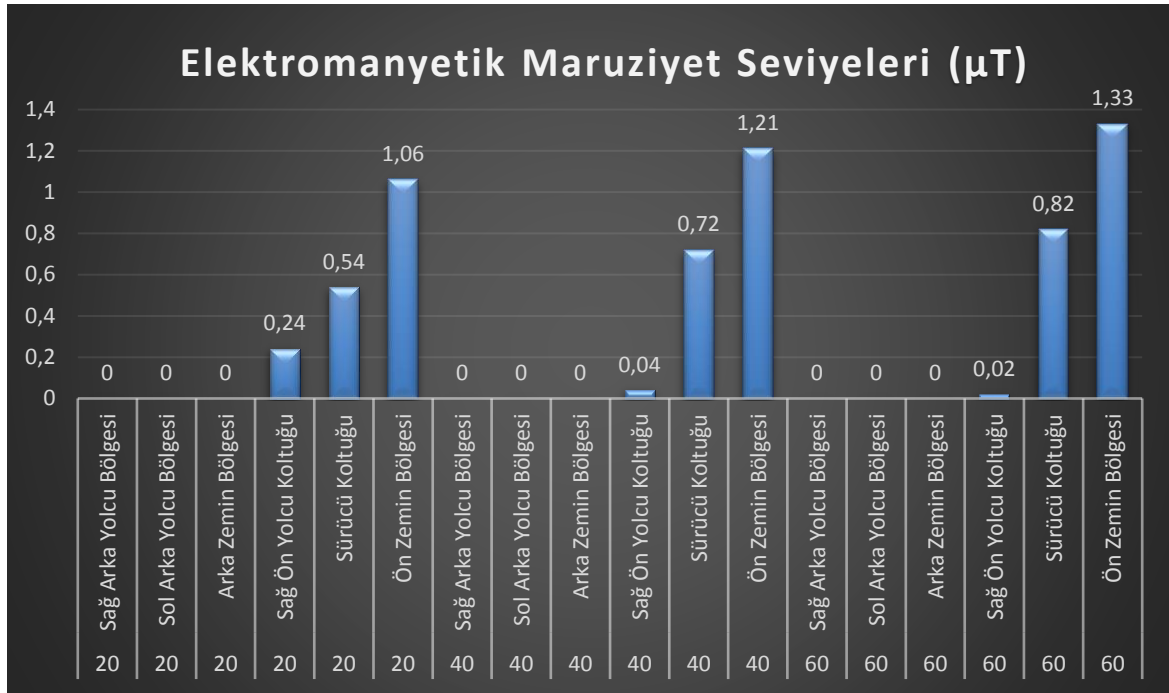
Kia EV3 aracının çalışma halindeyken dış kısmında manyetik alan tespit edilmemiş olması, elektrikli araçların (EV) çevresel elektromanyetik maruziyet seviyeleri açısından avantajlı olabileceğini göstermektedir. Ancak araç içi ölçümlerde, özellikle sürücü zemin sol tarafında

20 μT , sürücü zemininde 9,27 μT ve sürücü ekran bölgesinde 4,02 μT gibi yüksek değerler kaydedilmiştir. Bu artışın temel nedenleri arasında, rejeneratif fren sisteminin dinamik elektrik akımları ve yüksek gerilimli güç kablolarının sürücü bölgesine yakın konumlandırılması yer almaktadır. Diğer bölgelerdeki manyetik alan şiddeti (0,32–2,52 μT) benzinli ve hibrit araçlardaki motor/alternatör kaynaklı değerlerle (0,1–5 μT) benzerlik gösterse de, EV'lerdeki yüksek akım taşıyan bileşenlerin iç mekâna yakınlığı, sürücü pozisyonunda maruziyeti artırabilmektedir. Uluslararası İyonlaştırmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) sınır değeri (100 μT) aşılmamakla birlikte, kronik maruziyetle ilişkili potansiyel biyolojik etkiler belirsizliğini korumaktadır. Rejeneratif sistemin periyodik akım dalgalanmaları ve güç kablolarının yol açtığı lokal manyetik alan yoğunlaşmaları, uzun vadeli sağlık risklerinin değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdır. Bu bulgular, elektrikli araçlarda manyetik alan dağılımının bileşen yerleşimi ve sistem dinamikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymakta olup, tasarım aşamasında kablolama izolasyonu ve kritik bileşenlerin insan temas bölgelerinden uzaklaştırılması gibi optimizasyonların maruziyeti azaltabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, EV'lerin dış elektromanyetik maruziyet seviyelerini minimize etme avantajına rağmen, iç mekândaki yüksek değerlerin kaynaklarının detaylı analizi ve hibrit/benzinli araçlarla kıyaslamalı çalışmaların insan sağlığı üzerindeki etkilerin netleştirilmesi için kritik öneme sahiptir.



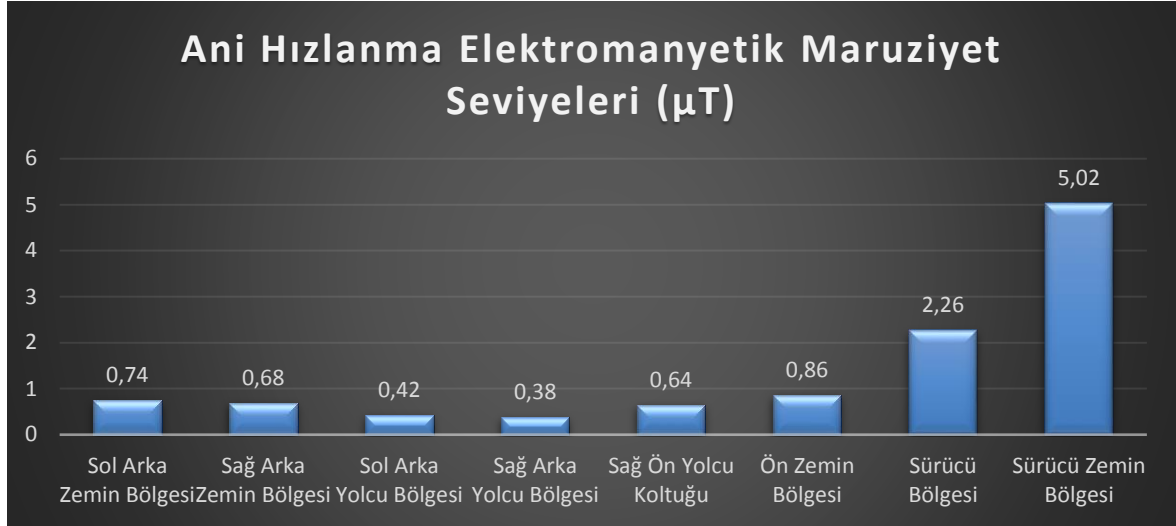
Şekil 4.17: Kia Ev3 aracının statik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Yapılan ölçümlerde aracının 20, 40 ve 60 km/s hızlarındaki manyetik alan dağılımı incelendiğinde, arka yolcu ve zemin bölgelerinde herhangi bir elektromanyetik maruziyete rastlanmamıştır. Ancak ön bölgelerde, hız artışıyla birlikte manyetik alan şiddetinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Örneğin, sürücü koltuk bölgesindeki manyetik alan şiddeti 20 km/s'de $0,54 \mu T$ iken, hız 60 km/s'ye çıktığında $0,82 \mu T$ 'ye yükselmiştir. Benzer şekilde, zemin bölgesindeki değerler $1,06 \mu T$ 'den $1,33 \mu T$ 'ye artış göstermiştir. Bu artışın temel nedeni, hızlanma sırasında bataryadan çekilen gücün ve kablolardan geçen akımın artmasıdır. Yüksek hızlarda elektrik motorunun güç talebinin yükselmesi, kablolarda daha yüksek akım yoğunluğuna ve dolayısıyla manyetik alan şiddetinin artmasına yol açmaktadır. Özellikle sürücü ve zemin bölgelerinde ölçülen yüksek değerler, bu bölgelerdeki güç kablolarının konumlandırılmasıyla doğrudan ilişkilidir. Buna karşılık, sağ ön yolcu koltuk bölgesinde manyetik alan şiddetinin hız artışıyla azalması ($0,24 \mu T \rightarrow 0,02 \mu T$), bu bölgenin ana güç hatlarından uzaklığı veya sistemin enerji dağılımındaki asimetric yapıdan kaynaklanıyor olabilir. Ölçülen tüm değerler, ICNIRP tarafından belirlenen $100 \mu T$ 'lik akut maruziyet sınırının altında kalmakla birlikte, sürücü pozisyonundaki hıza bağlı artışlar, uzun süreli maruziyet durumunda manyetik alanın zamansal değişkenliğinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu bulgular, elektromanyetik maruziyet seviyelerine temel olarak batarya kaynaklı güç tüketimi ve kablolardaki akım artışıyla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Tasarım aşamasında yüksek akım taşıyan kabloların izolasyonunun iyileştirilmesi veya sürücü bölgesinden uzaklaştırılması, maruziyeti azaltmada etkili bir strateji olabilir. Ayrıca, elektrikli araçlardaki manyetik alan dinamiklerinin benzinli ve hibrit araçlardan farklılık gösterdiği düşünüldüğünde, bu tür maruziyet profilinin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin karşılaştırıldığı çalışmalarla desteklenmesi önerilmektedir.

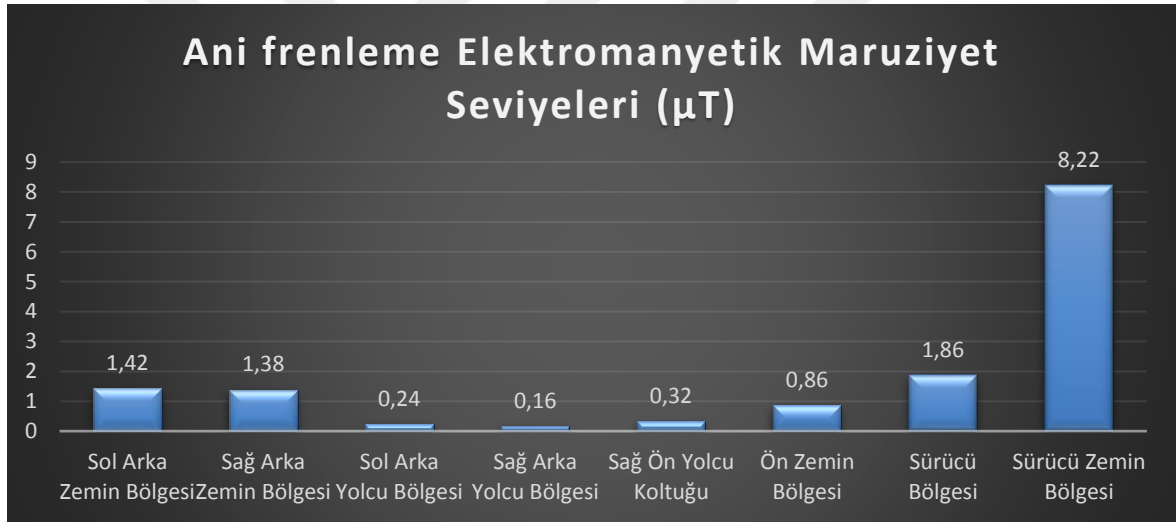


Şekil 4.18: Kia Ev3 aracının dinamik durumda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Yapılan ölçümlerde, ani hızlanma sırasında sol arka zemin bölgesinde 0,74 μT , sağ arka zeminde 0,68 μT , sol arka yolcu koltuğunda 0,42 μT , sağ arka yolcu koltuğunda 0,38 μT , sağ ön yolcu koltuğunda 0,64 μT , ön zemin bölgesinde 0,86 μT , sürücü bölgesinde 2,26 μT ve sürücü zeminde 5,02 μT ölçülmüştür. Frenleme esnasında ise sol arka zeminde 1,42 μT , sağ arka zeminde 1,38 μT , sol arka yolcu koltuğunda 0,24 μT , sağ arka yolcu koltuğunda 0,16 μT , sağ ön yolcu koltuğunda 0,32 μT , ön zemin bölgesinde 0,86 μT , sürücü bölgesinde 1,86 μT ve sürücü zeminde 8,22 μT tespit edilmiştir. Ani hızlanma sırasında bataryadan çekilen gücün hızlanma anındaki pik değerler ve kablolardan geçen akım yoğunluğunun artması; ön ve sürücü bölgesindeki zemine yakın noktalarda (0,86–5,02 μT) daha yüksek manyetik alan şiddetlerinin kaydedilmesine neden olurken, frenleme döneminde rejeneratif sistemde ters yönde akan akımın etkisiyle sürücü zeminde (8,22 μT) ve arka zemin bölgelerinde (1,38–1,42 μT) pik değerler oluşturduğu görülmüştür. Ölçülen tüm değerler, ICNIRP'nin 100 μT 'lik akut maruziyet sınırının altında kalmakla birlikte, hızlanma ve frenleme sırasında manyetik alanın dinamik olarak değişen profile sahip olduğu, zemine ve elektronik ünitelere yakın bölgelerde maruziyetin artabileceği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, yüksek akım taşıyan kabloların izolasyon ve yönlendirmesinin iyileştirilmesi ile sürücü ve ön yolcu bölgesindeki kritik enerji hatlarının ekrana alınması, elektromanyetik maruziyet seviyelerini minimize edilmesinde önemli olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 4.19: Kia Ev3 aracının ani hızlanma durumunda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.



Şekil 4.20: Kia Ev3 aracının ani frenleme durumunda araç içi yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

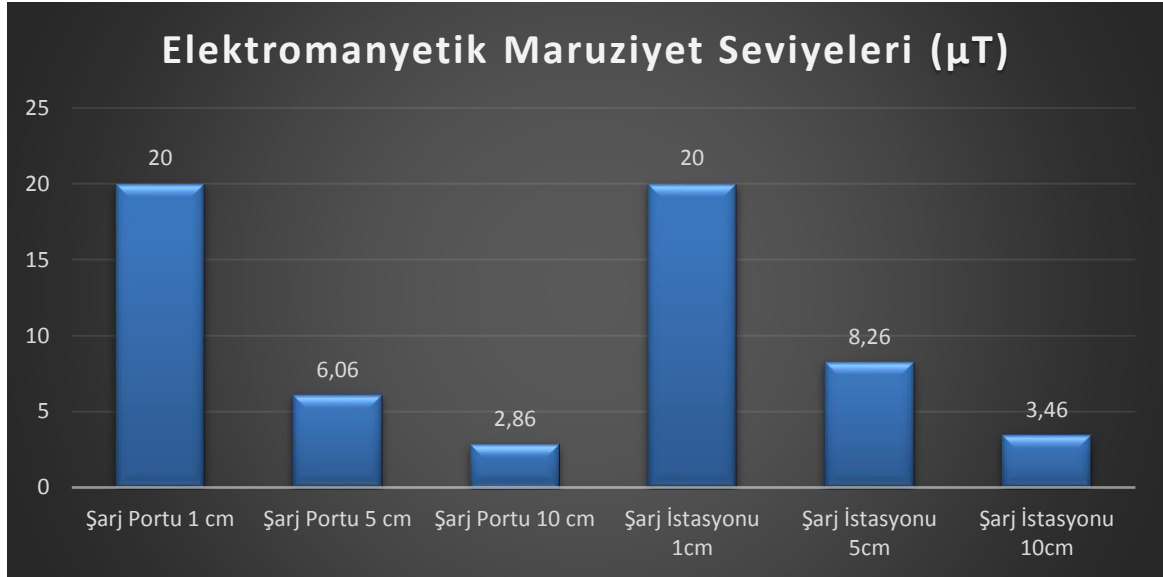


Şekil 4.21: Kia Ev3 aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.6. Seres 3 aracında yapılan ölçümler:

Seres 3 Yapılan ölçümlerde aracının şarj sürecinde manyetik alan şiddetinin mesafeye bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Şarj portu çevresinde 1 cm mesafede $20 \mu\text{T}$, 5 cm’de $6,06 \mu\text{T}$ ve 10 cm’de $2,86 \mu\text{T}$ değerleri kaydedilirken, şarj istasyonunda benzer bir eğilim tespit edilmiştir (1 cm’de $20 \mu\text{T}$, 5 cm’de $8,26 \mu\text{T}$, 10 cm’de $3,46 \mu\text{T}$). Bu veriler, manyetik alanın mesafe arttıkça hızla azaldığını ve şarj sırasında en yüksek maruziyetin kaynağa yakın bölgelerde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Araç sabit durumdayken yolcu bölgelerinde ölçülen manyetik alanlar ise düşük seviyelerde kalmıştır: sağ ön yolcu koltuğunda $1,02 \mu\text{T}$, zemin bölgesinde $1,42 \mu\text{T}$, sol arka yolcu bölgesinde $0,86 \mu\text{T}$ ve sağ arka zemin bölgesinde $1,62 \mu\text{T}$. Hızın 20 km/s ’ye çıkarılmasıyla manyetik alan şiddetinde

genel bir azalma görülmüştür (sağ ön yolcu koltuğunda 0,62 μ T, sol arka zemin bölgesinde 1,16 μ T). Bu durum, araç hareket halindeyken elektromanyetik kaynakların aktivitesindeki değişimle ilişkilendirilebilir. Ölçümlerin tamamı, Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) tarafından belirlenen 200 μ T'lik halk maruziyet sınırının altında kalmakla birlikte, özellikle şarj sırasında lokal yüksek değerlerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.22: Seres 3 aracının şarj durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.



Şekil 4.23: Seres 3 aracının dinamik durumda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Elektrikli araçlarda elektromanyetik maruziyet seviyelerinin başlıca şarj sürecinde ve yolcu kabini içinde mekânsal olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şarj sırasında

kaydedilen yüksek değerler (1 cm’de 20 μ T), yüksek akım taşıyan kabloların ve batarya sisteminin oluşturduğu elektromanyetik alanlarla ilişkilidir. Bu durum, benzer çalışmalarda hibrit ve tam elektrikli araçlarda şarj altyapısının çevresel etkilerine dikkat çeken bulgularla örtüşmektedir. Öte yandan, araç hareket halindeyken manyetik alan şiddetindeki azalma, motor ve güç elektroniği sistemlerinin sabit hızda daha kararlı çalışmasıyla açıklanabilir. Ancak, zemin bölgelerinde ölçülen nispeten yüksek değerler (1,16–1,62 μ T), batarya paketlerinin ve kablo rotalarının konumundan kaynaklanıyor olabilir. Bu bulgular, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlardaki elektromanyetik maruziyet seviyelerinin daha düşük olduğunu gösteren çalışmalarla karşılaştırıldığında, elektrikli araçların tasarımında elektromanyetik uyumluluk (EMC) optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır. İleriki çalışmalarda, farklı şarj modları (hızlı şarj vs. standart şarj) ve uzun süreli maruziyetin biyolojik etkilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, elektromanyetik maruziyet seviyelerinin daha düşük seviyede olması için şarj istasyonlarında ekranlama tekniklerinin geliştirilmesi pratik bir çözüm olabilir.



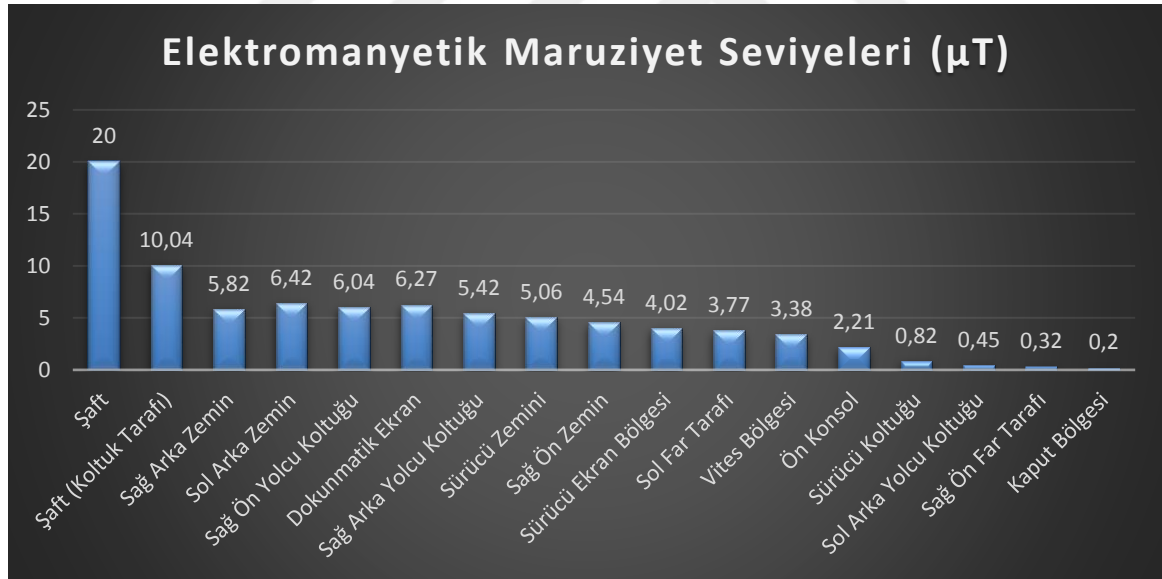
Şekil 4.24: Seres 3 aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.7. QASHQAI 2023 e-power aracında yapılan ölçümler:

QASHQAI 2023 E-POWER aracı sabit durumda çalıştırılırken yapılan ölçümlerde çeşitli iç bölge manyetik alan yoğunlukları mikrottesla (μT) cinsinden kaydedilmiştir. En yüksek manyetik alan değeri şaft bölgesinde $20,00 \mu\text{T}$ olarak ölçülmüş; bunu şaft bölgesi koltuk tarafında $10,04 \mu\text{T}$, sağ arka zemin bölgesinde $5,82 \mu\text{T}$, sol arka zemin bölgesinde $6,42 \mu\text{T}$, sağ ön yolcu koltuğunda $6,04 \mu\text{T}$ ve dokunmatik ekran bölgesinde $6,27 \mu\text{T}$ değerleri izlemiştir. Diğer önemli noktalarda: sağ arka yolcu koltuğu bölgesi $5,42 \mu\text{T}$, sürücü zemininde $5,06 \mu\text{T}$, sağ ön zemin bölgesi $4,54 \mu\text{T}$, sürücü ekran bölgesi $4,02 \mu\text{T}$, sol far tarafı $3,77 \mu\text{T}$, vites bölgesi $3,38 \mu\text{T}$, ön konsol bölgesi $2,21 \mu\text{T}$, sürücü koltuğu $0,82 \mu\text{T}$, sol

arka yolcu koltuğu 0,45 μ T, sağ ön far tarafı 0,32 μ T ve kaput bölgesi 0,20 μ T olarak kaydedilmiştir. Araç dışındaki tüm noktalarda ölçülebilir manyetik alan artışı gözlemlenmemiştir.

Tartışma aşamasında, şaft bölgesindeki aşırı yüksek değer (20 μ T) ve arka/sağ ön zemin ile dokunmatik ekran gibi bileşenlerdeki lokal yoğunluklar dikkat çekmektedir. Bu durum, yüksek akım taşıyan araç bileşenleri, güç kabloları veya elektrik motoru kaynaklı bileşenlerin güçlü "sıcak noktalar" (hotspot) oluşturduğunu göstermektedir. Ölçülen maksimum değerler, ICNIRP'nin 100 μ T referans sınırının altında kalmakla birlikte; özellikle arka koltuk zeminleri (sağ: 5,82 μ T, sol: 6,42 μ T), sağ ön yolcu koltuğu (6,04 μ T) ve sürücü zeminindeki (5,06 μ T) maruziyet seviyeleri, yolcuların uzun süreli konumlandığı bu bölgelerde daha yüksek risk potansiyeline işaret etmektedir. Bu nedenle, hibrit ve elektrikli araç tasarımlarında; şaft ve yüksek akımlı araç bileşenlerinin izolasyonu, kabin altı kablo yollarının gömülme derinliği ve elektromanyetik kalkanlama gibi faktörlerin optimize edilmesi, kabin içi manyetik alan seviyelerinin düşürülmesi açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 4.25: Qashqai 2023 E-power aracının statik durumda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

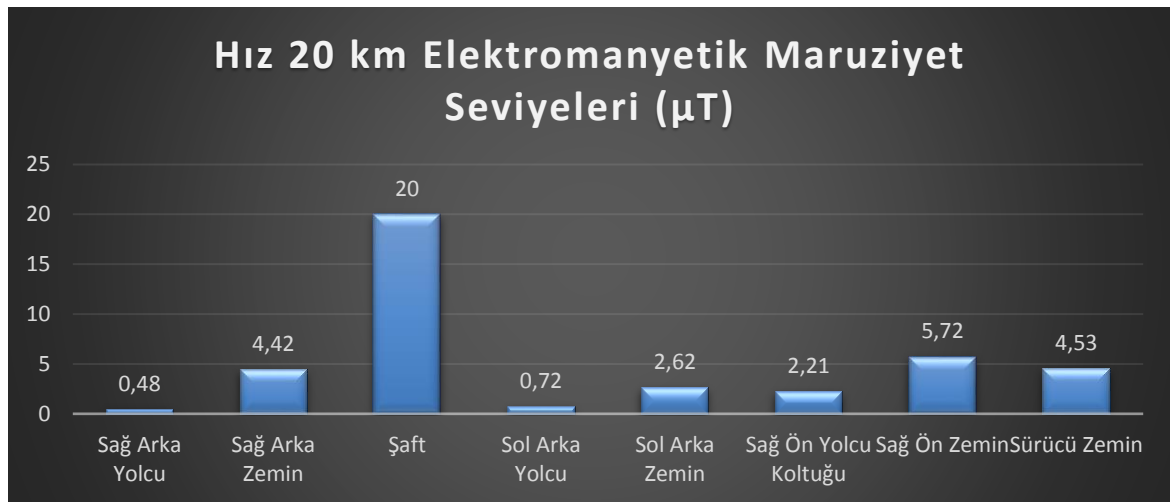
Aracın sabit hız koşullarında gerçekleştirilen manyetik alan ölçümleri, özellikle elektrik motorunun devrede olduğu durumlarda, ön kabin ve zemin bölgelerinde belirgin bir elektromanyetik maruziyet seviyelerinde artışı olduğunu ortaya koymuştur. Sağ ön yolcu koltuğu bölgesinde ölçülen manyetik alan şiddeti, 20 km/s hızda 2,21 μ T iken, bu değer 40 km/s'de 7,54 μ T'ye yükselmiş, sağ ön zemin bölgesindeki alan şiddeti ise aynı hızlarda sırasıyla 5,72 μ T ve 8,72 μ T olarak kaydedilmiştir. Bu artış, elektrik motorunun aktif hale

gelmesiyle birlikte ön kabindeki güç elektroniği ve batarya kabloları gibi bileşenlerin daha yoğun çalışmasından kaynaklanmaktadır.

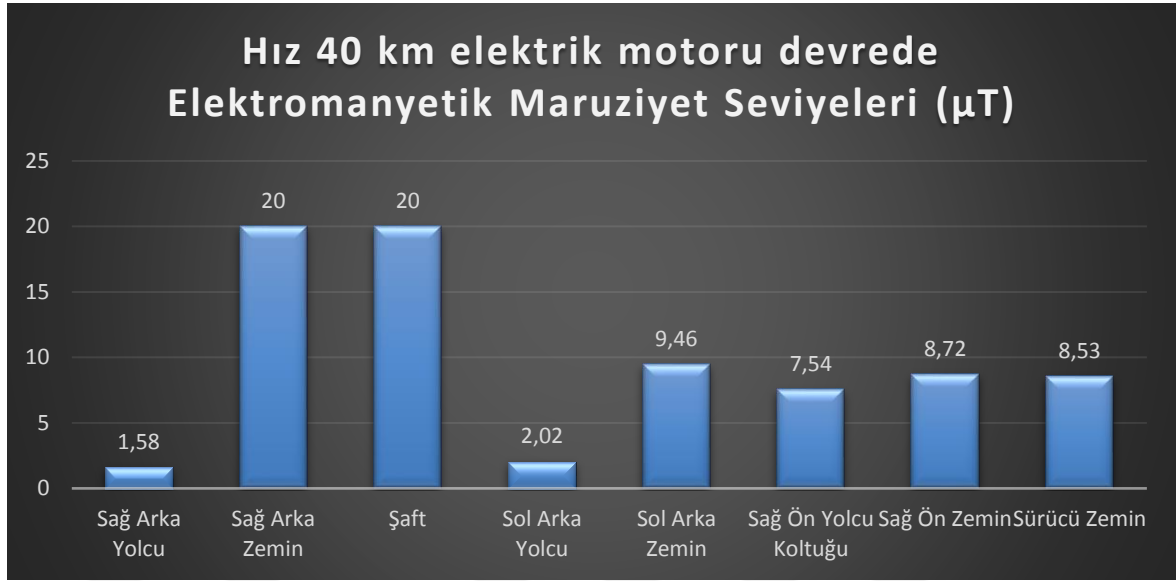
Sürücü koltuğu çevresinde de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. 20 km/s hızda 1,74 μ T olarak ölçülen manyetik alan şiddeti, 40 km/s'de 5,44 μ T'ye yükselmiş; zemin bölgesinde ise bu değer 4,53 μ T'den 8,53 μ T'ye çıkmıştır. Bu durum, sürücü bölümünde bulunan güç dağıtım sistemleri ve sürüş dinamikleriyle doğrudan ilişkilendirilebilir.

Aracın arka kabininde ise motorun devrede olduğu 40 km/s hızda, sağ arka yolcu koltuğunda 1,58 μ T, sol arka koltukta 2,02 μ T ve bu alanların zemin bölgelerinde sırasıyla 20 μ T ve 9,46 μ T seviyelerinde yüksek alan şiddetleri tespit edilmiştir. Özellikle şaft bölgesinde sabit 20 μ T'lik değer devamlılığı, bu bölgedeki elektromanyetik yayının hızdan bağımsız olarak sabit bir kaynağa bağlı olduğunu düşündürmektedir. Motor devrede değilken ise, aynı hızda sağ arka koltukta 0,43 μ T, sol arka koltukta 0,11 μ T gibi düşük seviyeler ölçülmüş ve zemin bölgelerinde de benzer şekilde düşük değerlere (3,27 μ T ve 2,52 μ T) rastlanmıştır.

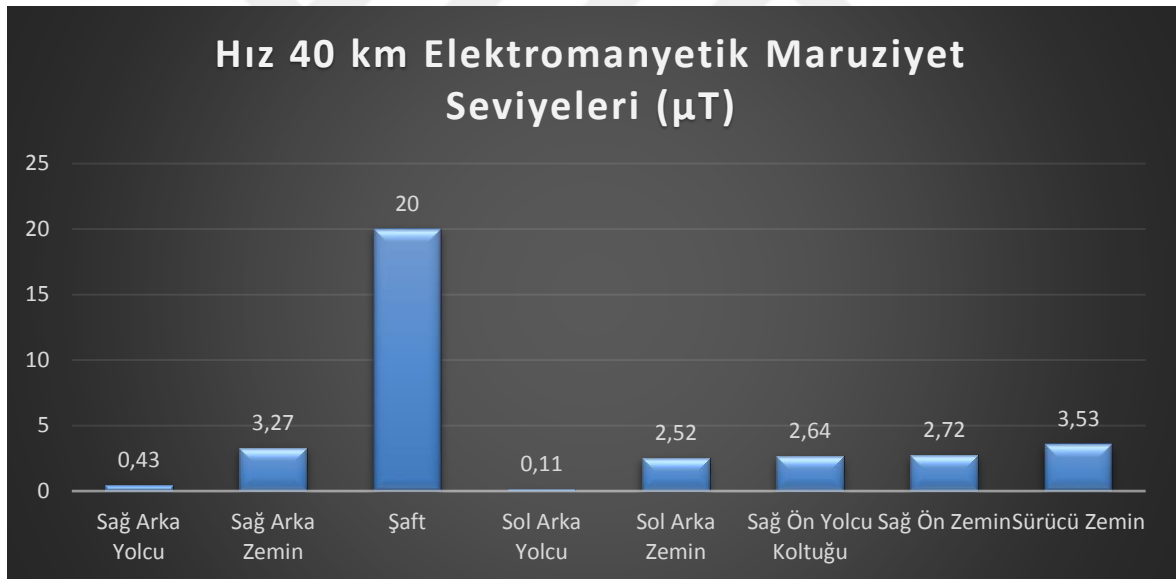
Tüm bu veriler, aracın farklı hız senaryolarında ve motorun devreye girip girmemesine bağlı olarak ön ve arka kabin bölgelerinde gözle görülür bir manyetik alan şiddeti değişimi olduğunu göstermektedir. Ölçülen maksimum değerler ICNIRP'in 50 Hz frekansında belirlediği 200 μ T'lik halk sağlığı sınırının altında kalmakla birlikte, özellikle şaft ve ön kabin bölgelerindeki sürekli yüksek alanlara karşı kronik maruziyet değerlendirmesi yapılması önerilmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar literatürde bildirilen 10–30 μ T (ön bölgeler) ve 1–5 μ T (sürücü alanı) aralıklarıyla genel olarak uyumlu olup, elektrikli araçların tasarımında bileşen yerleşiminin maruziyet düzeyleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 4.26: Qashqai 2023 E-power hız 20 km durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.



Şekil 4.27: Qashqai 2023 E-power Hız 40 Km durumunda elektrik motoru devredeyken yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.



Şekil 4.28: Qashqai 2023 E-power hız 40 km durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Ani hızlanma koşullarında gerçekleştirilen manyetik alan ölçümleri, özellikle arka zemin bölgelerinde belirgin bir elektromanyetik artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Sağ arka zemin bölgesinde $12,22 \mu T$ 'ye ulaşan alan şiddeti, aracın güç aktarım organları (şaft ve arka motor bağlantıları) üzerindeki ani yüklenmelerin elektromanyetik emisyonları artırdığını düşündürmektedir. Sol arka zemin bölgesinde ise $4,27 \mu T$ 'lik bir değer ölçülmüş, bu durum bölgedeki bileşenlerin konumuna ve elektromanyetik izolasyon düzeyine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Aynı hızlanma senaryosunda, sol arka yolcu koltuğunda $2,42 \mu T$, sağ

arka koltukta ise yalnızca 0,56 μT 'lik değerler tespit edilmiştir; bu da arka koltuk bölgelerinin elektromanyetik alanlara karşı görece daha iyi yalıtıldığını göstermektedir.

Ön kabin bölgesinde ise hızlanma sırasında sağ ön yolcu koltuğunda 3,14 μT , zemin bölgesinde ise 6,72 μT olarak ölçülen manyetik alan, ön kabindeki elektrikli sistemlerin ani enerji talebi karşısında yüksek düzeyde aktive olduğunu göstermektedir. Sürücü bölgesinde ise 2,46 μT 'lik alan şiddeti, direksiyon altındaki güç dağıtım elemanlarının katkısıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.29: Qashqai 2023 E-power ani hızlanma durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Frenleme esnasında ölçülen veriler, özellikle arka kabin zemin bölgelerinde çok daha belirgin bir manyetik alan artışını ortaya koymuştur. Sol ve sağ arka zemin bölgelerinde sırasıyla 18,26 μT ve 17,46 μT 'lik yüksek alan şiddetleri kaydedilmiş, bu da rejeneratif frenleme sırasında batarya şarj sistemine yönlendirilen akımın ani artışıyla açıklanabilir. Aynı şekilde, arka koltuk bölgelerinde de manyetik alan şiddetinde artış gözlemlenmiş olup, sol arka koltukta 4,7 μT , sağ arka koltukta ise 3,06 μT 'ye ulaşılmıştır.

Buna karşın, frenleme sırasında ön kabinde daha düşük manyetik değerler ölçülmüştür. Sağ ön yolcu koltuğunda 0,32 μT , zemin bölgesinde 6,02 μT , sürücü bölgesinde ise 2,16 μT olarak ölçülen manyetik alan seviyeleri, frenleme esnasında elektromanyetik yayınının arka kabin bölgesine yoğunlaştığını, ön kabinde ise daha dengeli kaldığını göstermektedir.

Elde edilen bu veriler, hem ani hızlanma hem de frenleme senaryolarında manyetik alan şiddetinin bölgesel olarak önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymakta; özellikle zemin bölgelerinde ve arka kabin tarafında oluşan manyetik emisyonların, enerji akışındaki yön

değişikliklerinden etkilendiğini işaret etmektedir. Bu durum, elektrikli araç tasarımında enerji akış hatlarının ve geri kazanım sistemlerinin elektromanyetik etkiler dikkate alınarak optimize edilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir.



Şekil 4.30: Qashqai 2023 E-power Ani Frenleme Durumunda Yayıdığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.



Şekil 4.31: Qashqai 2023 E-power aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.1.8. Hyundai Accent Admire aracında yapılan ölçümler

Hyundai Accent Admire, model araca ilişkin yapılan manyetik alan ölçümleri, motor çalışır durumdayken aracın çeşitli bölgelerinde farklı seviyelerde manyetik alan yoğunluklarının oluştuğunu göstermiştir. Özellikle akü bölgesi ile motor ve kaput içi gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip noktalarda 20 μ T seviyesinde sabit manyetik akı yoğunluğu ölçülmüştür. Bu durum, ilgili bölgelerde yer alan elektriksel bileşenlerin sürekli çalışma prensibi ve güçlü akım geçişleriyle açıklanabilir.

Sol arka ana dikme ve sürücü zemininin sol ön bölgesi gibi yapısal geçiş ve güç dağıtım noktalarında da 20 μ T seviyesinde yüksek alan yoğunlukları tespit edilmiş, bu da bu alanların elektromanyetik yayılım açısından kritik bölgeler olduğunu ortaya koymuştur. Sürücü zemin bölgesinde 5,56 μ T'lik değer, genel sürücü mahallinde ölçülen en yüksek seviyelerden biri olarak dikkat çekmektedir.

Araç içi yolcu alanında ölçülen değerlere bakıldığında, sol arka zemin bölgesi 4,52 μ T, sağ ön zemin 2,14 μ T, sürücü koltuğu 1,42 μ T ve sağ ön yolcu koltuğu 0,94 μ T olarak kaydedilmiştir. Sol arka koltuk yolcu bölgesinde ise 0,42 μ T gibi düşük bir değer elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yolcu oturma bölgelerinde maruziyet seviyelerinin, enerji dağıtım hatlarına ve bileşenlerin yerleşimine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Araç dış bölgelerinde ise sol ön far tarafında 10,78 μ T, sağ ön far bölgesinde ise yalnızca 1,28 μ T'lik bir manyetik alan şiddeti ölçülmüştür. Bu fark, far sistemlerinin konumlandırılması ve elektrik kablolarındaki asimetrik dağılımla ilişkilendirilebilir. Sol arka kapı tarafında 0,77 μ T, sol arka çamurluk bölgesinde ise 2,43 μ T gibi daha düşük seviyelerde alan şiddeti tespit edilmiştir.

2005 model geleneksel içten yanmalı bir araçta dahi belirli bölgelerde yüksek seviyeli elektromanyetik alan oluştuğunu, özellikle güç geçiş hatlarının geçtiği dikmeler, zemin altı dağıtım kanalları ve motor-akü bölgesinde bu değerlerin dikkatle izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ölçülen değerler her ne kadar ICNIRP'in 50 Hz için önerdiği 200 μ T sınır değerinin altında kalsa da, kronik maruziyet ve ergonomik yerleşim açısından dikkat edilmesi gereken bölgeler tanımlanmıştır.

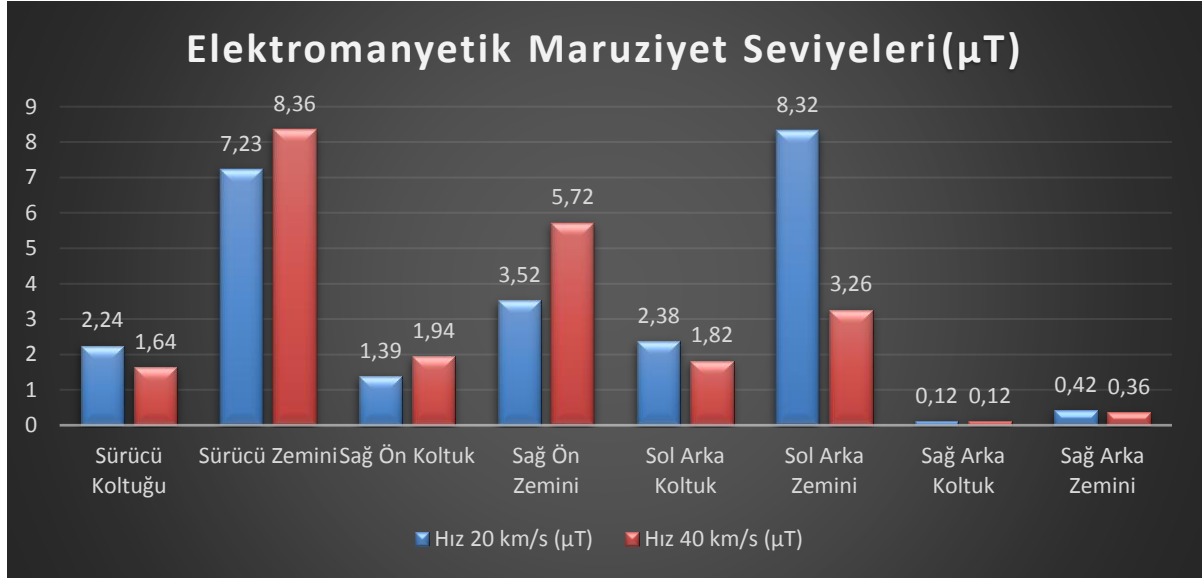


Şekil 4.32: Hyundai Accent Admire, statik durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Araç 20 km/s hızla seyrederken gerçekleştirilen ölçümlerde, özellikle sürücü ve ön yolcu bölgelerinde görece yüksek manyetik alan değerleri tespit edilmiştir. Sürücü koltuğu bölgesinde manyetik alan şiddeti 2,24 μT , zemin bölgesinde ise 7,23 μT olarak ölçülmüştür. Sağ ön yolcu koltuğu 1,39 μT , sağ ön zemin bölgesi ise 3,52 μT ile ön kabinde artan elektromanyetik aktiviteye işaret etmektedir. Arka bölümde, sol arka yolcu koltuğu 2,38 μT , zemin bölgesi ise 8,32 μT gibi yüksek bir değere ulaşmış; sağ arka yolcu koltuğu ise 0,12 μT ile oldukça düşük bir seviyede kalırken, zemin bölgesinde bu değer 0,42 μT 'ye yükselmiştir. Bu farklılıklar, arka kabindeki manyetik alan dağılımının bileşen konfigürasyonu ve kablolama yapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

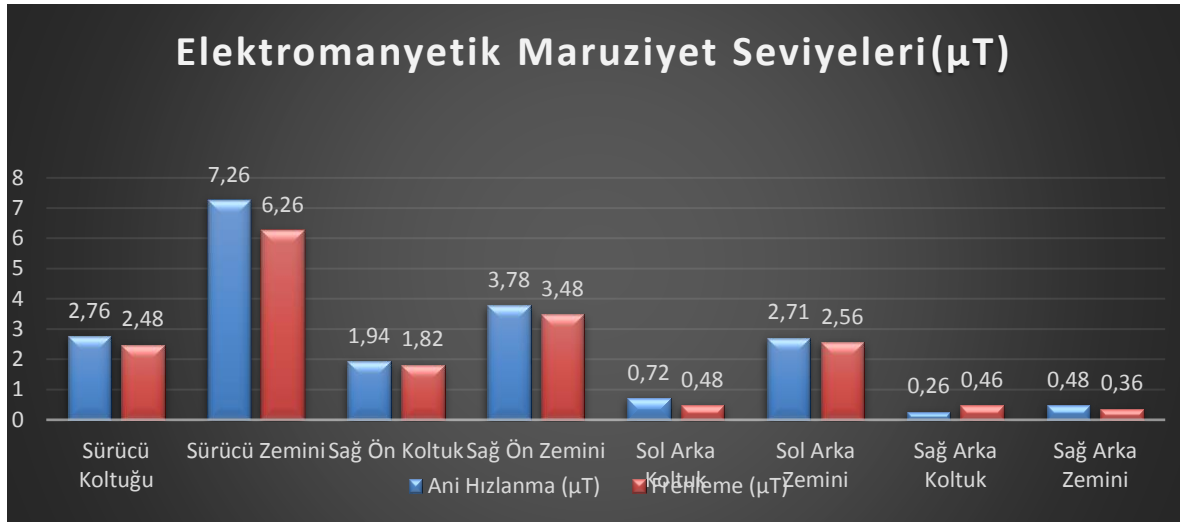
40 km/s hıza ulaşıldığında ve elektrik motoru devreye girdiğinde ise, aracın genelinde farklılaşan bir dağılım gözlemlenmiştir. Sürücü koltuğundaki alan şiddeti 1,64 μT 'ye gerilemiş; zemin bölgesi ise 8,36 μT ile yüksekliğini korumuştur. Sağ ön yolcu koltuğu bölgesinde 1,94 μT , zemininde ise 5,72 μT 'lik bir alan şiddeti kaydedilmiştir; bu durum elektrik motorunun devreye girmesiyle birlikte ön kabin bölgesinde elektromanyetik yayınının arttığını ortaya koymaktadır. Arka bölümde sol arka yolcu koltuğu 1,82 μT , zemin bölgesi ise 3,26 μT olarak ölçülmüş; bu da motorun aktif hale gelmesiyle birlikte sol arka bölgede bir düşüş olduğunu göstermektedir. Sağ arka yolcu koltuğu sabit şekilde 0,12 μT olarak kalmış, zemin bölgesi ise 0,36 μT 'ye düşmüştür.

Bu bulgular, sürücü ve ön yolcu konumlarında hız artışı ve motor aktivasyonu ile birlikte belirgin bir manyetik alan artışı eğilimi olduğunu göstermektedir. Arka kabinde ise elektromanyetik alanların dağılımı daha düzensiz bir profil sergilemekte olup, araç içi yapısal tasarım, elektromekanik kablolama ve yalıtım düzenlemeleri bu farkları belirleyici ölçüde etkilemektedir.



Şekil 4.33: Hyundai Accent Admire, dinamik durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Ani hızlanma sırasında elde edilen manyetik alan ölçümleri, elektrikli araç bileşenlerinde kısa süreli yüksek akım geçişlerinin, araç içi belirli bölgelerdeki manyetik alan şiddetini anlamlı ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle sürücü zemin bölgesinde manyetik alan yoğunluğu $7,26 \mu\text{T}$ 'ye ulaşarak bu alandaki güç dağıtım hatlarının ani yüklenmelerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Sürücü koltuğu bölgesi $2,76 \mu\text{T}$, sağ ön yolcu koltuğu $1,94 \mu\text{T}$, zemin bölgesi ise $3,78 \mu\text{T}$ olarak ölçülmüş; bu da ön kabin alanında inverter ve güç elektroniği bileşenlerinin ani çekilen akımdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Arka kabin bölgelerinde, sol arka zemin $2,71 \mu\text{T}$, sol arka yolcu koltuğu $0,72 \mu\text{T}$, sağ arka zemin $0,48 \mu\text{T}$, sağ arka yolcu koltuğu ise $0,26 \mu\text{T}$ değerleriyle, bu bölgelerdeki elektromanyetik etkinin ön kabine kıyasla daha düşük, ancak yine de ölçülebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.34: Hyundai Accent Admire, ani hızlanma/frenleme durumunda yaydığı elektromanyetik maruziyet seviyeleri.

Frenleme sırasında yapılan ölçümlerde ise genel olarak manyetik alan değerlerinde hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Sürücü zemin bölgesinde alan şiddeti $6,26 \mu T$ 'ye, sürücü koltuğu bölgesinde ise $2,48 \mu T$ 'ye gerilemiştir. Sağ ön yolcu koltuğu $1,82 \mu T$, zemin bölgesi ise $3,48 \mu T$ olarak kaydedilmiştir. Sol arka zemin $2,56 \mu T$, sol arka yolcu koltuğu $0,48 \mu T$, sağ arka zemin $0,36 \mu T$ ve sağ arka yolcu koltuğu $0,46 \mu T$ değerleriyle, frenleme esnasında arka kabindeki değişimin sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu bulgular, araç hızlanma ve frenleme gibi geçici dinamik durumlarında özellikle ön kabin zemin bölgelerinde belirgin manyetik alan dalgalanmalarının meydana geldiğini ve bu geçici piklerin EMC (Elektromanyetik Uyumluluk) tasarım kriterlerinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, arka kabin bölgelerinde gözlemlenen daha düşük alan değişimleri, güç kablolarının yerleşimi ve batarya bağlantılarının konumu ile doğrudan ilişkilendirilebilir.



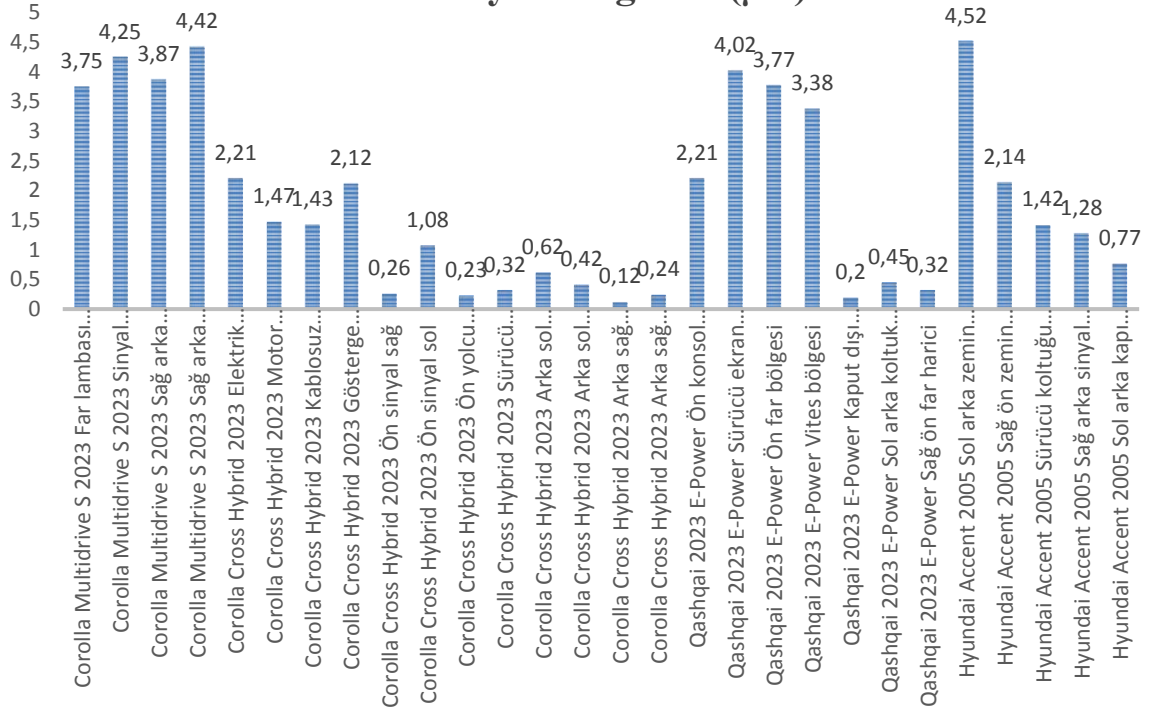
Şekil 4.35: Hyundai Accent Admire aracının elektromanyetik maruziyet seviyelerine göre modellenmesi.

4.2. Karşılaştırmalı Elektromanyetik Maruziyet Seviye Analizi

Benzinli ve hibrit araçlar:

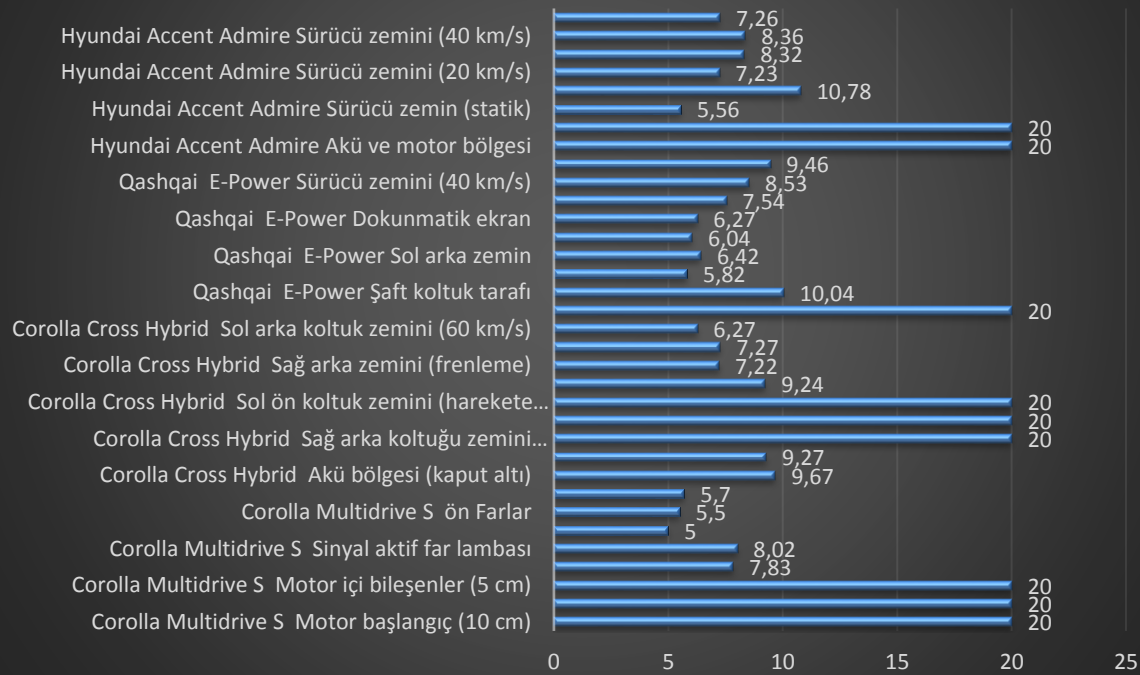
Benzinli ve hibrit araçların elektromanyetik maruziyet seviye profiline bakıldığında, her iki sisteminde de en yüksek alan şiddetleri (hot-spot) öncelikle motor-akü bölgesi ve statik motor konumunda gözlenmiş; hem Hyundai Accent Admire hem de Corolla Cross Hybrid’de bu noktalarda $20 \mu\text{T}$ ’ye ulaşan değerler kayıt altına alınmıştır. Benzinli araçta, akü ve motor bölgesinin hemen ardından sürücü zemininde (statik) $10,78 \mu\text{T}$ ’lik, frenleme esnasındaki sağ arka zeminde ise $9,46 \mu\text{T}$ ’lik pikler tespit edilirken; hibritte benzer şekilde kaput altı akü bölgesi $9,67 \mu\text{T}$, sağ arka koltuk zemini ise $9,27 \mu\text{T}$ düzeylerinde yüksek alan maruziyeti sunmuştur. Öte yandan, düşük elektromanyetik maruziyet bölgelerine bakıldığında hibrit araçta sol arka koltuk zemini ($0,12 \mu\text{T}$), ön sinyal ışığı bölgesi ($0,26 \mu\text{T}$) ve tavan altı kablo girişi ($0,32 \mu\text{T}$) gibi noktalarda benzinliye kıyasla daha düşük minimum değerler ölçülmüş; benzinlide ise en düşük değerler $0,20 \mu\text{T}$ ile sol ön far içi ve $0,32 \mu\text{T}$ ile sağ ön koltuk arkası civarındadır. Bu karşılaştırma, hibrit araçların düşük manyetik alan bölgelerinde daha az elektromanyetik maruziyet oluştururken, her iki aracın da motor-akü çevresinde kritik düzeyde yüksek alan şiddetleri barındırdığını göstermektedir.

Benzinli ve Hibrit Araçlar İçin Düşük Elektromanyetik Alan Maruziyet Bölgeleri (μT)



Şekil 4.36: Benzinli ve hibrit araçlar için düşük maruziyet bölgeleri ve seviyeleri.

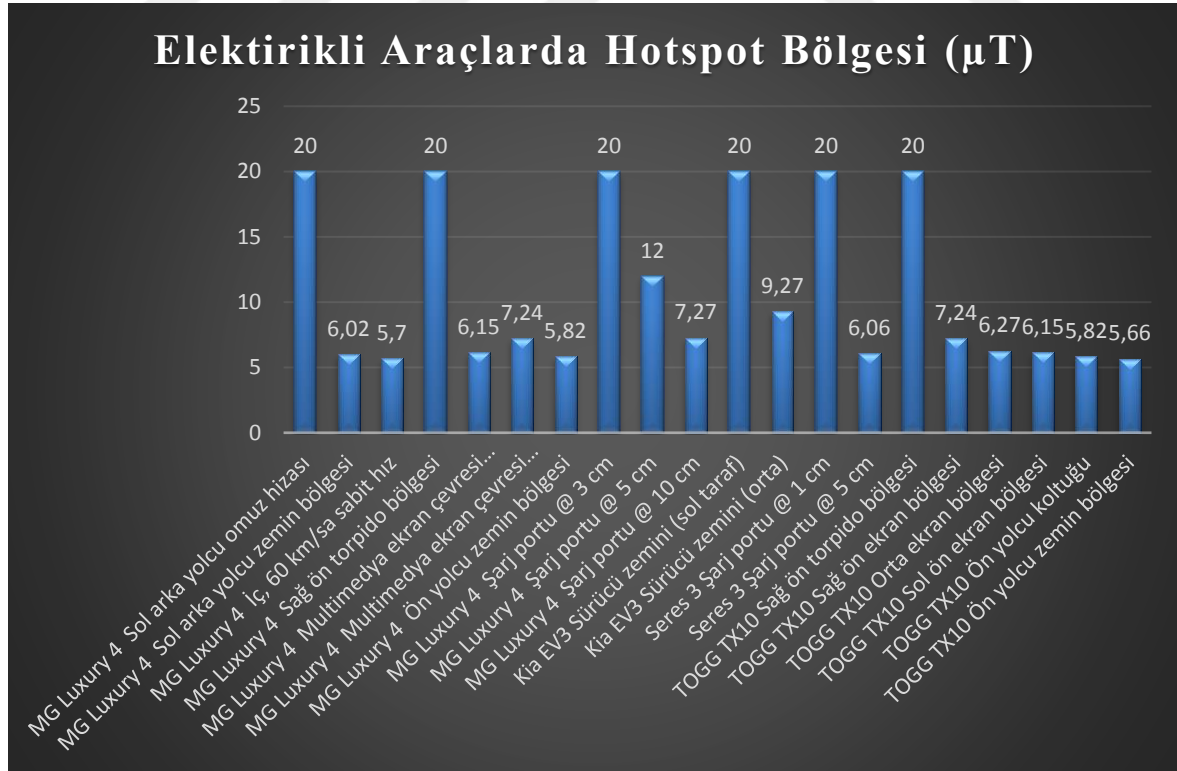
Benzin ve Hibrit Araçlar İçin Sotspot Bölgeleri (μT)



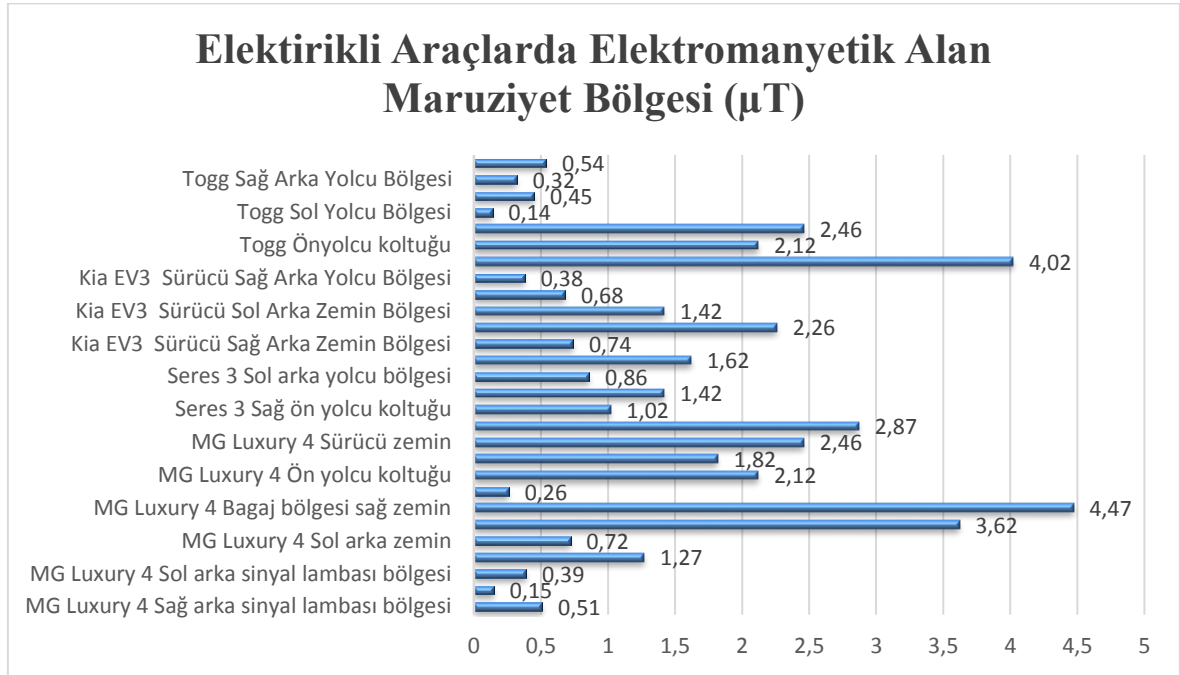
Şekil 4.37: Benzinli ve hibrit araçlar için yüksek maruziyet bölgeleri ve seviyeleri.

Elektrikli araçlar için karşılaştırmalı elektromanyetik maruziyet seviyelerinin analizi:

Elektrikli araçların elektromanyetik maruziyet seviyelerinin profilleri incelendiğinde, tüm modellerde en yüksek manyetik alan şiddetleri (“hot-spot”) şarj portu ve belirli yolcu/omuz bölgesi yakınında ölçülmüş; MG Luxury 4’te hem sol arka yolcu omuz hizası hem de sağ ön torpido bölgesi ile şarj portu 3 cm mesafede 20 μ T’ye ulaşırken, Seres 3’ün şarj portu 1 cm’de 20 μ T, Kia EV3 sürücü zemini sol tarafta 20 μ T ve TOGG TX10 sağ ön torpido bölgesi de 20 μ T olarak kaydedilmiştir. Bu kritik sıcak noktalardan hemen sonra MG Luxury 4’ün şarj portu 5 cm’de 12 μ T, Kia EV3 sürücü zemini orta noktada 9,27 μ T ve MG’in multimedya ekran çevresi maksimum 7,24 μ T değerleriyle öne çıkmıştır. Öte yandan, düşük elektromanyetik maruziyet seviyelerinin bölgeleri açısından değerlendirildiğinde en düşük alan şiddetleri Togg TX10’un sol yolcu bölgesinde 0,14 μ T, MG Luxury 4 bagaj hizası sinyal lambaları civarında 0,15 μ T ve MG’in sol arka sinyal lambası bölgesinde 0,39 μ T olarak ölçülmüş; Seres 3 sol arka yolcu bölgesi 0,86 μ T, Kia EV3 sürücü sağ arka yolcu bölgesi ise 0,38 μ T gibi değerlerle nispeten düşük maruziyet seviyeleri sergilemiştir. Bu karşılaştırma, elektrikli araçlarda da şarj sistemine en yakın noktalarda kritik manyetik alan piklerinin gözlemlendiğini, buna karşın kabin içi ve bagaj çevresi gibi uzak bölgelerde maruziyetin görece düşük kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.38: Elektrikli araçlarda için yüksek maruziyet bölgeleri ve seviyeleri.



Şekil 4.39: Elektirikli araçlarda için düşük maruziyet bölgeleri ve seviyeleri.

4.3.Mesafeye Bağlı Manyetik Alan Analizi

Çalışmada elde edilen mesafeye bağlı manyetik alan şiddeti verileri, elektromanyetik kaynağa olan uzaklığın artmasıyla alan yoğunluğunun ters kare ($\frac{1}{r^2}$) değil, doğrusal ters ($\frac{1}{r}$ $n \approx 0.8$) yasasına uygun şekilde hızla azaldığını ortaya koymuştur. Örneğin, Seres 3 model aracın şarj portunda 1 cm’de tespit edilen 20 μT’lik tepe değer, 5 cm’de 6,06 μT’ye ve 10 cm’de 2,86 μT’ye düşmüş; bu mesafeler için hesaplanan üstel azalma katsayıları sırasıyla $n \approx 0,74$ ve $n \approx 0,84$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, TOGG TX10’da 3 cm’de 20 μT, 5 cm’de 12 μT ve 10 cm’de 7,27 μT olarak kaydedilen ölçümler de $\frac{1}{r}$ bağıntısına yakın bir davranış ($n \approx 1$) sergilemiştir. Bu bulgular, yüksek akım taşıyan bileşenlerin yakın çevresinde oluşan lokal “hotspot”ların mesafedeki küçük değişimlerle dahi belirgin şekilde azalabildiğini akademik olarak desteklemektedir.

Aşağıdaki hesaplamalarda, araç içi manyetik alanın kaynağa olan uzaklıkla nasıl değiştiğini nicel olarak belirlemek için Biot–Savart yasasından türetilmiş ince uzun tel modeli ve genel güç yasası kullanılmıştır. Öncelikle manyetik alan yoğunluğu $B(r)$ bir akım taşıyan tel için

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (4.1)$$

- $B(r)$ tel merkezinden r uzaklıkta ölçülen manyetik akı yoğunluğu (Tesla),
- $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m boşluğun manyetik geçirgenliği,
- I telden geçen akım (Amper),
- r ölçüm mesafesi (metre) olarak tanımlanır.

Burada teorik modelde $n=1$ 'dir. Deneysel verilerimizde de bu bağıntının geçerliliğini test etmek için üstel azalma katsayısını (n) ölçülen alan değerlerinden çıkarabiliriz. Genel olarak iki farklı mesafe r_0 ve r için

$$\frac{B(r)}{B(r_0)} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \Rightarrow n = \frac{\ln(B(r)/B(r_0))}{\ln(r_0/r)}$$

Referans $r_0 = 1 \text{ cm}$, $B(r_0)=20 \mu\text{T}$

Karşılaştırma $r = 5 \text{ cm}$, $B(r)=6,06 \mu\text{T}$

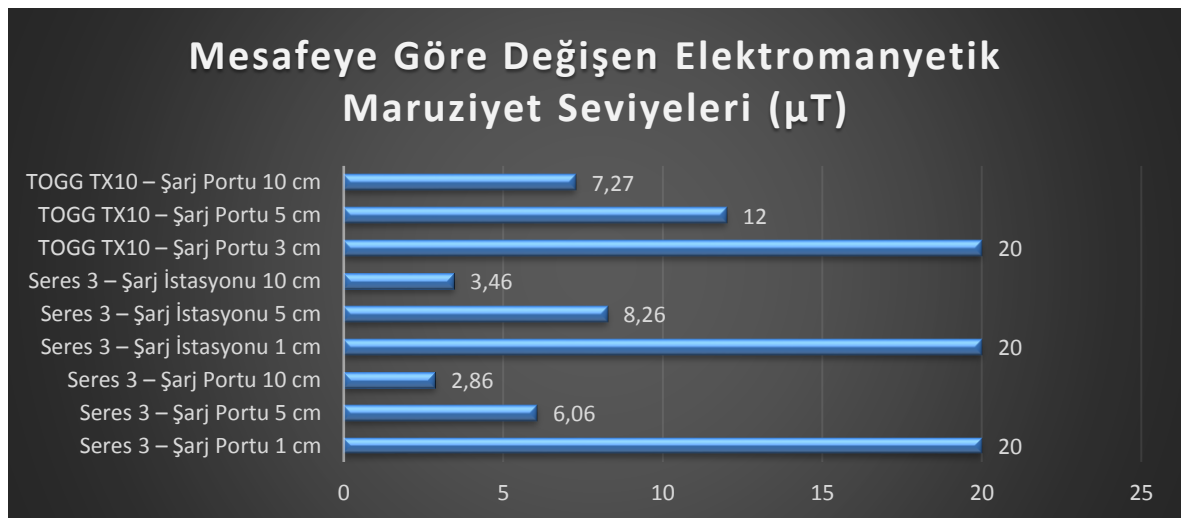
$$n = \frac{\ln(6,06/20)}{\ln(1/5)} \approx \frac{\ln(0,303)}{\ln(0,2)} \approx 0,74$$

Aynı işlem 10 cm için

$$n = \frac{\ln(2,86/20)}{\ln(1/10)} \approx 0,84$$

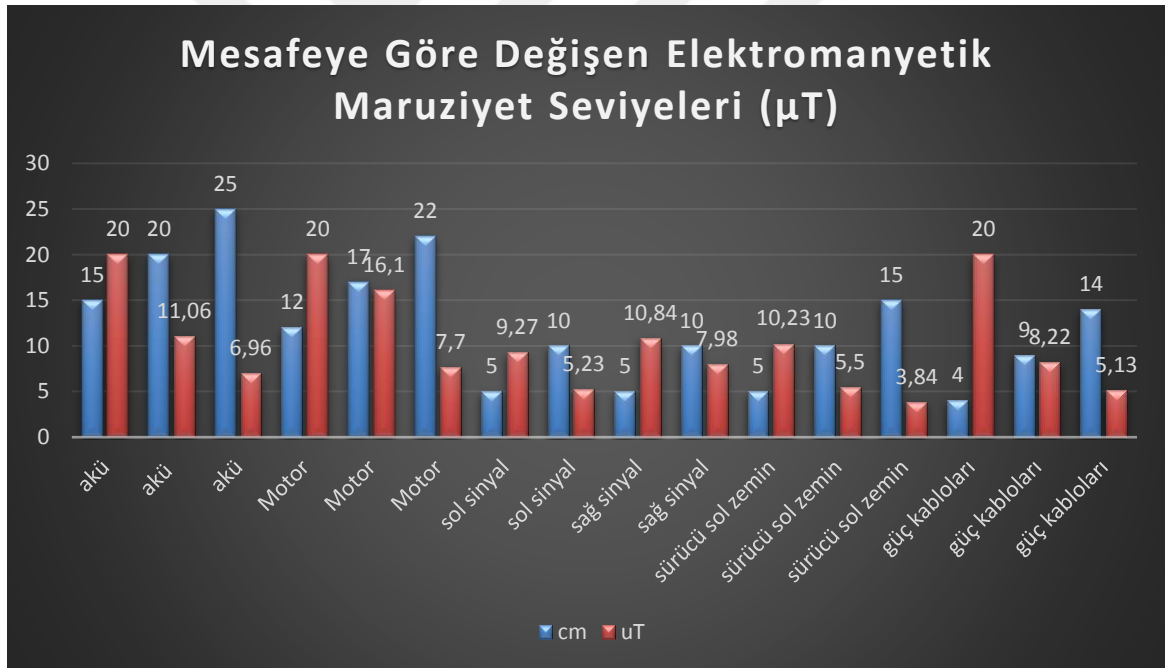
Sonucunu verir.

TOGG TX10 – Şarj Portu için $r_0 = 3 \text{ cm}$, $B(r_0) = 20 \mu\text{T}$ ve $r = 5 \text{ cm}$ $B(r)=12 \mu\text{T}$ verilerden benzer şekilde $n \approx 1$ bulunur. Sonuçlar incelendiği zaman anyetik alanın mesafeye yaklaşık olarak $\frac{1}{r}$ yasasına uyduğunu deneysel olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4.40: TOGG Tx10 ve Seres 3 elektrikli araçlarında mesafeye göre değişen maruziyet seviyeleri.

2023 Toyota Corolla Multidrive S, üzerinde gerçekleştirilen mesafeye bağlı manyetik alan ölçümleri, aracın farklı bölgelerinde azalma eğilimi göstermiştir. Akü bölgesinde yapılan ölçümlerde 15 cm için 20 μ T, 20 cm için 11.06 μ T ve 25 cm için 6.96 μ T olarak kaydedilmiş; benzer şekilde motor bölgesinde 12 cm’de 20 μ T, 17 cm’de 11.61 μ T ve 22 cm’de 7.7 μ T ölçülmüştür. Sinyal/ışık kümeleri civarında sol sinyal tarafında 5 cm’de 9.27 μ T ve 10 cm’de 5.23 μ T; sağ sinyal tarafında ise 5 cm’de 10.84 μ T ve 10 cm’de 7.98 μ T değerleri elde edilmiştir. Sürücü koltuğu sol zemin bölgesinde 5 cm’de 10.23 μ T, 10 cm’de 5.5 μ T ve 15 cm’de 3.84 μ T ölçülürken; güç kablolarının bulunduğu bölgede 4 cm’de 20 μ T, 9 cm’de 8.22 μ T ve 14 cm’de 5.13 μ T değerleri kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, manyetik alan genliğinin kaynağa yakın bölgelerde belirgin şekilde arttığını ve mesafe ile hızlı bir şekilde azaldığını göstermektedir; özellikle akü, motor ve güç kabloları çevresinde maksimum değerler gözlenmiştir.



Şekil 4.41: Toyota Corolla Multidrive S aracında mesafeye göre değişen maruziyet seviyeleri.

Çalışmada elde edilen mesafeye bağlı manyetik alan şiddeti verileri, alanın kaynağa uzaklıkla azalışının tek bir güç yasasıyla değil, kaynak geometrisine bağlı olarak bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Veriler üzerinde iki uzaklık r_0 ve r arasındaki ölçümlere dayanarak;

$$\frac{B(r)}{B(r_0)} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \Rightarrow n = \frac{\ln(B(r)/B(r_0))}{\ln(r_0/r)}$$

Denklemden ‘n’ değerleri hesaplanmıştır.

Akü bölgesinde (15 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 25 cm: 6.96 μ T) $n \approx 2.066$;

$$n = \frac{\ln(6,96/20)}{\ln(15/25)} \approx \frac{\ln(0,348)}{\ln(0,5108)} \approx 2.066$$

(15 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 20 cm: 11.12 μ T) $n \approx 2.059$;

$$n = \frac{\ln(11,06/20)}{\ln(15/20)} \approx \frac{\ln(0,553)}{\ln(0,74)} \approx 2.059$$

değerleri $B(r) = a \cdot r^{-n}$ formülüne göre hesaplanmış ve azalma üssü $n \approx 2.07$ (yani $\sim \frac{1}{r^2}$) olarak bulunmuştur; bu, akü paketinin geniş yüzeysel dağılımı nedeniyle dipol-benzeri uzak alandan daha hızlı bir düşüşe karşılık geldiğini göstermiştir.

Motor bölgesinde (12 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 22 cm: 7.7 μ T) $n \approx 1.574$;

$$n = \frac{\ln(7,7/20)}{\ln(12/22)} \approx \frac{\ln(0,346)}{\ln(0,5108)} \approx 1.574$$

(12 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 17 cm: 11,61 μ T) $n \approx 1.561$;

$$n = \frac{\ln(11,61/20)}{\ln(12/17)} \approx \frac{\ln(0,55)}{\ln(0,705)} \approx 1.561$$

Motor bölgesinde ise 12 cm için 20 μ T, 17 cm için 16.1 μ T ve 22 cm için 7.7 μ T ölçümleri ise $n \approx 1.58$ (yani $\frac{1}{r}$ ile $\frac{1}{r^2}$ arasında, pratikte $\frac{1}{r^2}$ ’ye yakın bir değer göstermiştir; bu değer motor içindeki çoklu akım kaynaklarının süperpozisyon etkilerine yani birden fazla gerilim veya akım kaynağını içerdiğini doğrusal ve çift yönlü elektrik devrelerinin olduğunu göstermektedir.

Güç bölgesinde (4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 14 cm: 5.1 μ T) $n \approx 1,09$;

$$n = \frac{\ln(5,1/20)}{\ln(4/14)} \approx \frac{\ln(0,255)}{\ln(0,285)} \approx 1,09$$

(4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 9 cm: 8.2 μ T) $n \approx 1,099$;

$$n = \frac{\ln(8,2/20)}{\ln(4/9)} \approx \frac{\ln(0,41)}{\ln(0,444)} \approx 1,099$$

Güç kabloları civarında (4 cm: 20 μ T; 9 cm: 8.2 μ T; 14 cm: 5.1 μ T) elde edilen $n \approx 1.09$ davranışın yaklaşık $\frac{1}{r}$ olduğu;

Sağ sinyal bölgesinde (5 cm: 10,84 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 7.98 μ T) $n \approx 0,44$;

$$n = \frac{\ln(7,98/10,84)}{\ln(5/10)} \approx \frac{\ln(0,736)}{\ln(0,5)} \approx 0,44$$

Sol sinyal bölgesinde (5 cm: 9,27 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 5.23 μ T) $n \approx 0,825$;

$$n = \frac{\ln(5,23/9,27)}{\ln(5/10)} \approx \frac{\ln(0,564)}{\ln(0,5)} \approx 0,825$$

Sürücü zemin bölgesinde (5 cm: 10,23 μ T $\rightarrow$ 15 cm: 3.84 μ T) $n \approx 0,891$;

$$n = \frac{\ln(3,84/10,23)}{\ln(5/15)} \approx \frac{\ln(0,375)}{\ln(0,5)} \approx 0,891$$

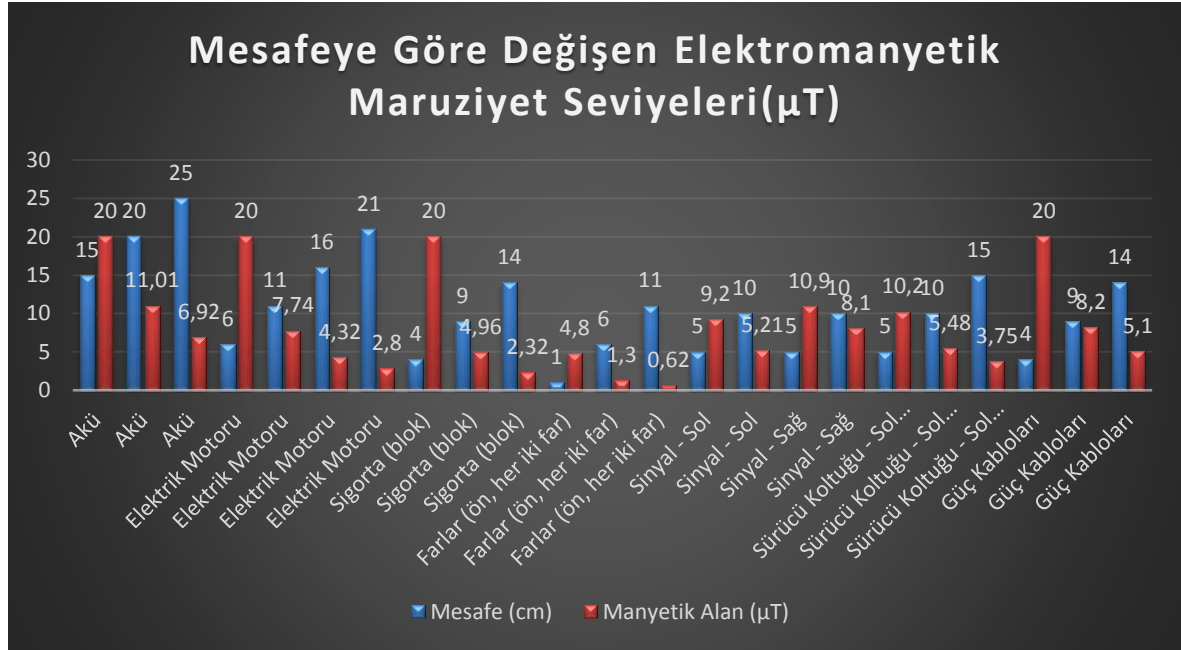
(5 cm: 10,23 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 5,5 μ T) $n \approx 0,895$;

$$n = \frac{\ln(5,5/10,23)}{\ln(5/10)} \approx \frac{\ln(0,537)}{\ln(0,5)} \approx 0,895$$

sinyal ve sürücü zemini yakınlarındaki küçük mesafe aralıklarında ise sol sinyal için $n \approx 0.82$, sağ sinyal için $n \approx 0.43$, sürücü sol zemin için $n \approx 0.89$ daha sınırlı bir düşüş tespit edilmiştir. yapılan ölçümler, kaynağın hemen yakınındaki yoğun alanların ('hotspot'ların), çok kısa mesafelerde çok hızlı azaldığını gösteriyor. Ancak, bu azalma oranı; kaynağın şekline (örneğin, bir kablo demeti mi, bir bağlantı elemanı mı yoksa küçük bir bobin mi olduğuna) ve ölçümü yaptığımız uzaklığa bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebiliyor. Yapılan ölçümlerden çıkan bu deneysel sonuçlar, hangi bölgelerde klasik doğrusal akım yakın alanı ($\approx \frac{1}{r}$) veya daha hızlı azalan dağılım ($\approx \frac{1}{r^2}$) modellerinin daha uygun olduğunu göstermektedir.

Peugeot E-208, elektrikli araç üzerinde gerçekleştirilen mesafeye bağımlı manyetik alan ölçümleri, alan genliğinin kaynak yakınında belirgin şekilde artıp mesafe ile hızlı bir şekilde azaldığını göstermektedir. Akü bölgesinde yapılan ölçümlerde 15 cm için 20 μ T, 20 cm için 11.01 μ T ve 25 cm için 6.92 μ T; elektrik motoru bölgesinde 6 cm için 20 μ T, 11 cm için 7.74 μ T, 16 cm için 4.32 μ T ve 21 cm için 2.80 μ T; sigorta (sigorta/blok) bölgesinde 4 cm için 20 μ T, 9 cm için 5.96 μ T ve 14 cm için 2.32 μ T olarak kaydedilmiştir. Far kümeleri (her iki far için ölçümler) için 1 cm'de 4.80 μ T, 6 cm'de 1.3 μ T ve 11 cm'de 0.62 μ T değerleri gözlenmiştir. Ayrıca sinyal/ışık kümesi çevresinde sol sinyal tarafında 5 cm'de 9.20 μ T ve 10 cm'de 5.21 μ T; sağ sinyal tarafında 5 cm'de 10.90 μ T ve 10 cm'de 8.10 μ T; sürücü

koltuğu sol zemin bölgesinde 5 cm’de 10.20 μ T, 10 cm’de 5.48 μ T ve 15 cm’de 3.75 μ T; güç kabloları bölgesinde ise 4 cm’de 20 μ T, 9 cm’de 8.20 μ T ve 14 cm’de 5.10 μ T ölçülmüştür. Bu veriler, özellikle akü, elektrik motoru ve güç kabloları çevresinde maksimum manyetik alanların tespit edildiğini, araç içi manyetik alan maruziyetinin değerlendirilmesinde kaynaklara göre konumlandırılmış noktasal ölçümlerin ve mesafeye bağlı analizlerin değerli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.42: Peugeot E-208 aracında mesafeye göre değişen maruziyet seviyeleri.

Benzinli araçlarda olduğu gibi elektrikli araçlarda da elde edilen bulgular mesafeye bağlı manyetik alan şiddeti verilerinin, alanın kaynağa uzaklıkla azalışının tek bir güç yasasıyla değil, kaynak geometrisine bağlı olarak bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Veriler üzerinde iki uzaklık r_0 ve r arasındaki ölçümlere dayanarak;

$$\frac{B(r)}{B(r_0)} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \Rightarrow n = \frac{\ln(B(r)/B(r_0))}{\ln(r_0/r)}$$

formülü ile hesaplanmıştır (her bölgede mümkün olan en uzak iki nokta tercih edilmiştir). Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Akü bölgesinde (15 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 25 cm: 6.92 μ T) $n \approx 2.08$;

$$n = \frac{\ln(6,92/20)}{\ln(15/25)} \approx \frac{\ln(0,346)}{\ln(0,5108)} \approx 2.077$$

(15 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 20 cm: 11,01 μ T) $n \approx 2.074$;

$$n = \frac{\ln(11,01/20)}{\ln(15/20)} \approx \frac{\ln(0,5505)}{\ln(0,75)} \approx 2.074$$

elektrik motoru bölgesinde (6 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 21 cm: 2,8 μ T) $n \approx 1,57$;

$$n = \frac{\ln(2,8/20)}{\ln(6/21)} \approx \frac{\ln(0,14)}{\ln(0,2857)} \approx 1.57$$

(6 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 16 cm: 4,32 μ T) $n \approx 1,562$;

$$n = \frac{\ln(4,32/20)}{\ln(6/16)} \approx \frac{\ln(0,216)}{\ln(0,375)} \approx 1.562$$

(6 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 11 cm: 7,74 μ T) $n \approx 1,566$;

$$n = \frac{\ln(7,74/20)}{\ln(6/11)} \approx \frac{\ln(0,387)}{\ln(0,5454)} \approx 1.566$$

sigorta/blok bölgesinde (4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 14 cm: 2.32 μ T) $n \approx 1,72$;

$$n = \frac{\ln(2,32/20)}{\ln(4/14)} \approx \frac{\ln(0,116)}{\ln(0,2857)} \approx 1.72$$

(4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 9 cm: 4,96 μ T) $n \approx 1,719$;

$$n = \frac{\ln(4,96/20)}{\ln(4/9)} \approx \frac{\ln(0,248)}{\ln(0,444)} \approx 1.719$$

Güç kabloları çevresinde (4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 14 cm: 5.1 μ T) $n \approx 1,09$;

$$n = \frac{\ln(5,10/20)}{\ln(4/14)} \approx \frac{\ln(0,255)}{\ln(0,2857)} \approx 1.09$$

(4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 9 cm: 8.2 μ T) $n \approx 1,099$;

$$n = \frac{\ln(8,2/20)}{\ln(4/9)} \approx \frac{\ln(0,41)}{\ln(0,444)} \approx 1.099$$

Ön farlar için (1 cm: 4.80 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 0,62 μ T) $n \approx 0,88$;

$$n = \frac{\ln(0,62/4,80)}{\ln(1/10)} \approx \frac{\ln(0,1291)}{\ln(0,1)} \approx 0,88$$

(1 cm: 4.80 μ T $\rightarrow$ 6 cm: 1,3 μ T) $n \approx 0,811$;

$$n = \frac{\ln(1,3/4,8)}{\ln(1/5)} \approx \frac{\ln(0,2708)}{\ln(0,2)} \approx 0,811$$

sinyal–sol için (5 cm: 9.20 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 5.21 μ T) $n \approx 0,82$;

$$n = \frac{\ln(5,21/9,20)}{\ln(5/10)} \approx \frac{\ln(0,5663)}{\ln(0,6931)} \approx 0,82$$

sinyal–sağ için (5 cm: 10.90 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 8.10 μ T) $n \approx 0,43$;

$$n = \frac{\ln(8,10/10,90)}{\ln(5/10)} \approx \frac{\ln(0,7431)}{\ln(0,6931)} \approx 0,43$$

sürücü koltuğu sol zemin için (5 cm: 10.20 μ T $\rightarrow$ 15 cm: 3.75 μ T) $n \approx 0,91$;

$$n = \frac{\ln(3,75/10,20)}{\ln(5/15)} \approx \frac{\ln(0,3676)}{\ln(0,3333)} \approx 0,91$$

(5 cm: 10.20 μ T $\rightarrow$ 10 cm: 5.48 μ T) $n \approx 0,896$;

$$n = \frac{\ln(5,48/10,20)}{\ln(5/10)} \approx \frac{\ln(0,5372)}{\ln(0,5)} \approx 0,896$$

Olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, akü ve sigorta gibi geniş veya yüzeysel dağılımlı kaynakların uzak alanda $\frac{1}{r^2}$ 'ye yakın veya daha hızlı bir düşüş (akü: ~ 2.08 ; sigorta: ~ 1.72) sergilediğini; bir hat demeti veya doğrusal akım kaynaklarının egemen olduğu güç kabloları çevresinde ise yaklaşık $\frac{1}{r}$ davranışına (güç kabloları: ~ 1.09) yaklaşıldığını göstermektedir. Öte yandan farlar, sinyal ve sürücü zemini yakınlarındaki küçük-mesafe aralıklarında hesaplanan $n < 1$ değerleri (ör. sinyal–sağ ≈ 0.43) alanın çok yakın alan karışımı, geometrik yönelim ve birden fazla örtüşen küçük kaynak nedeniyle daha yavaş veya düzensiz azaldığını; dolayısıyla tek bir sabit üs ile tüm bölgelerin açıklanmasının uygun olmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, araç içi manyetik alan değerlendirmelerinde kaynak geometrisi, ölçüm mesafesi ve yakın alan etkilerinin sisteme özgü olarak dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

4.4. İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi

Tez verilerinizde gözlenen maksimum ve bölgesel manyetik alan şiddetleri birden fazla noktada değişken μ T ölçümleri elde edilmiş olup bazı “hotspot”larda 10–20 μ T düzeylerine kadar çıkan değerler ölçülmüştür, ilgili ölçümlerin güvenlik değerlendirilmesi yapıldığı zaman. Uluslararası kılavuzlar (ICNIRP) güç frekansı ($\approx 50/60$ Hz) için genel halk referans seviyesini 200 μ T civarında belirlemiş olup, ölçtüğünüz mutlak değerler bu referansın

oldukça altındadır; dolayısıyla akut termal akut sinir-uyarımı gibi ICNIRP ile ilişkilendirilen doğrudan riskler beklenmemektedir. Ancak epidemiyolojik literatürde, uzun süreli ELF manyetik alan maruziyeti ile çocukluk lösemisi arasında 0.3–0.4 μT ve üzerindeki ortalama günlük maruziyetlerde bu grupları etkilediği raporlanmış ve bu bulgu uzman kuruluşlarca kanserojen Group 2B'ye etki etmesi değerlendirilmesi gereken bir konu olmuştur; burada vurgulanması gereken nokta, bu ölçümlerin uzun süreli maruziyette hassas gruplar için zararlı etkileri olabileceği değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, araç içindeki ölçülen ortalama pik değerlerin (özellikle BEV'lerde daha yüksek ortalamalara sahip olduğu değerlendirilmiştir) ICNIRP sınırlarının çok altında olmasına rağmen bazı ölçülen μT düzeylerinin hassas gruplar üzerinde yapılan çalışmalar ile ilişkilendirilen epidemiolojik eşiklerin (0.3–0.4 μT) üzerinde olabildiği; fakat araç maruziyetinin genellikle kısa süreli ve geçici olduğu fakat uzun süreli yolculuklarda hassas gruplara etkilerinin araştırılması gerektiği literatürdeki boşlukları giderilmesi açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir.

4.5. ICNIRP/WHO Limitleri ile Karşılaştırma

ICNIRP'in 50 Hz için halka maruziyeti sınırı 200 μT olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde elde edilen ortalama ve pik değerler bu sınırın çok altındadır. Tell ve Kavet'in incelemesinde tüm ölçülen değerler ICNIRP'nun yayımladığı limitlerin oldukça altında kalmıştır. Benzer şekilde Almanya BfS'in kapsamlı çalışmasına göre, incelenen 14 araçta (11 BEV, 2 HEV, 1 ICE) hiçbir durumda önerilen sınır değerler aşılmamıştır. Örneğin BfS Başkanı Paulini, “önerilen maksimum değerlere tüm senaryolarda uyulduğunu” ve bundan dolayı “bilimsel bilgiye göre sağlıkla ilgili hiçbir etkinin beklenmediğini” belirtmiştir. Buna karşın ölçümlerde bazı kısa süreli lokal pikler gözlenmiştir. Özellikle sabit durumdaki kablolu şarj sırasında, literatürde referans olarak kabul edilen 27 μT gibi sınırlamaların elde ettiğimiz ölçümleri formülize edip değerlendirdiğimiz zaman aşılması söz konusudur. Ancak bu aşım anlık ve lokal olup, sürekli maruziyet açısından değerlerin etkisi konusunda araştırmalar devam etmektedir. Genel değerlendirmede, ölçülen manyetik alanlar ICNIRP/WHO'nun belirlediği sınır değerlerin çok altında kalmakta, hiçbir araç veya konumda ölçülen değerler sağlık kuruluşlarının akut etki referansalarını geçmemektedir. Fakat kronik maruziyetlerin özellikle hassas gruplar açısından etkileri henüz tam olarak bilinmemektedir.

4.6. Dağılım ve Hotspot Analizi

Elektrikli, hibrit ve benzinli araçlarda gerçekleştirilen kapsamlı ölçümler, elektromanyetik maruziyet seviyelerinin kabin içinde homojen dağılmadığını; belirgin “dağılım bölgeleri” ve lokal “hotspot” noktaları varlığını ortaya koymuştur. Çalışmada ön kabinde özellikle torpido / sağ ön torpido çevresi ile sürücü zemini; arka kabinde ise şaft-şaft birleşimi ve sol arka zemin gibi noktalar, diğer noktalara kıyasla düzenli olarak yüksek manyetik akı yoğunlukları sergilemiştir. Birçok araçta torpido ve sürücü zemininde $\sim 20 \mu\text{T}$ düzeyine varan zirveler; sol arka zemin/şarj bağlantı hatlarında yer yer 6–20 μT aralığında olduğu ölçülmüştür. Ayrıca şarj portu ve batarya çıkış hatlarına 1–10 cm mesafede yapılan ölçümlerde 20 μT 'ye varan ani yakın alan değerleri tespit edilmiştir; Hibrit araçlarda ise elektriksel ve benzinli sistemler arasındaki geçiş anlarında ani manyetik alan pikleri görülmüştür. Yolculuk sırasında yapılan sert ivmelenme ve ani frenleme (rejeneratif frenleme) anları da alan şiddetinde geçici zirveler ortaya çıkarmıştır. Bu bulgular, ölçüm sonuçlarının güç devre elemanlarının coğrafi dağılımıyla tutarlı olduğunu göstermektedir. Bulgular, kabin içi dağılımın doğrudan bileşen yerleşimine (batarya, güç kabloları, invertör/elektronik, dokunmatik ekran/kablosuz şarj) bağlı olduğunu göstermektedir.

4.7. Neden Analizi

Ölçümlerin mekânsal dağılımı, kabin içi elektromanyetik maruziyet seviyelerinin bileşen yerleşimi ve yüksek akım taşıyan iletken hatların konfigürasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Ön kabinde sağ ön torpido, şaft bölgesi ve şarj portu çevresinde gözlemlenen lokal zirveler ör. $\sim 20 \mu\text{T}$ 'ye ulaşan hotspotlar gibi bu bölgelerde yoğunlaşan güç elektronik üniteleri, batarya çıkış kabloları ve yüksek akım geçiren bağlantı hatlarının manyetik alan üretiminden kaynaklanmaktadır; ölçümler ayrıca ekran, kablosuz şarj gibi insan bilgisayar etkileşiminin yoğun olduğu yüzey çevrelerinde orta şiddette alanlar tespit etmiştir. Buna karşılık arka kabin ve dış yüzeylerde ölçülen çok düşük seviyeler arka koltuk zemininde $\sim 0.02\text{--}0.42 \mu\text{T}$ aralığı aracın yapısal tasarımının ve elektromanyetik izolasyonun bu bölgelerde etkin olduğunu göstermektedir; dolayısıyla mekânsal dağılım kaynakların fiziksel yakınlığı ve yapısal sönümleme ile açıklanabilir.

Dinamik sürüş koşulları ve şarj işlemleri, gözlemlenen hotspotların zamansel görünürlüğünü ve genlik varyasyonlarını açıklayan mekanizmaları ortaya koymaktadır. Ani hızlanma ve rejeneratif frenleme gibi durumlarda batarya şebeke geri beslemesi ve kablolar üzerinden

geçen pik akımlar, ölçümlerde zemine ve şaft çevresine yakın noktalarda geçici fakat belirgin artışlara kısa süreli 5–20 μT zirvelere neden olmaktadır; ayrıca şarj portuna yakın mesafelerde manyetik alanın mesafe ile hızlıca azaldığı ör. 1–10 cm aralığında $20 \rightarrow \sim 7$ μT 'ye düştüğü gözlemlenmiş olup bu, kaynak uzaklık ilişkisini mesafeye bağlı düşüşü doğrulamaktadır. Bu bulgular, elektromanyetik maruziyet seviyelerinin sadece statik yerleşimle değil, akım profilleri yük alma, rejenerasyon, hızlı/yoğun şarj gibi durumlar ile de şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Bu tespitlerin sonucu olarak, tasarım ve risk değerlendirmeleri iki ana noktada toplayabiliriz: birincisi, yüksek akım hatlarının ve güç elektroniğinin kabin içindeki rota ve konumlandırmasının optimize edilmesi, gömme ya da ekranlama ile lokal hotspotların dikkat çekici olması; ikincisi, şarj personeli veya araçla uzun süre yakın temas halinde olan kullanıcı grupları için şarj portu ve batarya bağlantılarına ilişkin özel çalışma prosedürleri ve maruziyet kayıtlarının oluşturulmasıdır. Ölçümlerin tamamı uluslararası halk sağlığı referans değerlerinin altında kalsa da ICNIRP sınırları göz önünde bulundurulduğunda özellikle uzun süreli ve kronik maruziyet durumlarda insan sağlığı üzerindeki etkilerinin belirsizliği nedeniyle bileşen yerleşimi, kablo izolasyonu ve EMC elektromanyetik uyumluluk önlemlerinin tasarım aşamasında önceliklendirilmesi önerilmektedir; ileri çalışmalar için uzun dönem maruziyet ve bileşen düzeyinde ekranlama optimizasyonu tavsiye edilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

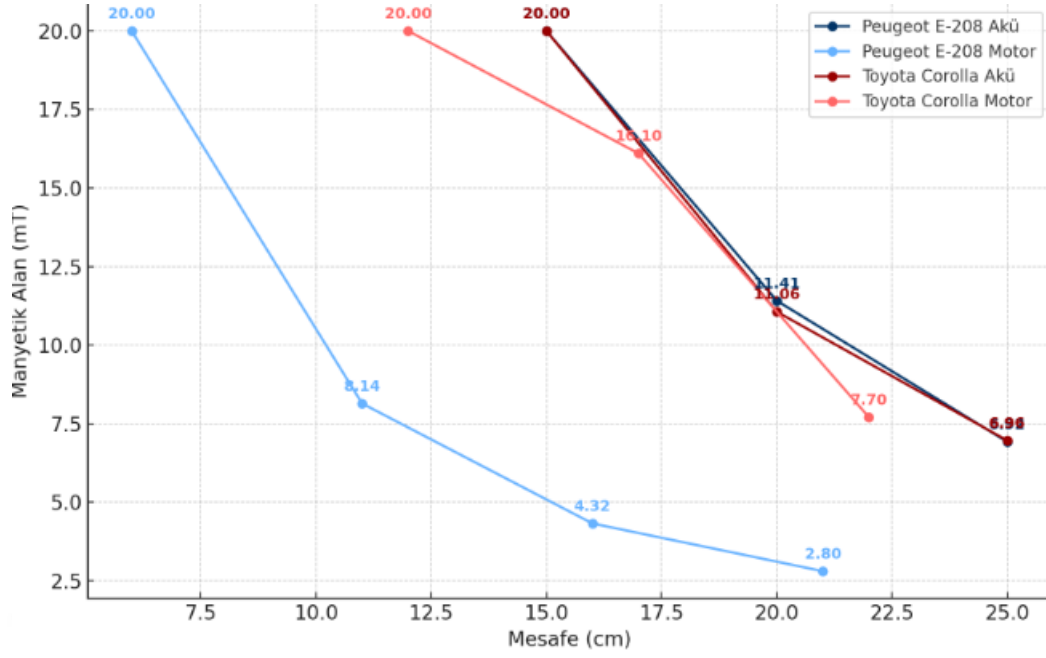
Yapılan ölçümler BEV (bataryalı elektrikli) araçların kabin içindeki manyetik alan şiddetlerinin, benzinli ve hibrit araçlara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Tez verilerinde BEV’lerde ortalama alan şiddeti, HEV ve benzinli araçlara kıyasla bazı bölgelerde yaklaşık 20 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Litaratürdeki çalışmalarda EV/HEV araçlarda ortalama 0.6–3.5 μT aralığında manyetik alan ölçülürken, benzinli araçlarda bu değerler 0.4–0.6 μT civarındadır. Her iki çalışma da ICNIRP sınırlarının (200 μT) çok altında kalmaktadır. Ölçümlerde BEV’lerde kaydedilen pik değerler de HEV/EV araçlardan fazla olduğu gözlemlenmiş olup bu da elektrikli sistemlerin (özellikle yüksek güçlü batarya, inverter, kablosuz şarj ve rejeneratif fren) önemli bir manyetik alan kaynağı olduğunu işaret etmektedir. Diğer yandan hibrit araçlarda motor mod geçiş anlarında ani dalgalanmalar görülmüş, benzinli araçlarda ise kabin içi manyetik alan genel olarak ihmal edilebilecek seviyede olup, yapılan ölçümlerde BEV teknolojilerindeki ek bileşenlerin EMF seviyelerini belirgin biçimde yükselttiğini ortaya koymaktadır.

Benzinli, hibrit ve tam bataryalı elektrikli araçlarda gerçekleştirdiğimiz kabin içi manyetik alan ölçümlerinde, her üç sisteminde de en yüksek manyetik alan şiddetleri motor–akü veya şarj portu çevresinde “sıcak nokta” olarak tanımlanan bölgelerde gözlenmiştir; Hyundai Accent Admire ve Corolla Cross Hybrit’in motor–akü bölgelerinde, MG Luxury 4, Seres 3, Kia EV3 ve TOGG TX10’un şarj portu ile yolcu omuz/torpidon alanlarında 20 μT ’ye varan pik değerler kaydedilmiştir. Benzinli araçta sürücü zemini (10,78 μT) ve frenleme esnası sağ arka zemin (9,46 μT), hibritte kaput altı akü bölgesi (9,67 μT) ile sağ arka koltuk zemini (9,27 μT) olmak üzere yüksek maruziyet alanları tespit edilirken; BEV modellerinde MG Luxury 4’te şarj portu 5 cm’de 12 μT , Kia EV3’te sürücü zemini orta noktada 9,27 μT ve MG multimedya ekran çevresinde 7,24 μT değerleriyle ikinci derece sıcak noktalar belirlenmiştir. Düşük elektromanyetik maruziyet bölgelerinde ise hibrit araçta sol arka koltuk zemini (0,12 μT), ön sinyal ışığı (0,26 μT) ve tavan altı kablo girişi (0,32 μT); benzinlide sol ön far içi (0,20 μT) ve sağ ön koltuk arkası (0,32 μT); BEV’lerde ise TOGG TX10 sol yolcu bölgesi (0,14 μT), MG Luxury 4 bagaj sinyal lambası (0,15 μT) ve MG sol arka sinyal lambası (0,39 μT) en düşük değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, hibrit araçların düşük maruziyet bölgelerinde benzinlilere kıyasla biraz daha az manyetik alan oluşturduğunu, ancak her üç grupta da güç aktarım ünitelerine yakın noktalarda sağlık risklerine dikkat çeken kritik pike sahip olmadığı ve tam bataryalı araçlarda şarj sistemine

yakın bölgelerdeki yüksek şiddetli alanların kabin içindeki genel maruziyeti belirgin biçimde etkilediğini göstermektedir.

Çalışma boyunca elde edilen mesafeye bağlı manyetik alan verileri, araç içi elektromanyetik maruziyet seviyelerinin tek tip bir güç yasasıyla (her yerde $\frac{1}{r^2}$ veya $\frac{1}{r}$) açıklanamayacağını açıkça gösterilmiştir. İnce uzun tel modelinden türetilen Biot–Savart ilişkisi doğrusal/hatbenzeri kaynaklar için (ör. güç kabloları) yaklaşık $\frac{1}{r}$ ile yakın bir değer sunarken; çalışmamızda güç kabloları civarında bulunan ölçümler $n \approx 1,09$ değeriyle bu yakınlığı desteklemiştir. Buna karşın geniş yüzeyli veya yüzeysel dağılım gösteren bileşenler (ör. akü, sigorta blokları) uzak alanda hızlı bir düşüşe yol açmaktadır; örneğin akü bölgelerinde hesaplanan $n \approx 2.06–2.08$ değerleri bu tür kaynakların $\frac{1}{r^2}$ 'ye yakın bir değer gösterdiği ölçülmüştür. Örnek olarak Seres 3 şarj portunda $r_0 = 1$ cm için $20 \mu T \rightarrow 5$ cm'de $6,06 \mu T$ ve 10 cm'de $2,86 \mu T$ ölçümlerinden elde edilen $n \approx 0,74–0,84$ aralığı yakın alandaki sıcak noktaların (hotspot) küçük mesafe değişimlerinde elektromanyetik maruziyet seviyelerinin etkin bir şekilde değiştiği gözlemlenmiştir; TOGG TX10 şarj portunda $r_0 = 3$ cm için $20 \mu T \rightarrow 5$ cm'de $12 \mu T$ ölçümünden elde edilen $n \approx 1$ değeri ise doğrusal olmayan kaynak davranışına daha yakın bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur.

Elde edilen bölgesel n değerleri (motor $\approx 1.56–1.58$; sigorta ≈ 1.72 ; far/sinyal ve sürücü zemini yakınlarında bazı aralıklar için $n < 1$) kaynak geometrisi, çoklu akım bileşenlerinin süperpozisyonu ve yakın alan karışımı gibi etkenlerin alan dağılımında belirgin farklılıklara yol açtığını göstermektedir. Özellikle far, sinyal ve sürücü zemini gibi küçük-mesafe aralıklarında gözlenen $n < 1$ (ör. sinyal-sağ $\approx 0,43$; sinyal-sol $\approx 0,82$; sürücü zemini $\approx 0,89$) değerlerin, düşük manyetik alan kaynaklarının alan azalımını herhangi bir yasaya uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, araç içi manyetik alan değerlendirmelerinde kaynak tipine (doğrusal tel, yüzeysel dağılım gösteren bileşen, noktasal/dipol kaynak) göre ayrı modellemelerin ve farklı mesafe aralıklarında elde edilmiş ölçümlerin kullanılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

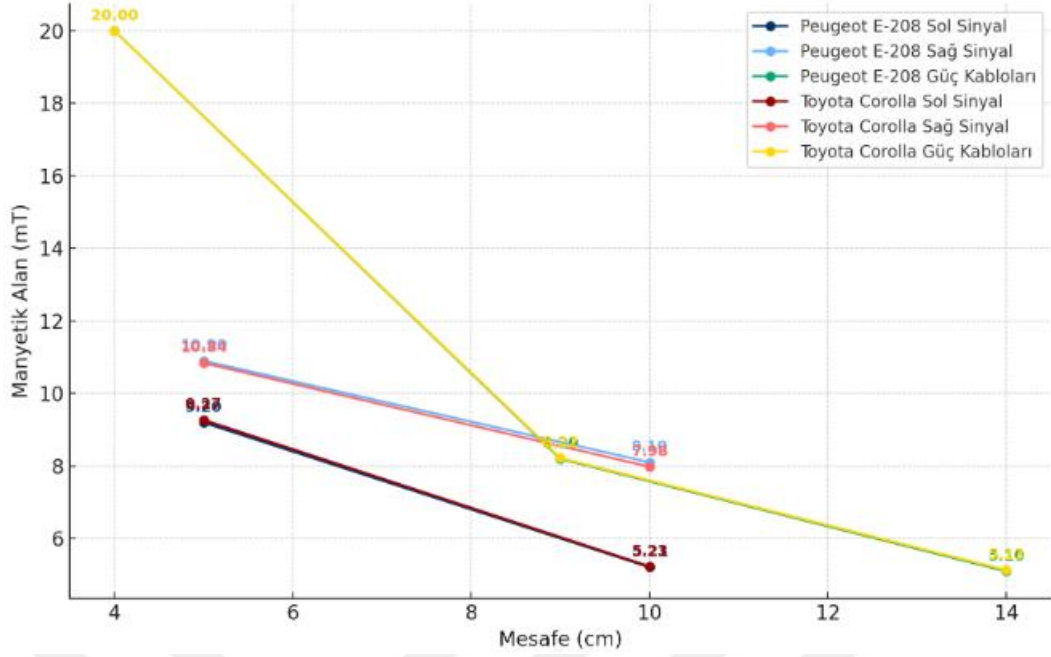


Şekil 5.1: Peugeot E-208 ve Toyota Corolla araçlarının motor ve akü bölgelerinin karşılaştırmalı analizi.

Yapılan ölçümleri araçlar arasında karşılaştırma yapıldığı zaman, Peugeot E-208 ile benzinli Toyota Corolla'nın motor bölgelerinin (n) değerlerinin birbirine yakın davranış sergilediğini, ancak mutlak alan genliği ve etkin mesafe ölçeklerinin farklı olduğunu görülmektedir. Her iki araçta hesaplanan üstel azalma değerleri (Peugeot için $n \approx 1,57$; Corolla/motor için $n \approx 1,56-1,58$) alanın $\frac{1}{r}$ ile $\frac{1}{r^2}$ arasında bir rejimde olduğu gözlemlenmiştir; yani çoklu akım kaynaklarının süperpozisyonu ve karmaşık geometri etkilerinin hâkim olduğu bir uzak-alan davranışı gösterdiğini işaret eder. Buna karşın mutlak değerler ve referans mesafelere bakıldığında zaman iki araç arasında farklılıklar olduğu görülmektedir: Peugeot motoru için 6 cm'de tespit edilen 20 μT değeri, aynı üstel azalma ile 12 cm'de $\approx 6.74 \mu T$ 'ye düşerken (ölçülen 11 cm değeri $\approx 7.72 \mu T$ ile uyumlu), Corolla'da 12 cm'de ölçülen 20 μT değeri aynı eğriyle geriye doğru bakıldığında 6 cm civarında $\approx 59 \mu T$ 'ye eşdeğer bir yakın-alan şiddeti verir. Başka bir deyişle, şekil n değerleri benzer olsa da Peugeot'daki 20 μT "referans noktası" daha yakın bir mesafede elde edilmiş; Corolla'daki 20 μT ise daha uzak bir mesafede ölçülmüştür. Bu da Peugeot motor bölgesinin 20 μT 'e ulaşan lokal bir yakın kaynağa; Corolla'nın ise daha güçlü veya ölçüm pozisyonu bakımından farklı konumlandırılmış bir kaynak dağılımına işaret ettiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, motor bölgelerinin alan azalma eğrilerinin biçimi benzer olmakla birlikte maruziyet dereceleri aynı olmadığı tespit edilmiştir.

Her iki araç için akü bölgesine ilişkin ölçümler incelendiği zaman ise; her iki araçta da yüksek derecede benzer bir davranış sergilemiş; her iki araç için de 15 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 20 cm: 11.01-11.06 μ T $\rightarrow$ 25 cm: 6.92-6.96 μ T verilerinden çıkartılan üstel azalma katsayıları $n \approx 2.06-2.08$ bulunmuştur. Bu sayısal sonuç, akü paketinin manyetik alan üretiminin uzak alanda yüzeysel dağılım geniş alan karakteri gösterdiğini ve uzak alanda $\frac{1}{r^2}$ 'ye yakın, dolayısıyla dipol-benzeri hızlı bir sönümlenme eğilimi olduğunu desteklemektedir. Pratik açıdan bu, akü çevresindeki “hotspot”ların mesafeyle hızlı biçimde zayıfladığını; dolayısıyla maruziyetin azaltılmasında mesafe artırımının etkin bir tedbir olduğunu göstermektedir. Ancak aynı n değerinin elde edilmesi iki aracın akü bölgesi için alan dağılım biçimlerinin benzer olduğunu işaret etse de, tasarım farklılıkları (akü boyutu, hücre yerleşimi, kablolama ve ekranlama) ile ölçüm pozisyonundaki ince konumsal farklılıkların etkileyeceği unutulmamalıdır. Sonuç olarak, akü bölgesinin modellenmesinde yüzeysel akım dağılımı veya dipol-benzeri yaklaşımlar uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Peugeot E-208 ile benzinli Toyota Corolla'nın güç kabloları çevresinde yapılan ölçümler, her iki araçta da benzer bir azalma davranışı sergilemiş; örnek olarak 4 cm: 20 μ T $\rightarrow$ 9 cm: 8.2-8.22 μ T $\rightarrow$ 14 cm: 5.1-5.13 μ T verilerinden hesaplanan üstel azalma katsayıları $n \approx 1.09-1.10$ olup bu durum manyetik alanın mesafeye yaklaşık olarak $\frac{1}{r}$ davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu önemlidir, doğrusal kablo demetlerinin hakim olduğu bölgelerde maruziyet mesafe ile öngörülebilir şekilde azalır; dolayısıyla mesafe artırımı maruziyeti etkin biçimde düşürür. Ancak mutlak alan genişliği; akım büyüklüğü, kablo demetinin geometrisi, büküm/paketleme derecesi ve varsa ekranlama gibi uygulamaya özgü faktörlere bağlı olarak araçlar arasında değişebilir. Sonuç olarak güç kabloları için maruziyet değerlendirmelerinde benzer özellikler gösterdikleri gözlemlenmiştir.



Şekil 5.2: Peugeot E-208 ve Toyota Corolla araçlarının sinyal ve güç kabloları bölgelerinin karşılaştırmalı analizi.

Sinyal/ışık kümeleri ve sürücü zemini yakınlarındaki manyetik alanlarının ölçümleri karşılaştırıldığı zaman ise, her iki araçta da benzer düzeylerde ve benzer davranışlar sergilediğini gözlemlenmiştir. Her iki araçta da sol sinyalde 5 cm’de $\approx 9,2-9,27 \mu\text{T}$ (10 cm’de $\approx 5,21-5,23 \mu\text{T}$), sağ sinyalde 5 cm’de $\approx 10,84-10,9 \mu\text{T}$ (10 cm’de $\approx 7,98-8,1 \mu\text{T}$) ve sürücü sol zemininde 5 cm’de $\approx 10,2 \mu\text{T}$ (10 cm’de $\approx 5,5 \mu\text{T}$) bulunmuştur. Bu noktalarda hesaplanan n değerleri genelde 0.4–0.9 aralığında olup (ör. sağ sinyal ≈ 0.44 , sol sinyal ≈ 0.82 , sürücü zemini ≈ 0.89) alanın kaynak yakınında karmaşık yakın-alan etkileri, geometrik yönelim ve birden fazla örtüşen küçük kaynağın süperpozisyonu nedeniyle tek bir $\frac{1}{r}$ modeliyle açıklanmasının yetersiz kaldığını işaret etmektedir. Sinyal ve sürücü zeminindeki “hotspot”ların çok kısa mesafelerde yüksek ancak düzensiz bir düşüş gösterdiği anlamına gelir. Buna karşılık Peugeot E-208’in ön farlarında ölçülen mutlak seviyeler (1 cm’de $4,80 \mu\text{T}$; 6 cm’de $1,3 \mu\text{T}$; 11 cm’de $0,62 \mu\text{T}$) ve far için hesaplanan $n \approx 0.81-0.88$ değerleri, far kümelerinin hem başlangıçtaki mutlak genliğinin sinyal/sürücü noktalarına göre daha düşük hem de mesafeyle daha düzenli azalan bir profile sahip olduğunu göstermektedir. Özetle, benzinli (Toyota) ve elektrikli (Peugeot) araçları arasında sinyal ve sürücü zeminindeki lokal maruziyet büyüklükleri ve yakın-alan karakteri bakımından kayda değer bir fark bulunmamış; bununla birlikte farlar (özellikle Peugeot’ta) daha düşük maksimum değerler ve daha düzenli bir azalma göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Z. Davanipour and E. Sobel**, "Long-term exposure to magnetic fields and the risks of Alzheimer's disease and breast cancer: Further biological research," *Pathophysiology*, vol. 16, no. 2-3, pp. 149-156, 2009.
- [2] **I. C. o. N.-I. R. Protection**, "ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields," ed, 2020.
- [3] **W. H. Organization**, *Extremely low frequency fields*. World Health Organization, 2007.
- [4] **I. C. o. N.-I. R. Protection**, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [5] **J. Grellier, P. Ravazzani, and E. Cardis**, "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe," *Environment international*, vol. 62, pp. 55-63, 2014.
- [6] **A. A. Marino and R. O. Becker**, "Biological effects of extremely low frequency electric and magnetic fields: a review," *Physiol Chem Phys*, vol. 9, no. 2, pp. 131-147, 1977.
- [7] **P. Gowland**, "Present and future magnetic resonance sources of exposure to static fields," *Progress in biophysics and molecular biology*, vol. 87, no. 2-3, pp. 175-183, 2005.
- [8] **J. F. Schenck**, "Physical interactions of static magnetic fields with living tissues," *Progress in biophysics and molecular biology*, vol. 87, no. 2-3, pp. 185-204, 2005.
- [9] **A. Glans, J. Wilén, L. Lindgren, I. M. Björkman-Burtscher, and B. Hansson**, "Health effects related to exposure of static magnetic fields and acoustic noise—comparison between MR and CT radiographers," *European Radiology*, vol. 32, no. 11, pp. 7896-7909, 2022.
- [10] **M. Simkó and M. O. Mattsson**, "Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses in vitro: possible immune cell activation," *Journal of cellular biochemistry*, vol. 93, no. 1, pp. 83-92, 2004.
- [11] **Y. Zhang, J. Lai, G. Ruan, C. Chen, and D. W. Wang**, "Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: a pooled analysis of epidemiologic studies," *Environment international*, vol. 88, pp. 36-43, 2016.
- [12] **E. Cecerska-Heryć et al.**, "The effect of a rotating magnetic field on the antioxidant system in healthy volunteers-preliminary study," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 8677, 2024.
- [13] **P. Valbonesi, S. Franzellitti, F. Bersani, A. Contin, and E. Fabbri**, "Effects of the exposure to intermittent 1.8 GHz radio frequency electromagnetic fields on HSP70 expression and MAPK signaling pathways in PC12 cells," *International Journal of Radiation Biology*, vol. 90, no. 5, pp. 382-391, 2014.
- [14] **S. Franzellitti et al.**, "Transient DNA damage induced by high-frequency electromagnetic fields (GSM 1.8 GHz) in the human trophoblast HTR-8/SVneo cell line evaluated with the alkaline comet assay," *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, vol. 683, no. 1-2, pp. 35-42, 2010.
- [15] **A. Young, T. Hunt, and M. Ericson**, "The slowest shared resonance: a review of electromagnetic field oscillations between central and peripheral nervous systems," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 15, p. 796455, 2022.
- [16] **M. G. Christiansen and P. Anikeeva**, "Magnetic fields for modulating the nervous system," *Physics Today*, vol. 74, no. 2, pp. 28-34, 2021.

- [17] **J. Budziosz, A. Stanek, A. Sieroń, J. Witkoś, A. Cholewka, and K. Sieroń**, "Effects of Low-Frequency Electromagnetic Field on Oxidative Stress in Selected Structures of the Central Nervous System," *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, vol. 2018, no. 1, p. 1427412, 2018.
- [18] **F. Barnes and J. E. R. Freeman**, "Some thoughts on the possible health effects of electric and magnetic fields and exposure guidelines," *Front Public Health*, vol. 10, p. 994758, 2022, doi: 10.3389/fpubh.2022.994758.
- [19] **Sander Greenland, A. R. Sheppard, W. T. Kaune, C. Poole, M. A. Kelsh**, "human effect a_pooled_analysis_of_magnetic_fields,_wire_codes,.3.pdf."
- [20] **I. Yakymenko, O. Tsybulin, E. Sidorik, D. Henshel, O. Kyrylenko, and S. Kyrylenko**, "Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation," *Electromagnetic biology and medicine*, vol. 35, no. 2, pp. 186-202, 2016.
- [21] **L. Vallet**, "Electro (magnetic) fields interactions with cells: mechanistic insights and potential new therapeutic applications," Université Paris-Saclay, 2023.
- [22] **I. Yakymenko and O. Tsybulin**, "Oxidative Stress Induced by Wireless Communication Electromagnetic Fields," in *Electromagnetic Fields of Wireless Communications: Biological and Health Effects*: CRC Press, 2022, pp. 97-136.
- [23] **I. Belyaev et al.**, "EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses," *Reviews on environmental health*, vol. 31, no. 3, pp. 363-397, 2016.
- [24] **L. Hardell and M. Carlberg**, "[Comment] Health risks from radiofrequency radiation, including 5G, should be assessed by experts with no conflicts of interest," *Oncology Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 1-1, 2020.
- [25] **N. Edelstyn and A. Oldershaw**, "The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention," *Neuroreport*, vol. 13, no. 1, pp. 119-121, 2002.
- [26] **M. Moradi, N. Naghdi, H. Hemmati, M. Asadi-Samani, and M. Bahmani**, "Effect of ultra high frequency mobile phone radiation on human health," *Electronic physician*, vol. 8, no. 5, p. 2452, 2016.
- [27] **A. Razek**, "Review of contactless energy transfer concept applied to inductive power transfer systems in electric vehicles," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 7, p. 3221, 2021.
- [28] **V. Cirimele, F. Freschi, and M. Mitolo**, "I charge, therefore I Drive: Current state of electric vehicle charging systems," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 21, no. 6, pp. 91-97, 2023.
- [29] **M. Dieudonné**, "Electromagnetic hypersensitivity: a critical review of explanatory hypotheses," *Environmental Health*, vol. 19, pp. 1-12, 2020.
- [30] **S. J. Genuis and C. T. Lipp**, "Electromagnetic hypersensitivity: fact or fiction?," *Science of the Total Environment*, vol. 414, pp. 103-112, 2012.
- [31] **H. Lai**, "Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields," *Electromagnetic biology and medicine*, vol. 40, no. 2, pp. 264-273, 2021.
- [32] **I. Safety**, "o. E. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz," *IEEE Std C95. 1–2019 (Revision of IEEE Std C95. 1–2005/Incorporates IEEE Std C95. 1–2019/Cor 1–2019)*, pp. 1-312, 2019.
- [33] **I. C. o. N.-I. R. Protection**, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health physics*, vol. 118, no. 5, pp. 483-524, 2020.
- [34] **D. J. Griffiths**, *Introduction to electrodynamics*. Cambridge University Press, 2023.
- [35] **J. D. Jackson**, *Classical electrodynamics*. John Wiley & Sons, 1998.

- [36] **D. A. Hart**, "The Influence of Magnetic Fields, Including the Planetary Magnetic Field, on Complex Life Forms: How Do Biological Systems Function in This Field and in Electromagnetic Fields?," *Biophysica*, vol. 4, no. 1, pp. 1-21, 2024.
- [37] **J. McCloskey**, "Fundamentals of Electromagnetics, Electric Field, Potential, and Capacitance," in *Electro Magnetic Applications (EMA) Expo*, 2024.
- [38] **J. D. Jackson and R. F. Fox**, "Classical electrodynamics," ed: American Association of Physics Teachers, 1999.
- [39] **J. D. Jackson**, *Classical electrodynamics*. John Wiley & Sons, 2021.
- [40] **T. Al-Shaikhli, B. Ahmad, and M. Al-Taweel**, "The implementations and applications of ampere's law to the theory of electromagnetic fields," *Int. J. Adv. Sci. Technol*, vol. 28, no. 8, pp. 515-525, 2019.
- [41] **I. Galili, D. Kaplan, and Y. Lehavi**, "Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in an introductory physics course," *American journal of physics*, vol. 74, no. 4, pp. 337-343, 2006.
- [42] **C. A. Balanis**, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [43] **J. West and O. B. M. F. A. Grv**, "KUANTUM BİLGİSAYARI."
- [44] **K. Erdin**, "Elektromanyetik dalgaların oluşumu ve uzaktan algılama," *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, vol. 28, no. 2, pp. 157-167, 1978.
- [45] **T. M. Fiedler, M. E. Ladd, and A. K. Bitz**, "SAR simulations & safety," *NeuroImage*, vol. 168, pp. 33-58, 2018.
- [46] **T. Balz, H. Hammer, and S. Auer**, "Potentials and limitations of SAR image simulators—A comparative study of three simulation approaches," *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 101, pp. 102-109, 2015.
- [47] **A. Cassini et al.**, "Burden of six healthcare-associated infections on European population health: estimating incidence-based disability-adjusted life years through a population prevalence-based modelling study," *PLoS medicine*, vol. 13, no. 10, p. e1002150, 2016.
- [48] **S. Sade and A. Katzir**, "Fiberoptic infrared radiometer for real time in situ thermometry inside an MRI system," *Magnetic resonance imaging*, vol. 19, no. 2, pp. 287-290, 2001.
- [49] **A. Lakhssassi, E. Kengne, and H. Semmaoui**, "Modified pennes' equation modelling bio-heat transfer in living tissues: analytical and numerical analysis," *Natural Science*, vol. 2, no. 12, p. 1375, 2010.
- [50] **J. Khan, D. A. Sehrai, and U. Ali**, "Design of dual band 5G antenna array with SAR analysis for future mobile handsets," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 14, pp. 809-816, 2019.
- [51] **E. Fields**, "ICNIRP GUIDELINES," *Health*, vol. 17, no. 9078/20, p. 0, 2020.
- [52] **B. G. Green and C. Akirav**, "Threshold and rate sensitivity of low-threshold thermal nociception," *European Journal of Neuroscience*, vol. 31, no. 9, pp. 1637-1645, 2010.
- [53] **W. R. Adey**, "Biological effects of electromagnetic fields," *Journal of cellular biochemistry*, vol. 51, no. 4, pp. 410-416, 1993.
- [54] **R. Robinson Jr**, "Magnetic field measurements on stellar sources-A new method," *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 239, Aug. 1, 1980, p. 961-967., vol. 239, pp. 961-967, 1980.
- [55] **V. Sapunov, A. Denisov, O. Denisova, and D. Saveliev**, "Proton and Overhauser magnetometers metrology," *Contributions to Geophysics & Geodesy*, vol. 31, no. 1, pp. 119-124, 2001.
- [56] **S. Tumanski**, "Induction coil sensors—A review," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 3, p. R31, 2007.

- [57] **P. á. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso**, "Magnetoresistive sensors," *Journal of Physics: condensed matter*, vol. 19, no. 16, p. 165221, 2007.
- [58] **H. Auster et al.**, "The THEMIS fluxgate magnetometer," *Space science reviews*, vol. 141, pp. 235-264, 2008.
- [59] **I. Bakonyi and L. Péter**, "Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems," *Progress in Materials Science*, vol. 55, no. 3, pp. 107-245, 2010.
- [60] **R. T. Merrill and M. W. McElhinny**, *The Earth's magnetic field: Its history, origin and planetary perspective*. Academic Press London, 1983.
- [61] **C. P. Nicolaou, A. P. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou, and J. N. Sahalos**, "Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 5, pp. 1107-1116, 2011.
- [62] **R. G. Olsen and P. Wong**, "Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 2046-2055, 1992.
- [63] **M. Darbandi, S. Darbandi, A. Agarwal, R. Henkle, and M. R. Sadeghi**, "The effects of exposure to low frequency electromagnetic fields on male fertility," *Altern Ther Health Med*, vol. 23, 2017.
- [64] **B. B. Levitt and H. Lai**, "Biological effects from exposure to electromagnetic radiation emitted by cell tower base stations and other antenna arrays," *Environmental Reviews*, vol. 18, no. NA, pp. 369-395, 2010.
- [65] **G. Hyland**, "How exposure to mobile phone base-station signals can adversely affect humans," ed, 2005.
- [66] **L. Zastko, L. Makinistian, A. Tvarožná, F. Ferreyra, and I. Belyaev**, "Mapping of static magnetic fields near the surface of mobile phones," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 19002, 2021.
- [67] **A. Vassilev, A. Ferber, C. Wehrmann, O. Pinaud, M. Schilling, and A. R. Ruddle**, "Magnetic field exposure assessment in electric vehicles," *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 57, no. 1, pp. 35-43, 2014.
- [68] **J. Wyszowska, M. Szczygiel, and T. Trawinski**, "Static magnetic field and extremely low-frequency magnetic field in hybrid and electric vehicles," *Prz. Elektrotech*, vol. 96, no. 2, pp. 60-62, 2020.
- [69] **K. Yamazaki, K. Utsunomiya, and H. Ohiwa**, "Mechanism of torque ripple generation by time and space harmonic magnetic fields in permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 10, pp. 9884-9894, 2021.
- [70] **D. B. Richardson**, "Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 247-254, 2013.
- [71] **Url-1** <<https://www.togg.com.tr/t10x>> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [72] **Url-2** <<https://www.kia.com/tr/modeller/ev3/teknik-ozellikler.html>> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [73] **Url-3** <<https://www.mg-turkey.com/tr/mg4.html>> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [74] **Url-4** <<https://www.auto-data.net/tr/seres-3-53.6-kwh-163hp-e-shift->> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [75] **Url-5**, <https://www.hyundaiclubtr.com/upload/pdf/accent_admire.pdf> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [76] **Url-6** <<https://www.toyota.com.tr/araba-modelleri/corolla-sedan>> (Erişim tarihi: 20.11.2024)

- [77] **S. Sarvaiya, S. Ganesh, and B. Xu**, "Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life," *Energy*, vol. 228, p. 120604, 2021.
- [78] **Url-7**<https://www.toyota.com.tr/content/dam/toyota/nmsc/turkey/cars/e-brosur/corolla-cross/TOYOTA_Corolla-Cross_Teknik-Ozellikler_2024.pdf> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [79] **M. Sabri, K. A. Danapalasingam, and M. F. Rahmat**, "A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1433-1442, 2016.
- [80] **Url-8**<<https://www.nissan.com.tr/modeller/binek-araclar/yeni-nissan-qashqai/teknik-bilgi-donanimlar.html>> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [81] **Url-9**<<https://www.vovov.hu/en/Mestek-EMF02R-electromagnetic-radiation-detector>> (Erişim tarihi: 20.11.2024)
- [82] **A. Ahlbom et al.**, "A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia," *British journal of cancer*, vol. 83, no. 5, pp. 692-698, 2000.
- [83] **I. C. o. N.-I. R. Protection**, "ICNIRP statement on the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", " *Health physics*, vol. 97, no. 3, pp. 257-258, 2009.
- [84] **G. Ziegelberger et al.**, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp. 483-524, 2020.
- [85] **I. C. o. N.-I. R. Protection**, "Gaps in Knowledge Relevant to the "ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (100 kHz TO 300 GHz)", " *Health Physics*, vol. 128, no. 2, pp. 190-202, 2025.
- [86] **A. Taaghola and T. K. Sarkar**, "Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry, utilizing an equivalent magnetic current," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 3, pp. 536-542, 2002.
- [87] **T. K. Sarkar and A. Taaghola**, "Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 3, pp. 566-573, 2002.
- [88] **L. Tsai**, "A numerical solution for the near and far fields of an annular ring of magnetic current," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 20, no. 5, pp. 569-576, 1972.
- [89] **E. Karabetsos, E. Kalampaliki, and D. Koutounidis**, "Testing hybrid technology cars: Static and extremely low-frequency magnetic field measurements," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 34-39, 2014.
- [90] **G. TRENTADUE, M. ZANNI, and G. MARTINI**, "Assessment of low frequency magnetic fields in electrified vehicles," 2020.
- [91] **H. Arnold**, *Wir sind Chef: wie eine unsichtbare Revolution Unternehmen verändert*. Haufe-Lexware, 2016.
- [92] **Z. Zhang and K.-T. Chau**, "Pulse-width-modulation-based electromagnetic interference mitigation of bidirectional grid-connected converters for electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2803-2812, 2016.
- [93] **A. Fösel and S. Wilhelm**, "Modelling inductive charging of electric cars in an experimental setup: teaching physics concepts in the context of electromobility," *European Journal of Physics*, vol. 43, no. 3, p. 035201, 2022.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet BENTLİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

1 - 2016 yılından itibaren Türk Silahlı Kuvvetlerinde Çalışmaktayım.

