

**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK (EMC) DENEYLERİNİN
FİZİKSEL ANALİZİ VE 900/1800 MHZ GSM BANDINDA
İLETİM VE İŞİNİM DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tuğfan KARABULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2011
ANKARA**

Tuğfan KARABULUT tarafından hazırlanan “ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK (EMC) DENEYLERİNİN FİZİKSEL ANALİZİ VE 900/1800 MHZ GSM BANDINDA İLETİM VE İŞİNİM DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Selim ACAR

.....

Tez Danışmanı Fizik Bölümü

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile FİZİK Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Selim ACAR

.....

Fizik Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Gökay UĞUR

.....

Fizik Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç Dr. Erol KURT

.....

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih:/..../2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tuğfan KARABULUT

**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK(EMC) DENEYLERİNİN FİZİKSEL
ANALİZİ VE 900/1800 MHZ GSM BANDINDA İLETİM VE IŞINIM
DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Tuğfan KARABULUT

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2011

ÖZET

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik uyumluluk (EMC) kavramı ve testleri tanıtılarak gelişen teknolojiler kapsamındaki cihaz ve sistemlerin çalışma ortamlarında elektromanyetik girişimler incelendi. EMC testlerinde fiziksel olarak etki eden temel parametreler üzerinde duruldu. Elektromanyetik Enterferans (EMI) kavramı ile bağışıklık ve yayınım sonucu oluşabilecek enterferans hesaplama yöntemlerinden bahsedildi. Enterferansi önleyici tedbirler hakkında bilgi verildi. EMC açısından devre elemanlarının davranışını, ekranlama, topraklama, filtreler, antenler ve EMI azaltma tekniklerinden bahsedildi. EMC Laboratuvarlarında kullanılan Yarı Yansız Oda (YYO) ve Tam Yansız Odalar (TYO) tanıtıldı. Bu odalardaki yansıma ve ekranlama katsayıları hakkında bilgi verildi. 900 ve 1800 MHz GSM bandında İletim ve Işınım deneyleri yapılarak elde edilen bulgular hakkında EMC ve EMI açısından genel değerlendirme yapıldı.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : Elektrik ve Manyetik Alan, Elektromanyetik dalga, Elektromanyetik girişim (EMG), Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)
Sayfa Adedi : 126
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Selim ACAR

**PHYSICAL ANALYSE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY
TESTS AND, ASSESMENT OF CONDUCTED AND RADIATED TESTS TO
900/1800 MHZ GSM BANDWITH
(M.Sc. Thesis)**

Tuğfan KARABULUT

**GAZI UNIVERSITY
INSTUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2011

ABSTRACT

In this thesis, electromagnetic compatibility (EMC) introduced the concept of developing and testing technologies were evaluated under the procedures of electromagnetic devices and systems, working environments. EMC is focused on the main parameters affecting the physical tests. Electromagnetic Interference (EMI) that may occur as a result of interference with the concept of immunity and the diffusion calculation methods mentioned. Interference was informed about preventive measures. The behavior of circuit elements in terms of EMC, shielding, grounding, filters, antennas and EMI reduction techniques mentioned. Used in laboratories, EMC Semi Anechoic Chamber (SAC) and Full Anechoic Chambers (FAC) is introduced. The rooms were informed about the reflection coefficient and shielding. 900 and 1800 MHz GSM band, the transmission and radiation experiments on the findings derived from the general assessment made in terms of EMC and EMI.

Science Code : 202.1.147
**Keywords : Electric and Magnetic Field, Electromagnetic waves,
Electromagnetic Interference (EMI), Electromagnetic
Compatibility (EMC)**
Number of Pages : 126
Advisor : Assoc. Prof. Dr. Selim ACAR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince daima yardımlarını esirgemeyen, deneyim ve tecrübesinden yararlandığım, başta çok değerli hocam Doç. Dr. Selim ACAR'a teşekkür ederim. Çalışma konumuyla ilgili olarak yardım ve desteklerini esirgemeyen Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) Teknik Düzenleme ve Standardizasyon Daire Başkanlığı EMC laboratuvar personeline teşekkürü ederim.

Gazi Üniversitesi Fizik Bölümünde tez çalışmalarım boyunca değerli destek ve yardımlarını esirgemeyen ve aynı zamanda tez danışmanım olan Doç. Dr. Selim ACAR'a ve Gazi Üniversitesi Fizik Bölümünün çok değerli hocaları Doç. Dr. Metin ÖZER ve Doç. Dr. Gökay UĞUR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca manevi desteklerini esirgemeyen eşim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1. Elektrik Alan	3
2.2. Manyetik Alan.....	5
2.3. Elektromanyetik Dalga Teorisi ve Hesaplamaları	7
2.3.1. Zamanla değişen alanlar ve maxwell denklemleri	8
2.3.2. Düzlem elektromanyetik dalgalar	8
2.3.3. Kılavuzlanmış dalgalar	10
2.4. Elektromanyetik dalgaların üretilmesi	11
2.5. Elektromanyetik Işıma ve Dalga Saçılması	12
3. ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK (EMC) VE ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMLERİN (EMI) FİZİKSEL OLARAK İNCELENMESİ.....	14
3.1. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve Elektromanyetik Girişim (EMI) Kavramı.....	14
3.2. EMC ve EMI'nin Tarihi.....	15

	Sayfa
3.3. EMC Problemleri ve Gürültü Tipleri	16
3.4. Elektromanyetik Enterferans (EMI) Analizi	19
3.5. Temel EMC Birimleri ve Sinyaller	20
3.6. EMC Açısından Temel Devre Elemanları	22
3.7. EMC ve Antenler	27
3.7.1. Genişband antenler.....	33
3.8. EMC'nin Fiziksel Analizi	40
3.8.1. İletimle yayınının fiziksel analizi.....	43
3.8.2. Işınım ile yayınının fiziksel analizi	51
3.8.3. İletimle bağışıklığın fiziksel analizi	53
3.8.4. Işınım ile bağışıklığın fiziksel analizi	56
3.9. EMI Alıcıları ve Dedektör Tipleri.....	58
3.10. Işınım ile Girişim (enterferans) Ölçümleri.....	59
4. ELEKTROMANYETİK GÜRÜLTÜ AZALTMA TEKNİKLERİ.....	67
4.1. Elektromanyetik Kuplaj	67
4.2. Yayılım Yoluyla Kuplaj.....	71
4.3. Filtreler.....	73
4.3.1. Temel elektromanyetik gürültü (EMG) filtreleri	74
4.4. EMC için Topraklama.....	76
4.5. Kablolar, Konnektörler ve Bağlantı Elemanları.....	78
4.6. Baskı Devre (PCB) Tasarımı	81
5. DENEYSEL YÖNTEM VE BULGULAR.....	84

	Sayfa
5.1. Elektromanyetik Uyumluluk Deneyleri	84
5.1.1. İletimle Yayınım Deneyleri.....	86
5.1.2. İletimle Bağışıklık Deneyleri	88
5.1.3. Işınım ile yayınım deneyleri.....	91
5.1.4. Işınım ile bağışıklık deneyi	94
5.2. EMC Deney Bulguları.....	98
5.2.1. Deney raporu (EMC açısından uygun bir cihaz için).....	98
5.2.2. Deney raporu (EMC açısından uygun olmayan bir cihaz için).....	105
5.3. Diğer Elektromanyetik Uyumluluk Deneyleri	111
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	126

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elektromanyetizmanın temel yasaları ve Maxwell denklemleri.....	8
Çizelge 3.1. Genel büyüklükler ve birimler.....	20
Çizelge 3.2. Temel devre elemanları ve uç denklemleri.....	24
Çizelge 3.3. İyi iletken ve kayıplı dielektrik için yayılma katsayıları.....	65
Çizelge 4.1. Küçük uzunlukta akım taşıyan bir iletken için alan ifadeleri.....	72
Çizelge 4.2. Akım taşıyan küçük manyetik dipol için alan ifadeleri.....	72
Çizelge 5.1. GSM mobil telefonlar için yapılan EMU deneyleri ve unsurları.....	85
Çizelge 5.2. A/B sınıfı cihazlar için iletimle yayılım sınır değerleri.....	86
Çizelge 5.3. İletimle yayılım deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler.....	87
Çizelge 5.4. İletimle bağışıklık deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler.....	90
Çizelge 5.5. Işınım ile yayılım deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler.....	92
Çizelge 5.6. Işınım ile yayılım ölçüm sınır değerleri.....	93
Çizelge 5.7. Işınım ile bağışıklık deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler.....	96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrik alan vektörleri.....	5
Şekil 3.1. Gürültü spektrumu.....	17
Şekil 3.2. Direncin ısı gürültü voltajını belirlemek için eşdeğer devre.....	18
Şekil 3.3. Kaynak-Yol-Almaç modeli.....	20
Şekil 3.4. Direnç eşdeğer devresi.....	24
Şekil 3.5. Sığa eşdeğer devresi.....	25
Şekil 3.6. İndüktans eşdeğer devresi.....	26
Şekil 3.7. Çubuk anten ve ışıma diyagramı.....	27
Şekil 3.8. Akım taşıyan bir telin oluşturduğu radyasyon.....	29
Şekil 3.9. Ortadan (solda) ve uçtan (sağda) ışımalı anten paternleri.....	32
Şekil 3.10. Bikonik anten çeşitleri.....	35
Şekil 3.11. Bikonik antenin anten faktörü ve anten kazanç grafiği.....	35
Şekil 3.12. Log periyodik antenin eleman dizilişi ve yüksek ve düşük frekans ölçümleri.....	36
Şekil 3.13. HL 562 ULTRALOG antenin anten deseni ve kazanç grafiği.....	38
Şekil 3.14. HL 046 log periyodik antenin deseni ve kazanç grafiği.....	39
Şekil 3.15. Horn antenin anten faktörü ve anten kazanç grafiği.....	40
Şekil 3.16. (a) Işınım ile yayılım modeli (b) Işınım ile bağışıklık modeli.....	41
Şekil 3.17. (a) İletim ile yayılım modeli (b) İletim ile bağışıklık modeli.....	42
Şekil 3.18. LISN Diyagramı.....	44
Şekil 3.19. AC güç kabloları için ortak ve diferansiyel mod akımları diyagramı....	46
Şekil 3.20. Güç Kaynakları.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.21. Diferansiyel mod akımlarının bobinlerdeki etkisi.....	50
Şekil 3.22. Ortak mod akımlarının bobinlerdeki etkisi.....	50
Şekil 3.23. Diferansiyel mod devresi için LISN devresi.....	51
Şekil 3.24. Diferansiyel ve ortak mod akımları.....	52
Şekil 3.25. KŞ-1/M2/-M3 devresi için basitleştirilmiş devre şeması.....	55
Şekil 3.26. İki kablolu iletim hattı.....	57
Şekil 3.27. Sonlandırma gerilimini belirleyici basit devre.....	58
Şekil 3.28. EMC ölçümlerinde kullanılan dedektör tipleri.....	59
Şekil 3.29. Elektrik ve manyetik alan için ekran zayıflatması.....	64
Şekil 4.1. İletimle kuplaj ve eşdeğer devre modeli.....	67
Şekil 4.2. (a) Diferansiyel girişim gerilimi (b) Ortak girişim gerilimi.....	68
Şekil 4.3. İki iletken arasında manyetik kuplaj ve eşdeğer devre.....	69
Şekil 4.4. İki iletken arasında kapasitif kuplaj ve eşdeğer devre.....	70
Şekil 4.5. Kapasitif kuplaj yoluyla indüklenen gerilimin frekansa bağlı değişimi...71	71
Şekil 4.6. Temel EMG filtre tipleri.....	73
Şekil 4.7. Temel AGF devreleri.....	74
Şekil 4.8. YGF devresi ve frekans cevabı.....	74
Şekil 4.9. BGF ve frekans cevabı.....	75
Şekil 4.10. BGF için tipik filtre performansı.....	75
Şekil 4.11. a) LC tipi band söndüren filtre b) RC tipi band söndüren filtre.....	76
Şekil 4.12. Tek-nokta topraklama bağlantıları.....	77
Şekil 4.13. Çok-nokta topraklama bağlantıları.....	78
Şekil 4.14. Ekranlanmış koaksiyel kablo kesiti.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Elektriksel kısa devreler için eşit devre.....	80
Şekil 4.16. PCB'den Havaya-yayılan yayınlar (Diferansiyel Mod).....	81
Şekil 4.17. Kablodan havaya-yayılan yayınlar (Ortak Mod).....	81
Şekil 4.18. PCB için sonlandırma teknikleri.....	82
Şekil 5.1. EMC Deneyleri.....	84
Şekil 5.2. İletimle yayılım deney düzeneği.....	87
Şekil 5.3. İletimle bağışıklık deney düzeneği.....	91
Şekil 5.4. Işınım ile yayılım deney düzeneği.....	93
Şekil 5.5. Alan düzgünlüğü EMR 300 prob ölçüm noktaları.....	95
Şekil 5.6. Işınım ile bağışıklık deney düzeneği.....	97
Şekil 5.7. İletimle yayılım genel deney düzeneği.....	99
Şekil 5.8. 900 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği.....	99
Şekil 5.9. 1800 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği.....	100
Şekil 5.10. İletimle bağışıklık genel deney düzeneği.....	100
Şekil 5.11. 900 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	101
Şekil 5.12. 1800 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	101
Şekil 5.13. Işınım ile yayılım genel deney düzeneği.....	102
Şekil 5.14. 900/1800 MHz Bekleme/Şarj ölçüm grafiği.....	102
Şekil 5.15. Işınım ile bağışıklık deney düzeneği.....	103
Şekil 5.16. 900 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	104

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. 900 MHz ses kalibrasyonu dikey polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	104
Şekil 5.18. 1800 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	104
Şekil 5.19. 1800 MHz ses kalibrasyonu dikey polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	105
Şekil 5.20. 900 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği.....	106
Şekil 5.21. 1800 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği.....	106
Şekil 5.22. 900 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	107
Şekil 5.23. 1800 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	107
Şekil 5.24. 900 MHz Işınım ile yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği.....	108
Şekil 5.25. 1800 MHz Işınım ile yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği.....	109
Şekil 5.26. 900 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	110
Şekil 5.27. 900 MHz ses kalibrasyonu dikey polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	110
Şekil 5.28. 1800 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	110
Şekil 5.29. 1800 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği.....	111

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Bikonik anten.....	34
Resim 3.2. Bikonik log spiral antenler.....	36
Resim 3.3. HL 562 ULTRALOG anten.....	37
Resim 3.4. HL 046 log periyodik anten.....	38
Resim 3.5. Boynuz (Horn) anten.....	39
Resim 3.6. LISN Görünüşü.....	44
Resim 3.7. Bağlaştırma ve ayrıştırma şebekeleri (CDN).....	55
Resim 3.8. Yansımaz odalar.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan bazı simge ve kısaltmalar açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Elektrik Alan Şiddeti(V/m)
α_2	t kalınlığındaki iletken içinde dalganın zayıflama kaybı
γ_2	iletken içinde dalganın yayılma katsayısı
ρ	hava ile iletken arasındaki yansıma katsayısı
c	Işık hızı ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s)
τ	hava ile iletken arasındaki iletim katsayısı
F	Coulomb Kuvveti
f	Frekans (Hz)
Q₀	Elektrik Yüğü (Coulomb)
V	Gerilim (V-Volt)
I	Akım (I-Amper)
H	Manyetik Alan Şiddeti (Amper/metre)
P	Güç (W-Watt)
S	Güç Yoğunluğu (A/m^2 -Amper/metrekare)
w	Açısal frekans
T	Periyot
k	Dalga sayısı
μ	Manyetik Geçirgenlik
σ	Ekranlama İletkenliği

Simgeler	Açıklama
α_R	Yansıma kaybı
T	Isı değeri
V_T	Isı yük voltajı
δf	Ölçülen band genişliği
R_L	Yük direnci
λ	Dalga Boyu (m)
δ	Nüfuz Etme Derinliği (m)
σ	Ortamın İletkenliği (S/m)
ϵ	Dielektrik Sabiti (Boşluk için: $\epsilon_0 = 8.82 \cdot 10^{-12}$ F/m)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
k	Boltzmann Sabiti ($k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/°C)
I_f	Gürültü Akımı
U_0	Filtre elemanı girilmeden önceki kaynak gerilimi
U_2	Filtre elemanı bağlandıktan sonraki yük gerilimi
Z_{in}	Giriş empedansı
R_{in}	Giriş direnci
X_{in}	Giriş reaktansı
η_r	Radyasyon etkinliği
Kısaltmalar	Açıklama
AB	Avrupa Birliği
AM	Amplitude Modulation (Genlik Modülasyonu)

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternative Current Alternatif Akım
BTC	Bilgi Teknolojisi Cihazı
BTK	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
CDN	Coupling Decoupling Network Kuplaj/Dekuplaj Şebekesi
CM	Common Mode (Ortak mod)
CENELEC	Comitee European de Normalisation Eletrotechnique Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
CISPR	Comitée International Spécial des Perturbations Radioélectriques Uluslar arası Enterferansla ilgili Özel Komite
DAN	Deney Altındaki Numune
dBm	1 mili-watt'a göre desibel güç birimi
DC	Doğru Akım
DM	Diferansiyel Mode
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMU	Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	Electromagnetic Interference
FM	Frequency Modulation (Frekans Modülasyonu)
FAC	Full Anechoic Chamber (Tam Yansısız Oda)
GSM	Global System for Mobile Communication Küresel Mobil Haberleşme Sistemi
Hz	Hertz (Frekans birimi, 1/sn)
IEC	International Electrotechnical Comission Uluslararası Elektroteknik Komisyon

Kısaltmalar	Açıklama
LISN	Line Impedance Stabilization Network Hat Empedans Sabitleyici Şebeke
SAC	Semi Anechoic Chamber (Yarı Yansımaz Oda)
TYO	Tam Yansımaz Oda
YYO	Yarı Yansımaz Oda
ESD	Electrostatic Discharge (Elektrostatik Boşalma)
ETSI	European Telecommunication Standards Institute Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Enstitüsü
EFT	Electrical Fast Transient Elektriksel Hızlı Geçişler
EMS	Electromagnetic Susceptibility Elektromanyetik Bağışıklık
MHz	Mega Hertz (10^6 Hertz)
PGL	Piyasa Gözetimi Laboratuvarı
RF	Radio Frequency Radyo Frekansı
RSE	Işınım ile istenmeyen yayınımlar
RBW	Çözünürlük band genişliği (Resolution Band Width)
UHF	Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
VHF	Very High Frequency (Çok Yüksek Frekans)
VBW	Görüntü band genişliği (Video Band Width)

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojilerle birlikte her türlü elektriksel ve elektronik cihaz ve sistemlerin birbirleriyle uyumlu çalışması önemli bir konu haline gelmiştir. Elektriksel ve elektronik sistemler dediğimizde, her türlü vasıtanın elektriksel ve elektronik donanımı, haberleşme teknolojileri, her türlü radyo frekansıyla çalışan sanayi ürünleri, oyuncaklar, bilgi teknolojileri cihazları, yüksek gerilim hatları, elektrik hatları v.b. evimizde ve işyerlerinde kullanılan cihaz ve sistemler olarak anlaşılmaktadır. Bu cihaz ve sistemlerin aynı ortamda çalışmaları sonucunda birbirlerini etkilemesi sonucunda elektromanyetik girişim (enterferans) meydana gelmektedir. Bu girişimin önlenmesi veya limit seviyenin altında olması için bir takım önlemlerin alınması gereklidir.

Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) mühendisleri bu önlemler ve gerekli tedbirler konusunda uzun zamandan beri çalışmalarını sürdürmektedir. Bu çalışmaların sonucunda EMC kavramının manası ve fiziksel altyapısını öğrenmek önemli hale gelmiştir. EMC kavramının en genel manada tanımı, bir veya birden fazla elektronik veya elektriksel ürünün çalışma ortamında diğer elektriksel ve elektronik cihazlardan etkilenmemesi veya kendinin diğer sistemleri etkilemesi olarak tanımlanabilir. Bir ürün ve sistem açısından EMC kavramının iki önemli unsuru vardır. Bunlar iletim ve ışıdır. Bir ürün veya sistem kendi çalışma ortamında, iletim veya ışı yaparken iki türlü etki oluşturur veya iki türlü etkiye maruz kalır. Bunlar “yayınım” ve “bağışıklık” kavramlarıdır. Bir ürün veya sistem EMC açısından dört temel etkileşime maruz kalır. Bunlar, “iletimle yayınım ve bağışıklık” ile “ışıyla yayınım ve bağışıklık” dır. Elektriksel ve elektronik ürün ve sistemler için bağışıklık gürültüleri kadar yayınım gürültü problemleri de önemli yer tutmaktadır. Genel olarak EMC, anlaşılması zor olmayan ancak detayları oldukça fazla olan bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tezde, EMC deneylerinin nasıl ve ne şekilde gerçekleştirildiği ile bu deneylerle ilgili fiziksel parametrelerin neler olduğu incelenmektedir. Ayrıca, bu deneylerde kullanılan ölçüm cihazları, ölçüm odalarının tanıtılması ve EMC testlerinde kullanılan anten modelleri ve fiziksel yapıları ele alınmıştır. Bu tez çalışmasının diğer önemli amaçlarından biri de, EMC kavramının

günlük hayatta kullanılan elektriksel ve elektronik cihazların yayılım ve bağışıklık problemlerinin belirlenmesi ve bunların oluşturabilecekleri Elektromanyetik girişimlerin (Enterferans) önlenmesi için gerekli önlemlerin neler olabileceği konusunda bilgi verilmektedir. Her türlü elektriksel ve elektronik sistem ve cihazların EMC şartlarına uygun olarak üretilmesinde nelere dikkat edilmesi hususunda bu tezde ele alınan konuların yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu anlamda bu tezdeki bilgiler günlük hayata girmiş olan her türlü elektriksel ve elektronik cihaz ve sistemlerin üretimi, ithalatı ve piyasaya arzı esnasında devlet kurumlarının denetimi ve tüketicilerin bu tür cihazları alırken dikkat etmesi gereken hususlar açısından büyük ölçüde yardımcı olacaktır. Bu çalışmada, elektromanyetik girişimin nedenlerinin incelemesi ve buna bağılı olarak EMC kavramının bilimsel açıdan anlaşılması sonucunda üniversiteler ve ilgili kuruluşların bu konuyla daha yakından ilgilenmelerini sağlayacak ve üretilen veya ithal edilerek piyasaya arz edilen her türlü elektriksel ve elektronik cihaz ve sistemlerin EMC kriterlerine uygun olarak düzenleme, uygulama ve denetim mekanizmaları için etkin metodların ortaya konulması, daha ileri dönemde beklentilerin karşılanması açısından büyük önem sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Tezin ikinci bölümünde, elektrik ve manyetik alan ve elektromanyetik dalga teorisi ile ilgili teorik bilgiler detaylı olarak ele alınmıştır. Üçüncü bölümde EMC ve EMI kavramları ve bu kavramların fiziksel analiz yöntemleri ve EMC deneylerinin fiziksel parametreleri üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, Antenler hakkında bilgi verilmekte ve EMC testlerinde kullanılan geniş band antenler incelenmektedir. Bununla birlikte, bu bölümde ışıyım testlerinde kullanılan yarı yansız oda (SAC) ve tam yansız oda (FAC) hakkında bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde, Elektromanyetik gürültü azaltma teknikleri fiziksel olarak ele alınmıştır. Beşinci bölümde EMC açısından 900 ve 1800 MHz GSM bandı deneysel yöntem ve bulgular ele alınarak, uygun olan ve uygun olmayan GSM mobil cihazlar için iki ayrı deneysel sonuçlarının genel değerlendirmesi yapılmıştır. Altıncı bölümde elde edilen deneysel sonuçlarına göre EMC 'ye uygunluğu sağlayacak ve EMI'yi önleyecek tedbirler ve öneriler ortaya konmuştur.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Elektrik Alan

Fiziksel olayların anlatımında kolaylık sağlanması amacıyla alan kavramı geliştirilmiştir. *İlgilendiğimiz fiziksel olay için seçilen koordinat sisteminin belirli bir noktasına, aynı anda karşılık gelen fiziksel büyüklükler bir alan oluştururlar.* Alanı tanımlayan fiziksel büyüklükler zamanla değişebileceği gibi sabit değer de olabilir [1]. Elektrik alan (\vec{E}), uzayda birim mesafeye göre elektromanyetik dalganın potansiyel enerji değişimi olarak tanımlanmaktadır. Elektrik alan vektörel bir büyüklük olup, skaler olarak değeri elektrik alan şiddetini verir [39]. Başka bir deyişle, elektrik alan yüklü bir çubuğun çevresinde bir deneme yüküne bir kuvvet etkilyorsa, o noktada bir elektrik alan oluşur diyebiliriz. Bu kuvvet, bu bölgede var olan yükler tarafından oluşturulmuştur. Elektrik ve manyetik alan elektromanyetizmanın en temel kavramlarıdır. Elektrik alan yükler arasındaki kuvvetlerin nedeni olarak düşünülebilir. Bu durumda iki değişik sorun ortaya çıkmaktadır. Bunlar,

- Belirli bir yük dağılımının oluşturduğu elektrik alanın hesaplanması.
- Yükler tarafından oluşturulan alanların ve yükler üzerine uygulanan kuvvetlerin hesaplanmasıdır.

Herhangi bir bölgeye konmuş elektrik yüklü bir cisim üzerine, elektriksel bir kuvvet etkilyorsa bu noktada bir elektrik alan vardır denir. Kuvvetlerin elektrik kökenli olup olmadığını anlamak için deneme cismi yüklü veya yüksüz olduğunda üzerlerine etkileyen kuvvetler karşılaştırılarak yapılır. Kuvvet vektörel bir büyüklük olduğundan elektrik alanın büyüklüğü ve doğrultusu da vektörel bir büyüklüktür. Buna göre elektrik alan vektörü;

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} (V/m) \quad (2.1)$$

E : Elektrik alan şiddeti (V/m)

F : Kuvvet

q : Elektrik yükü (Coulomb)

şeklinde olur [1,13,25]. Elektrik alanını oluşturan bütün yüklerin yer ve büyüklükleri bilinirse, istenilen bir noktadaki elektrik alan şiddetini, Coulomb yasasından yararlanarak hesaplamak mümkündür. Bir noktasal yükten r uzaklıkta bulunan bir A noktasındaki elektrik alanını bulmak için, A noktasına bir deneme q yükü konmuş olsun, deneme yüküne etkiyen Coulomb kuvveti;

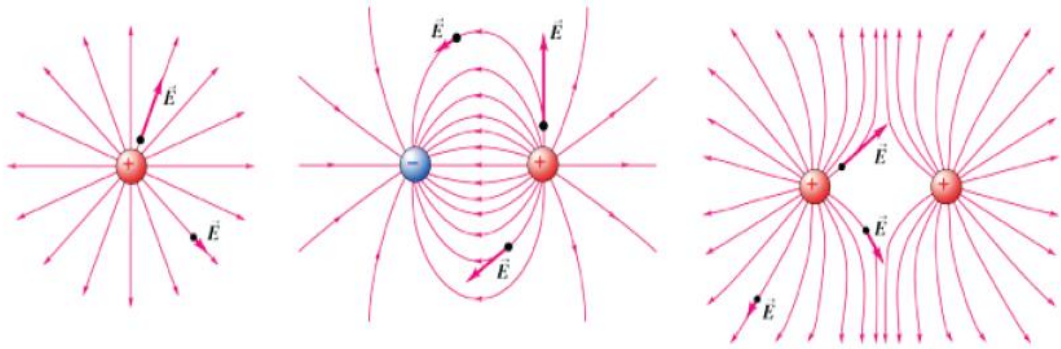
$$\vec{F} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.2)$$

olur. Sürekli yük dağılımı olan bir sistemin bir hacim yükü için elektrik alanı ise;

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\mathbf{r}')}{r^2} d\mathbf{\tau}' \quad (2.3)$$

elde edilir. Doğrultusu uzayın her noktasında elektrik alan vektörü yönünde çizilen çizgiler elektrik alan çizgileri adını alır. Elektrik alan çizgileri birbirine yakın olduğunda \vec{E} büyük, uzak olduğunda küçüktür. Elektrik alan çizgileri için;

- Alan çizgileri bir artı yükten çıkıp bir eksi yükte son bulmalıdır.
- Bir artı yükten ayrılan veya bir eksi yüke ulaşan alan çizgilerinin sayısı yük miktarıyla orantılıdır.
- İki alan çizgisi birbirini kesmez [1,13].



Şekil 2.1. Elektrik alan vektörleri [3]

Gauss yasası, kapalı bir yüzeyden (Gauss yüzeyi) geçen net elektrik akıyla, yüzey tarafından sarılan yük arasındaki genel bağıntıdan bahseder. Bir q yükünü saran r yarıçaplı küresel bir gauss yüzeyinden geçen net akı, yüzey içindeki yüklerle orantılıdır. Herhangi kapalı bir yüzeyden geçen net elektrik akısı, yüzeyin biçiminden bağımsızdır ve nokta bir q yükünü saran herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net akı;

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

dır. Bu denklem diferansiyel Gauss yasasıdır. Elektrik alanın skaler bir fonksiyonun gradyanı olarak yazılabildiğini biliyoruz. Böylece gauss yasası;

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

dır. Bu denklem *Poisson denklemidir*. Yükün olmadığı bölgelerde yani $\rho = 0$, $\nabla^2 V = 0$ denklem *Laplace eşitliği* haline gelir [13,42,25].

2.2. Manyetik Alan

Durgun bir yük etrafında yalnızca bir elektrik alan oluştuğu halde, hareketli bir yük etrafında elektrik alana ilaveten manyetik alanda oluşur. Manyetik alan, bir gözlemciye göre düzgün doğrusal (ivmesiz) hareket eden yüklerin (parçacıkların) oluşturduğu bir alan olarak tanımlanmaktadır. Manyetik alan, elektrik alan gibi vektörel (büyüklüğü ve yönü olan) bir niceliktir [3,25]. Bazı materyaller doğal

manyetik özellik gösterir, örneğin mıknatıslar, demir, kobalt v.b. gibi bazı materyaller manyetik alan içerisine konulduğunda, manyetik alanla aynı yönlü etkileşerek manyetik özellik gösterirler. Bu özelliklere sahip materyallere ferromanyetik malzemeler denir. Mıknatıslanan bir materyalde toplam manyetik dipol moment sıfırdan farklıdır. Manyetik alan vektörü \vec{B} ile gösterilir [25]. Manyetik alan vektörü, elektrik alan vektörünün tersine bir yükte başlayıp diğer yükte sonlanmazlar. Tersine alan çizgileri kendi üzerine kapanan eğriler oluştururlar. Elektrik alan çizgileri gibi birbirlerini kesmezler. Elektrikte hareket eden yükler artı yüklerdir ve eksi yüklerin tersi yönde aktığı kabul edilir Manyetik alan çizgilerinin sıklığı, akım geçen telden radyal uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak azalır (elektrik alan çizgilerinde olduğu gibi). Sağ el kuralında, sağ el başparmağını akım yönünde tutup diğer parmaklarımızı akım yönünde doladığımızda, manyetik alan vektörünün yönünü buluruz.

Bir yüzeyden geçen manyetik akı Φ harfiyle gösterilir ve toplam manyetizmanın ölçüsüdür ve bu yönüyle elektrik yükün manyetik karşılığıdır. Manyetik alanın en önemli konularından birisi manyetik akı yoğunluğudur ve \vec{B} ile gösterilir. \vec{B} vektörel büyüklük olup, \vec{v} hızıyla hareket eden q yükü üzerinde bir \vec{F} kuvveti meydana getirir. Bu durum aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (N) \quad (2.6)$$

F : Newton (N)

B : Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)

q : Elektrik yükü (Coulomb)

v : Hız (m/s)

Bu kuvvete *Lorentz kuvveti* denir [39,42]. Elektrik Alan ve Manyetik Alanı birbiriyle mukayese edecek olursak,

mesafe olarak,

- Manyetik alanın büyüklüğü, kaynaktan mesafenin karesiyle azalır.
- Bir nokta yükten ileri gelen elektrik alan, yükten itibaren mesafenin karesiyle azalır.

Kaynak olarak,

- Elektrik alan, izole bir elektrik yüküyle kurulur.
- Manyetik alan üreten akım elemanı, uzatılmış bir akım dağılımının parçası olmalıdır.

Doğrultu olarak,

- Bir nokta yükün ürettiği elektrik alan, doğrultuda radyaldır (yükten çıkan doğru boyunca)
- Bir akım elemanının ürettiği manyetik alan, hem ds uzunluk elemanına hem de \hat{r} birim vektöre diktir.

Bir iletken elektrik ve manyetik alana maruz kaldığında iletkendeki iletim elektronları bu alanlarla etkileşerek sapmalar gösterir. Bu durumda iletken içerisinde oluşan potansiyele Hall potansiyeli, dirence ise Hall direnci denir [6].

2.3. Elektromanyetik Dalga Teorisi ve Hesaplamaları

İletken bir ortamda statik elektrik ve manyetik alanlar birlikte olabilirler ve bir elektromanyetostatik alan oluştururlar. Bu ortamdaki statik elektrik alanı bir durgun akım akmasına neden olur ve bu da statik manyetik alan oluşturur. Elektrik ve manyetik alan yüklere bağlıdır. Yüklü parçacıklar hareket etmiyorsa sadece elektrik alan oluşur. Eğer yüklü parçacıklar hareket ediyorsa elektrik alanla birlikte manyetik alanda oluşur. Statik modeller basittir, ancak zamanla değişen elektromanyetik olayları açıklamakta yetersiz kalır. Elektromanyetostatik alanlarda, elektrik alan durgun yüklerle, manyetik alan akımla belirlenir. Eğer kaynaklar sinüsel ve ortam

lineer ise, elektromanyetik alanlar da kaynaklar gibi aynı frekansta sinüs eğrisi oluştururlar. Bu durumda, Maxwell denklemleri frekans uzayında çözülür. Alanlar fazör gösterimiyle verilir [22].

2.3.1. Zamanla değişen alanlar ve Maxwell denklemleri

Elektromanyetik teorinin temeli olan Maxwell'in elde ettiği denklemler; zamanla değişen bir manyetik alanın bir elektrik alan oluşturması gibi, zamanla değişen bir elektrik alanın da bir manyetik alan oluşturacağını söylemektedir. Elektromanyetik dalgaları, yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucunda oluşan birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşenleri oluşturmaktadır. Bu dalgalar, bu iki alanın oluşturduğu düzleme dik doğrultuda c ışık hızıyla boşlukta yayılan enine dalgalardır [2,42]. Aşağıda çizelge 2.1.'de elektromanyetik dalgaların fiziksel temelini oluşturan denklemler verilmektedir.

Çizelge 2.1. Elektromanyetizmanın temel yasaları ve Maxwell denklemleri [2]

No	Eşitlik	Yasanın Adı	Fiziksel Anlamı
1	$\oint \mathbf{E} \, d\mathbf{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$	Elektrik Alanda Gauss Yasası	1. Elektrik yükleri arasındaki etkileşme kuvveti, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters yüklerin çarpımıyla doğru orantılıdır. 2. Yükler iletkenin dış yüzeyinde bulunur.
2	$\oint \mathbf{B} \, d\mathbf{s} = 0$	Manyetik Alanda Gauss Yasası	1. Manyetik yük yoktur. 2. Tek kutuplu bir mıknatıs elde edilemez.
3	$\oint \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = - \frac{d\phi_H}{dt}$	Faradayın İndüksiyon Yasası	Kapalı bir iletken halkadan geçen manyetik akım değişirse halkada indüksiyon akımı oluşur.
4	$\oint \mathbf{B} \, d\mathbf{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_0 i$	Amper Yasası	1. Akım taşıyan tel etrafında manyetik alan oluşur. 2. Işık hızı ortamın elektromanyetik özellikleriyle değişir.

2.3.2. Düzlem elektromanyetik dalgalar

İletken olmayan basit bir ortamda Maxwell denklemlerinin, \vec{E} ve \vec{H} için homojen vektör dalga denklemlerini verecek şekilde basitleştirdiğini gösterdik. \vec{E} elektrik alanı için kaynaksız dalga denklemi;

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$$

E : Elektrik alan şiddeti (V/m)

t : Zaman (s)

c : Işık hızı ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s)

ile gösterilir [39]. Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu, homojen, skalar dalga denkleminin ayrıştırılabilir ve bu denklem ortamda $c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ hızı ile ilerleyen bir dalgayı temsil eder. Elektromanyetik dalgalar elektromanyetik güç taşırlar ve bu güç bir güç akı yoğunluğu olan Poynting vektörü kavramı ile izah edilir. Düzgün düzlem dalga elektrik alanının ve benzer şekilde manyetik alanının yayılma yönüne dik sonsuz düzlemlerde, aynı yöne, aynı genliğe ve aynı faza sahip olduğu Maxwell denklemlerinin özel bir çözümüdür. Pratikte düzgün düzlem dalgalar yoktur çünkü oluşturulması için sonsuz boyutta kaynaklar gerekir ve pratik dalga kaynakları her zaman sonlu boyutludurlar. Bununla birlikte, eğer kaynaktan yeterince uzakta ise, dalga cephesi neredeyse küresel hale gelir ve dev bir küre yüzeyinin çok küçük bir kısmı bir düzleme yakındır. Kayıpsız ortamda düzlem dalgaları dediğimizde, durgun durumdaki sinüzoidal dalga davranışını ele almamız gerekmektedir. İletken olmayan basit ortamlarda kaynaksız dalga denklemi, bir homojen *Helmholtz* denklemi haline gelir;

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.8)$$

burada k dalga sayısıdır. $k = w\sqrt{\mu\epsilon} = \frac{w}{c}$ burada kartezyen koordinat sisteminde E_x , E_y ve E_z bileşenleri için üç skalar Helmholtz denkleminde eşit olur. Bu denkleminde z düzlemine dik bir düzlem yüzeyindeki E_x ile tanımlanan düzgün düzlem dalga denkleminde;

$$E(z) = a_x E_x^*(z) = a_x E_0 e^{-jkz} \quad (2.9)$$

olarak elde edilir ve buradan, $v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{w}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$, faz yayılma hızı, ışığın ortamdaki hızına eşit olduğunu belirtir. Ayrıca, $k = w\sqrt{\mu\epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$ dalga sayısı k , elde edilir. İlgili \vec{H} manyetik alanı $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ denkleminde;

$$H = a_y H_y^*(z) = a_y \frac{k}{w\mu} E_x^*(z) = a_y \frac{1}{\eta} E_x^*(z) \quad (2.10)$$

ortamın öz empedansı $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ Ω olur. Havada $\eta_0 = 120 \pi = 377(\Omega)$ dur [22].

2.3.3. Kılavuzlanmış dalgalar

Bu zamana kadar anlatılan konular sonsuz genişlikteki düzlem dalgalarla ilgili idi. Burada boş bir boru veya dalga kılavuzu içine hapsedilmiş elektromanyetik dalgaları incelenmiştir. Dalga kılavuzunun iletken bir boru içindeki elektrik ve manyetik alanı sıfır olur. Bu durumda iç duvarlardaki sınır koşulları şu şekilde olur.¹

$$(i) \quad E^{\parallel} = 0, \quad (ii) \quad B^{\perp} = 0$$

¹ Mükemmel iletkende $E=0$ olur. Faraday yasasıyla $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$ magnetik alanın sıfırdan başladığını kabul edersek daima sıfır olacaktır.

Bu boru boyunca yayılan E ve H 'nin dalga kılavuzu içinde Maxwell denklemlerini sağlamalıdır ve bu denklemlerin çözümünden, E_z ve H_z boyuna bileşenleri aşağıda verilmiştir.

$$(i) \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(\frac{w}{c}\right)^2 - k^2 \right] E_z = 0 \quad (2.11)$$

$$(ii) \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(\frac{w}{c}\right)^2 - k^2 \right] H_z = 0 \quad (2.12)$$

$E_z=0$ olanlara *TE dalgalar*²; $H_z=0$ olanlara *TM dalgalar*³ adı verilir. $E_z=0$ ve $H_z=0$ olan dalgalara ise *TEM dalgaları*⁴ adı verilir. Kenarları a ve b olan dikdörtgen şekilli bir dalga kılavuzu için TE dalgalarının yayılmasını incelendiğinde, Laplace denkleminin iki boyuttaki çözümünden genel çözüm,

$$H = H_0 \cos(k_x x) e^{-k_y y} \quad \text{ve} \quad E = E_0 \cos(k_x x) e^{-k_y y} \quad (2.13)$$

şeklinde olur. Sınır şartlarından E_0 ve H_0 tespit edilirken, $k_x = m\pi/a$ ($m=0,1,2,\dots$) ve $k_y = n\pi/b$, ($n=0,1,2,\dots$) olur [13].

2.4. Elektromanyetik Dalgaların Üretilmesi

Elektromanyetik dalga ile onu üreten dalga kaynağı arasındaki ilişkiyi incelendiğinde, dalga boyuna bağlı olarak, elektromanyetik dalga üreticilerinin yapısının farklılaştığı görülmektedir. Örnek olarak kısa dalga elektromanyetik dalga üretici, $w = 1/\sqrt{LC}$ frekansıyla titreşen *LC* devresini içermektedir. Bu sistemdeki yük ve akımlar verilen rezonans frekansında salınırlar. Elektromanyetik enerji, titreşim periyodunun yarısında, yüklerin kondansatörde elektrik enerjisi depolaması, diğer yarısında ise akımların bobinde manyetik enerji depolaması şeklinde oluşmaktadır. *LC* salınıcısındaki bobinin karşısındaki anten, bu devredeki ω frekanslı

² *TE=Enine elektrik dalgalar*

³ *TM=Enine manyetik dalgalar*

⁴ *TEM=Enine elektrik ve manyetik dalgalar*

salınımlarla titreşir ve çevreye elektromanyetik dalga şeklinde enerji yayınlar, yani *LC* salınıcısı ve anten sistemi, bir enerji dönüşümü gerçekleştirir. Elektrik dipol antenin iki kolunun uçları arasında elektrik yükleri salınım hareketi yaparlar. Elektrik ve manyetik alan çizgileri, dipol antenin ekseni civarında dönel şekiller oluşturarak, antenden *c* ışık hızıyla uzaklaşırlar. Herhangi bir yönde yayılan dalganın şiddeti $\sin^2\theta$ ile orantılıdır. Burada θ , dipol merkezine dalganın ulaşacağı noktaya birleştiren doğrultunun, dipol eksenine yaptığı açıdır. Buna göre dalga şiddeti dipol anten eksenine doğrultusunda ($\theta = 0^\circ$ ve 180°) sıfır, eksene dik doğrultuda ($\theta = 90^\circ$ ve 270°) maksimumdur [2].

2.5. Elektromanyetik Işıma ve Dalga Saçılması

Elektromanyetik ışın yayılma eksenine ve birbirlerine dik açılarda olan aynı fazda yayılan sinüs salınımları şeklinde elektrik ve manyetik alanların varlığı ile tanımlanır. Elektromanyetik ışınımın dalga ve tanecik olarak davrandığı ispatlanmıştır. Elektromanyetik ışınımın frekans, dalga boyu, hız ve genlik gibi özellikleri klasik sinüs dalgası modeliyle incelenebilir. Ancak ışın enerjisinin absorbe edilmesi ve yayılımı ile ilgili olayların açıklanmasında dalga modeli başarılı olamamıştır. Bunun için tanecik modeli geliştirilmiştir. Bu modelde elektromanyetik ışın, enerjileri frekansıyla orantılı olan ve foton adı verilen parçacıklar veya enerji paketlerinden oluşmuş olarak görülür. Bizim burda elektromanyetik ışınımın dalga özelliklerini ele alacağız; Elektromanyetik spektrum, ışın kırınımı (difraksiyon), dalgaların çakışması, ışın yansımaları, ışın saçılması, ışın polarizasyonu gibi dalga parametreleri ile incelenir. Elektromanyetik dalgalar saçılırlar. Bu saçılmanın etkileri bakımından birinci ve ikinci bileşenleri önemlidir. İlk etki eden faktörler yansıma ve kırılmadır. Diğerleri ise kırınımdır. Bir düzleme belirli açıyla gelen bir elektromanyetik dalga düzlemle aynı açıyla yansır. Her iki ortamın parametrelerine bağlı olarak değişen bir açıyla ikinci ortama kırılarak geçer (Snell yasası). Bu etkiler iki ortamın parametreleriyle belirlenen yansıma ve kırılma katsayısı denen parametrelerle şekillenir. Yansıma ve kırılma elektromanyetik dalganın yatay veya dikey polarizasyonlu olmasına göre değişir. Diğerleri ise kırınım etkisidir. Ortamdaki ayrıtlardan saçılmaları kapsar. Elektromanyetik dalgalar eğrisel yüzeyleri yalayarak

geçer ve arkadaki gölge bölgelere ulaşabilirler. Yarık boyutları elektromanyetik dalga boyutunda olduğundan yarıklardan içeri sızıntı olabilir. İçeri sızan dalgalar ardışıl yansımalarla dolaşırken bir taraftan yarıktan tekrar sızıntı yapabilirler. Bu olaya çınlama denir ve çınlama özellikle EMC etkileri açısından önemli olabilir [23].

3. ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK (EMC) VE ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMLERİN (EMI) FİZİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

3.1. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve Elektromanyetik Girişim (EMI) Kavramı

Her türlü elektronik cihazların yakınında çalışan küçük ve yüksek hızlı elektronik cihazların kullanımının yaygınlaşması ile birlikte kablosuz haberleşme cihazlarının sayısı ve çeşitliliğinin artması girişim etkisinin artmasına yol açmıştır. Daha hızlı ve karmaşık devreler, birbirlerine ters etkisi olan cihazları içeren sistemler gelecekte daha da artacaktır. Elektromanyetik girişim etkisi, ürün deneyleri yapılmaya kadar anlaşılmamıştır. Genellikle ürün teknolojisinin gelişiminde enterferans problemleri, karmaşıklığı ve güvenilirliği azalmış sistemlere eklenmiş olan yabancı komponentlerin ilave edilmesiyle ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten, elektromanyetik yayınımla ilgili olarak ülke düzenlemelerini karşılamayan yasal olmayan ürünler piyasaya arz edilmektedir. Bu nedenle, yayılım ve bağışıklıkla ilgili ulusal düzenlemelerle uyumlu hale getirilerek elektromanyetik enterferans konuları ürün tasarımının başlangıç bölümünde ele alınmıştır. Piyasaya arz edilen elektronik cihaz ve sistemlerin davranışlarının anlaşılması için, Maxwell'in eşitlikleri ve sinyal analiz tekniklerinin bilinmesi gerekmektedir. Buna karşın, basit cihaz ve devrelerin uygulamaları çoğunlukla enterferans problemlerinin çözümü için yetersiz kalır. Bu problemlerin çözümü için, genellikle elektrik devre teorisi için referans edilen uygun bir analiz tekniği düşük frekanslarda çalışan cihazların davranışlarını tanımlamak için kullanılıyordu. Gelişen teknolojiyle birlikte, elektromanyetik ve devre teorisinin temel kavramları birbirlerinden tamamıyla ayrılmıştır. Bu nedenle, EMC tasarımcılarının beklentisi, temel devre elemanları olan direnç, bobin ve kondansatör (sığa) genel olarak ideal olması planlanmaktadır. EMC açısından bu çok önemlidir. Günlük hayatımızda kullandığımız her türlü elektrikli ve elektronik cihazların hatta dünya çevresinde dolaşan yabancı uydular mevcut çalışma ortamlarında birbirlerini etkilemektedir. Bu nedenle, bu sistemlerin mevcut çalışma ortamlarında birbirlerini etkilememeleri için hem yayılım hem de dış enterferanslara karşı bağışıklık için tasarlanması gereklidir [4,8,9,10].

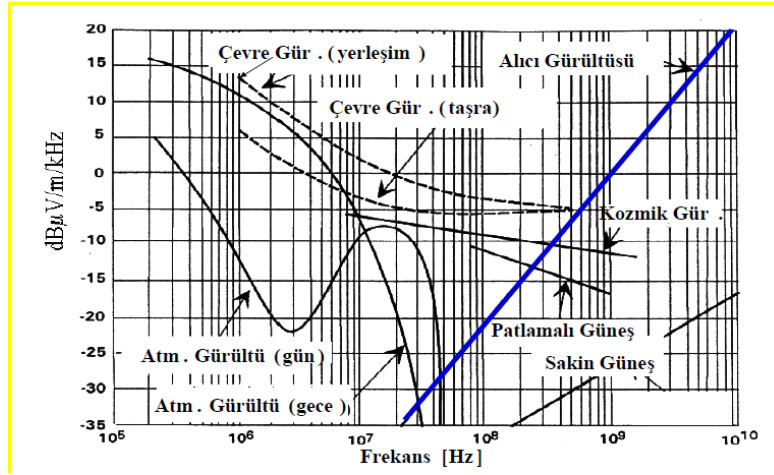
3.2. EMC ve EMI'nin Tarihi

20. yüzyılın başlarına kadar, birkaç insan yapımı elektromanyetik radyasyon kaynağı bulunuyordu. İlk basit radyo alıcısı, doğal gürültü kaynaklarının oluşturduğu girişim için duyarlı olduğundan bu problemin giderilmesi genellikle basit olmaktaydı. İlk radyo vericileri arasındaki karışımlar verici veya alıcının basit hareketleriyle veya frekans değişimiyle kolayca çözümlenebiliyordu. 1930'ların öncesinde, sistem ve elektrik devrelerinin tasarımını yapanlar, şimşek ve güneş ışınları gibi doğal gürültü kaynaklarının etkisine rağmen, cihazın fonksiyonel olarak çalışması sağlanıyordu. Bu dönemdeki elektrik sistemlerinin elektromanyetik yayınımlarının azaltılması için hemen hemen hiçbir çaba gösterilmemiştir. Bunu takip eden yıllarda, oldukça fazla insan yapımı elektromanyetik radyasyon kaynağı tasarlanmaya ve üretilmeye başladı. Bu süreçte üretilen sistemler, karmaşık alıcı ve vericiler, radyolar, telefon ve televizyon yakınındaki bilgi taşıyıcı sinyaller, floresan lambalar, röleler, AC güç hatları, DC motorlar gibi elektromanyetik radyasyon kaynaklarının birbirini etkilemeleri, bir doğal gürültü kaynağının neden olduğu elektriğin kullanımı ve üretimin artmasıyla oluşabilmektedir. Bu dönemde, EMC açısından sistemlerin tasarımı öncelikli olarak düşünülmemiş, buna bağlı olarak elektrikli cihazlar arasındaki etkileşimler daha fazla yaygınlaşmıştır. 1933'de uluslararası radyo enterferansları özel komitesi oluşturuldu ve cihazlarla ilgili EMI yayınımlarının ölçümleri için standartlar yayınlandı. İkinci Dünya Savaşında, radyo haberleşmesinin kullanılmasıyla birlikte radarlar ve uzaktan kumandalı hassas sistemlerin ilk örnekleri tasarlandı. Radarların gelişimiyle birlikte mikrodalga rezonatörü gibi küçük mikrodalga kaynaklarının ilk uygulamaları denendi. Bu ve diğer küçük elektronik cihazlar, gemiler, uçaklar ve otomobiller gibi vasıtaların içinde bu sistemler kullanılmaya başlandı. Savaş esnasında, bu cihazlar, elektronik sinyalleri soğuran ve büyük mesafelerde onları ayrıştırabilen cihazlar olarak ortaya çıkmasıyla bu sistemler elektronik harbin ilk kullanımı olarak, bir düşmanın istenmeyen elektronik gürültü yayınımları önlenerek yanlış sinyallerle yer belirleme cihazları ve telsiz haberleşme sistemleri elektromanyetik girişimle karıştırıldı. Elektronik harbin gelişmesiyle elektronik ve elektrikli cihaz ve sistemlerin EMC gereksinimi büyük önem kazanmıştır. Savaşın sona ermesiyle birlikte, nükleer silahların test edilmesiyle birlikte, nükleer

patlama sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik darbe elektronik cihazlara zarar verebileceği veya hasara neden olabileceği ortaya çıkmıştır. 1960'ların başında, MIL-STD-461 standardı, hem elektromanyetik yayılım hemde bağışıklıkla ilgili düzenlemeleri yürürlüğe koyarak, ikinci dünya savaşını izleyen yıllarda, avrupa ülkelerinde CISPR standardı ile yayılım sınırlamalarıyla ilgili olarak çeşitli yayınlar ortaya koydular. Amerika Birleşik Devletleri sayısal bilgisayar ve bununla ilgili cihazların üreticisi olarak bu ürünlerin piyasaya arzı sonucunda, küçük entegre devreli cihazların kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve bununla birlikte uyumluluk problemlerinin sayısı önemli ölçüde artmaya başlamıştır. 1979'da Birleşik Haberleşme Komisyonu (FCC) sayısal cihazların soğurduğu elektromanyetik enerji miktarını düzenlemeye başladı. Bugün mikro-elektronik devrelerin küçülen boyutu ve artan hızı elektromanyetik uyumluluk ürün tasarımını önemli kılmaktadır [9,10,37].

3.3. EMC Problemleri ve Gürültü Tipleri

Bu bölümde EMC/EMI sorunlarıyla ilgili pek çok örnek gösterilecektir. Radyo alıcıları ile bilgisayar enterferansı, radyo alıcısı ile araçların ateşleme sistemleri, buzdolabı klimaları, bilgisayar hoparlörü üzerinde ani gürültü akımı yaratır. Manyetik Rezonans (MRI) cihazları yan odadaki bilgisayar monitörlerini yeterince geniş manyetik alan yaratarak rahatsız eder ve otomobillerdeki genlik modülasyonlu (AM) radyo alıcısıyla üzerinden geçen güç hatları enterferansları gibi benzer şekilde sayısız EMC problemleriyle karşılaşmamıza neden olmaktadır [8,9]. Gürültü kaynaklarının bazıları insan yapımı, bazıları ise doğal olarak oluşmaktadır. Şekil 3.1'de elektronik sistemler tarafından daha yaygın tecrübe edilmiş olan gürültü tipleri gösterilmektedir [9]. Genel olarak gürültü tipleri iki ana başlıkta toplanmıştır. Birincisi dış gürültü, diğeri ise iç gürültüdür.



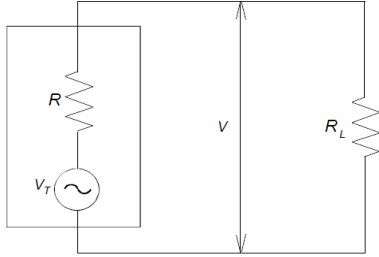
Şekil 3.1. Gürültü spektrumu

Dış gürültü merkezi, alıcının dışındaki bir yerde bulunmaktadır ve genel olarak Dış gürültü Atmosferik, uzay ve suni gürültü olarak üç ana başlık altında toplanır. *Atmosferik gürültü*, durgun ve bir yıldırımın sonucu olarak ve gök gürültüsü olduğunda oluşan elektriksel boşaltmalar şeklinde veya dünya'nın atmosferinin diğer bölümlerinde daha yaygın olarak görülmektedir. *Uzay Gürültüsü*, pek çok tip uzay gürültüsü vardır. Bunlar kaynaklarına göre, *Güneş Gürültüsü* diğeri ise, *kozmetik gürültüdür*. Güneş, yaygın olarak haberleşme için kullanılan radyo frekanslarını içeren elektromanyetik spektrumun büyük kısmının karşısında dev bir yayınım kaynağıdır. Diğer bir uzay gürültüsü, kozmik gürültü ise, güneş gibi, uzaktaki yıldızlar benzer yolla dünya'ya doğru enerjilerini yaymaları sonucunda oluşan gürültü şeklidir. *Suni Gürültü*, suni kaynaklar tarafından üretilen girişimlerdir, genellikle, 1 MHz ile 600 MHz arasındaki frekanslarda oluşur. Suni gürültülerin iki genel kategoriye ayrılır; *Tasarlanmış aktif antenler* ve diğeri *doğal aktif antenler* dir. Tasarlanmış aktif antenler, elektromanyetik enerjiyi soğurmak üzere tasarlanmış cihazlardır. Bunlar, araç alarmları için uzaktan kumandalar, hücresel telefonlar, telsiz ve radar vericileri gibi benzer cihazları içerir. Doğal aktif antenler, ışımaya yapmak için tasarlanmamış cihazlardır, ancak, elektromanyetik enerjiyi soğururlar. Bunlar, normal olarak genellikle iletişimde olduğundan diğer frekanslarda doğal bir aktif anten olabilen hücresel telefonlar, anahtarlar, roleler, motorlar gibi sayısal cihazları kapsamaktadır [9,10,39]. İç veya dahili gürültü, alıcıların ve diğer elektriksel cihazların komponentlerinden meydana gelen bir enterferans kaynağıdır. Mevcut iç

gürültünün pek çok tipi varken, ısı, devre elemanı ve bağlantı elemanı gürültüsü olarak üç ana kısımda ele alınır; *Isı Gürültüsü*, bir komponentin içindeki öz direnç elektronların hareketleriyle meydana gelmekte olup, elektronlar arasındaki rastgele çarpışmalar, direncin oluşturduğu moleküller ve atomlar nedeniyle oluşur. Bir direnç tarafından üretilen ısı gürültüsü gücü;

$$P_T = kT\delta f \quad (3.1)$$

olarak verilir.



Şekil 3.2. Direncin ısı gürültü voltajını belirlemek için eşdeğer devre [9,10].

Alıcının maksimum güç gürültüsü için, R_L yük direnci R 'ye eşit olmak zorundadır. Bu durumda,

$$P_T = \frac{V^2}{R_L} = \frac{V^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_T}{2}\right)^2}{R} = \frac{V_T^2}{4R} \quad (3.2)$$

$$V_T = \sqrt{4kT\delta f R} \quad (3.3)$$

Devre Elemanı Gürültüsü, yarı iletkenler içinde oluşmakta olup, potansiyel engeli boyunca akan yüklerle, birleşik elektronların rastgele yayınımlarının bir sonucudur. Schottky, RMS akımını bulması sonucunda vakum tüp diyodlarındaki devre elemanı gürültüsü;

$$I_{sh} = \sqrt{2qI_{dc}\delta f} \quad (3.4)$$

olarak verilir. *Bağlantı gürültüsü*, iletim devre elemanları kusurlu olduğunda bağlantı gürültüleridir. Bağlantı gürültüleri, direnç içinde aşırı gürültü veya vakum tüpleri içinde kırpışma gürültüleri olarak bahsedilir. I_f gürültü akımı, yaklaşık olarak;

$$I_f = \frac{KI_{dc}\sqrt{\delta f}}{\sqrt{f}} \quad (3.5)$$

olabilir. Gürültünün bu tipi, cihaz çalışma frekansına bağlıdır ve düşük frekans çalışmaları için oldukça geniş bantda olabilir [9,10].

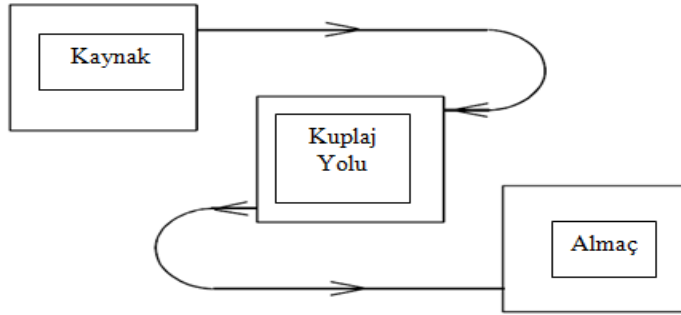
3.4. Elektromanyetik Enterferans (EMI) Analizi

Genel olarak, Elektromanyetik girişim senaryoları, üç şekilde meydana gelir.

- Bir verici veya bir gürültü komponenti olabilecek bir kaynak (genellikle bir yayıcı veya bir tehdit olarak bahsedilebilir) olmalıdır.
- Bir kaynaktan girişim veya alıcı gürültüsü olan cihaz veya komponent olan bir almaç (genellikle bir kurbandan bahseder) olmalıdır.
- Almaç için kaynaktan verici sinyal girişimi yapan bir kuplaj yolu bulunmalıdır.

Bu kaynak-yol-almaç olarak belirtilen model şekil 3.3'de gösterilmektedir. Elektromanyetik girişimin bu model önerisi, aşağıdaki üç yolun biriyle önlenmektedir.

- Bir kaynaktaki yayını bastırmak,
- Kuplaj yolunun etkinliğinin azalması veya kesilmesi,
- Yayınımlar için almaç bağışıklığını yapmak,



Şekil 3.3. Kaynak-Yol-Almaç modeli

EMC için elektronik sistemlerin sorunlarını gidermek amacıyla yapılan planlamada, elektronik sistem elemanların birinin kaldırılmasıyla enterferans elimine edilebilmektedir. Kaynaktaki yayının bastırılması, elektromanyetik girişimin elimine edilmesinin en arzu edilen yöntemdir. Bu modelin çok sık gözden kaçan komponentlerinden biri kuplaj yoludur. Doğal elektromanyetik gürültü kaynakları ve cihazlardan oluşan elektromanyetik girişimin her birinin katkısı, mevsimlik, ortam ve atmosferik parametreler ve ekipman yaşı ve bakım şartları, alıcı ve verici özellikleri gibi birçok diğer faktörler, frekans, zaman, yön ve mesafenin fonksiyonlarıdır [9,10].

3.5. Temel EMC Birimleri ve Sinyaller

Elektromanyetik Uyumluluk ile ilgili temel birimler çizelge’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Genel büyüklükler ve birimler

Değişken Tanımı	Birimi	EMC’de Yaygın Kullanılan dB Formu
V : Gerilim	V	dB μ V, dBmV
I : Akım	A	dB μ A, dBmA
E: Elektrik Alan Şiddeti	V/m	dB μ V/m, dBmV/m
H: Manyetik Alan Şiddeti	A/m	dB μ A/m, dBmA/m
P : Güç	W	dB μ W, dBmW
S : Güç Yoğunluğu	W/m ²	dB μ W/m ² , dBmW/m ²

EMC ölçümlerinde kullanılan ve Çizelge'de verilen birimler dB olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [8,9].

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ [Güç oranları]} \quad (3.6)$$

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \text{ [Gerilim oranları]} \quad (3.7)$$

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \text{ [Akım oranları]} \quad (3.8)$$

Gerilimin dB olarak ifadesi;

$$dB\mu V = 20 \log_{10} \left(\frac{Volt}{1\mu V} \right) \quad dBmV = 20 \log_{10} \left(\frac{Volt}{1mV} \right) \quad (3.9)$$

Akımın dB olarak ifadesi;

$$dB\mu A = 20 \log_{10} \left(\frac{Amper}{1\mu A} \right) \quad dBmA = 20 \log_{10} \left(\frac{Amper}{1mA} \right) \quad (3.10)$$

Gücün dB olarak ifadesi;

$$dB\mu W = 10 \log_{10} \left(\frac{Watt}{1\mu W} \right) \quad dBmW = 10 \log_{10} \left(\frac{Watt}{1mW} \right) \quad (3.11)$$

Elektrik alan şiddetinin dB olarak ifadesi;

$$dB\mu V/m = 20 \log_{10} \left(\frac{V/m}{1\mu V/m} \right) \quad (3.12)$$

Manyetik alan şiddetinin dB olarak ifadesi;

$$dB\mu A/m = 20 \log_{10} \left(\frac{A/m}{1\mu A/m} \right) \quad (3.13)$$

elde edilir [8,9,37].

Zamanla değişen bir sinyali frekansa bağlı hale getirmek için Fourier dönüşümü kullanılır. Zamanla değişen bir $f(t)$ sinyali ele alalım.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nwt + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nwt \quad (3.14)$$

Burada $w = 2\pi f = 2\pi/T$ açısal frekans, T sinyal periyodudur. Burada a_0 , a_n ve b_n katsayıları aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) dt \quad (3.15)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \cos nwt dt \quad (3.16)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \sin nwt dt \quad (3.17)$$

EMC'de standart emisyon limitleri, 30 MHz ile 10 GHz frekans aralığındadır. Bu frekans aralığındaki sinyal analizlerini dikkate alırsak, akım gerilim sinyalleri için, fourier dönüşümü yerine daha çok sinyalin fourier zarf metodu tercih edilir. Simetriden dolayı, b_n katsayıları sıfır ve a_n katsayısı ise;

$$a_n = \frac{2At_h}{T} \frac{\sin x_h}{x_h} \frac{\sin x_r}{x_r} \quad (3.18)$$

elde edilir. Bu sinyalin spektrumu kesikli frekans bileşenlerine sahip olur ve x değeri sıfıra yaklaştıkça, Sinx/x fonksiyonu 1'e yaklaşır, düşük frekanslarda spektrum zarfı yatay bir asimptota sahip olur [8,42].

3.6. EMC Açısından Temel Devre Elemanları

Temel devre elemanları olan direnç, indüktans ve sığa genellikle ideal olarak düşünülmektedir. Devre analizi yaparken, iletkenler, bağlantı elemanları ve bağlantı kablolarının etkisi ihmal edilir. Ancak, devre elemanlarının farklı frekanslarda çalıştığında, temel devre elemanları gibi davranış gösterebilirler [8]. Bir iletkene DC akımı uygulandığında, iletken kesiti boyunca akım dağılımı oluşur. Eğer bu iletkene

AC akımı uygulanırsa, iletkende indüklenen gerilim, yüklerin iletken dış yüzeye yönelmesine neden olur. Deri etkisi olarak adlandırılan bu etki;

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\sigma\mu}} \quad (3.19)$$

olarak verilir. Düşük frekanslar için iç empedans,

$$Z_i = \frac{1}{\pi a^2 \sigma} + j\omega \frac{\mu}{8\pi} = r_{dc} + j\omega L_{dc} \quad (3.20)$$

Düşük frekanslar için iletkenin (DC) iç direnci ve iletkenin (DC) indüktansı;

$$L_{dc} = \frac{\mu l}{8\pi} \quad , \quad r_{dc} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma} \quad (3.21)$$

olur. Yüksek frekanslar için ise,

$$Z_i = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} + j \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = r_i + jx_i \quad \text{olur.} \quad (3.22)$$

düşük frekanslarda iletken kesitindeki akım dağılımı kesitte homojen özellik gösterir. Frekans arttıkça akım yoğunluğu iletkenin dış yüzeyine doğru kayar ve iletken yüzeyine yaklaşır. Frekansın yükselmesine bağlı olarak $\delta \ll a$ olacağı için yüksek frekanslarda iletkenin iç indüktansı biraz daha küçülür ve çok yüksek frekanslarda ihmal edilebilir. Deri etkisi nedeniyle bir iletken kesitindeki akım yoğunluğu;

$$J(x) = J_0 \delta (1 - e^{-x/\delta}) \quad (3.23)$$

şeklinde ifade edilir. İletkenden geçen akım ise;

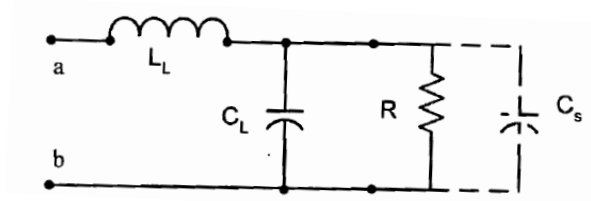
$$I = J_0 \delta (1 - e^{-a/\delta}) \quad (3.24)$$

olur [8]. Burada temel devre elemanları direnç, indüktans ve sığa için eşdeğer devreleri ve frekans tepkileri incelenmiştir.

Çizelge 3.2. Temel devre elemanları ve uç denklemleri

Eleman	Zaman Bölgesi	Frekans Bölgesi
Direnç	$u = R \cdot i$	$U = R \cdot I$
İndüktans	$u = L \frac{di}{dt}$	$U = j\omega LI$
Sığa	$i = C \frac{du}{dt}$	$I = j\omega CU$

Çizelge 3.2’de temel devre elemanlarının eşitlikleri verilmiştir. En çok kullanılan temel devre elemanı direnç için eşdeğer devre şekil 3.4’de verilmektedir;



Şekil 3.4. Direnç eşdeğer devresi

Bu devrede a-b uçları arasında toplam empedans,

$$Z_{ab} = \frac{j\omega L_L + R(1 - \omega^2 L_L C_P)}{1 + j\omega R C_P} \quad (3.25)$$

formülü yardımıyla hesaplanabilir. Bu genel direnç eşdeğer empedansı, geniş frekans aralığında direncin davranışını tanımlamaya yarar. Z_{ab} empedansının frekansa bağlı davranışı dört farklı durumda incelenmiştir.

- $f=0$ Hz durumu için $Z_{ab}=R$ olur.
- Frekans arttırılırsa, Z_{ab} empedansı azalmaya başlar ve belli frekans değerinde R direncine eşit olur.
- Frekans R direnç değerinin üstüne çıkarsa, C_P geri besleme sığası üzerinden akım akar ve indüktans hala çok küçüktür ve kısa devre olarak davranmaya

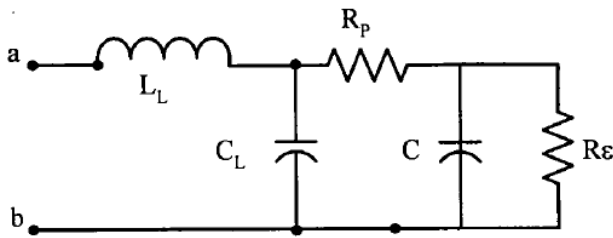
devam eder.

- Frekans arttırılmaya devam edilirse, eşdeğer devrenin empedansı küçülmeye devam eder ve eşdeğer devre direnci minimum olur.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_L C_P}} \quad (3.26)$$

Bu frekans değeri üstünde, devre empedansında bobin etkin olur. Son olarak frekans sonsuza yaklaştıkça, indüktans empedansı çok büyür ve buna karşılık sığa empedansı ise sıfıra yaklaşır. Bu durumda direnç açık devre özelliği gösterecektir [8]. EMC tasarımlarında sığa en çok kullanılan elemandır. Aşağıdaki sığa eşdeğer devresinde a-b uçlarındaki devre empedansı,

$$Z_{ab} = j\omega L_L + R_P + \frac{1}{j\omega C} = R_P + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (3.27)$$



Şekil 3.5. Sığa eşdeğer devresi

Z_{ab} empedansının frekansa bağlı davranışı dört farklı durumda incelenmiştir.

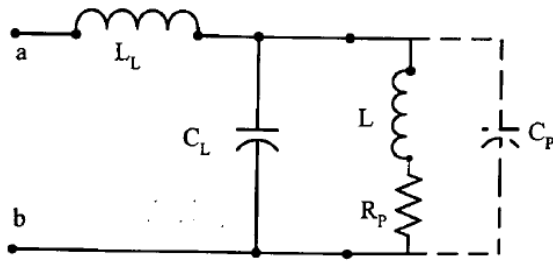
- $f = 0$ Hz durumunda DC olarak eşdeğer devrede indüktans kısa devre, C kapasitesi açık devre olur.
- Frekans arttırılırsa, ideal C kapasitesi tarafından belirlenen Z_{ab} empedansı doğrusal olarak azalır ve minimuma ulaşır.
- Kapasitenin rezonans frekansında, eşdeğer devre rezonansa girer.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_L C}} \quad (3.28)$$

- Frekans arttırmaya devam ederse, indüktans empedans üzerinde etkin olmaya başlar ve empedans doğrusal olarak artar. Kapasitenin maksimum çalışma frekansı, indüktans tarafından sınırlandırılmış olur [8].

İndüktans fiziksel yapısı nedeniyle manyetik alan yayabilir ve dış kaynaklı manyetik alanlara karşı duyarlıdır. Bu nedenle bu elemanın ekranlanmış olması önem arzeder. Şekil 3.6'de endüktans eşdeğer devresinde a-b uçlarındaki devre empedansı görülmektedir.

$$Z_{ab} = \frac{(j\omega L + R_p) \frac{1}{j\omega C_p}}{j\omega L + R_p + \frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{R_p + j\omega L}{1 - \omega^2 LC_p + j\omega C_p R_p} \quad (3.29)$$



Şekil 3.6. İndüktans eşdeğer devresi

Z_{ab} empedansının frekansa bağlı davranışı dört farklı durumda incelenmiştir.

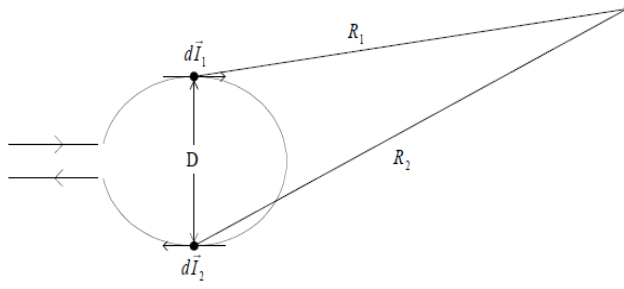
- $f = 0$ Hz durumunda DC olarak eşdeğer devrede L indüktans kısa devre, C_p kapasitesi açık devre olur.
- Frekans arttırılırsa, ideal L indüktansı Z_{ab} empedansı üzerinde etkili olur.
- Frekans artışı sürdürülürse, R_p nin empedans değeri L nin empedans değerine eşit oluncaya kadar azalır ve eşdeğer devre rezonansa girer.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_p}} \quad (3.30)$$

- Rezonans frekansından büyük frekanslarda, C_p eşdeğer empedans üzerinde etkili olmaya başlar. Empedansın etkisi bu bölgede azalmaya başlar [8].

Boyu ışıret dalga boyundan çok küçük antenlerde ışınan güç hemen hemen sıfırdır, çünkü anten ışıma direnci çok küçüktür. Oysa anten boyu yarım dalga boyuna yakın ise yayılan güç maksimum olur. Bu tip antenlere rezonanslı antenler denmektedir. Bu özelliklerin anlaşılması temel anten tanımlarının açıklanmasıyla mümkün olabilecektir. Anten ışıması üç boyutlu uzayda ve küresel koordinatlarda iki açı ile belirtilmektedir; θ düşey (z ekseni) ile, ϕ yatay (x -ekseni) ile yapılan açılardır. Anten mühendisliğinde yatay ve düşey düzlemlere ayrıca manyetik alan düzlemi (H -düzlemi) ve elektrik alan düzlemi (E -düzlemi) denmektedir. Bir anten için önemli parametreler giriş empedansı, ışıma direnci, duran dalga oranı (DDO), giriş gücü, ışıma gücü, verim, ışıma diyagramları, polarizasyon, etkin yüzey, yönelticilik, kazanç, demet genişliği, yakın/uzak alan, anten faktörü ve anten kalibrasyonu olarak sıralanabilir. Her şeyden önce anten bir iletim hattı üzerinden bir kaynak ile beslenen devre elemanıdır. Kaynak ile iletim hattı girişi ve anten ile iletim hattı sonu arasında empedans uyumu olması durumunda kaynaktan çekilen güç maksimum olur ve bu gücün tamamı yüke yani antene aktarılmaktadır. Aksi halde iletim hattının her iki ucunda da geri yansımalar oluşacaktır. Bu yansımalar antenin ışıma gücünü azalttığı gibi kaynağa istenmeyen güç olarak geri dönmekte ve ısınmalara neden olduğundan kaynak ve iletim hattının ömrünü kısaltmaktadır [31]. Temel anten kavramı ve bir çok anten türü gözden geçirilerek ve özellikle EMC ile ilgili ölçümlerde kullanılan genişband antenler bu bölümde ele alınacaktır. Antenlerin yaymış olduğu ışıyan alanı fiziksel olarak inceleyecek olursak, en basit haliyle akım taşıyan tel üzerinde bir döngü düşünelim, bir gözlem noktasından R_1 ve R_2 mesafesinde ve aralarında D uzaklığı bulunan $d\vec{l}_1$ ve $d\vec{l}_2$ akım elemanları olsun. Bu R_1 ve R_2 mesafesini ayrı ayrı gözlemleyecek olursak;

$R_2 - R_1 \leq 0.1\lambda$ olduğunda bu alanlar, fazdan ayrı olarak akım elemanlarının eklenmesiyle üretilir ve ışıma miktarı küçüktür.



Şekil 3.8. Akım taşıyan bir telin oluşturduğu radyasyon

Bununla birlikte, $R_2 - R_1 \geq 0.1\lambda$ olduğunda ise ışınım miktarı büyük olur. Bir kaynaktan yayılan güç, bir kürenin sonsuz yarıçapından geçen güçtür. Bu gücü hesaplamak istediğimizde poynting vektörünün ortalama değerini almamız gerekir, bunun değeri;

$$\langle \vec{P} \rangle \approx \hat{r} \frac{1}{r^2} \frac{\eta}{4\lambda^2} [|N_\theta|^2 + |N_\phi|^2] \quad (3.31)$$

elde edilir. Bu bize yayılan dalga yönündeki ortalama güç yoğunluğunu verir. Antenden yayılan toplam güç bulmak istersek, $W = \lim_{r \rightarrow \infty} \oint_S \hat{n} \cdot \langle \vec{P} \rangle ds$ formülünden,

$$W = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} K(\theta, \phi) d\Omega \quad (3.32)$$

elde edilir [10,31]. Antenler için diğer önemli bir konu anten desenidir. Anten deseni iki kısımda ele alınmaktadır. Birincisi, güç deseni ve ikincisi alan desenidir. Güç deseni, sabit yarıçapdaki yayılan güç bölgesi, Alan deseni ise sabit yarıçapda elektrik ve manyetik alan büyüklüğünün olduğu bölgedir. Anten deseni pek çok loplara içerir. En büyük lop ana loptur. Diğer küçük loplara ise yan loplardır. Lineer polarizeli antenlerin yayılım deseni, genellikle düzlem elektrik alan ve düzlem manyetik alan deseni olarak adlandırılarak özelleştirilir. Bu düzlem elektriksel alan, elektrik alan vektörünün maksimum yayılım yaptığı yönü kapsar. Hiçbir anten gerçekte izotropik desene (bütün yönlerde aynı olan) sahip değildir. Çoğu anten (gerçek olanlar zaten) tüm yönlerden daha ziyade bazı yönlere daha etkili yayılmaya eğilimlidir. Antenin yön kazancı,

$$g_d(\theta, \phi) = \frac{K(\theta, \phi)}{\left(\frac{W}{4\pi}\right)} = \frac{4\pi}{W} K(\theta, \phi) \quad (3.33)$$

lineer polarizeli antenlerin ışınma deseni, genellikle elektrik alan düzlem deseni ve manyetik alan düzlem deseninin terimlerinde mevcuttur. Bu elektrik alan düzlemi elektrik alan vektörü ve maksimum ışınma yönünü içerir. Hiçbir anten doğru olarak izotropik desene sahip değildir. Bir antenin ışınma etkinliği, güç kaynağından yayılan toplam gücün, anten tarafından yayılan güce oranıdır. Bir antenin ışınma direnci, toplam ışınan güce eşit direnç içinde harcanan gücün içinden akması için gerekli olan giriş akımına eşit direncidir.

$$R_r = \frac{2W}{I_0 I_0^*} \quad (3.34)$$

R_r =Radyasyon direnci

W = Toplam ışınan güç

Anten sürücü kaynağından bakıldığında, radyasyon direnci, omik direnç den ayırt edilemez. Her iki durumda, bu kaynak, zamanla sürekli akım genliğinde tutmak amacıyla bu anten için enerji sürekli sağlanması gerekir. Omik direnç durumunda, bu direnç, elektromanyetik dalga yayılımı içindeki enerjiye dönüştürülür [10,31]. *Bir anten, besleme noktasında iki kapılı bir devrenin giriş kapısı gibi davranır. Bu noktada, besleme gerilim kaynağının bağlanacağı uçlar arasında bir empedans değeri gösterir. Bu değere giriş empedansı denir.* Bir frekansdaki empedans değeri, bir antenin ışınma yaparken besleme uçlarındaki gerilimin akıma oranıdır [31]. Bir çift giriş terminaliyle rastgele bir anteni ele aldığımızda bu anten, diğer kaynaklarla oluşturulan dalgalardan güç katkısı olmadığına, anten terminallerini incelersek, Thevenin eşdeğer devresi, yalnız bir empedans içerir.

$$Z_{in} = \frac{V}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (3.35)$$

R_{in} giriş direnci, X_{in} giriş reaktansıdır. Radyasyon etkinliği;

$$\eta_r = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{R_{ri}}{R_{ri} + R_L} \quad (3.36)$$

olarak elde edilir. Hertz dipolü, nokta yükü sonlandırılmış, dz kablo kesitinden akan I düzenli akımını içerir. Bu nokta yükü oluşan A vektör potansiyeli, B manyetik alanı ve E elektrik alanı ise;

$$\vec{A}(\vec{r}) \approx (\hat{r} \cos\theta - \hat{\theta} \sin\theta) \frac{\mu_0}{4\pi} Idz \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3.37)$$

$$\vec{B} = \hat{\phi} \frac{\mu_0 Idz}{4\pi} \sin\theta \left[\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right] e^{-jkr} \quad (3.38)$$

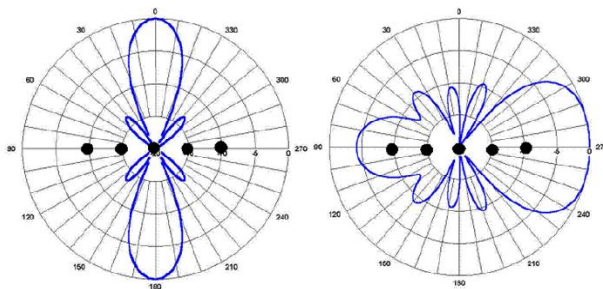
$$E_r = \frac{Idz}{4\pi} 2\eta_0 \cos\theta \left[\frac{1}{r^2} - \frac{j}{kr^3} \right] e^{-jkr} \quad (3.39)$$

$$E_\theta = \frac{Idz}{4\pi} \eta_0 \sin\theta \left[\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} - \frac{j}{kr^3} \right] e^{-jkr} \quad (3.40)$$

elde edilir.

Yakın nokta alanları, $r = 0$ veya $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ olduğu zaman en kuvvetli olduğu yerlerdir. Böylece, \vec{B} manyetik alanı $\frac{1}{r^2}$ ile değişir, \vec{E} Elektrik alanı $\frac{1}{r^3}$ ile değişir. Yakın nokta alanlar, yayılan güç için katkı sağlamaz. Bunun yerine yakın nokta alanlar reaktif güç (Bir antenin yakın alanı içinde depolanan enerji değiştiği zaman) içinde sonuçlanır. Yalnız $\frac{1}{r}$ terimler yayılan güç için katkı sağlarlar. Uzak nokta alanları, $r \rightarrow \infty$ olduğu noktada, en kuvvetli noktadır. Böylece, \vec{B} manyetik alanı ve \vec{E} Elektrik alanı $\frac{1}{r}$ ile değişir. Buna göre ışıyan güç değeri, $W = 40\pi^2 I^2 \left(\frac{dz^2}{\lambda^2} \right)$ Radyasyon direnci, $R_r = 80\pi^2 \left(\frac{dz}{\lambda} \right)^2$ olur. Yön kazancı, $g_d(\theta) = \frac{3}{2} \sin^2\theta$ olur ve

en maksimum olduğu yön $\theta = \frac{\pi}{2}$ olduğu açıdaki yöndür ve $D = 1.5$ olduğu mesafedir. Toplam kazanç $G = 10 \log_{10}(1.5) = 1.76 \text{ dB}$ olur. Silindirik dipol anten, VHF/UHF frekans bandında en yaygın kullanılan antenlerdir. Bu antenin radyasyon paterni uzak nokta alanında hertz dipolü ile aynı paterne sahip olur [26,27]. Antenin kaynaktan çektiği güç, ışınma gücü ve ısı kayıpların toplamı birbirine eşittir. *Anten verimi* ışınma gücünün kaynaktan çekilen güce oranıdır. Isıl kayıplar ne kadar az ise verim artar. Anten polarizasyonu, elektrik alanının zamanla çizdiği şekle göre belirlenir. Anten yaydığı elektromanyetik dalgalar için iletim boyunca elektrik alan zemine dik ise *düşey*, paralel ise *yatay polarizasyonlu* dalga adını alır. En genel polarizasyon *elips* biçimindedir. Bunun özel hali *dairesel* polarizasyon, dairesel polarizasyonun iki bileşeni de yatay ve düşey polarizasyondur [31]. Anten faktörü, Anten çift yönlü (elektrik alanı gerilime, gerilimi elektrik alana dönüştüren) bir dönüştürücüdür. $AF = E/V$ şeklinde tanımlı alıcı anten faktörü daha çok uygulama açısından önemlidir. Ortamdaki elektrik alan değeri, bir elektrik alan ölçü aleti ve ona bağlı bir alıcı anten ile ölçülmektedir. Anten faktörü ideal durumlarda hesaplanmaktadır. EMC problemlerinde ise anten faktörü frekansla değişen grafiklerle ya da tablolarla verilir. Antenler gerek bireysel olarak gerekse bir dizi oluşturulduğunda farklı yönlerde ışınma yapabilirler. Demet oluşturmaları ya da demet taramalı anten dizileri adı verilen bu sistemlerde iki farklı ışınma yönü bulunmaktadır; bunlardan birincisi ortadan ışınmalı antenler (diziler) veya uçtan ışınmalı antenler (diziler) adını alır. Beş elemanlı izotropik antenlerden oluşturulan dizilerde ışınma, dizi eksenine dik yönde ise ortadan ışınmalı (boresight), dizi eksenine paralel ise uçtan ışınmalı (end-fire) antenlerdir [10,31].



Şekil 3.9. Ortadan (solda) ve uçtan (sağda) ışınmalı anten paternleri [31].

3.7.1. Genişband antenler

EMC deneylerinde kullanılan antenler geniş band antenlerdir. Dipol antenler, ışınımla yayılım ölçümleri için, pek çok çekici karakteristiklere sahip olmasına rağmen, bunlar, bir genişband frekans bandı üzerindeki veri toplanması için ideal değildir. Işınımla yayılım menzili 30 MHz'den 16 GHz'e kadar yayılmaktadır ve dipolün uzunluğu her bir ölçüm frekansında $\frac{1}{2} \lambda$ uzunluğunu sağlamak için fiziksel olarak ayarlanması gereklidir. Ancak bu yöntem pratik değildir bunun yerine daha pratik bir yöntem olarak genişband antenlerle ölçüm yapılması daha uygun olacaktır. Geniş band antenlerin karakteristikleri;

- Giriş çıkış empedansı, frekans bandı üzerinde çoğunlukla sürekli dir.
- Anten pateni frekans bandı üzerinde çoğunlukla sürekli dir.

Genişband antenlerin iki tipini inceleyeceğiz, bikonikal anten ve log-periodic anten bikonikal anten, tipik olarak 30 MHz ile 200 MHz frekans bandı aralığında kullanılır. Log-periodic anten, tipik olarak 200 MHz ile 1 GHz frekans bandı aralığında kullanılır [10,31]. Bir sonsuz bikonikal anten, besleme noktasındaki küçük boşlukla, θ_h iki koninin yarım açısını içerir. Maxwell eşitliklerinin çözümlerinden,

$$H_{\phi} = \frac{H_0}{\sin\theta} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \quad (3.41)$$

$$E_{\theta} = \frac{k_0}{\omega \epsilon_0} \frac{H_0}{\sin\theta} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} = \eta_0 H_{\phi} \quad (3.42)$$

elde edilir. Bu alanlar enine elektromanyetik dalgalar (TEM) şeklinde belirtilmektedir. (elektrik ve manyetik alan ortogonal ve enine yayılma yönündedir) Bu nedenle, koni üzerinde iki nokta arasında tek bir voltaj tanımlanabilir. Bu voltaj, besleme noktasından her iki r noktasındaki zıt koniler üzerindeki iki nokta arasında üretilir. Toplam voltaj;

$$V(r) = 2\eta_0 H e^{-jk_0 r} \ln \left(\cot \frac{1}{2} \theta_h \right) \quad (3.43)$$

Koninin yüzeyindeki akım;

$$I(r) = 2\pi H_0 e^{-jk_0 r} \quad (3.44)$$

Toplam zamandaki ışıyan güç;

$$W = 2\pi\eta_0 |H_0|^2 \ln \left(\cot \frac{1}{2} \theta_h \right) \quad (3.45)$$

Radyasyon direnci,

$$R_r = 120 \ln \left(\cot \frac{1}{2} \theta_h \right) \quad (3.46)$$

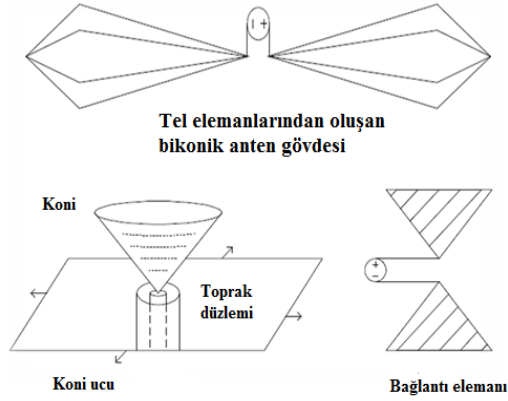
elde edilir. Bu giriş empedansına eşit olarak elde edilir. Lineer polarizeli dalgalar için, geniş taraf yönünde ($\theta=90^\circ$) anten üzerinde meydana gelir, alan komponentleri için bu antenin cevabı onun eksenine paraleldir. Keza giriş empedansı ve paterni teorik olarak sonsuz frekans uzunluğu üzerinde sürekli olur.



Resim 3.1. Bikonik anten

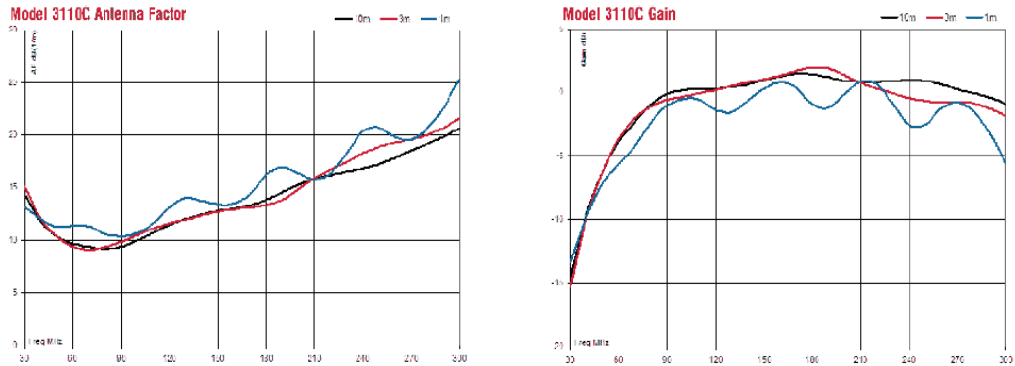
Sonsuz uzunluktaki konileri yapmak açıkca mümkün değildir, buna karşın, gerçek bikonikal antenler, kesikli koniler içerir. Bu sonlu uzunluktaki koniler boyunca dışa doğru seyahat eden dalgalar olarak yansımaya neden olurlar. Bunlar, sadece gerçek

olmaktan ziyade, bir hayali (reaktif) bileşene sahip olan duran dalgalar üretir. Genellikle kablolar koni yüzeylerinde uygun olarak kullanılmaktadır.



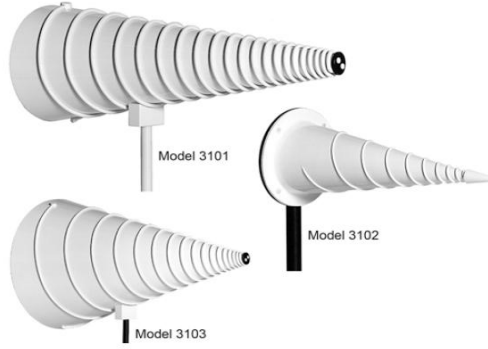
Şekil 3.10. Bikonik anten çeşitleri

Konik antenin diğer çeşitlerinden biri olan dış konik antenin yer düzlemi üzerindeki alanı, görüntüleme metoduyla bikonik antenin alanıyla aynıdır. Dış konik antenin radyasyon direnci, bikonik antenin $\frac{1}{2}$ sidir. Diğer bir anten çeşidi papyon antendir, düz üçgen levha veya bu düzlem üzerindeki aynı alan hattında olan bir kablo içerir. Papyon anten çoğunlukla UHF televizyon sinyallerini almak için kullanılmaktadır. Katı üçgen metalin yerine kablo kullanılması, papyon antenin bant genişliğini azaltmaya meyillidir [9,10,31]. Bikonik antenlerin anten faktörü ve anten kazanç grafiği aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Bikonik antenin anten faktörü ve anten kazanç grafiği

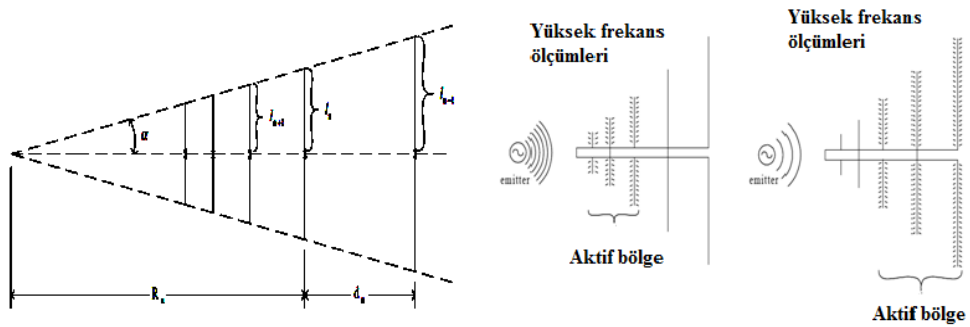
Diğer bir örnek anten olan Bikonikal log spiral antenlerdir, 100 MHz ile 10 GHz aralığındaki frekans bandını kapsar [21].



Resim 3.2. Bikonikal log spiral antenler

Geniş band antenlere bir örnek log periyodik antenlerdir. Log periyodik anten yapıları tekrarlayan boyutları boyunca bant genişliğinde geniş bir çalışmayı başarır. Bu yapısal boyutlar, bu yapının merkezine olan mesafe oranıyla artmaktadır. Sonuç olarak, giriş empedansı ve periyodik olarak tekrarlayan radyasyon özellikleri ve frekansın logaritmik fonksiyonudur. Log periyodik dipol dizilişi, bir genel log periyodik ölçüm anteni olur. Tüm periyodik antenlerin paylaşılan özellikleri içindeki eleman mesafesi, uzunluğu ve ayrımları bir sabitle ilişkilidir.

$$\tau = \frac{l_n}{l_{n-1}} = \frac{d_n}{d_{n-1}} = \frac{R_n}{R_{n-1}} \quad (3.47)$$



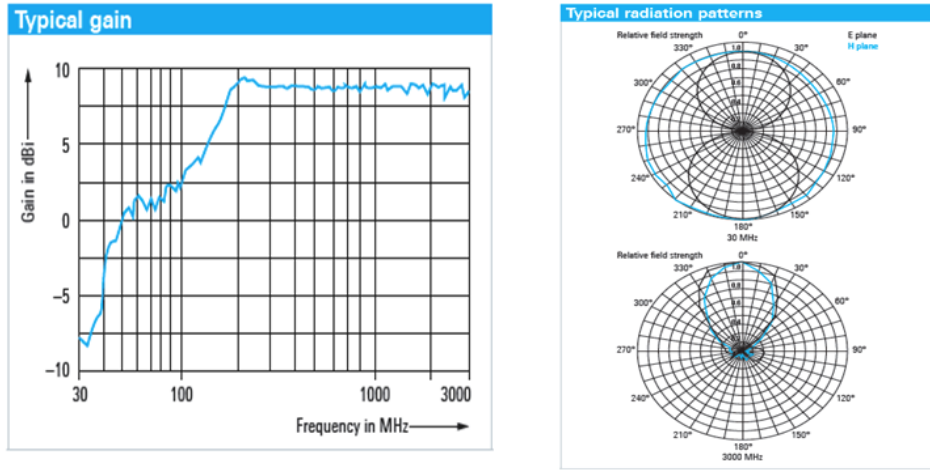
Şekil 3.12. Log periyodik antenin eleman dizilişi ve yüksek ve düşük frekans ölçümleri

Log periyodik dizinin çalışmasının en etkili yolu, komşu elemanlar üzerindeki faz içindeki ters akımlar olması gibidir. Bu yolla en kısa elemanlar, sağdaki elemanlarla girişim yapmaz. Log periyodik antenin bant genişliği, yaklaşık olarak en uzun elemanın ve en kısa elemanın $\lambda/2$ olduğu frekansda belirlenmesidir. Belirli bir frekansda veya rezonansa yakın bir frekansdaki sadece bu eleman aktiftir. Böylece, Bu antenin aktif bölgesi frekansa bağlı olarak ayarlanır. Anten açıklıkları yayılmış olan ışınan alandan açılarak veya bir açıklıkla karakterize olur. Bunlar, horn, yuva ve mikroşerit yama antenleri içerir. Bu tip antenlerin çalışmasını Huygens'in ilkeleri en iyi açıklar; İlerleyen dalganın önündeki her bir nokta dışarıya doğru yayılan ikincil dalgacıklar bir küresel kaynak olarak rol oynar. Bu durum dalganın kırınımı olarak bilinir [26,10]. Işınımla yayınım ve ışınımla bağışıklık EMC deneylerinde kullanılan log periyodik antenlere örnekler aşağıda gösterilmektedir. Işınımla yayınım deneylerinde HL562 ULTRALOG model anten, bikonikal ve log periyodik anten özellikleri üzerinde bulundurmaktadır [9, 10,36].



Resim 3.3. HL 562 ULTRALOG anten

Bu anten, anten değiştirmeden 30 MHz den 3 GHz'e kadar frekans aralığında temel olarak yayınım ölçümleri için kullanılmaktadır. Bu log periyodik anten özellikle 500 MHz ve 1 GHz arasında sistem hassasiyetini artırmak için V şeklindedir. 10 V/m veya daha yüksek elektrik alan şiddeti gerektiren elektromanyetik bağışıklık ölçümlerinde kullanılmak için en uygun simetri ve duran dalga oranını sağlar. Aşağıda HL 562 ULTRALOG antenin anten paterni ve kazanç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.13. HL 562 ULTRALOG antenin anten paterni ve kazanç grafiği

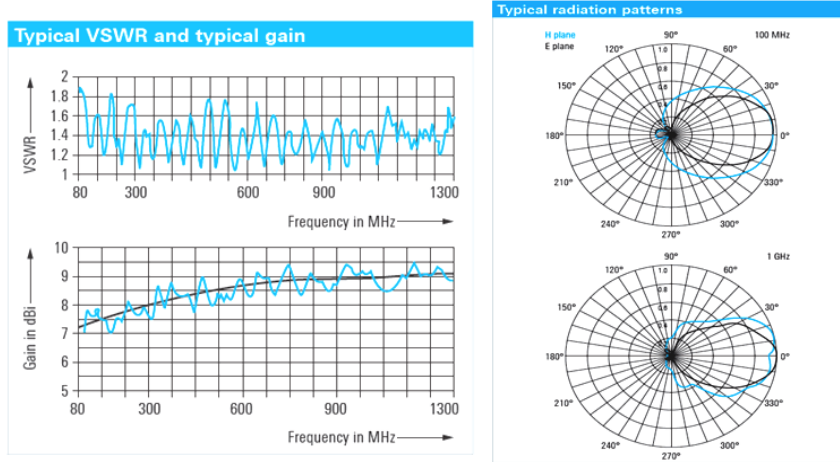
Aşırı geniş frekans bandı aralığı ile yalnız bir anten kullanımı sağlar. Polarizasyon düzlemi (yatay ve dikey) seçimi sağlar ve yüksek frekanslarda kazanç artar [36].

Işınımla bağışıklık ölçümlerinde kullanılan periyodik anten ise HL 046 model antendir. Bu anten, düşük güç yükseltme gerektirirken yüksek kazanç sağlar. Geniş frekans aralığı kapsamından dolayı yalnız bir anten gerektirir. En uygun şekilde radyasyon paterni nedeniyle sabit ışınım sağlar [36].



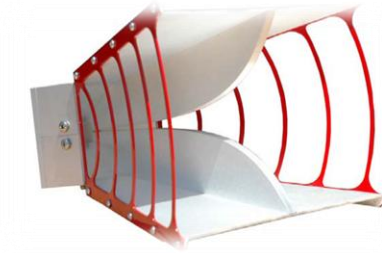
Resim 3.4. HL 046 log periyodik anten

Aşağıda HL 046 log periyodik antenin paterni ve kazanç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.14. HL 046 log periyodik antenin paterni ve kazanç grafiği [36]

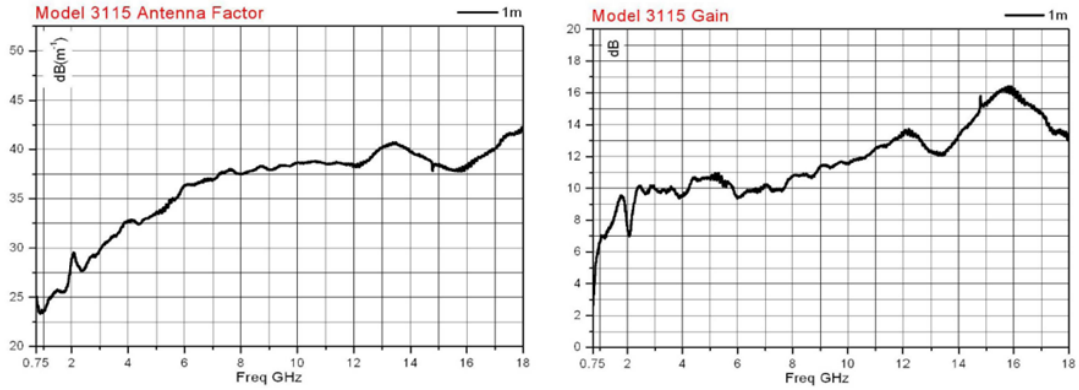
Boynuz antenin alt kısmı geniştir ve 3 temel çeşidi vardır. E-düzlem boynuz–geniş etek, elektrik alan vektörü içeren düzlemdir.



Resim 3.5. Boynuz (Horn) anten

H-düzlem boynuz–geniş etek, manyetik alan vektörü içeren düzlemdir. Piramid horn–geniş etek, her iki düzlem içinde olur. Bir boynuz antenin açıklık dağıtımı, genellikle, diyafram boyunca bir faz sivri ucuyla beslenmiş dalga kılavuzu şekliyle aynıdır [9,36,21].

Boynuz antenler için anten faktörü ve kazanç grafiği aşağıda gösterilmektedir.



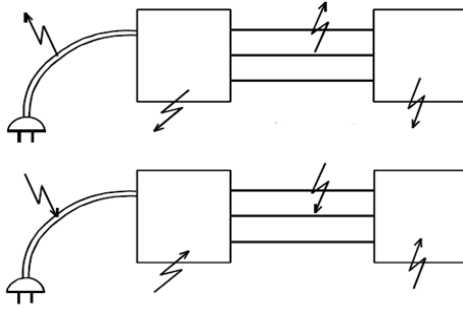
Şekil 3.15. Boynuz (Horn) antenin anten faktörü ve anten kazanç grafiği [21].

3.8. EMC'nin Fiziksel Analizi

Elektromanyetik uyumluluk, kendi elektromanyetik ortamında çalışmaya hazırlamak için bir elektronik sistemin kabiliyetinden bahseder ve keza kendi elektromanyetik girişim kaynağı olmayacaktır. Elektromanyetik uyumlu sistemler 3 kriterle desteklenir;

- Sistem diğer sistemlerle girişim yapmamalıdır.
- Sistem diğer sistemlerden kaynaklanan EM yayınına karşı bağışık olmalıdır.
- Sistem kendi bileşenleri arasında da girişim oluşturmamalıdır.

EMC'nin kolayca en gözden kaçan yüzü, bir elektronik sistemin kendi kendini enterfere etmeyecek şekilde planlanması gerekir. 4 girişim transfer metodu, ışınım yayını, ışınım bağışıklık, iletim yayını ve iletim bağışıklık deneyleri ele alınacaktır [9,10,37,41]. Işınım yayını ve bağışıklık yoluyla oluşan girişimlerin bir kısmı modern elektronik aygıtların güç girişleri veya güç kaynaklarından oluşmakta veya sistem veya cihaz işlemcilerinden, iç kabloları ve kablo yollarından veya kendi iç devre elemanlarından oluşmaktadır. Işınım yoluyla oluşan girişimler şekil 3.16'da tasvir edildiği gibi elektromanyetik sinyalleri alabilir veya yayabilir.



Şekil 3.16. (a) Işınımla yayılım modeli

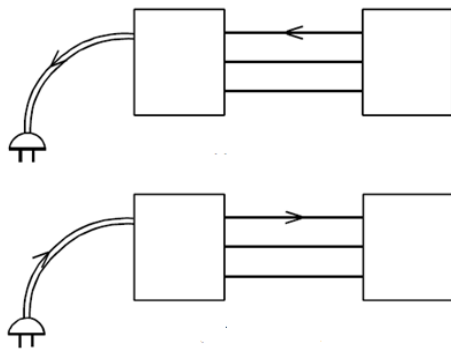
(b) Işınımla bağışıklık modeli

- Güç kabloları uzun olması durumunda, ya diğer kaynaklardan alınan sinyaller ya da radyo TV yayınlarıyla bir anten olarak rol oynayabilir. Daha yüksek frekans sinyalleri güç girişinde varolmasına rağmen AC güç girişi veya 50/60 Hz sinyali taşımak için planlanmıştır. Örneğin transörmörler, bilgisayar işlemcileri veya vakum tüpler sinyalleri yayabilir veya alabilirler.
- Yeterince uzun olmak kaydıyla, bir bilgisayar içindeki iç kablolar veya bağlantılar örneğin bir bilgisayar içindeki veri yol veya şeritleri bir anten olarak rol oynayabilir.
- Hatalı olarak tasarlanmış metalik koruma muhafazaları harici sinyalleri alabilir veya yayılabilir [9,10,37,41].

İletimle yayılım terimi, elektronik cihazların çift AC güç girişlerinde elektromanyetik enerjinin oluşabilmesine olanak sağladığı mekanizmadan bahsetmektedir. Elektronik cihazlardaki iletimle yayılım ve ışınımla yayılım limitleri düzenleme kuruluşları tarafından denetlenmektedir. Eğer bir ürün tüm ışınımla yayılım düzenlemelerinden geçse bile, iletimle yayılım testlerinden başarısız olursa, ürünün piyasaya arzı mümkün olmamaktadır. İletimle yayılım düzenlemesinin birinci nedeni, ürünün çift güç giriş portundaki elektromanyetik enerji, ürüne güç verildiğinde, ürünün bağlı olduğu tüm güç dağıtım ağı yolunda oluşmakta ve bu elektromanyetik enerji, ürünün kendisinin oluşturduğundan daha etkili olarak geniş bir ağıda bulunabilir. Diğer elektronik cihazlar ışınım yoluyla elektromanyetik girişim alabilir. İletimle yayılımın olduğu frekans aralığındaki

düzenleme, ışınlama yayınının olduğu frekans aralığındaki düzenlemeden genellikle daha azdır. İletimle yayının düşük frekanslar ve daha uzun dalga boylarında oluştuğundan genellikle oluşan problemler bu yolla meydana gelmektedir. Bununla birlikte, ışınlama yayının yoluyla oluşan girişimler yüksek frekans ve daha kısa dalga boylarında oluşmakta olup, elektromanyetik girişimi almak ve yaymak için daha geniş frekanslı bir antene ihtiyaç vardır. Bu bölümde, bu girişimleri azaltma ve bu girişimleri azaltma metodları hakkında bilgi verilmektedir. Girişim yapan sinyaller, şekil 3.17'de gösterildiği gibi metalik muhafazalı iç kablolar veya güç girişleri üzerinden komponentlerle direk olarak iletim kurabilirler. Bunu önlemek için, tıkaçlar ve filtreler tasarlanmıştır. İletim kuplaj yolu, ışınlama kuplaj yolundan daha etkilidir. İletim kuplaj yolları aşağıda belirtilmektedir;

- Bir sistem dahilindeki cihazlar veya diğer devre elemanlarıyla iletim yapabilen iç kablolar veya AC güç giriş portları tarafından alınabilen harici sinyallerdir.
- Gürültü veya girişim, AC güç girişi yakınındaki devre elemanlarına aktarılır ve bir güç şebekesi üzerinden iletilebilir.
- Gürültü sinyalleri, uygunsuz olarak planlanmış metalik muhafazalar veya ekranlamalar yoluyla iletim yapabilirler.



Şekil 3.17. (a) İletimle yayının modeli

(b) İletimle bağışıklık modeli [10].

İlk olarak, hat empedansı düzenleme ağıyla (LISN), iletimle yayının ölçümleri için çalışma yapılmıştır. Ortak ve diferansiyel mod akımları gözden geçirildikten sonra

yayımlar için önemli bir bakış açısı verilmiştir. Güç kaynaklarının kendileri, iletimle yayınının en önemli unsurlarından biri olup, bunu azaltmak için kullanılan güç kaynağı filtreleri hakkında daha sonra geniş bilgi verilecektir. İletimle ilgili diğer bir unsur olan iletimle bağışıklık, kendi AC güç kablosu yoluyla birleştiğinde elektromanyetik girişim için ürünün buna dayanıklılığını ifade eder [9,10,37,41].

3.8.1. İletimle yayınının fiziksel analizi

İletimle yayınının deneyleri bir cihazın enerji ve telekomünikasyon girişlerinden iletkenlik yoluyla yayılan elektromanyetik emisyon seviyelerini tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. İletimle yayınının ölçümü için kullanılmış olan ölçüm metodlarını anlamak çok önemlidir. İletimle yayınının, Amerika'da düzenleme kuruluşu olan FCC tarafından 450 kHz'den 30 MHz'e kadar frekans bandı üzerinde düzenlemeler yapılmış ve AB'de ise CISPR 22 standardı ile iletimle yayınının sınırları 150 kHz'den 30 MHz'e kadar geniş bir banda yayılmıştır. İletimle yayınının deneylerinde kullanılan en önemli cihaz LISN cihazıdır. Bu cihaz,

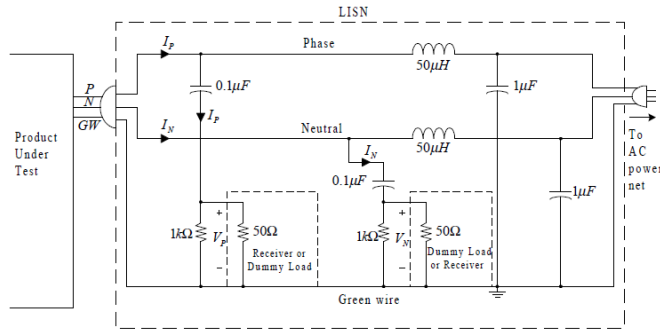
- İletimle yayınının deneyi frekans bandı boyunca, ürünün güç kablosu çıkış noktasına sabit empedans sağlar.
- Ölçüm sistemi ile şebeke arasında izolasyon sağlar.
- Güç şebekesindeki ölçüm sistemini etkileyebilecek harici gürültüyü engeller.
- Şebekeye bağılı diğer cihazların DAN kaynaklı olası gürültülerden etkilenmesini engeller.

Bu bölümde söz konusu cihazın fiziksel yapısı daha detaylı ele alınmıştır [37]. Hat empedans uyumlaştırma şebekesi (LISN), İletimle yayınının deneyleri esnasında bir cihaz test edildiği zaman, test altındaki cihazın AC güç girişi ve şebeke arasına bağlanmalıdır. LISN içinde AC güç filtrelenir ve ürünün temiz bir AC güç ile beslenmesi sağlanır.



Resim 3.6. LISN Görünüşü

İletimle yayılım testlerinin amacı, test altındaki ürünün AC güç girişinde mevcut olan gürültü akımlarını ölçmek ve gürültü akımlarının düzenleme sınırları dahilinde olduğundan emin olmaktır. Çünkü test altındaki cihazın varolan akımları AC güç kablosu üzerindeki yüke bağlıdır ve bu yük, ölçüm frekans aralığında, prizden prize ve binadan binaya önemli ölçüde değişir ve akım probu ile güç kablosunun üzerine gürültü akımları ölçmek için yeterli değildir. Bunun yerine, test altındaki numunenin AC güç çıkışını kontrol etmek amacıyla uyumlaştırılmış empedansı görülen LISN'e bağlanır.



Şekil 3.18. LISN Diyagramı

Bu LISN'in iki kullanım amacından biridir. LISN'nin ikinci amacı, ürünün AC güç kablosunun bağlantısından gelen net güç sistemi üzerindeki dış gürültüyü engellemektir. Şebekeden net olarak gelen her bir güç akımı, cihazdan iletimle yayımına ilave olabilen ve ürünün AC güç kablosundan cihaza gelen güçtür. LISN tüm yapılan iletimle yayılım frekans aralığı içinde yukarıda belirtilen amaçlarının

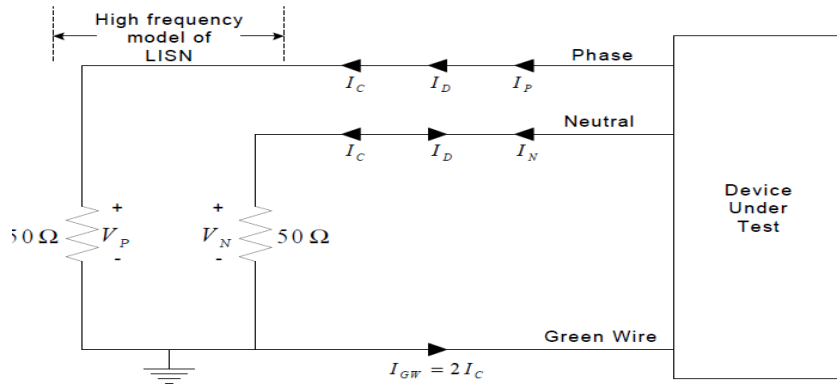
her ikisini de sağlaması gerekir. Şekilde gösterilen LISN diyagramında, 50 mH'lik bobin hatalı test verileri ve ölçüm cihazlarına doğru akan net güç üzerindeki dış gürültüyü engeller. Buna karşın, 1 μ F'lık sığa, ölçüm cihazlarının yönlendirdiği bu gürültü akımları için alternatif yol sağlar. Diğer 0,1 μ F sığalar, test alıcısının girişinde, DC olarak aşırı yüklenmeyi önlerler. 1 k Ω dirençler, 50 Ω direnç kaldırıldığında, statik yük yolu gibi rol oynayarak, yükün deşarj olması için 0.1 μ F gibi davranırlar. 50 Ω 'luk dirençlerden biri spektrum analizörün giriş empedansıdır. Buna karşın diğeri, faz ile toprak arasında ve nötr ile toprak arasında her zaman yaklaşık 50 Ω olan bu empedansı garanti eden bir suni yükür. Böylece bu test frekanslarında, kapasitörler aslında kısa devredir ve bobinler geniş empedans sağlarlar. Eğer açık devre olarak bunlar büyük empedanslara yaklaştırılırsa, iletimle yayınım test frekanslarındaki LISN'in eşdeğer devresindeki varolan V_P ölçüm voltajı, Faz ve toprak arasında ölçülür ve V_N ölçüm voltajı, nötr ve toprak arasında ölçülür. Hem faz hem de nötr voltajları, iletimle yayınımında belirlenmiş olan frekans aralığında ölçülmesi gerekir ve her ikisinde bu ölçülen frekans aralığı dahilinde, tüm frekanslarda belirlenen limitlerin altında olmalıdır. Faz ve nötr voltajlarının miktarı düzenlenmiş olmasına rağmen, voltajların empedansı genellikle 50 Ω ile düzenlenmiş olduğu için, iletimle yayınım akımlarının doğru sınırı, iletimle yayınımında kolayca görülür.

$$I_P = \frac{1}{50} V_P \quad I_N = \frac{1}{50} V_N \quad (3.48)$$

LISN, 50/60 Hz şehir şebeke frekansında, test altındaki ürüne ve AC gücüne herhangi bir etki etmediği ve cihazın çalışma fonksiyonu için gerekli AC gücünü sağlamıştır [9,10]. LISN'in amacı, cihazın faz ve toprak için standart empedansını sağlamalıdır. İletimle yayınım, bu empedanslar üzerindeki voltajın ölçümüyle tespit edilir. İletimle yayınımın ölçüldüğü LISN devresinde, 50 Ω 'daki LISN frekansının temsil edildiği iki yükü yerini almıştır. 50 Ω 'luk empedanslar ölçülmesi beklenen frekans bandı boyunca sabit olduğunu farzedelim, böylece, spektrum analizör kullanımıyla empedans boyunca voltaj ölçümüyle bulunabilen ortak ve diferansiyel mod akımları;

$$I_C = \frac{1}{2} \frac{(V_P + V_N)}{50\Omega} \quad I_D = \frac{1}{2} \frac{(V_P - V_N)}{50\Omega} \quad (3.49)$$

elde edilir.

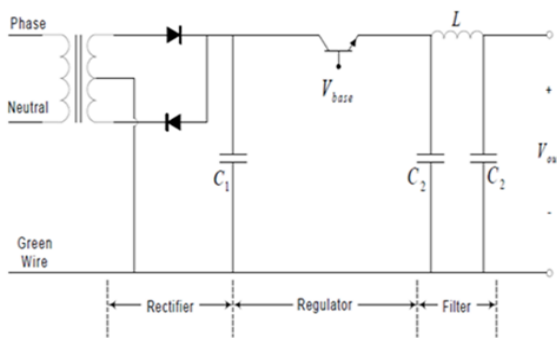


Şekil 3.19. AC güç kabloları için ortak ve diferansiyel mod akımları diyagramı

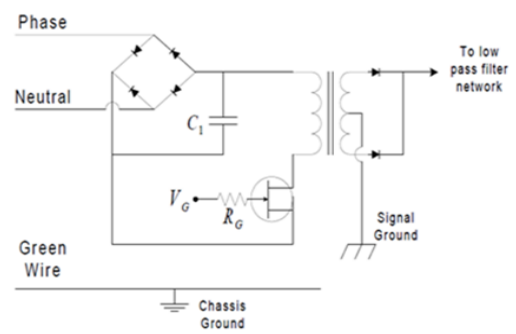
Eğer diferansiyel mod akımları, ortak mod akımlarından baskınsa, V_P yaklaşık olarak V_N 'nin büyüklüğüne ancak ters yönüne eşit olur. Topraklama hattı üzerinden geri dönüşümle oluşan ortak mod akımları istenmeyen durumdur. Sigorta atması veya iyi olmayan topraklama hattı nedeniyle devre kesilmesi durumunda, 50/60 Hz akım için bir yol sağlamak için var olduğunu hatırlamak önemlidir. Bu cihaz, normal çalışma şartları altında 50/60 Hz akım taşımak için tasarlanmamıştır. Ancak, iletimle yayılım ölçümü yapılan yüksek frekanslarda, topraklama hattı, standartdaki talepleri karşılamayan bir ürünün neden olabileceği ortak mod akımlarını taşıyabilir. Topraklama hattından geri dönen yüksek frekanslardaki baskılı ortak mod akımlarının öncelikli iki yöntemi vardır. Birinci yöntem, ürün kasasına girdikten sonra ve topraklama kablosu şaseye lehimlenmeden önce, topraklama kablosunun etrafı bir ferit çekirdekle basit olarak sarılmalıdır. Bu çekirdek Ferit, iletimle yayılım frekans bandında yüksek geçirgenliğe sahip olabilecek şekilde seçilebilmesi gerekir. Ortak mod akımlarını engellemek için ikinci yöntem, cihazın iki toprak hattı ve topraklama hattının tamamıyla dönüşümü beklenmektedir. Ürün güç kablosunun sağ girişindeki bir trafo, zararlı şok riskini azaltmak için nötr ve faz kablosundan elektriksel olarak izole edilerek kullanılır. Bu yöntem ortak mod iletimle yayılım

akımları ölçümlerini azaltmaya yardımcı olabilir. Ancak, ortak mod akımı için bir yol, ürünün metal şase ve ölçüm bölgesinin toprağı arasındaki dönüş yolunda kapasitif kuplaj olabilir. Bir ürünün iletimle yayınımlarını azaltmak için kullanılan en önemli araçlardan biri olan güç kaynağı filtreleri, bir ürünün diferansiyel mod iletimle yayınımlarını azaltmak için büyük ölçüde yardımcı olabilmektedir. Ancak, bu filtrelerin çoğu, iletimle yayınımlarını ortak mod yayınımlarını azaltmak için tasarlanmış değildir [9,10].

Bir ürün için iletimle yayınımlarını girişimlerinden biri, onların güç kaynaklarıdır. Bir akım kaynağı, AC hat voltajını DC voltaja dönüştüren bir güç kaynağı kullanarak oluşturur. Bu süreç içinde bunu yaparken, pek çok güç kaynağı, ürünün çalışma fonksiyonlarına girişim yapmayan istenmeyen yüksek frekans sinyallerini yaratır. Bu istenmeyen EM enerji, düzenleme testlerinde başarısız olan ürünün neden olabileceği iletimle yayınımlarını ölçülebilmektedir. Güç kaynaklarının iki önemli tipi burada tartışılacaktır. Bunlardan birincisi olan lineer güç kaynakları, DC güç kaynakları için temiz AC elde edilmesini sağlar ancak, verimsiz ve hantaldır diğeri ise, Anahtarlama modlu güç kaynakları, pek çok istenmeyen RF enerji üretir ancak, lineer güç kaynaklarından daha küçük ve hafiftir.



Doğrusal güç kaynağı



Anahtarlama modlu güç kaynağı

Şekil 3.20. Güç Kaynakları

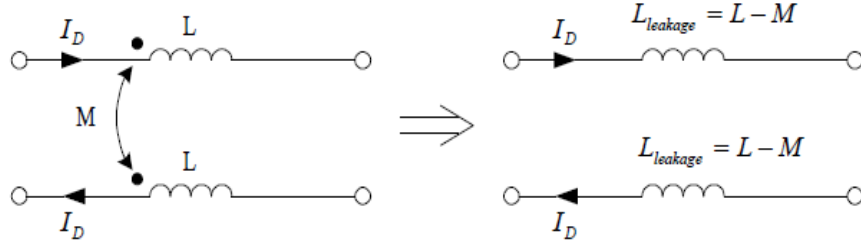
Lineer güç kaynaklarında, dönüştürücü, filtreleme sağlamak için ve yenileştirmeden önce istenen genlik için AC voltaj girişinin üst veya altında (genellikle altında) bir basamak olarak yerleştirilmektedir. Doğrultucu bölümü, 50/60 Hz AC dalga

şeklinden, bir titreşen DC dalga şekline dönüştürülmektedir. Bu bölümdeki C_1 sığası titreşen DC dalga şeklini düzeltmek için kullanılır. Düzenleme bölümü, lineer güç kaynağından beslendiği zaman son derece önemlidir. Çıkış DC voltajı tasarlanan değerinin altına düşürülmesi isteniyorsa, akım kaynaktan beslenir. Bununla birlikte, transistörün V_{out} baz çıkış geriliminin bir kısmının geri beslemesiyle, transistörün kollektör ve emiter boyunca gerilimi ne kadar azalır, baz gerilimide o kadar azalacaktır. Böylece regülatör tipik yükleme şartları altında, güç kaynağı için sabit bir gerilim kaynağı olur. Güç kaynağının düzenleme bölümünden sonra, filtreleme bölümü gelir. Filtreleme bölümü, güç kaynağının düzenleme ve doğrultma bölümlerinin sol tarafında bulunur ve dalgalanmaları azaltır. Bu lineer güç kaynakları, iletimle yayılım olduğu zaman son derece temiz bir güç kaynağı olmasına karşın, bu güç kaynaklarının arzu edilmemesinin iki önemli sebebi vardır. Bunlardan birincisi, 50/60 Hz güç frekanslarında kullanılan dönüştürücü çekirdek, çok büyük ve çok ağırdır. İkincisi, lineer güç kaynaklarının verimliliği çok fazla değildir. Bu güç kaynaklarının verimliliği yaklaşık olarak % 20 ile % 40 arasındadır. Değişik bir güç kaynağı olan anahtarlama modlu güç kaynağı, lineer güç kaynaklarından hem daha verimli (verimlilik % 60 ile % 90 arasında) hem de daha hafiftir. Bir anahtarlama modlu güç kaynağı veya anahtarlayıcı 20 kHz ile 100 kHz arasında anahtarlama frekansında çalışması için gereken dönüştürücüler kullanılır. Bir anahtarlama modlu güç kaynağında, faz ve nötr güç girişlerindeki dört diyot, bir titreşen DC dalga şeklini üretmek için, bir tam dalga doğrultucu olarak önemli rol oynar. C_1 kapasitörü dalga şeklinin tepelerini tutmak için yardımcı olur. Anahtarlama modlu güç kaynakları, anahtarlama modlu güç MOSFET geçişleri nedeniyle lineer güç kaynaklarından iletimle yayımlara karşı büyük bir katkı sağlar [9,10,19]. Tüm elektronik ürünlerde kullanılan güç kaynağı filtreleri yapılan iletimle yayılım düzenlemelerine uygun olmayabilir. Güç kaynağı filtresi bir cihazın güç girişlerine eklenir. Böylece, bu filtreler cihaz çıkışından itibaren iletimle yayılım akımlarını önlemektedirler. Yapılan iletimle yayılım testleri yüksek frekans aralığından dolayı, bu filtreler hem ortak hem de diferansiyel mod akımlarını azaltması gerekmektedir, geleneksel elektrik filtreleri, iletimle yayılımı azaltmak için yeterli olmadığından bunun yerine, güç kaynağı filtreleri, tüm iletimle yayılım frekans spektrumu boyunca hem ortak hemde diferansiyel mod akımlarını azaltmak için tasarlanmıştır.

Kaynak ve yük empedansının her ikisi 50Ω 'a eşit olduğu düşünülür, ancak, gerçekte böyle olmayabilir. Çünkü, yük empedansı, bir LISN tarafından düzenlenmiş empedans olarak 50Ω 'a ayarlanmış olmasına rağmen, kaynak empedansı, filtreye bağlanan cihaza bağımlıdır böylece, söz konusu güç filtresinin cihaz ile düzgün çalışması için, cihazınızın güç kablolarında görülen giriş empedansı, iletimle yayılım aralığındaki tüm frekanslarda, 50Ω olması gerekir. Güç kaynağı filtresinin bir önemli tarafı, cihazlardan hem ortak hemde diferansiyel mod akımlarını azaltmaktır. Mevcut tanımı gereği diferansiyel mod akımı, nötr hattı yakınından döner ve faz hattından dışarı akar, hiçbir diferansiyel mod akımı toprak hattından akmamaktadır. Böylece, diferansiyel mod toplam kaybını belirlemek için, ürünün topraklama hattına bağlanmadan, faz ve nötr hattına ayrı ayrı bağlanarak ölçüm yapılması gerekir. Faz ve nötr kablolarındaki ortak mod toplam kayıp ölçümleri için, devreye bağlanmış olan faz, nötr ve toprak hattının beraber olması gerekir. Her iki durumda, Z_S ürünün güç kablosu içinde görülen empedansıdır ve değeri $Z_S = 50 \Omega$. dur [9,10]. Bir ürün üzerinde kullanılan filtreler için toplam kayıp değeri, test düzeneği kullanılarak belirlenebilir. Bu ürünün giriş filtresi giriş ortak ve diferansiyel mod akımları I_C ve I_D ve LISN tarafından ölçülebilen çıkış ortak ve diferansiyel mod akımları I'_C ve I'_D 'dir. LISN 'nin ölçtüğü voltaj;

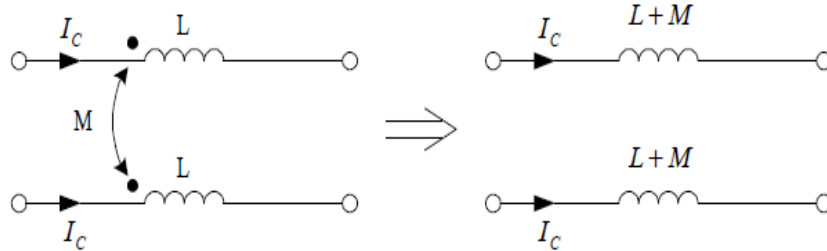
$$V_P = 50(I'_C + I'_D) \qquad V_N = 50(I'_C - I'_D) \qquad (3.50)$$

elde edilir. Bu voltaj tüm düzenleme frekanslarında iletimle yayılım sınırları altındadır. Birleşik indüktanslar, M karşılık indüktans ve L ile temsil edilen öz indüktanslardır. Sargılar aynı çekirdek üzerinde, özdeş ve sıkı olduğu için, karşılıklı indüktans yaklaşık olarak öz indüktansa eşittir ve bobinin kuplaj katsayısı birimsel olarak yaklaşır. Ortak mod bobininin amacı, diferansiyel mod akımlarının etkisi olmaksızın ortak mod akımlarını engellemektir.



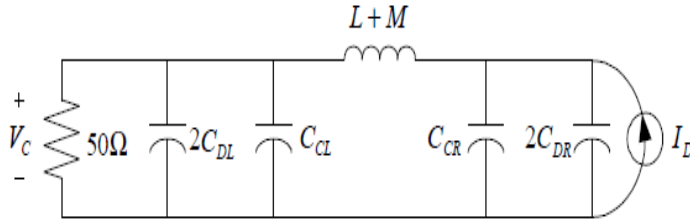
Şekil 3.21. Diferansiyel mod akımlarının bobinlerdeki etkisi

Böylece, diferansiyel mod akımlarıyla ilgili olarak, bu ortak mod bobini her bir uçta $L-M$ indüktansı eklenmiştir. Bu indüktans, sargılar arasında birleşik olmayan ve çekirdeğin dışına sızan bir manyetik akının katkısıyla oluşmakta ve kaçak indüktans olarak adlandırılmaktadır. İdealde, $L \approx M$ için, bu kaçak indüktans sıfırdır ve ortak mod bobini, diferansiyel mod akımı üzerinde hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Pratik olarak, kaçak indüktans sıfırdan farklı fakat çok küçük olmakla birlikte, eğer ortak mod akımı üzerindeki ortak mod bobin etkisi göz önüne alınırsa, indüktansın bir yönü boyunca voltajı hesaplanabilmektedir [9,10,19].



Şekil 3.22. Ortak mod akımlarının bobinlerdeki etkisi

Böylece, bu ortak mod bobini her bir uçta $L + M$ bobini ortak mod akımlarıyla ilgili olarak eklenmiştir. Sonuç olarak, ortak mod bobini, ortak mod akımına engel olmaktadır. Burada, akım kaynağı olarak ortak mod akımlarına benzer akım gibi düşünülmektedir. Ortak mod akımları için, güç kaynağı filtre devresi için eşit örgü denklemini yazarsak, ortak mod akımlarını LISN ve filtre için eşit devreye indirgenmektedir ve diferansiyel mod devresi için, LISN ve filtrenin eşit devresi şekil 3.23'deki devreye indirgenmektedir [9,10,19].



Şekil 3.23. Diferansiyel mod devresi için LISN devresi

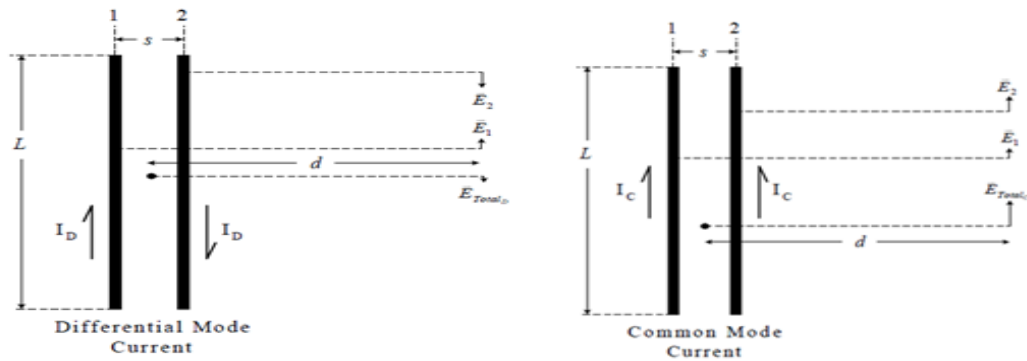
3.8.2. Işınımla yayınının fiziksel analizi

Bir elektriksel veya elektronik cihazın bulunduğu ortama ışınım yollu yaydığı elektromanyetik dalga gürültü seviyelerinin belirlendiği deneylerdir. Bu tür ışınımla yayının ölçümlerinin yapıldığı yer elektromanyetik olarak temiz ve çevre nesnelere yansımının olmadığı açık alanlar veya bu şartların sağlanamadığı durumlarda, bu tip ortamları temsil eden yapay TEM hücreleri veya elektromanyetik olarak yalıtılmış yarı yansısız (SAC-semi anechoic chamber) deney odaları kullanılmaktadır [4,26,12]. Işınımla yayının terimi bir elektronik cihazdan kasıtsız olarak elektromagnetik enerjinin serbest bırakılmasını tanımlamaktadır. Bir elektronik cihazın devre tasarımından uzakta istenmeyen yayılımla elektromagnetik alanlar oluşmasıdır. Genel olarak, ışınımla yayının istenmeyen ışınımla birleşir, keza, istenen ışınımlar, planlanmış iletim frekans bandının dışındaki frekanslarda istenmeyen yayınımlara sahip olabilirler. Elektronik cihazlar önemli miktarda ışınımla yayınıma maruz kalırlar. Bu cihazların kendi çalışma ortamlarında veya yakınındaki diğer cihazların çalışmasıyla enterfere olabilirler. Bu nedenlerden dolayı, temel tasarım teknikleri yayınımları en aza indirmek için kullanılacak şekilde ışınımla yayınının kökeninin arkasındaki kavramları anlamak önemlidir. Burada, bir elektronik cihazdan ışınımla yayınımları azaltmak ve ölçüm tahminleri için tartışma metodları ve ışınımla yayınının nereden kaynaklandığını araştırılmaktadır. Bu amaçla, ortak ve diferansiyel mod akımları, tanıtılarak ve onların ışınımla yayınımdaki rolleri araştırılacaktır. Akım probu kullanarak akım taşıyan kablolar üzerindeki diferansiyel ve ortak mod akımlarının ölçülmesi metodları uygulanacaktır. Sonuçta, bu metod ile elektronik cihazlardan ışınımla yayınıma etkisi olması muhtemel olan cihaz yapısı ve devre geometrisinin önemi üzerinde durulmaktadır.

Akım taşıyan iletkenlerde, büyük dalga boylarındaki frekanslarda iletim boyutunu yayılan elektromanyetik enerji etkileyebilir [9,10,12,26]. Basit iletim düzenlemesiyle oluşabilen akım tiplerini kavramamıza karşın, ışınımla yayınının anlaşılması çok önemlidir. Paralel iletkenlerdeki akımlar iki tip olabilmektedir. Bunlar, diferansiyel ve ortak mod akımlarıdır. Bu akımlar şekil 3.24'de gösterilmektedir. Paralel iletkenler üzerindeki Diferansiyel mod akımlarının büyüklükleri eşit ve zıt yönlüdür. Buna karşın ortak mod akımları büyüklüğü eşit ve aynı yönlüdür. Paralel iletken sistemi üzerindeki bir akım, genel olarak, ortak ve diferansiyel mod akımlarından oluşmaktadır. Bu nedenle, bir genel akım, bir ortak mod komponentleri ve diferansiyel mod komponentleri içinde bir arada olmayabilir. İlk iletkenin akımı I_1 , ortak mod akımı I_C ve diferansiyel mod akımı I_D 'nin toplamıdır. İkinci iletken akımı I_2 , ortak ve diferansiyel mod akımlarının farkı olur. Böylece ortak ve diferansiyel mod akımları bulunur;

$$I_D = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad I_C = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (3.51)$$

Ortak ve diferansiyel mod akımları arasındaki ayrımın önemi, incelenmiş olan akımların her bir türünden ışınımla yayılım varsa belirgin olmaktadır. Diferansiyel mod akımlarının çıkarılması nedeniyle yayılan elektrik alan bileşenleri, yayılan küçük bir elektrik alanı üretir. Ortak mod akımlarının eklenmesi nedeniyle yayılan elektrik alan bileşenleri, çok daha büyük bir elektrik alanı üretir. Bu etki aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Diferansiyel ve ortak mod akımları

Birinci iletken levhanın akımı nedeniyle, elektrik alan bileşeni E_1 , ortak ve diferansiyel mod akımları olarak tanımlanmaktadır. Bu elektrik alan, paralel iletken levhalar olarak aynı düzlem içindeki bir nokta olarak gözlemlenmektedir. İkinci iletken levha gözlem noktasına daha yakındır. (bir küçük s mesafesiyle) ikinci iletken levha üzerindeki akımlar nedeniyle bu elektrik alanın E_2 büyüklüğü, her iki akım modu için, birinci iletken levha üzerindeki akım nedeniyle daha büyüktür. E_2 alanı, gibi ortak mod akımları nedeniyle E_1 alanıyla aynı yönlü olmasına rağmen, E_2 alanı, diferansiyel mod akımları nedeniyle, E_1 alanıyla zıt yönlüdür. Bu nedenle, d mesafesi iletkenler arasındaki s mesafesinden daha büyüktür. Diferansiyel mod akımları nedeniyle toplam elektrik alan ihmal edilebilmektedir. Buna karşın ortak mod akımları nedeniyle toplam elektrik alan oldukça büyük olur [9,10,37,41].

3.8.3. İletimle bağışıklığın fiziksel analizi

İletimle bağışıklık konusu, cihazın AC güç hattı boyunca, elektromanyetik girişim kuplajına ürünün gösterdiği direnç olarak belirtilmektedir. Bununla birlikte, birçok durumda, ürünün güç kaynağı, güç kaynağı filtresi tarafından azaltılmış olduğundan ürünün AC güç kaynağı boyunca girişim yapmaya çalışan sinyallerin genliği genellikle çok küçük olacaktır. İletimle yayınının başlıca nedeni, diğer bir ürün tarafından, evlerimiz ve binalardaki elektrik güç dağıtım şebekeleri yoluyla yayılan ve alınan elektromanyetik enerji olarak tanımlanmaktadır. İletimle bağışıklık sorunları, ürünün güç dağıtım ağı üzerindeki büyük dalgalanmalar veya geçişler nedeniyle olur. Şimşekler, elektromanyetik darbe (EMP) ve güç dalgalanmaları AC güç giriş kablosu aracılığıyla bir ürün için çiftlenebilen elektromanyetik girişim örnekleridir. İyi dizayn edilmiş güç kaynağı ve güç kaynağı filtreleri, bu olayların bazıları için iletim yollu bağışıklığı önlemek için ürüne büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Deney altındaki cihaza bağlı çeşitli kabloları bozucu işareti (frekans bölgesinin tamamında, deneyden geçirilen cihaz kapısında tarif edilmiş bir ortak mod empedansı ile) uygun şekilde bağlaştırmak için kuplör elemanları kullanılmalıdır. Kuplör elemanları, (bağlaştırma/ayırıştırma şebekesi adı verilen) tek bir kutu içinde birleştirilebilir veya çeşitli bölümlerden meydana gelebilmektedir. Kuplör elemanı esas parametresi olan deneyden geçirilen cihaz kapısında görülen ortak mod

empedansı, Çizelgede belirtilmiştir. Uygun enjeksiyon metodun seçilmesi ile ilgili kurallar, aşağıda belirtilmektedir [48,50]. CDN cihazının genel özellikleri ise;

- Cihaz kablolarına doğrudan kuplaj söz konusudur.
- Kesilebilir veya canlı uçları elde edilebilen kablolarla uygulanması kolaydır.
- Gerekli enerjiyi (RF) kuple etmek düşük güçlerle sağlanır.
- Genelde elektrik şebeke bağlantılarında kullanılır (2, 3, 4 telli).

CDN'nin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır bunlar; CDN lerin önemli avantajları;

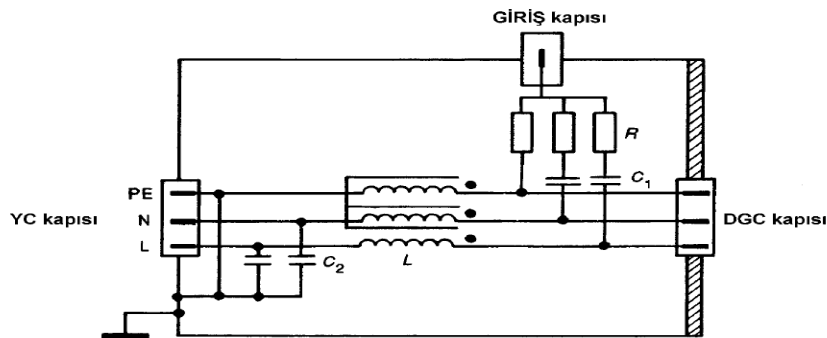
- Numuneye bağlı yardımcı cihaz test esnasında korunur (decoupling ünitesinden dolayı).
- Yüksek doğrulukta 150 ohm ortak mod empedansı oluştururlar.
- İç kayıp çok az olduğundan az güç gerektirir.

CDN lerin önemli dezavantajları;

- Kabloya kuplajlanan sinyal gereğinden fazla olabilir.
- Farklı kablolar için farklı CDN ler gerekir.

150 kHz'den 80 MHz'ye kadar olan frekans bölgesi içinde, kuplör şebekeleri için tipik parametreler çizelgede belirtilmiştir. Ortak mod empedansı Z_{ce} , deney üreticinin iç empedansı (50 Ω) ve 100 Ω 'luk bir seri eş değeri temsil eden uyarılan hatların her biri ile seri bağlı 100 Ω 'luk dirençten meydana gelir. Uygun bir $L |L\omega| \gg 150 \Omega$ bobini kullanılarak C_2 ayırma elemanları Z_{ce} 'yi etkilememesi sağlanmalıdır. Kuplör şebekesindeki deneyden geçirilen cihaz kapısının merkezi, toprak referans düzleminin 30 mm üzerine yerleştirilmelidir. Kuplör şebekesi ile deneyden geçirilen cihaz arasındaki kablo, toprak referans düzleminin 30 mm üzerine yerleştirilmesi durumunda, yaklaşık 150 Ω 'luk bir karakteristik empedansı temsil edebilmelidir. Deney üretici ile kuplör şebekesi (KŞ) tellerinin her birine DC ve AC ayırma uygulaması şartıyla C_1 kondansatörlerinin empedansı, ilgilenilen

frekans bölgesinde 150Ω 'dan çok daha az olmalıdır. Yardımcı cihaz, bir ortak mod bobini L , ekranlı kablolar için C_2 kondansatörleri veya sadece ortak mod bobini L ile ayrılmalıdır. Ekranın yardımcı cihaz tarafında toprak referans düzlemine bağlanması sebebiyle ekranlı kablolar için C_2 kondansatörü gerekli olmayabilir. Ekranlı kablolar için C_2 değeri, istenen işaret aşırı derecede etkilenmeyecek şekilde seçilmelidir. Kuplör şebekesi parametrelerinin, örneğin KŞ-M1'de ferrit (ler) in doyuma ulaşmasıyla etkilenmesine izin verilmez [48,50]. Tek bir kuplör şebekesi ile bütün fonksiyonel şartların sağlanmasına imkân olmadığından, değişik durumlar için değişik KŞ kullanılmaktadır. Bağlaştırma ve ayırıştırma şebekeleri (CDN) bütün güç kaynağı bağlantıları için önerilmektedir. Bununla birlikte, yüksek güç (Akım ≥ 16 A) ve/veya karışık kaynak sistemleri (çok fazla veya değişen paralel kaynak voltajları) için diğer enjekte metodlar seçilebilir.



Şekil 3.25. KŞ-1/M2/-M3 devresi için basitleştirilmiş devre şeması

Bu rahatsız edici sinyaller, CDN-M1 (tek kablo), CDN-M2 (iki kablo) veya CDN-M3 (üç kablo) veya duruma uygun eşdeğer şebekeler kullanılmasıyla kaynak hattı için çiftlenebilmesi gerekmektedir.



Resim 3.7. Bağlaştırma ve ayırıştırma şebekeleri(CDN)

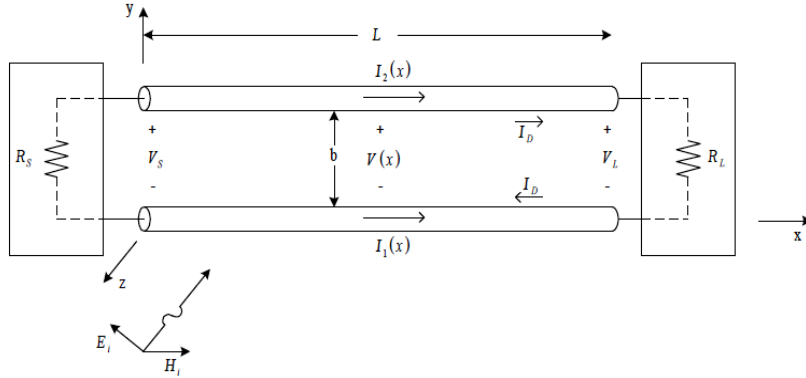
CDN çalışma performansı, deney altındaki cihaz (EUT) tarafından alınan akım nedeniyle manyetik malzemenin doyuma ulaşmasıyla aşırı derecede bozulmamalıdır. Mümkün olan her yerde, akım akmasıyla oluşan mıknatıslanmayı sağlaması gereken şebeke yapısı, akımın geri dönüşünü engellemelidirler. Eğer gerçek kurulumdaki kaynak bağlantıları ayrı ayrı yönlendirilirse ve CDN-M1 seçilirse tüm giriş noktaları için ayrı ayrı olarak kullanılması gerekmektedir. Eğer deney altındaki cihaz diğer bağlantı terminalleriyle (örneğin RF amacı veya yüksek sızıntı akımı için) sağlanırsa, bu terminaller toprak referans düzlemine bağlanması gerekir;

- Deney altındaki cihazın karakteristiği veya özelliği CDN-M1 kullanılmasına izin verdiği zaman, bu durumda, güç kaynağı, CDN-M3 şebekesi doğrultusunda sağlanması gerekir;
- Deney altındaki cihazın karakteristiği veya özelliği diğer sebepler veya RF için seri bağlı toprak terminaliyle bir CDN-M1 şebekesinin varlığına müsaade etmediğinde, bu toprak terminali referans toprak düzlemine bağlanması gerekmektedir. Bu durumda, CDN-M3 şebekesi, toprak iletimi korumasıyla bir RF kısa devreyi önlemek için bir CDN-M2 şebekesiyle birlikte kullanılması gereklidir. Bu durumda test ekipmanı için CDN-M1 ve CDN-M2'nin birlikte kullanılması gerekli olmaktadır [11,48,50].

3.8.4. Işınlama bağışıklığının fiziksel analizi

Işınım yoluyla elektromanyetik dalgalara maruz kalan elektrikli ve elektronik cihazların, bağışıklık seviyelerinin değerlendirilmesidir. Tüm sayısal cihazlar için gerekli yasal düzenlemelerle, ışınım ve iletimle yayılım ile bağışıklık düzenleme limitleri uyumlu hale getirilmiştir. Bununla birlikte, iletim ve ışınım yayınımlarına bağışıklığı olan sayısal cihazlar için bu düzenlemeler önemlidir. Eğer, pek çok ürün radar veya radyo vericilerinin oluşturduğu alanlar gibi dış rahatsızlıklara karşı hassasiyet gösterirse, bu ürünler, güvensiz kabul edilmekte ve piyasaya arzı mümkün olmamaktadır. Sayısal cihazların sahip olduğu ışınım alanlarının etkisinde büyük önem arzeder. Özellikle, bu alanların baskı devreler (PCB), kablo bağlantıları ve kablolar üzerindeki etkisi önemlidir. Bu manada, ekranlanmış koaksiyel kabloların

üzerindeki etki alanını incelemek amacıyla, iki kablolu iletim hatlarında, bu alanların koaksiyel kablolar üzerindeki etkileri için model geliştirilmektedir. Bir elektromanyetik alanın etkisindeki iki kablolu iletim hattı üzerindeki akımı teşvik edecektir. Bu akımlar nakil hattının etrafında yayılan bir alana dönüşmektedir.

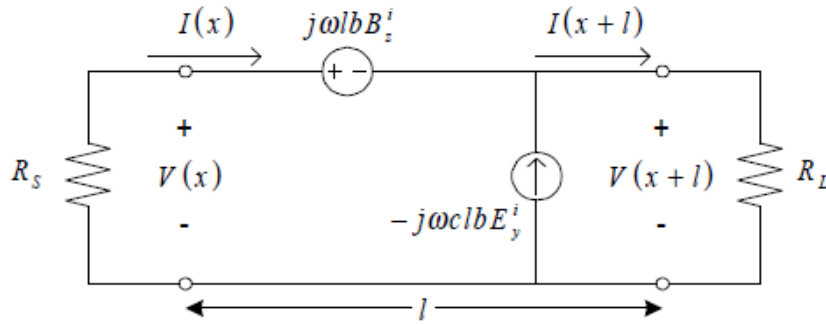


Şekil 3.26. İki kablolu iletim hattı

İletim hattı sistemi üzerindeki bu alan terminaller üzerindeki voltajı teşvik edecektir. Bu nakil hattını tanımlamak için benzer bir sistem geliştirilmesi gerekmektedir. Gelen bir elektromanyetik alan ile açıklanan iki iletkenli iletim hattı ile gösterilecek olan bir eşdeğer devre, konunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Bu gerilim ve akım hattının eşdeğerler devre modeli için, Faraday kanununun geniş bir uygulama şekli;

$$\oint E \cdot dl = -j\omega \int_{\Delta S} \vec{B} \cdot \hat{n} \, ds \quad (3.52)$$

formülü ile verilir. Bu formül, iletim hattı ucundaki toplam elektromanyetik alan için gerekli matematiksel işlemleri yapılarak düzenlendiğinde, x ve y yönündeki elektromanyetik alan bileşenleri ve z yönündeki manyetik alan bileşenleri elde edilecektir. Şekil 3.26'daki devrede terminaller üzerindeki voltajların hesaplanması için, şekil 3.27'de indirgenmiş devre haline dönüştürülmektedir. Bu devrede, V_L ve V_S terminal voltajları hesaplandığında,



Şekil 3.27. Sonlandırma gerilimini belirleyici basit devre

$$V_S = \frac{R_S}{R_S + R_L} j\omega L b B_z^i - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} j\omega L b E_y^i \quad (3.53)$$

$$V_L = \frac{-R_S}{R_S + R_L} j\omega L b B_z^i - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} j\omega L b E_y^i \quad (3.54)$$

elde edilir. Böylece elektromanyetik alanların etkisindeki iki kablolu iletim hattının sonunda oluşacak olan voltajların yaklaşımını açıklamak için bir yöntem belirlenmektedir. Bir cihazın çalışmaya hazırlanması için, hat sonu voltajların en aza indirgenmesi istenilen durumdur veya bu cihaz ile girişimden bunları önleyecek devre geliştirilmelidir. Mühendisler, bu modelleri kullanarak, elektromanyetik alanlar tarafından meydana gelen girişimlerin en aza indirilmesi için arzu edilen iki kablolu iletim hattında kullanılan cihazların parametrelerini belirlemektedirler [28,29,14,41,42].

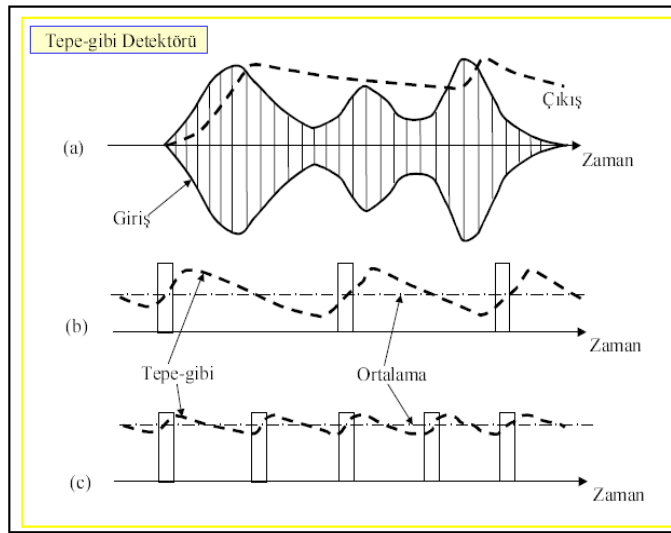
3.9. EMI Alıcıları ve Dedektör Tipleri

EMC testlerinde spektrum analizörüne göre daha duyarlı, daha düşük gürültü faktörüne sahip EMI alıcısı kullanılır. EMI alıcısında farklı karakterdeki işaretlere karşı farklı duyarlılık gösteren dedektör tipleri 3 türdür bulunur;

- Peak Dedektör (Tepe Dedektörü), zamanla değişen bir işaretin en yüksek seviyesini kaydeder.

- Average Dedektör (Ortalama Dedektörü), zamanla değişen bir işaretin belirli bir süre boyunca ortalamasını kaydeder.
- Quasi Peak Dedektör (Tepe-Gibi Dedektörü), belirli bir süre boyunca işaretin genliğini ve tekrarlama sıklığını kaydeder.

Tepe gibi (TG) dedektöründe çıkış işaretinin genliğine ve tekrarlama sıklığına bağlıdır. Herhangi bir işaretin TG değeri \leq TP değeridir. Sürekli sinüzoidal bir işarete TG değeri = TP değeridir.



Şekil 3.28. EMC ölçümlerinde kullanılan dedektör tipleri

Düşük tekrarlama hızı darbesele işaretlerde ikisi arasında büyük fark vardır. Darbesele işaretlerin girişimi durumunda EMC ölçülerinde elde edilen değerler darbe tekrarlama frekansına bağlıdır. Bu TG dedektörü işaretin seviyesi yanında tekrarlama sıklığında göstermektedir. Darbesele girişimde sürekli darbelerin ölçümü bir ortalama dedektör gerekmektedir [23].

3.10. Işınım ile Girişim (enterferans) Ölçümleri

Işınım yoluyla girişim ölçümleri için kullanılan deney teknikleri ve bu deneylerde kullanılan deney odaları hakkında fiziksel olarak inceleme yapılmaktadır. Işınım deneyleri için kullanılan deney odaları teknikleri aşağıda belirtilmektedir;

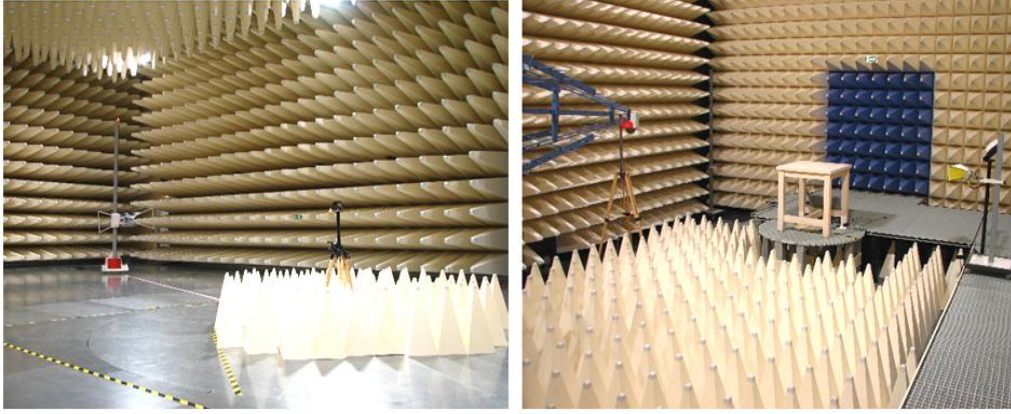
- Mikrodalga Yansımaz odalar
- Enine elektromagnetik hücreler
- Yansımaz odalar
- G-TEM hücreler

Elektromanyetik uyumluluk ve girişim ölçümleri için en yaygın laboratuvar yaklaşımı, mikrodalga yansımaz odalardır [4,17,40,41]. 1990 yılında RF absorblama teknolojisindeki gelişmeler, açık saha test alanı deney yönteminin giderek bir ekran muhafazalı oda içinde uygulanmaya başlanmış olup, bu tip odalar yarı yansımaz oda (SAC) ve tam yansımaz oda (FAC) olarak adlandırılmaktadır. Işınım ile yayılım ve ışınım ile bağışıklık deneyinde kullanılan bu yansımaz odalar serbest uzay ortamına benzetilmesi temeline dayanarak geliştirilmiştir. Hem SAC hem de FAC yaklaşık ideal test şartlarındaki benzer test şartlarını sağlarlar. Yansımaz odalar üretim fabrikaları ve/veya bir araştırma geliştirme merkezi yakınında olabilen, olumsuz hava şartlarında ve ortam sinyalleri için bağışıklık sağlayabilen bir tesis içinde uygun deney ve ölçüm uygulamaları için deney alanlarıdır. Bu kabiliyet elektronik cihazların ürün sertifikaları ile araştırma, geliştirmeye yönelik çalışmalarda önemli ölçüde fayda sağlamaktadırlar. Bazı odalar kapalı alanda yapılan ölçümler için büyük kolaylık sağlamaktadırlar. Bunlar, dış elektromanyetik ortamlardan genellikle 100 dB den fazla yüksek izolasyon sağlarlar. Buna karşın yansımaz odalar özellikle çok düşük sinyal seviyelerini içeren hassas ölçümler içinde uygun olmaktadır. Bu odaların taban, tavan ve duvarların yüzeyleri mikrodalgaları absorblamayı sağlayan piramitlerle kaplanmıştır. Bu odaların duvarları, yüksek frekanslarda daha yüksek güç soğurma kapasitesi ve daha düşük frekanslarda daha az soğurma imkanı sağlamaktadırlar. 200 MHz'in altındaki frekanslarda, mevcut test bölgesinin boyutları, dalga boyuna karşılık gelen ölçüm frekansları ile kıyaslanabilmektedir. Sonuç olarak, EMC/EMI ölçümleri için, mikrodalga yansımaz odaların kullanımı 200 MHz in üzerindeki frekanslarda sınırlanmaktadır. Laboratuvarlarda ışınım deneylerinde kullanılan yansımaz odalar iki türdür. Bunlardan ışınım ile yayılım deneylerinin yapıldığı yarı yansımaz oda (Semi Anchoic Chamber-SAC) ve ışınım ile bağışıklık deneyleri için kullanılan tam yansımaz odadır (Full Anchoic Chamber-FAC). Yansımaz odalarda genellikle

ölçüm için deney altındaki cihazı, antenleri ve diğer aksesuarları oda içine taşımak, kurmak veya kurulumunu kolaylaştırmak için bir kapı bulunmaktadır. Bu kapı, odanın içinde ve dışındaki elektromanyetik ortam arasında iyi bir izolasyon sağlamak amacıyla metalik yaylı kaynak sıkıştırmasıyla dikkatlice tasarlanmaktadır. Benzer şekilde, her kablo, konnektör veya güç kaynağı hattı, yüksek elektromanyetik izolasyon sağlamak için, özel paneller aracılığıyla yansısız odaya bağlantı sağlanmaktadır. Karmaşık test ölçüm düzeneğinde, yansısız odanın zemini, bir tahta veya yansımayı önleyecek platform ile monteli raylı sisteme sahiptirler. Deney altındaki cihaz bu raylı sistem üzerine yerleştirilerek bir elektrik veya mekanik düzenleme yardımıyla platform raylar üzerinde hareket edebilmekte ve hassasiyetle pozisyonunu değiştirilebilmektedir [9]. SAC ve FAC üzerindeki tartışmalara ilaveten GTEM hücre ve yankılanma odaları da CISPR ve diğer EMC standart komitelerince tartışma konusu olmuştur. Bununla birlikte, sertifikasyon deneyleri için, bu deney yöntemleri hala tercih edilmemektedir. EMC çoğu ülke için zorunlu bir gereksinim olduğu için, değişik ülkelerde değişik deney odaları tercih edilmektedir. CISPR 16-1-4 standardında tanımlanmış olan, SAC, ilgili frekans aralığı içindeki elektromanyetik enerjiyi absorbe eden RF soğurucu malzemeler ile kaplanmış altı iç yüzeyin beşi yüzeyi bir ekran muhafazası ile kaplanmaktadır. Oda zemini toprak düzlemiyle iyi bir iletim sağlaması gerekmektedir [14-16,41,45].

Yarı yansısız oda (SAC) normal olarak iletim ve ışınlama yayılım deneylerinde kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde, SAC, 30 MHz'in üzerinde taşıyıcı frekansın 10'uncu harmoniği veya 40 GHz den düşük herhangi bir frekans aralığı içinde ışınlama yayılım ölçümleri için kullanılmaktadır. CISPR 22, ANSI C 63.4 ve GB 9254, gibi test standartları SAC'ın NSA (Normalize edilmiş alan zayıflaması)'nın maksimum sapması için bir ideal OATS içindeki 30 MHz den 1 GHz frekans aralığında NSA değeri ± 4 dB limitleri içinde olması gerekmektedir. Bir diğer konu, Avrupa standartlarının sınır değerleri yalnız 10 m test mesafesi için verilmiştir. Ancak pek çok durumda, bu odalar ve/veya deney sistemleri 3m/5m normalizesi için serbest uzay yayılım modeli uygulanmaktadır. Bu modelde, 10 m için test mesafesinin oranı üstünde 20 dB/10 faktörü bir oransal dönüşümü

uygulanmaktadır. Standartlardaki ölçüm belirsizliği bu yöntemi kullanarak yapılmaktadır.



Yarı Yansız Oda

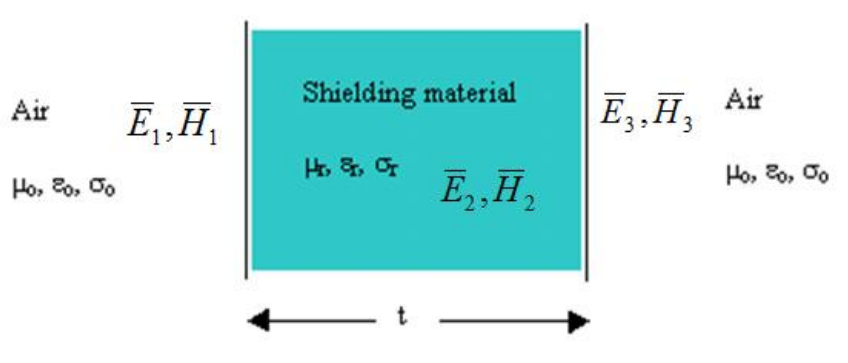
Tam Yansız Oda

Resim 3.8. Yansız odalar [51]

Teknolojik ilerlemeler sayesinde, yakında güncellenen CISPR standartları içinde FAC, CISPR 16-2-3 içinde tanımlanmış olarak tüm iç yüzeyler, ilgili frekans aralığı içinde elektromanyetik enerjiyi soğuran radyo frekans absorblayıcılarla kaplanmasıyla bir ekran muhafazası oluşturulması beklenmektedir. FAC, verici antenden alıcı antene direk olarak giden sadece bir noktadaki serbest uzay ortamı olarak tasarlanmış odalardır. Tüm indirek ve yansıyan dalgalar FAC'ın tüm duvar, yüzey ve tavanında kullanılan absorblayıcı malzeme ile minimize edilmiş olmalıdır. FAC, ışınımla istenmeyen yayılım (Radiated Spurious Emission- RSE), ışınımla bağışıklık (Radiated Susceptibility- RS) ve 1 GHz frekansın üzerinde ışınımla yayılım (Radiated Emission-RE) testleri için geniş manada kullanılmaktadırlar [14-16,41,45]. Işınımla istenmeyen yayınımlar (RSE) testi, test altındaki cihazdan ışınımla yayılım analizinde kullanılmakta olan kablosuz ekipman için önemli testlerden biridir. Işınımla istenmeyen yayınımlar (RSE) testi için en geniş referans standart ITU-R SM 329. dur. Haberleşme cihazları kabul testleri için normal olarak test mesafesi 3 metredir. Telekomünikasyon cihazlarının maksimum güçte iletimde olması şartını sağlayan deneyler için tanımlanan taşıyıcı frekans spektrumunda 50 dB'nin üzerinde zayıflatmayı sağlayan notch filtre, istenmeyen yayılım sinyallerini doğrulukla ölçmek için bir alıcıya izin veren ölçüm sinyal yolu

için gerekli olmaktadır. Notch filtrenin Bu özelliği, taşıyıcı frekans sinyalinin çok büyük genliği nedeniyle ölçüm yolundaki istenmeyen yayınlardan alıcının ve hatta sistemdeki ön yükselticiden kaçınmak amacıyla deneyin başarılı olması için çok önemlidir. Bir diğer düşünce olarak, ışınımla istenmeyen yayınımlar (RSE) test laboratuvarında onaylanmış olan iyi bir odanın, serbest uzay test şartlarına benzer bir deney ortamı sağlanması istenir. Bu deney metodu, tam yansız deney odasının test alanı değerlendirilmesi için, 30 MHz den 1 GHz frekans aralığı için, serbest uzay normalize edilmiş alan zayıflaması (NSA) ve CISPR 16-1-4 standardı içinde tanımlanmış olarak 1 GHz den 18 GHz frekans aralığına kadar alan duran dalga oranı (VSWR) test metodu olmaktadır [5,12,48,49,45]. FAC için diğer yaygın ölçüm şekli, ışınımla bağışıklık testleridir. Bu test metodu IEC 61000-4-3 standartlarını referans alır. Bu standart, kabul edilebilen serbest uzay deney alanı değerlendirme metodu, deney düzlem alan düzgünlüğü metodudur. Bu alan düzgünlüğü test metodu, test altındaki cihazın deney düzeneğinden 1.5 m x 1.5 m test düzleminden seçilerek belirlenir. Bir deney alanında, her bir frekansdaki gerekli deney alan yoğunluğundan, 16 noktanın 12 test noktasının (% 75) 0-6 dB sapma dahilinde olduğu göz önüne alınmaktadır. En sık, ışınımla bağışıklık deney sistemi içinde, uygun anten seçimi, iletim için gerekli olmaktadır 1 GHz'in üzerindeki yüksek frekanslarda ışınımla yayınım testleri için tam yansız oda (FAC) kullanılması gerekmektedir. Limit değerler yalnız verici ve anten arasında 3 m seçilmesi ve serbest uzay şartları içinde kalibre gerektiren 3 m mesafe için anten faktörü mevcuttur. FAC deney alanı performansı için geçerli olan metod, bu alanın CISPR 16-1-4 içinde mevcut olan duran dalga oranıdır. Bu test alanı içinde ölçülen alanın duran dalga oranı, deney için gerekli frekans aralığı için 6 dB den az olması durumunda, deney odasının uygun olduğu değerlendirilir [5,12,48,49,45]. Ekranlama muhafazası ve faraday kafesi mikrodalga yansız odalar için düşük maliyetli alternatiflerdir. Bir ekranlama muhafazası radyo frekans enerji sızmasını engellemek için, panel eklem bağlantıları boyunca, metalik kaynakla birbirine bağlanmış sac duvarlara sahiptir. Dış elektromagnetik ortamla iç oda arasındaki elektromanyetik izolasyon, yansız odalarla mukayese edildiği zaman bu iki oda tipi için oldukça zayıftır. Ayrıca, oda duvarlarından iç yansımalar ölçümlerde hata olmasına neden olmaktadır.

Elektromanyetik dalga kaynağı ile cihaz arasına iletken bir engel yerleştirilmesiyle, elektromanyetik kaynağın etkisi perdelenebilmektedir.



Şekil 3.29. Elektrik ve manyetik alan için ekran zayıflatması

Ekran zayıflatması sadece ideal durumlarda hesaplanabilmektedir. En önemli etmen, ekranlı mahfazanın homojen olması ve her bakımdan tarif edilmiş özelliklere sahip malzemelerden oluşmasıdır. Uygulamada bu şartlardan sapmalar, hesaplamanın sadece yaklaşık değerlerle sonuçlanmasına neden olacak kadar büyük olabilir.

Ekran zayıflatması aşağıdaki eşitliklerle verilir:

$$\alpha_S = 20 \log \left(\frac{E_0}{E_1} \right) \quad \text{elektrik alan için,} \quad (3.55)$$

$$\alpha_S = 20 \log \left(\frac{H_0}{H_1} \right) \quad \text{manyetik alan için} \quad (3.56)$$

α_S : dB cinsinden ekran zayıflatmasıdır.

E_0 : Verici ve alıcı antenler arasında ekranlama yokken elektrik alan şiddeti

H_0 : Verici ve alıcı antenler arasında ekranlama yokken manyetik alan şiddeti

E_1 : Verici ve alıcı antenler arasında ekranlama varken, elektrik alan şiddeti

H_1 : Verici ve alıcı antenler arasında ekranlama varken, manyetik alan şiddeti

Kaynak ve gözlem noktası birbirinden yeterince uzak ise, düzlem dalga yaklaşıklığı ile ekranlama etkinliği hesaplanabilir. Düzlem dalga için elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinlikleri birbirine eşittir. Kaynak ve gözlem noktaları yakın ise bu

durumda kaynağın cinsi önem kazanacak ve düzlem dalga yaklaşımı geçerli olmayacaktır. Dolayısıyla elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinlikleri birbirinden farklı olacaktır. Dik gelen düzlem dalga için ekranlama etkinliği;

$$SE_{dB} = 20 \log(e^{\alpha_2 t}) - 20 \log|\tau| + 20 \log|1 - \rho e^{-2\gamma_2 t}|$$

$$= \alpha_A + \alpha_R + \alpha_{IR} \quad [8,19] \quad (3.57)$$

$$\rho = \frac{(\eta_1 - \eta_2)^2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \quad \text{yansımaya katsayısıdır.} \quad (3.58)$$

$$\tau = \frac{2\eta_1\eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \quad \text{iletim katsayısıdır.} \quad (3.59)$$

Çizelge 3.3. İyi iletken ve kayıplı dielektrik için yayılma katsayıları

	α	β	η
İyi iletken $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$	$\sqrt{\pi f \mu \sigma}$	$\sqrt{\pi f \mu \sigma}$	$(1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}}$
Kayıplı dielektrik $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$	$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\omega \sqrt{\mu \epsilon}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} (1 + j \frac{\sigma}{2\omega\epsilon})$

t kalınlığındaki iyi iletken için α_A zayıflama kaybı;

$$\alpha_A = 20 \log_{10} e^{\alpha t} = 20(\alpha t) \log_{10} e$$

$$= 8.686 \alpha t = 8.686 t \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (\text{dB}) \quad (3.60)$$

Yansıma kaybı α_R ;

$$\alpha_R = -20 \log|\tau| = 20 \log \left(\frac{|1+K|^2}{4|K|} \right) \quad \text{dir.} \quad (3.61)$$

Gelen dalganın dalga empedansının boş uzaydaki (havadaki) değeri ile ekranlama yapısı içerisindeki değeri arasındaki oranı;

$$\alpha_R = \begin{cases} 20 \log \left(\frac{1}{4|K|} \right) & |K| \ll 1 \\ 20 \log \left(\frac{|K|}{4} \right) & |K| \gg 1 \end{cases} \quad (3.62)$$

α_R 'ın SE üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek için $\eta_I = \eta_0$ için K değiştiğinde α_R 'ın değişimine bakmamız gerekir.

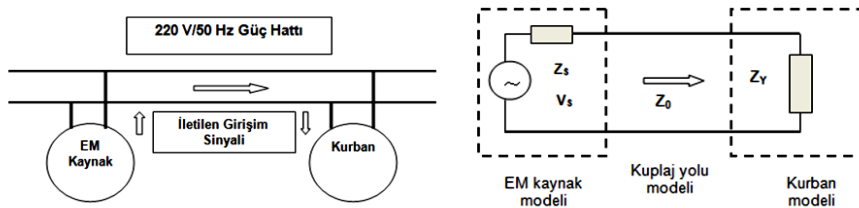
Sonuç olarak, düşük empedanslı manyetik alanda, bütün frekanslarda iletkenlerin yansıma kaybı (α_R) küçüktür. Dolayısıyla manyetik alan ekranlama etkinliği zayıflama kaybı (α_A) ile elde edilebilir. Bunun için ferromanyetik malzemeler kullanılması gerekli olmaktadır. Manyetik malzemelerin manyetik geçirgenliğinin uygulanan manyetik alanla değiştiği göz önünde tutulmalıdır. Yüksek empedanslı elektrik alanda, iyi iletken kullanılarak bütün frekans bandında ekran tasarlamak mümkün olmaktadır [8,16,19].

4. ELEKTROMANYETİK GÜRÜLTÜ AZALTMA TEKNİKLERİ

Elektromanyetik gürültü sorunlarına karşı alınabilecek önlemler olarak, filtreleme, elektromanyetik kuplaj, topraklama, kablo, konektör ve bağlantı elemanları ve PCB tasarımı ile ilgili fiziksel incelemeler bu bölümde ele alınmakta ve pratik yaklaşımlar üzerinde durulmaktadır. Elektromanyetik sistemlerin tasarımında yarı iletken teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin tasarımında elektromanyetik bağışıklık seviyesi ve elektromanyetik girişimlere karşı tedbirlerin alınması önemli kazanımlar sağlayacaktır. Elektromanyetik girişime neden olan kuplaj yolu ile oluşan girişimleri öğrenmek ve bunlara karşı alınması gerekli tedbirler anlatılmıştır.

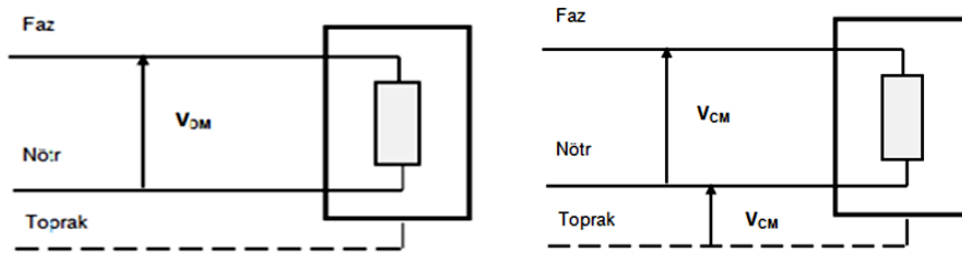
4.1. Elektromanyetik Kuplaj

Elektromanyetik girişimin, en zor belirlenebilen girişim teşhislerinden biri almaçın takibiyle mümkün olmaktadır. Kuplaj mekanizmaları son derece ince ve son derece karmaşık olabilir. Ortak güç kaynakları ve ortak hatlar gibi ortak bağlantı hatlarına sahip olan sistemler ve cihazlar arasındaki sığalar, yakın iletkenler arasındaki karşılıklı endüktans, bir link yoluyla yayılan elektromanyetik radyasyon ve değişen elektromanyetik alan içindeki iletkenler elektromanyetik kuplaja örnek teşkil etmektedir. Bir elektromanyetik girişim kaynağından bir alıcı devreye sinyal kuplajının çok sayıda yolu vardır. Ancak, bunlar genel olarak üç sınıfta ele alınır [8]. Kaynak ve almaç arasında girişim yolu olduğu zaman meydana gelen iletken kuplaj bir iletken hacimle şekillenir. İletken kuplaj, bir güç kablosu aracılığıyla, anten giriş terminalleri, arayüz kabloları, topraklama dönüşümleri, metalik muhafaza veya çerçeveler gibi istenmeyen dış iletkenlerle olabilmektedir. İletim yolu ile kuplaj modeli ve eşdeğer devre modeli aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.1. İletimle kuplaj ve eşdeğer devre modeli

Doğrudan iletimle yolu ile kuplaj oluşumlarından bir diğeri ise ortak empedans yoluyla kuplaj olup, aynı toprak hattını kullanan farklı sistemler arasında meydana gelir. Doğrudan iletim yoluyla kuplaj örneklerini çoğaltmak mümkündür. Aynı güç kaynağının beslenen sistemler buna iyi bir örnektir. İletim yoluyla gerçekleşen girişim problemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için mod kavramının anlaşılması gereklidir. Diferansiyel girişimde toprak hattından bağımsız olarak sistem iletkenleri arasında bir gerilim oluşuyorsa bu diferansiyel moddur (Differential Mode). Ortak gürültü sinyali ise toprak hattı ile sistem iletkenleri arasında bir gerilim oluşuyorsa bu ortak mod (Common Mode) olarak adlandırılır. Bunlarla ilgili şekil aşağıda gösterilmektedir.



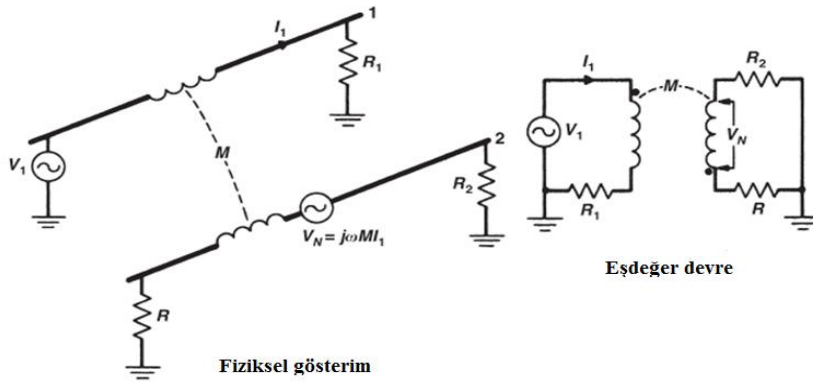
Şekil 4.2. (a) Diferansiyel girişim gerilimi (b) Ortak girişim gerilimi

Diferansiyel biçimde oluşan girişim akımları eşit şiddetle fakat paralel iletkenler üzerinde ters yönlü olarak akarlar. Ortak girişim akımları ise genellikle bir parazit kapasitesi üzerinden sisteme girer ve sistem iletkenleri üzerinden döner. Ortak mod akımları eşit şiddetle ancak paralel iletim yollarında ters yönlü olarak akarlar [8,12]. Bir kaynaktan elektromanyetik ışınım yayılması sonucu oluşan girişim, hem E elektrik alan hem de H manyetik alan ışınımı ile gerçekleşir. Elektromanyetik ışınım, E ve H alanlarının birleşimi olarak ortaya çıkmaktadır. Bir kaynaktan yayılan alan özellikleri, kaynağa olan mesafeye göre değişmektedir. Bu mesafeye göre yakın alan ve uzak alan kavramları tanımlanmıştır. Elektrik alanın manyetik alana oranı dalga empedansı olarak tanımlanır ve uzak alan bölgesinde bu oran, $Z_0 = E/H = 120\pi = 377 \Omega$ olur. Yakın alan bölgesinde E/H oranı kaynağın özelliklerine bağlı olarak değişim gösterir. Kaynak yüksek akım, düşük gerilim karakterli ise, yakın alan bölgesinde H manyetik alanı baskındır ve $E/H < 377 \Omega$ olur. Bunun tersi durumda, E elektrik alanı

baskın olur ve bu durumda $E/H > 377 \Omega$ dur. Bir iletkenin elektrik akımı aktığında, iletkenin çevresinde manyetik alan oluşur. İki iletken arasında bir gerilim farkı oluştuğunda bir elektrik alanı oluşur. Bu elektrik ve manyetik alanlarla etkileşen sistemlerde girişim sinyalleri meydana gelir. İndüksiyon veya manyetik kuplaj, ancak, yakın alanda ikisi birlikte olduğunda yayılım kuplajına benzemektedir. Manyetik kuplaj, manyetik alanın yoğun olduğu bölgede daha baskındır ve genellikle almaç ve kaynak arasında mesafe olduğunda meydana gelir. yakın alan bölgesinde ise uzak alandan daha karmaşıktır nispeten bu küçük ayrılık nedeniyle, almaçın varlığı kaynak davranışını etkileyebilir. Bu iki yönlü olay, ortak kuplaj olarak adlandırılır ve şekil 4.3’de bu durum görülmektedir. Burada alıcı sistemde manyetik kuplaj yoluyla indüklenen gürültü gerilimi,

$$V_N = j\omega M_{12}I = j\omega B \cdot A \cdot \cos\theta \quad (4.1)$$

elde edilir [8,12,40,30].



Şekil 4.3. İki iletken arasında manyetik kuplaj ve eşdeğer devre

Burada gürültü gerilimini azaltmak için aşağıdaki pratik yolları şunlardır.

- ✓ Çalışma frekansı (f)'nin azaltılması
- ✓ Etkilenen devrede oluşan kapalı (A) çevrim alanının küçültülmesi
- ✓ B manyetik alan şiddetinin düşürülmesi
- ✓ Kaynak ve alıcı devre arasındaki mesafenin artırılması

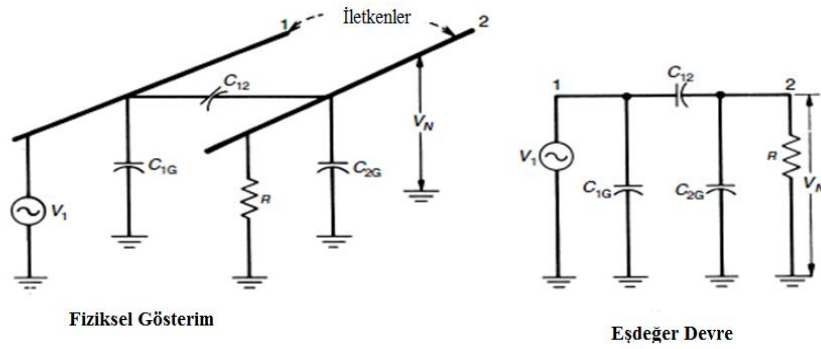
✓ Uygun kablolama tekniklerinin kullanılması

Endüktif kuplaj gibi, kapasitif veya elektriksel kuplaj, kaynak ve almaç, münferit olarak dalga uzunluğu daha az olduğu zaman meydana gelir. Kapasitif kuplajın bu durumunda elektrik alan daha baskın olur. Kapasitif kuplaj'da gürültü geriliminin bulunması istenirse,

$$V_N = \frac{j\omega R C_{12}}{1 + j\omega R C_{2G} + j\omega R C_{12}} \cdot V_{1G} = \frac{j\omega [C_{12}/(C_{12} + C_{2G})]}{j\omega + 1/(C_{12} + C_{2G})} \cdot V_{1G} \quad (4.2)$$

Düşük frekanslar için gürültü gerilimi,

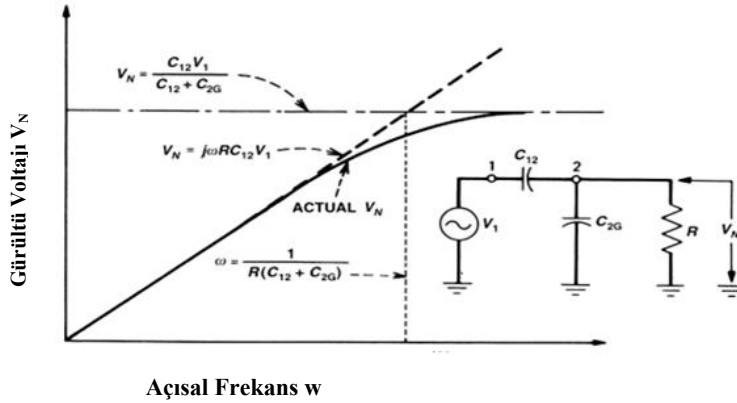
$$V_N = j\omega R C_{12} \cdot V_{1G} = R C_{12} \frac{dV_{1G}}{dt} \quad (4.3)$$



Şekil 4.4. İki iletken arasında kapasitif kuplaj ve eşdeğer devre

yüksek frekanslar için gürültü gerilimi,

$$V_N = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \cdot V_{1G} \quad (4.4)$$



Şekil 4.5. Kapasitif kuplaj yoluyla indüklenen gerilimin frekansa bağlı değişimi

Şekil’de gürültü voltajının frekansa göre değişimi gösterilmektedir ve burada kesim frekansı;

$$w = \frac{1}{R(C_{12} + C_{2G})} \quad (4.5)$$

elde edilir [8,12,9].

4.2. Yayılım Yoluyla Kuplaj

Yayılm yoluyla kuplaj dediğimiz zaman, uzak alan bölgesinde EM kaynak ile kurban arasındaki etkileşim yayılım yoluyla kuplajdır. Burada, elektromanyetik gürültü kaynağı bir anten gibi hareket ederek alıcı kaynağa akım ve gerilim olarak etki eder. Bu tür kuplaj örnekleri olarak, akım taşıyan düzgün bir telden yayılan elektromanyetik alanları gösterilebilir. Bu oluşan elektromanyetik alana elektrik dipolü diyoruz. Akım taşıyan bir telin yakın ve uzak alanda oluşturduğu bağıntılar çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Küçük uzunlukta akım taşıyan bir iletken için alan ifadeleri

$E_r = 60 Il \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j\lambda}{2\pi r^3} \right) \cos\theta \text{ [V/m]}$ $E_\theta = \frac{Z_0 Il}{2\lambda r} \left(1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^4 \right)^{1/2} \sin\theta \text{ [V/m]}$ $H_\phi = \frac{Il}{2\lambda r} \left(1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \right)^{1/2} \sin\theta \text{ [A/m]}$	I : İletkenden akan akım (A) l : Dipol boyu (m) λ : Dalga boyu (m) r : Dipole olan mesafe (m) Z ₀ : Empedans (377 Ω)
Yakın Alan Bölgesi : $r < \lambda/2\pi$	
$E = \frac{Z_0 Il}{2\pi^2 r^3} \text{ (V/m) ve } H = \frac{Il}{4\pi r^2} \text{ (A/m)}$	Empedans
	$Z = \frac{E}{H} = \frac{\lambda}{2\pi r} Z_0 \text{ [}\Omega\text{]}$
Uzak Alan Bölgesi : $r > \lambda/2\pi$	
$E = \frac{Z_0 Il}{2\lambda r} \text{ (V/m) ve } H = \frac{Il}{2\lambda r} \text{ (A/m)}$	Empedans($Z=Z_0$)
	$Z = \frac{E}{H} = 120\pi = 377\Omega \text{ [}\Omega\text{]}$

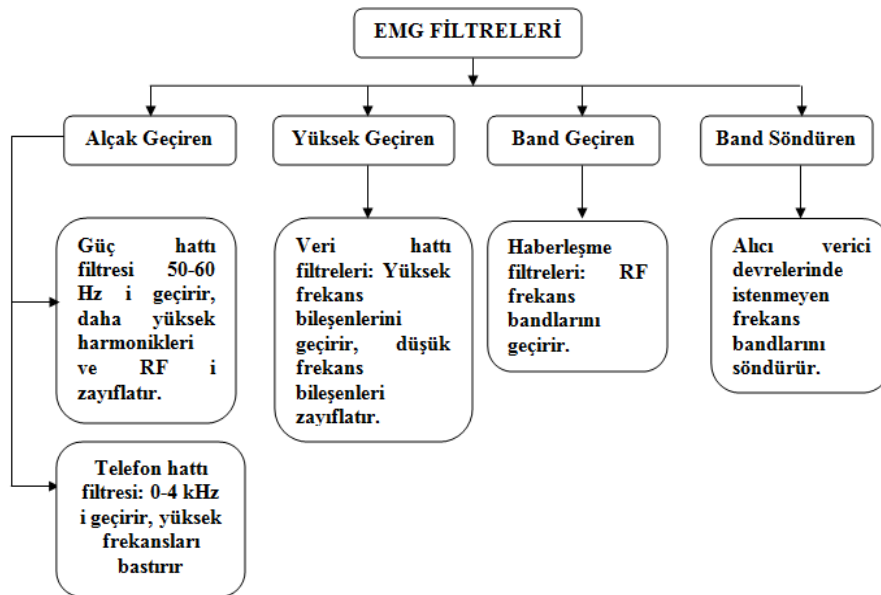
Diğer bir örnek ise, dairesel bir telden yayılan alanlardır. Akım taşıyan dairesel bir telin oluşturduğu alan bir manyetik dipol oluşturur. Küçük dairesel kaynağın ortamda oluşturduğu alan seviyeleri Çizelge 4.2’de verilmiştir [8].

Çizelge 4.2. Akım taşıyan küçük manyetik dipol için alan ifadeleri

$H_r = \frac{IS}{\lambda} \left(\frac{j}{r^2} - \frac{\lambda}{2\pi r^3} \right) \cos\theta \text{ [A/m]}$ $H_\theta = \frac{\pi IS}{\lambda^2 r} \left(1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^4 \right)^{1/2} \sin\theta \text{ [A/m]}$ $E_\phi = \frac{Z_0 \pi IS}{\lambda^2 r} \left(1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \right)^{1/2} \sin\theta \text{ [V/m]}$	I : İletkenden akan akım (A) l : Dipol boyu (m) λ : Dalga boyu (m) r : Dipole olan mesafe (m) Z ₀ : Empedans (377 Ω)
Yakın Alan Bölgesi : $r < \lambda/2\pi$	
$E = \frac{Z_0 SI}{2\lambda r^2} \text{ (V/m) ve } H = \frac{SI}{4\pi r^3} \text{ (A/m)}$	Empedans
	$Z = \frac{E}{H} = \frac{2\pi r}{\lambda} Z_0 \text{ [}\Omega\text{]}$
Uzak Alan Bölgesi : $r > \lambda/2\pi$	
$E = \frac{Z_0 \pi SI}{\lambda^2 r} \text{ (V/m) ve } H = \frac{\pi SI}{\lambda^2 r} \text{ (A/m)}$	Empedans($Z=Z_0$)
	$Z = \frac{E}{H} = 120\pi = 377\Omega \text{ [}\Omega\text{]}$

4.3. Filtreler

Bir elektromanyetik gürültü kaynağından yayılan gürültüyü azaltmak için bazı önlemler alınması gerekir. Daha iyi bir çözüm elde etmek için Elektromanyetik gürültü filtrelerinin kullanılması gerekebilir. Bir filtre en basit olarak sığa ve bobinden oluşur. Filtreler genel olarak istenmeyen frekanslardaki gürültüyü engelleyen ve istenen frekanslardaki sinyalleri geçiren iki kapılı devrelerdir. Filtrelerin görevi elektromanyetik gürültü kaynağından yayılan ve kurban sistemlere ulaşan gürültüyü önlemek ve azaltmaktır. En yaygın kullanılan filtre tipi yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak için kullanılan alçak geçiren filtredir. EMG filtrelerinde araya girme kaybı dediğimiz filtre elemanları için performans göstergesidir.



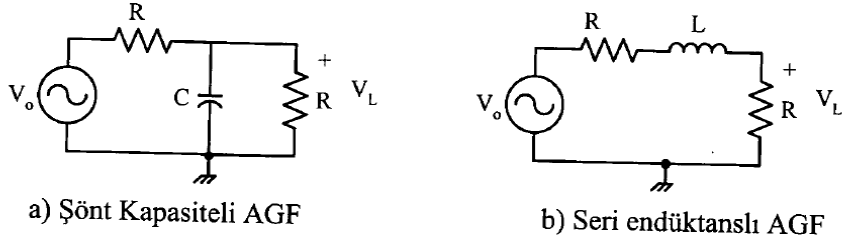
Şekil 4.6. Temel EMG filtre tipleri

Araya girme kaybı (AGK) tanımı için;

$$AGK = 20 \log \frac{|U_{20}|}{|U_2|} = 20 \log \frac{|U_0|}{|U_2|} \quad [8,42,41] \quad (4.6)$$

4.3.1. Temel elektromanyetik gürültü (EMG) filtreleri

Temel EMG azaltılması amacıyla kullanılan filtreler dört sınıfa ayrılır[8]. Temel devre elemanlarından sığa ve seri endüktans elemanları alçak geçiren filtre (AGF) olarak görev yapmaktadır. Aşağıda AGF devreleri görülmektedir.

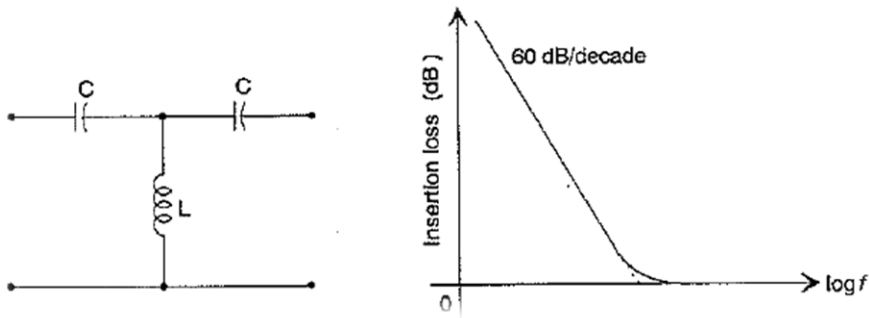


Şekil 4.7. Temel AGF devreleri

Araya Girme Kaybı (AGK) ifadesi güç oranlarına bağlı olarak ifade edilir. Buna göre (AGK) ifadesi [8,42];

$$AGK = 10 \log \left(\left| \frac{P_A}{P_L} \right| \right) \quad (4.7)$$

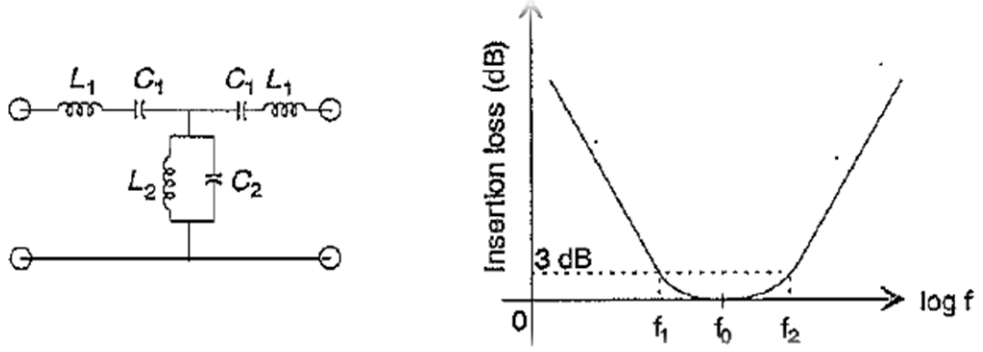
Yüksek Geçiren Filtreler (YGF), 50/60 Hz AC veya daha küçük frekanslı sinyallere engel olmak için kullanılır. Temel YGF devresi aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.8. YGF devresi ve frekans cevabı

Standart bir Alçak geçiren filtre (AGF) devresi filtre elemanları arasındaki dönüşümle Yüksek geçiren filtre (YGF) haline getirilir ve bu durumda, AGF için AGK değeri yüksek geçiren frekanslarda oluşur [8].

Band Geçiren Filtreler (BGF), belirli frekansları geçirip, bunun dışındaki diğer frekansların geçmesine engel olan filtrelerdir. Temel BGF devresi aşağıda verilmektedir.

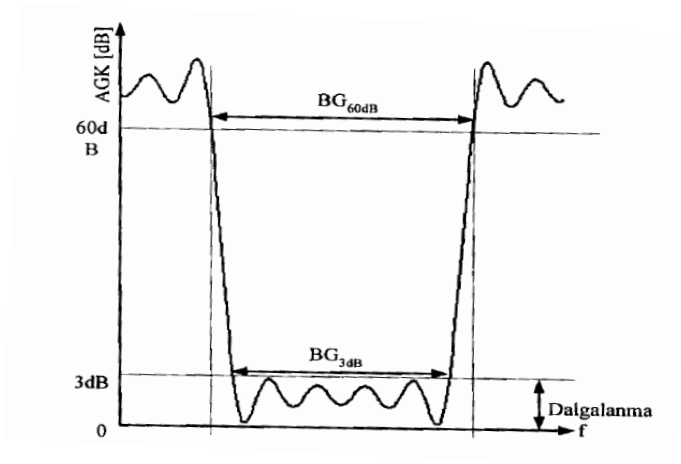


Şekil 4.9. BGF ve frekans cevabı

Merkez frekansı f_0 şu şekilde verilir.

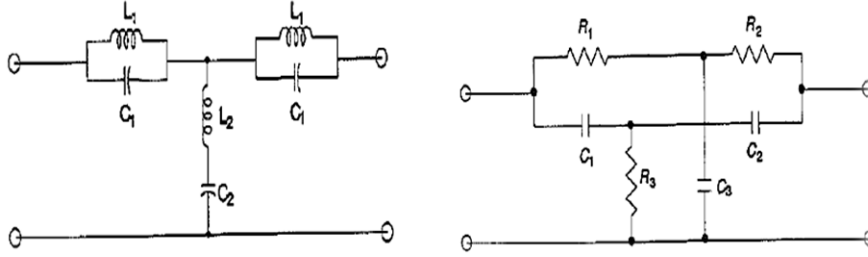
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4.8)$$

Band geçiren filtreler için AGK ifadesinin temel şekli aşağıda gösterilmektedir [8].



Şekil 4.10. BGF için tipik filtre performansı

Band Söndüren Filtreler (BSF), özel frekans bandlarındaki girişimleri bastırmak için tasarlanırlar. Özellikle verici alıcı devreleri arasına seri olarak istenmeyen gürültü bandlarını bastırmak için kullanılırlar. En çok kullanılan türü LC devreli BSF'dir.



Şekil 4.11. a) LC tipi band söndüren filtre b) RC tipi band söndüren filtre

Sönen bandın merkez frekansı;

$$f_0 = (f_1 f_2)^{1/2} \quad (4.9)$$

olur, burada f_1 ve f_2 kesim frekansıdır. Burada,

$$C_1 = \frac{1}{2\pi Z_0 (f_2 - f_1)} \quad L_1 = \frac{Z_0 (f_2 - f_1)}{2\pi f_2 f_1} \quad (4.10)$$

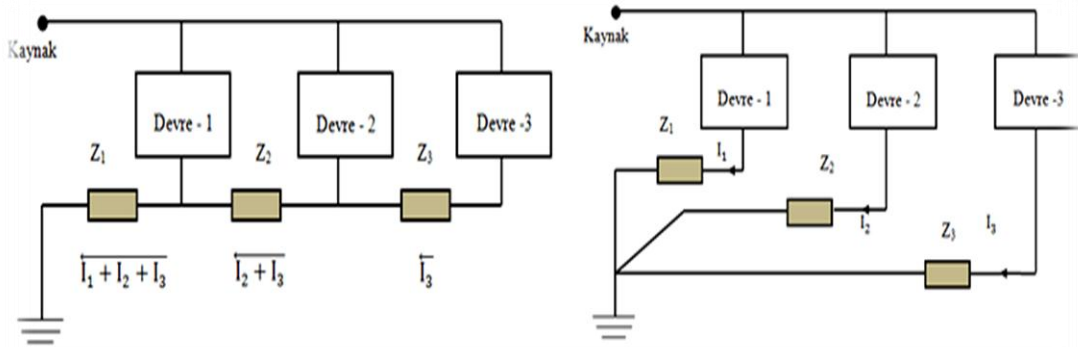
$$C_2 = \frac{f_2 - f_1}{\pi Z_0 f_1 f_2} \quad L_2 = \frac{Z_0}{4\pi (f_2 - f_1)} \quad (4.11)$$

elde edilir. RC tipi band söndüren filtre 1 MHz in altındaki düşük frekanslar uygulamaları için kullanılır [8].

4.4. EMC için Topraklama

Genel olarak elektriksel devrelerde kullanılan topraklama yöntemleri elektromanyetik gürültü içinde geçerli olmaktadır. Bu gürültü sinyallerinin topraklanmasında frekans önemli rol oynar. Elektromanyetik sinyal topraklamaları DC ve AC hatlar için yapılan topraklamaya göre farklıdır. Elektromanyetik

gürültü sorunlarının azaltılması için topraklamanın büyük önemi vardır. İyi bir EMC topraklaması için sinyal referans gerilimleri için sıfır empedans düzlem kabul edilir ancak bu değer sıfırdan farklı olursa iki sistem arasında toprak akımlarına bağlı olarak bir gerilim dönüşümü olur [8]. Topraklama, koruma toprağı ve sinyal toprağı (referans toprağı) olmak üzere iki temel katagoride düşünülebilir. Düşük empedanslı bir yol üzerinden yeryüzüne yapılan bağlantı koruma toprağıdır. Koruma toprağı yeryüzü potansiyelidir ve koruma toprağı, elektrikli cihazların şasesinin topraklanmasını gerektirir [12,26]. Sinyal toprağı için, yük ile kaynak arasında düşük empedanslı döngü oluşturulmalıdır. Sinyal toprakları; tek-nokta, çok-nokta ve hibrit olmak üzere sınıflandırılabilir.



a) Seri bağlı sistem

b) Paralel bağlı sistem

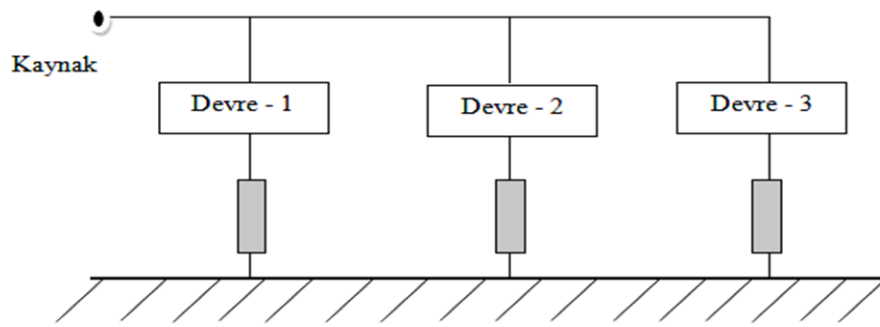
Şekil 4.12. Tek-nokta topraklama bağlantıları

Tek nokta topraklaması, her alt sistem referans toprağına ayrı olarak bağlanır. Bu tür topraklama, seri ve paralel bağlı olarak gerçekleştirilir. Yüksek frekanslarda tek-nokta topraklama yapılamaz [8,12]. *Çok nokta topraklaması*, özellikle yüksek frekanslarda kullanılması önemlidir. Yüksek frekanslarda iç sistemlerde potansiyel farkı oluşmakta olup, bu potansiyel farkının sıfıra indirgenmesi için çok noktada yapılan topraklama daha iyi sonuç verir [8,12]. Yüksek frekanslarda ($f > 10\text{MHz}$) ve digital devrelerde toprak empedansını minimize etmek için kullanılır. Devreler en yakın düşük empedanslı toprağına, genelde şaseye bağlanır. Yüksek frekanslarda bağlantı yolunun bir inçden küçük tutulması gerekir. Düşük frekanslarda bu tür topraklama tercih edilmez çünkü tüm devrelerin akımları ortak toprak

empedansından akar. Yüksek frekanslarda, toprağın ortak empedansı yüzeyin gümüş ile kaplanması ile azaltılabilir. Toprak yüzeyinin kalınlığını artırmak yüksek frekanslarda anlamlı değildir, çünkü deri etkisi (skin effect) nedeniyle akım yüzeyden akar.

Genelde EMU uyumlu tasarımlarda;

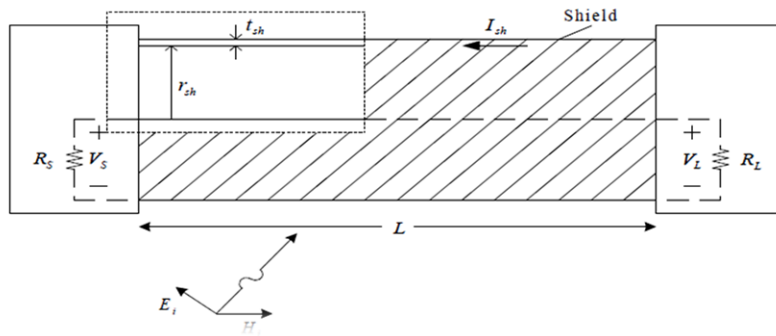
$f < 1$ MHz ise tek-nokta topraklama, $f > 10$ MHz ise çok-nokta topraklama, $1 \text{ MHz} < f < 10 \text{ MHz}$ aralığında bağlantı uzunluğu $\lambda/10$ 'dan küçük olabiliyorsa tek-nokta, aksi durumda, çok-nokta topraklama kullanılır [12].



Şekil 4.13. Çok-nokta topraklama bağlantıları [8,12]

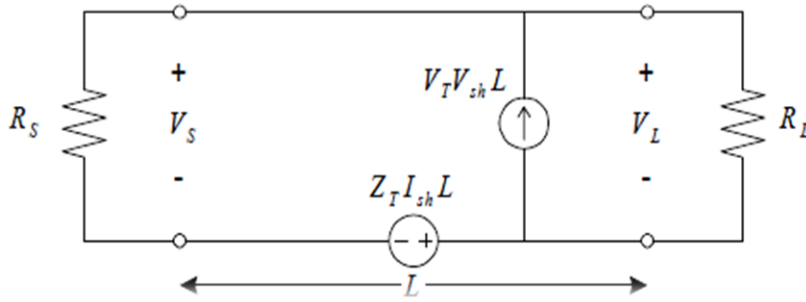
4.5. Kablolar, Konnektörler ve Bağlantı Elemanları

EMC kalitesini belirleyen önemli unsurlardan biri kablolardır. Kablolar istenmeyen işaretleri bir noktadan diğer bir noktaya ilettikleri gibi, üzerindeki işaretleri havaya yayarlar. Kablolar en uzun ve en geniş çevrim yüzey alanı oluşturan devre elemanlarıdır. Kablo performansını belirleyen ekranlama malzemesi ve kalitesi ile kablo ekranının topraklama tekniğidir. Koaksiyel kablolar doğal ekranlı kablolardır [7]. Koaksiyel kabloların merkezindeki iletim kabloları, bir silindirik iletim ekranıyla çevrilmiştir. Bu ekran, gelen elektromanyetik alan hat terminasyonu için kuplajı önlemek amacıyla bir devre için tasarlanmıştır. Bir katı iletim ekranlaması, bunu sağlamasına rağmen, bu ekranlama indüklenen akımlar ve merkezi iletken kablolar için gelen alanların girişimlerini bütünüyle önlemek için gerekli olabilmektedir.



Şekil 4.14. Ekranlanmış koaksiyel kablo kesiti

Koaksiyel kablolarda kullanılan gerçek ekranlama, mükemmel olmasada, bu kusurlar, genel uygulamalarda ihmal edilebilir. Bundan başka, Koaksiyel kablo ekranlamasının tam etkin olması için, zaman zaman olan arızalı kablolardan kaçınmak gerekir ve kabloların konektör bağlantıları, kablo sonlarında kullanılması gerekli olduğunda dış yüzeye bağlanmıştır. Dış alanlar, ekranlama yüzeyinde indüklenen akımın yayınımla ideal olmayan ekranlama sonucunda dış yüzeye nüfuz etmektedir. Başka bir deyişle, bu ekranın yüzey transfer empedansı olarak bilinen empedansa sahip olurlar. Ekran üzerinde akan akımın neden olduğu bir yük alanı için, ekranın dış yüzeyinden, ekranın iç yüzeyine doğru bir voltaj düşmesi olur. Böylece, dış alanlar, ekranlanmış kablolar üzerinde gürültü voltajına neden olabilmektedirler. Ekranlanmış koaksiyel kablo üzerindeki bir yük alanıyla indüklenen bu gürültüyü hesaplamak için, biz ilk olarak elektromanyetik dalga etkisiyle ekranın dışı üzerindeki indüklenen akımı hesaplamamız gerekir. Bu akım, yüklü elektromanyetik alan nedeniyle ekranlı kablolar üzerindeki indüklenmiş gürültü voltajını yaklaşık olarak hesaplamak için büyük kolaylık sağlamaktadır. Elektromanyetik alanlar örgüler arasında küçük boşluklar sayesinde nüfuz yeteneğine sahip oldukları için, örgü ekranlar, biraz daha fazla elektromanyetik radyasyona duyarlıdır. Ekranlı örgü kablolar için, yüzey transfer admitansı, Y_T , çok büyük sonlanmış empedansı hariç olmak üzere ihmal edilebilir. Ancak, biz bu modeli basitleştirir ve Y_T admitansını kapsayacak şekilde aşırı olmayan empedans değerlerini hariç tutarak, elektriksel kısa devre için devre modeli aşağıdaki gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Elektriksel kısa devreler için eşit devre

Bu devre için iletim hattı eşitlikleri;

$$V_S = \frac{R_S}{R_S + R_L} Z_T I_{sh} L - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} Y_T V_{sh} L \quad (4.12)$$

$$V_L = \frac{-R_L}{R_S + R_L} Z_T I_{sh} L - \frac{R_S}{R_S + R_L} Y_T V_{sh} L \quad (4.13)$$

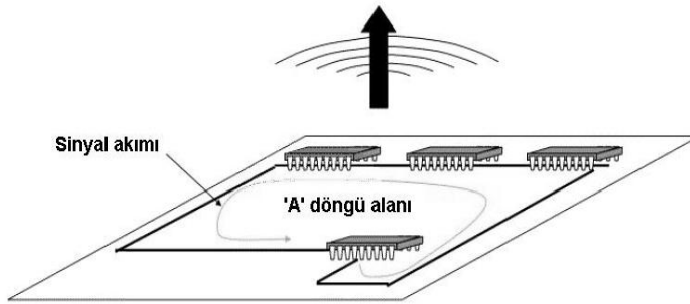
elde edilir [10,28,14,29].

EMC önlemlerinde kablolar kadar etkin olan elemanlar konektörler ve bağlantı elemanlarıdır. İki kablonun bağlantısı, iki yüzeyin sızdırmazlık montajı EMC açısından önemlidir. Elektronik devrelerde ve cihazlarda kapaklar, gövdeler, giriş panelleri, havalandırma yarıkları v.b. gibi süreksizlik kaçınılmaz olarak bırakılır. Elektromanyetik sızıntıyı önlemek için kontak ve bağlantı elemanları kullanılır. Kabloları bir yüzeye veya panele bağlarken sıkı temas ve geniş şeritlerle topraklanması önemlidir. Çevre yüzeylerin teması açısından iletken katkılı plastikler, contalar ya da yaylar kullanılır. Yüzey montajlarında iletkenlerin kontak yüzeyleri temiz olmalı ve tam temas sağlanmalıdır. Yüzey montajlarında zamanla paslanma önemli bir EMC problemi oluşturur. Paslanmanın değişik nedenleri bulunmaktadır. Bunlardan önemlileri *galvanik* (farklı türden iki metalin oluşturduğu kontak yüzeyindeki rutubet) ve *elektrolitik* (nem ve bağlantılar üzerinde akan akım) etkidir. Yüzey montajlarında, mümkün olduğu kadar galvanik hareketlilik etkisi düşük olan metaller kullanılmalıdır. Birleştirilecek metallerin elektro-kimyasal özellikleri yakın olmalıdır. Direk bağlantı teknikleri kullanılmalıdır. Metalden metale temiz bağlantı

yüzeyi kurulmalı ve bağlantı noktaları nemden korunmalıdır. Gerekli durumlarda bu noktaların fiziksel ve elektriksel durumları kontrol edilmelidir [7].

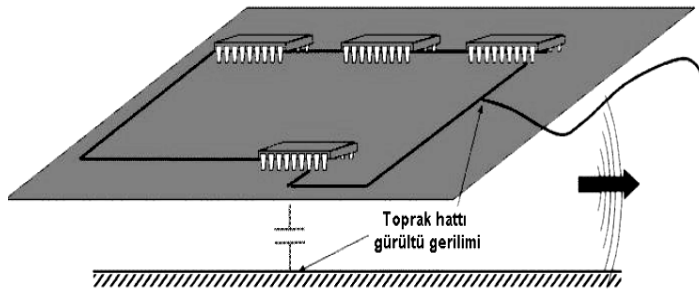
4.6. Baskı Devre (PCB) Tasarımı

PCB'ler EMI önlemenin ilk savunma hattı olarak görülebilir. PCB'lerdeki devreler, EMI problemlerinin başladığı ve sona erdiği yerlerdir. Elektromanyetik gürültü azaltma tekniklerinden biri baskı devre (PCB) tasarımıdır. İyi PCB planının ve tekniklerinin tek uygulanma nedeni baskı devre kartlarının daha az yayılımını sağlamak değil ayrıca bu baskı devrelerin dış enterferansa karşı daha yüksek seviyede bağışıklığa sahip olmasını sağlamaktır.



Şekil 4.16. PCB'den Havaya-yayılan yayınlar (Diferansiyel Mod)

Baskı devre tasarımlarında bazı noktalara dikkat edilmesi EMI açısından ürün tasarımında önemli yer tutar. Şekilde kablodan havaya yayılan yayınlar görülmektedir.

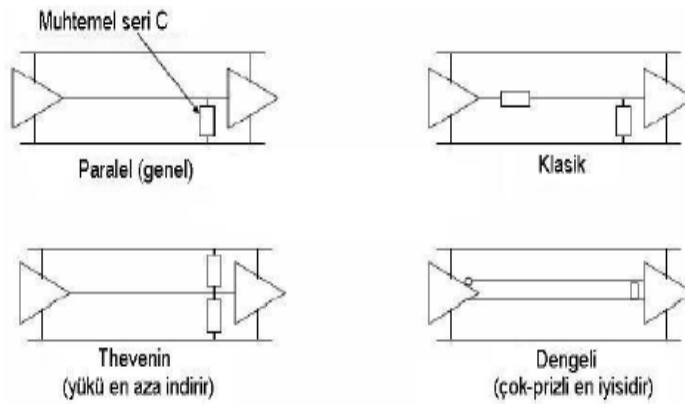


Şekil 4.17. Kablodan havaya-yayılan yayınlar (Ortak Mod)

Diğer enterferansı önleme metodlarına göre, PCB tasarımı maliyeti düşüktür. PCB planı için ilk kural döngü alanlarının küçük olmasını sağlamaktır. PCB planına ilişkin diğer bir yol ortak mod akımları en aza indirmektir. Bu, PCB tasarımı sırasında düzlemlerin (katı katmanların) kullanılması, bölüntüleme, filtreleme, toprak hattının bağlanması ile gerçekleştirilmektedir. Ortak mod, genelde diferansiyel modan daha büyük tehdit oluşturur. PCB tasarım teknikleri,

- kart planı
- Düzlemler ve katmanlar
- Toprak hattının bağlanması
- Dekuplaj
- İletim hatları
- Çoklu kartlar

olarak verilmektedir. PCB tasarımlarında, yüksek karakteristik empedans bölgeleri daha fazla yayılım yaptığından, ideal olarak tasarlanan devre şemalarında işaret hatları mikroşeritli olmalı ve her durumda toprak plakası bulunmalıdır. Baskı devrelerinde yüksek frekans işaret hatları mutlak olarak sonlandırılmalı ve kısa tutulmalıdır. Aşağıda, PCB için çeşitli sonlandırma teknikleri gösterilmektedir.



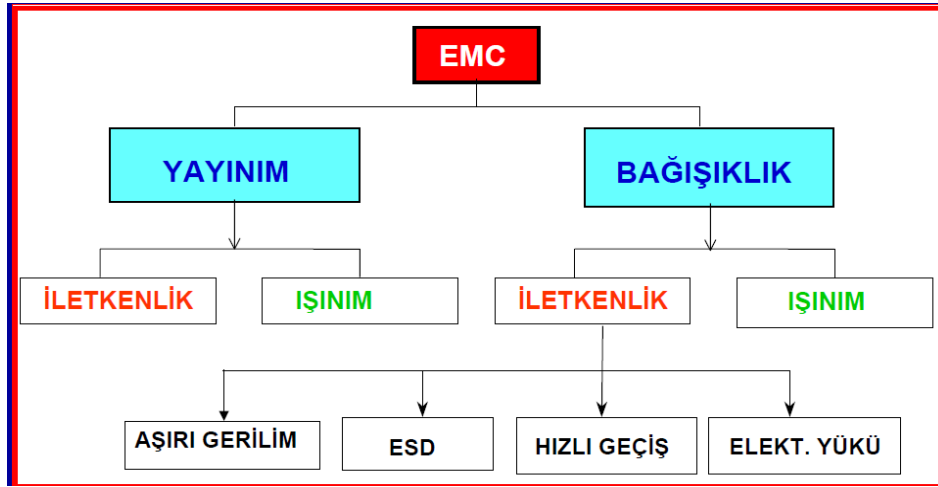
Şekil 4.18. PCB için sonlandırma teknikleri

Bir diğer önemli husus, yüksek frekans işaret hatları, kapalı çevrimler oluşturmamalı devre işaret hatlarının uçları açık olmalıdır. Baskı devre işaret hatlarında keskin köşeli dönüşler kullanılmamalı bunun yerine konik veya oval köşeli dönüşler kullanılmalıdır. Boyları çeyrek veya yarım dalga civarında sonlandırılmamış hatlar anten gibi ışınım yaparlar. Baskı devre üzerinde yerel ekranlama uygulanmalıdır. Uzun yan hatlar yüksek frekanslarda harmonik ve yansıma etkileri yaratırlar. Farklı tabakalardaki hatlar ortogonal döşenmelidir. Uygun dekaplaj eleman gürültüsü ve besleme parazitlerini azaltır. Yüksek frekanslı elemanlar besleme katına en yakın yerleştirilmelidir. Ayrı kartlardaki plakaların üst üste gelmesi system gürültüsünü arttırır. Ürünlerin PCB tasarımında yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınması EMC/EMI açısından büyük önem taşımaktadır [26,28,29,34,37].

5. DENEYSEL YÖNTEM VE BULGULAR

5.1. Elektromanyetik Uyumluluk Deneyleri

Elektromanyetik Uyumluluk deneyleri iki ana deney grubundan oluşmaktadır. Cihazın bulunduğu ortama verdiği kendisinden kaynaklı olarak meydana gelen elektromanyetik rahatsızlıklardır. Bunlara “yayınım” diyoruz, diğeri ise, cihazın bulunduğu ortamdan kaynaklı elektromanyetik yayınlara karşı gösterdiği tepki ise “Bağışıklık” olarak belirtilmektedir. “Yayınım” ve “Bağışıklık” deney grupları ise kuplajlama⁵ yollarına göre “İletimle” ve “İşinimla” olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Şekil 5.1.’de GSM mobil telefonlar için yapılan EMU deneyleri ve unsurları gösterilmektedir [4].



Şekil 5.1. EMC Deneyleri

Bununla birlikte, güç kalitesi ile ilgili olan ve yayınım deneyleri olarak kabul edilen Harmonik Akım Yayınımı, Gerilim Dalgalanması ve Kırpışma, bağışıklık deneyleri kapsamında ele alınabilecek olan Ani Yükselme, Elektriksel Hızlı Geçişler/Patlama, Gerilim Çökmesi-Kısa Kesintiler ve Elektro-Statik Boşalma deneyleri de EMU deneyleri kapsamındadır [4,26].

⁵ Kuplajlama: Elektromanyetik dalganın iletiminde bağlantı noktasında kayıpsız geçiş sağlanması

EMC/EMI ölçüm ve testleri yayınım ölçüleri ve bağışıklık testleri olarak ikiye ayrılır. Yayınım genelinde 30 MHz - 1GHz arasında ölçümleri yapılmaktadır. Uygun test ortamı yansız oda veya açık alandır. Genel olarak yayınım ölçüm düzeneklerinde uygun IF ölçme bandlarına (200Hz, 9kHz ve 120kHz) ve uygun dedeksiyon tiplerine (tepe, sözde-tepe ve ortalama dedektörü) sahip spektrum analizör (9 kHz-1 GHz yada 150 kHz-300 MHz arasında) kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılmakta olan anten tipleri (20-30 MHz arasında) yarım dalga dipolü, (30-400 MHz arasında) bikonik ve log-periodik ve (400-1000 MHz arasında) boynuz (horn) anten tipleri kullanılmaktadır [7,26]. Çizelge 5.1’de GSM mobil telefonlar için yapılan EMU deneyleri ve unsurları verilmektedir.

Çizelge 5.1. GSM mobil telefonlar için yapılan EMU deneyleri ve unsurları

GSM Mobil Telefon			
SIRA NO	EMU Deneyleri	Deney Bandı	Deney Modu
1	İletimle Yayınım	900/1800	Şarj/İletişim
2	İletimle Bağışıklık	900/1800	Şarj/İletişim ve Bekleme
3	Işınımla Yayınım	900/1800	Şarj/Bekleme
4	Işınımla Bağışıklık	900/1800	Şarj/İletişim ve Bekleme
5	Harmonik Akım Yayınımı (Harmonic Flicker)	900/1800	Şarj/İletişim
6	Gerilim Dalgalanması	900/1800	Şarj/İletişim
7	Ani Yükselmelere Karşı Bağışıklık(Surge)	900/1800	Şarj/İletişim ve Bekleme
8	EFT/Patlama	900/1800	Şarj/İletişim ve Bekleme
9	Elektrostatik Boşalma(ESD)	900/1800	Şarj/İletişim ve Bekleme
10	Gerilim Çukurları, Kısa Kesintiler ve Gerilim Değişmeleri	900/1800	Şarj/İletişim ve Bekleme

5.1.1. İletimle yayının deneyi

İletimle yayının deneyleri bir cihazın enerji ve telekomünikasyon gibi portlarından iletkenlik yoluyla yayılan elektromanyetik emisyon seviyelerini tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. 30 MHz üstündeki girişim işaretleri, iletim yollarında hızlı biçimde söndüğünden deneyler standartlar uyarınca, genellikle 150 kHz – 30 MHz frekans aralığında tepe dedektör (Peak), ortalama dedektör (AV) ve sözde tepe dedektör (QP) kullanılarak uygulanır. EMI test alıcısı “resolution bandwidth” değeri 9 kHz uygulanır. İletimle yayının deneylerinin adımları aşağıda belirtilmektedir .

- Line ve Notr için tepe ve ortalama ölçüm alınması,
- Limite yaklaşan frekanslarda ortalama ve sözde tepe ölçüm alınması,
- Ölçüm sonuçlarının limit ile karşılaştırılması,

Her hafta başında deneye başlamadan önce sistemin doğrulanması işlemi yapılmaktadır. Doğrulama işleminin yapılmasının ardından, ortam gürültü seviyesi ölçme işlemi yapılır. Her türlü elektrikli ve elektronik cihazlar A ve B sınıfı olarak sınıflandırılmış olup, GSM mobil cihazlar telsiz telekomünikasyon ve terminal cihazları B sınıfı cihazlar kapsamındadır. A ve B sınıfı cihazlar için iletimle yayının ölçümü sınır değerleri Çizelge 5.2.’de verilmektedir.

Çizelge 5.2. A/B sınıfı cihazlar için iletimle yayının sınır değerleri

FREKANS(MHz)	A Sınıfı (dB μ V)		B Sınıfı (dB μ V)	
	Sözde-tepe (Quasi-peak)	Ortalama (Average)	Sözde-tepe (Quasi-peak)	Ortalama (Average)
0,15 – 0,5	79	66	66 - 56	56 - 46
0,5 – 5,0	73	60	56	46
5,0 – 30,0	73	60	60	50

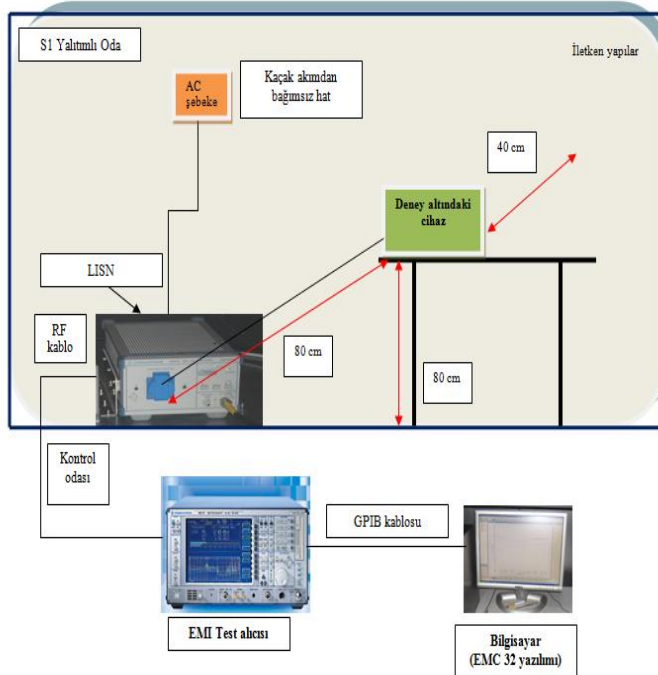
Herhangi iletkenler ve onlara bağlı olan aparatların şebekesini içeren bir A/B sınıfı sayısal cihaz veya sistemlerdeki tüm yayınımlar yukarıda belirtilen alan güçlerinin seviyesini aşmamalıdır [23,43,44,46,47]. İletimle yayının deneyinde kullanılan

cihazlar çizelge 5.3.'de gösterilmektedir. İletimle yayının deney düzeneği şekil 5.2.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. İletimle yayının deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler

ÖLÇÜM CİHAZI		CİHAZLAR
☒	EMI Test Alıcısı	
☒	AMN(LISN)	
☒	GSM Şebeke Simülatörü	
☒	GSM Şebeke Simülatörü	
☒	Bilgisayar	

GSM Mobil telefonu şarj konumunda iken baz istasyonu anteni aracılığıyla şebeke simülatörü ile senkronize olması sağlanır ve konuşma linki kurulur.



Şekil 5.2. İletimle yayının deney düzeneği

Deney her iki 900 MHz-1800 MHz GSM bandlarında gerçekleştirilmektedir. GSM mobil telefon iletişim linki kurmak için, GSM şebeke cihazına bağlantı yapılır ve deney düzeneği tam olarak kurulduktan yazılım yardımıyla L (Line) ve N (Nötr) hatlarındaki girişimleri ölçülerek Tepe-Ortalama (Peak-Average) ölçüm sonuçları elde edilir [23,43,44,46,47].

5.1.2. İletimle bağışıklık deneyi











İletimle bağışıklık olayı bir cihazın, kendi AC güç kablosu yoluyla oluşan elektromanyetik girişim için bir ürünün dayanıklılığı ifade eder. Ancak, çoğu durumda, kendi AC güç kablosu aracılığıyla bir ürüne etki eden sinyallerin genliği genellikle çok küçüktür, cihazın güç kaynağı ve güç kaynağı filtresiyle bu sinyaller büyük ölçüde azaltılır. İletimle bağışıklıkla olan sorunun en önemli sebebi diğer ürünler tarafından bir bina veya evdeki güç dağıtım ağı vasıtasıyla alınan ve ışıyan elektromagnetik enerji olduğunu unutmamak gerekir. İletimle bağışıklık sorunları, öncelikle voltajdaki dalgalanmaları veya bu voltajı alan ürünün olduğu yerde güç dağıtım ağı vasıtasıyla oluşmaktadır. Bu deneyin amacı, test altındaki cihazın normal kullanımda bağı kabloları üzerinden maruz kalabileceği elektromanyetik enerjiye karşı tepkisinin kontrol edilmesidir. Bu deneyin kapsamında en az bir iletim kablosu bulunan elektrik/elektronik cihazların maruz kalabileceği ortak mod RF enerjinin 150 kHz - 80 MHz frekans bölgesindeki aralığını kapsar (DAN boyutu $< \lambda/4$) üst frekans, numunenin ve kabloların boyutuna göre 230 MHz olabilir ve ortak modda yapılmaktadır. Ürün standardına göre deney seviyeleri; 1V, 3V, 10V olarak uygulanmaktadır, uygulanan frekans band aralığı, 150 kHz–80 MHz, deney esnasında uygulanan RF sinyali 1kHz % 80 genlik modülasyonludur. Deneye başlamadan önce, 1 kHz lik ses sinyalinin cihaza tanıtılması amacıyla yapay ağız yardımıyla her cihaz için yukarı bağlantı (uplink) ve aşağı bağlantı (downlink) değerleri tespit edilir. Kalibrasyon için aşağıdaki cihazlar kullanılır;

- Akustik kalibratör : 0 dBPa ses basınç seviyesine sahip 1 kHz sinyal üreten referans kaynağı.
- Basınç mikrofONU : Ses şiddetini elektriksel işarete dönüştürür.
- Yapay ağız simülatörü : Harici bir AF sinyali ile beslenir. Bu sinyalin frekansı ve genliğıyle orantılı olarak akustik sinyal üretir.

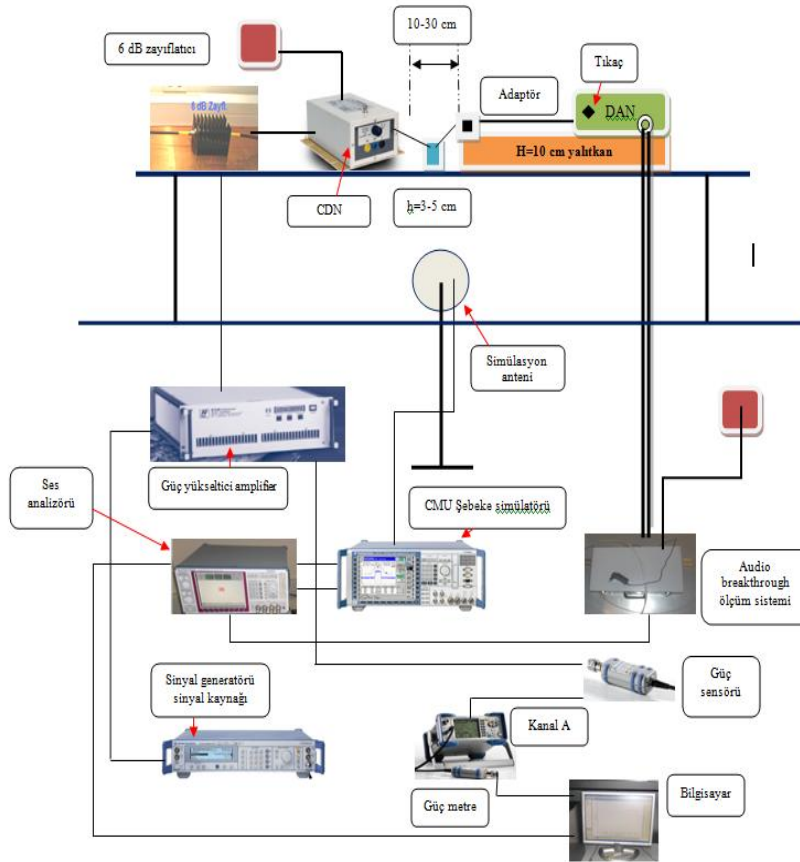
Prop mikrofONU akustik tüpteki ses seviyelerini ölçer. Akustik tüp GSM mobil telefonunun kulaklığına iliştirilir ve burada oluşan sinyalleri prob mikrofONuna taşır. İki kanallı ses yükseltici her iki mikrofONun çıkış sinyallerini yükseltir. GSM telefonları için iletimle bağışıklık deneylerinde 3 tane izleme kanalı zorunludur. Yukarı bağılantı (Uplink) için ses kalibrasyon seviyesi eşik değeri kalibrasyonunda elde edilen değerin 35 dB altıdır. Aşağı bağılantı (Downlink) için ses kalibrasyon seviyesi eşik değeri kalibrasyonunda elde edilen değerin 35 dB altıdır. Link kalitesi parametresi, mobil telefonun sayısal alıcı kısmının etkilenip etkilenmediğini izlemek için telefonda baz istasyonuna “bit error” sayısı ile rapor edilen ve link kalitesini gösteren bir parametredir. Eşik seviyesi 3’tür. Deney esnasında ölçülen değerlerin bu üç kanaldaki eşik seviyelerinden birini aşması halinde söz konusu frekansdaki telefon tepkisini belirlemek amacıyla, standartda belirtildiğı şekilde, bağışıklık frekansı ilk önce 400 kHz daha sonra 500 kHz arttırılarak ve azaltılarak ayrı ayrı ölçüm alınır, eğer etki bu ölçümlerin herhangi birinde veya her ikisinde de kaybolursa etki dar bantta olmaktadır ve normal ölçüme devam edilmektedir. Sonuç olarak, bu tepki, aktif radyo kanalından kaynaklanıyorsa Deney altındaki numune iyi kabul edilebilir, aksi durumda, geniş bant tepkisi olarak kabul edilmektedir. İletimle bağışıklık deneyinde kullanılan cihazlar çizelge 5.4.’de gösterilmektedir. Bu deneyde 6 dB zayıflatıcı kullanılmasının nedeni, yükseltici çıkışına empedans uyumsuzluğu nedeniyle geri dönebilecek enerjiyi azaltarak yükselticiyi korumaktır. Geri dönen enerji toplamda 12 dB’lik zayıflamaya uğrar (16 da 1 ine düşer). Deneyde uygulanan alan şiddeti 3 V veya 10 V RMS değeridir. Modülasyon % 80 genlik modülasyonludur. Modülasyon frekansı, 1 kHz (Sinüs dalgası) frekans aralığında, 150 kHz- 80 MHz (gerekirse 230 MHz’e kadar genişletilebilir), frekans adımı, %1

logaritmik olarak artmakta, kalma zamanı ise minimum 1 sn olacak şekilde deney standartında belirtildiği şekilde deney düzeneği hazırlanmaktadır.

Çizelge 5.4. İletimle bağışıklık deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler

ÖLÇÜM CİHAZI		CİHAZLAR
<input checked="" type="checkbox"/>	UPL Audio analizör	
<input checked="" type="checkbox"/>	NRP Güç metre	
<input checked="" type="checkbox"/>	GSM Şebeke Simülatörü	
<input checked="" type="checkbox"/>	GSM Şebeke Simülatörü	
<input checked="" type="checkbox"/>	NRP Güç sensörü	
<input checked="" type="checkbox"/>	Bilgisayar	
<input checked="" type="checkbox"/>	Sinyal kaynağı	
<input checked="" type="checkbox"/>	Güç Yükseltici	
<input checked="" type="checkbox"/>	CDN	
<input checked="" type="checkbox"/>	6 dB Zayıflatıcı	

Yükseltici ile CDN arasına 6 dB'lik zayıflatıcı konur. DAN'ın enerji girişleri CDN M2+M3'ün "EUT" çıkış portuna bağlanarak numune çalıştırılır ve deneye hazır hale getirilir. İletimle bağışıklık deneyinin genel düzeneği şekil 5.3'de gösterilmektedir. GSM mobil telefonu şarj konumunda iken baz istasyonu ile senkronize olması sağlanır, konuşma linki kurulur ve 900 MHz-1800 MHz frekanslarda deney gerçekleştirilir. DAN maksimum iletim gücünde çalışacak şekilde kumanda edilmelidir. Telefon iletişim modunda iken, DAN maksimum iletim gücünde olacak şekilde çalıştırılmalıdır ve GSM mobil cihazın kulaklık ses seviye ayarı orta seviyeye getirilmelidir.








Şekil 5.3. İletimle bağışıklık deney düzeneği [23,43,44,45,48,50].

Numune cihaza deneye başlamadan önce kaydedilen bir veri (kısa mesaj, bir numara vb.) deney sonunda kaybolmadığı kontrol edilmelidir. Deney süresince, aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı (Downlink-Uplink) ses seviyeleri ve link kalitesi (RXQUAL) izlenir. Deney sonucunda, ölçümler 35 dB limit çizgisini aşmadığı takdirde deney UYGUN kabul edilir aksi takdirde deney “UYGUN DEĞİL” olarak kabul edilir [23,43,44,45,48,50].

5.1.3. Işınımla yayınımlı deneyi

Işınımla yayınımlı deneyinden önce deney sisteminin güvenilirliğini denetlemek amacıyla doğrulama işlemi yapılır. Doğrulama ve arka plan ölçümlerinden sonra deney işlemine başlanmaktadır. Işınımla yayınımlı (Radiated Emission) deneyi yarı yansız odada yapılmaktadır. Işınımla yayınımlı deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.5’de gösterilmektedir [23,43,44,46,47].

Çizelge 5.5. Işınım yayını deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler

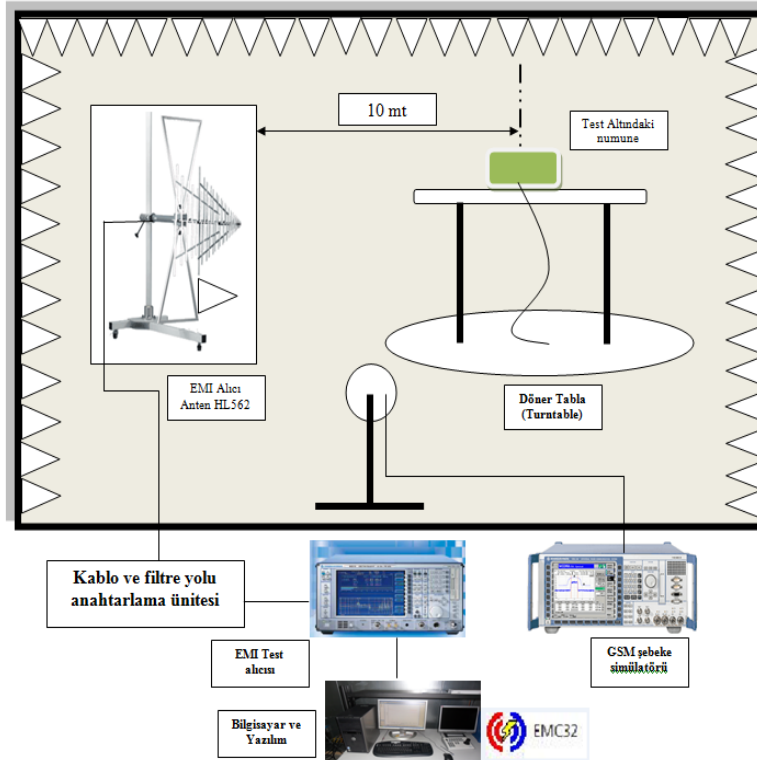
ÖLÇÜM CİHAZI	CİHAZLAR
<input checked="" type="checkbox"/> GSM Şebeke Simülatörü	
<input checked="" type="checkbox"/> GSM Şebeke Simülatörü	
<input checked="" type="checkbox"/> Bilgisayar	
<input checked="" type="checkbox"/> Yazılım	EMC yazılımı
<input checked="" type="checkbox"/> EMI Test Alıcısı	
<input checked="" type="checkbox"/> EMI Alıcı Anten	

Deney işleminin yapılışı aşağıdaki gibi olmalıdır.

- DAN yarı yansız odada yerden 80cm yükseklikte döner tabla üzerindeki yalıtkan masa üzerine konur. Masa, en yüksek ışınım seviyesini belirlemek için 360 derece döndürülebilme kabiliyetine sahiptir.
- DAN, yüksekliği değişebilen anten kulesine monte edilmiş girişim-alıcı anteninden 10 metre uzaklıktadır. Yarı yansız oda içerisinde yansıtıcı bir engel bulunmamalıdır.
- Ölçümde kullanılacak anten genişband anten olup, ve alan seviyesinin maksimum seviyesini belirleyebilmek için aşağı yukarı hareket etme özelliğine sahiptir.
- Ölçümü yapmak için antenin polarizasyonu hem yatay, hem düşey olarak ayarlanabilmektedir.
- Şüphelenilen her emisyon için, en yüksek okuma seviyesini bulmak amacıyla DAN en kötü durumuna ayarlanmalıdır, anten yüksekliği otomatik olarak değiştirilebilir ve döner tabla üzerindeki masa 360 derece döndürülebilir.

- Deneysel 30 MHz – 1000 MHz frekans aralığında önce tepe dedektör ile tüm band taranarak yapılır. Daha sonra limitlere yaklaşan veya şüphelenilen frekanslar için sözde-tepe (Quasi-Peak) alıcısı kullanılarak yapılmaktadır.

Işınımla yayılım deney düzeneği şekil 5.4.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Işınımla yayılım deney düzeneği

A/B sınıfı cihazlar için Işınımla yayılım limit değerleri çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. A/B sınıfı cihazlar için ışınımla yayılım ölçüm sınır değerleri

FREKANS(MHz)	A sınıfı (10 m ² 'de)	B sınıfı(10 m ² 'de)
	dB μ V/m	dB μ V/m
30-230	40	30
230-1000	47	37

Notlar:

- Geçiş frekanslarında düşük olan limit uygulanır.
- Emisyon seviyesi (dB μ V/m) = 20 log Emisyon seviyesi (μ V/m)

GSM Mobil telefonu şarj konumunda iken baz istasyonu anteni aracılığıyla şebeke simülatörü ile senkronize olması sağlanır, konuşma linki kurulmamaktadır. Her iki frekans bandında (900 MHz ve 1800 MHz) deney gerçekleştirilmektedir. Deney sonuç değerlendirmesi standartda belirlenen limitlere göre yapılır [23,43,44,46,47].

5.1.4. Işınım ile bağışıklık deneyi

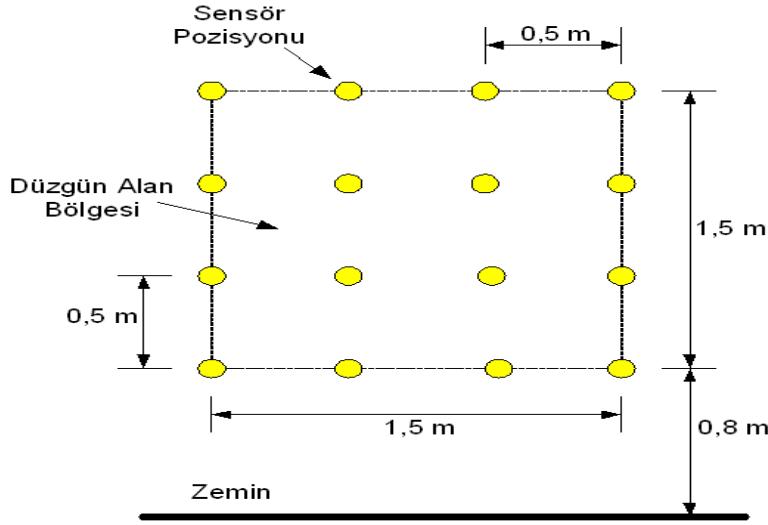
Işınım yoluyla elektromanyetik dalgalara maruz kalan elektrikli ve elektronik cihazların, bağışıklık seviyelerinin değerlendirilmesidir. Deney odası tam yansız deney odası (FAC) dır. Deneyde kullanılan genel cihaz ve antenler aşağıda belirtilmektedir. 80 – 2500 MHz frekans bandında güç yükselteci, 3 m deney mesafesi, 80 – 1300 MHz log periyodik anten ve 1 – 6 GHz frekans aralığında boynuz (horn) anten veya bu frekans aralığını kapsayabilen uygun bir anten kullanılması veya bu frekans aralığını kapsayan bir anten kullanılması gereklidir.

Deneyin genel özellikleri;

Frekans Aralığı *	: 80 MHz – 1000 MHz
Alan Şiddeti	: 3 V/m veya 10V/m (ilgili ürün standardına göre)
Modülasyon Frekansı	: 1 kHz (Sinüs dalgası)
Modülasyon Tipi	: % 80 AM
Frekans Adımı	: Temel frekansın % 1'i
Anten polaritesi	: Yatay ve Dikey
Uygulama Açısı	: DAN'ın 0, 90, 180, 270 derecelik pozisyonu
Deney mesafesi	: 3 m

(*) Cihaza özel standart varsa, o standarttaki frekans aralığı uygulanır. Örneğin GSM cihazları için 1,4 – 2,7 GHz bandı ilave olarak uygulanır.

Alan düzgünlüğü ölçümü, hem yatay hem de dikey polarizasyonda yapılır Aşağıdaki şekilde belirtilen noktalara EMR 300 cihazı ve prob yerleştirilerek alan düzgünlüğü ölçümü gerçekleştirilir.



Şekil 5.5. Alan düzgünlüğü EMR 300 prob ölçüm noktaları [23,43,44,49].

Alan düzgünlüğü işlemin yapılmasının amacı, deney numunesi üzerindeki alan düzgünlüğünün, deney sonuçlarının doğruluğunu garanti edecek düzeyde olmasını sağlamaktır. Alan düzgünlüğü işlemi için aşağıdaki işlemler sırasıyla uygulanmalıdır.

- Deneyleerde kullanılacak alan şiddeti (E_t) değerinin en az 1,8 kat fazlası ile alan şiddeti (E_c) ile kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmelidir. E_t değeri $E_c / 1,8$ 'den büyük olmamalıdır.
- Kalibre edilecek alan 1,5 m x 1,5 m (1 GHz'e kadar) ebadındadır.
- 1,5 m x 1,5 m alan İçin; Alan sensörünü 16 kalibrasyon ölçüm noktasından birine konuşturılır. Sinyal jeneratörünün çıkışını deney bandının en küçük frekansına ayarlanır. Antenden kalibre edilen alan şiddetini (E_c) oluşturana kadar sinyal jeneratörü çıkış gücü ayarlanmalıdır. Frekans maksimum olarak % 1 oranında arttırılmalıdır. Deney, frekans bandını aşınca kadar yukarıdaki adımlar tekrarlanır ve band sonu frekans için yukarıdaki adım tekrarlanmalıdır.
- Kalan 15 ölçüm noktası için bu işlemler ayrı ayrı tekrarlanmalıdır.
- Her bir frekans adım için 16 sürülen güç değerini küçükten büyüğe sıralanır. En yüksek değerden başlanarak kalan 15 değerden en az 11 tanesinin değeri - 6 dB ila 0 dB tolerans aralığında olup, olmadığı kontrol edilmelidir. Bunun

aksi durumda ise, bir sonraki en büyük değere geçip aynı sorgulama yapılmalıdır. 12 değer bulunuyorsa işlem tamamlanmış olur.

- Bu işlemler her frekans adımı için ayrı olarak tekrarlanmalıdır.
- Tespit edilen frekansta deney sisteminin sature olup, olmadığı tüm frekanslar için aşağıdaki yöntem ile kontrol edilmelidir. (Alanın deney seviyesi (E_t) olan değer $1,8$ katı ile kalibre edildiğini (E_c) kabul edersek;
 - Kalibrasyon yapılırken elde edilen sürülen güç (P_c) değerini $5,1$ dB düşürecek şekilde sinyal jeneratörünün çıkışı ayarlanmalıdır.
 - Antene aktarılacak bu yeni güç seviyesi buna göre ayarlanmalıdır.

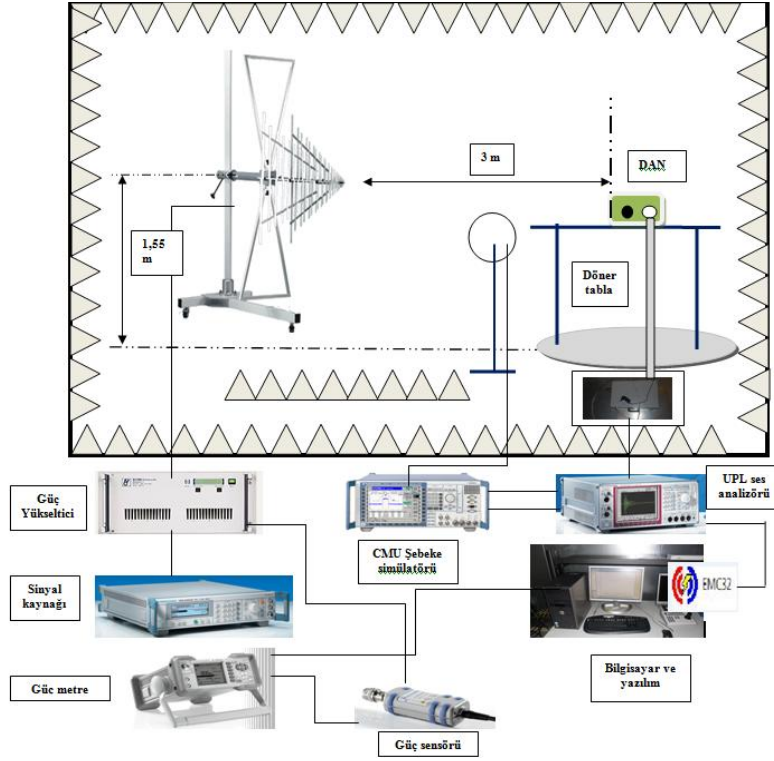
Işınımla bağışıklık deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.7.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.7. Işınımla bağışıklık deneyinde kullanılan cihaz ve malzemeler

ÖLÇÜM CİHAZI	CİHAZLAR
☒ UPL Audio analizör	
☒ NRP Güç metre	
☒ GSM Şebeke Simülâtörü	
☒ NRP Güç sensörü	
☒ Bilgisayar	
☒ Sinyal kaynağı	
☒ Güç Yükseltici	
☒ Ses kalibrasyonu Ölçüm Sistemi	

GSM mobil telefon şebeke simülâtörü ile link kurularak deney yapılır. Deney 900 ve 1800 MHz frekanslarda ayrı ayrı gerçekleştirilir. Deney süresince; aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı (Downlink-Uplink) ses seviyeleri ve link alış kalitesi izlenmelidir. Bu gözlem parametrelerinin izlenebilmesi için tüm ses bağlantısının performans kalibrasyonu ses performans kalibrasyonuna göre yapılmalıdır. Işınımla bağışıklık

deneyinde, iletimle bağışıklık deneyinde olduğu gibi ses kalibrasyon işlemleri yapılmalıdır. Işınımla bağışıklık deney düzeneği Şekil 5.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Işınımla bağışıklık deney düzeneği

Işınımla bağışıklık deneyinde 900 ve 1800 Mhz için ölçüm dışında tutulacak frekanslar; Tx-Uplink kanalı: +/- 300 kHz

GSM 900-orta kanal = 902,1MHz - 902,7 MHz

GSM 1800-orta kanal = 1747,3 MHz - 1747,9 MHz

Rx bandı- yukarı bağlantı (downlink): - % 6 / + % 5

GSM 900 (Rx bandı 935-960 MHz) için hariç tutulacak bant = 878,9 – 1008 MHz

GSM 1800 (Rx bandı 1805-1880 MHz) için hariç tutulacak bant=1696,7–1974 MHz

GSM mobil telefonlar için ışınımla bağışıklık deneylerinde 3 parametre izlenir.

- Yukarı bağlantı (Uplink) için ses alış seviyesi
- Aşağı bağlantı (Downlink) için ses alış seviyesi
- Link alış (Rxquality) kalitesi parametresi

deney sonucu olarak izlenecek olan 3 parametre değeri limit değerleri aşmadığında cihaz ışınlama bağımsızlık deneyi için “UYGUN” kabul edilir, aksi takdirde deneye tabi tutulan cihaz ışınlama bağımsızlık deneyi için “UYGUN DEĞİL” olarak kabul edilir [23,43,44,49].

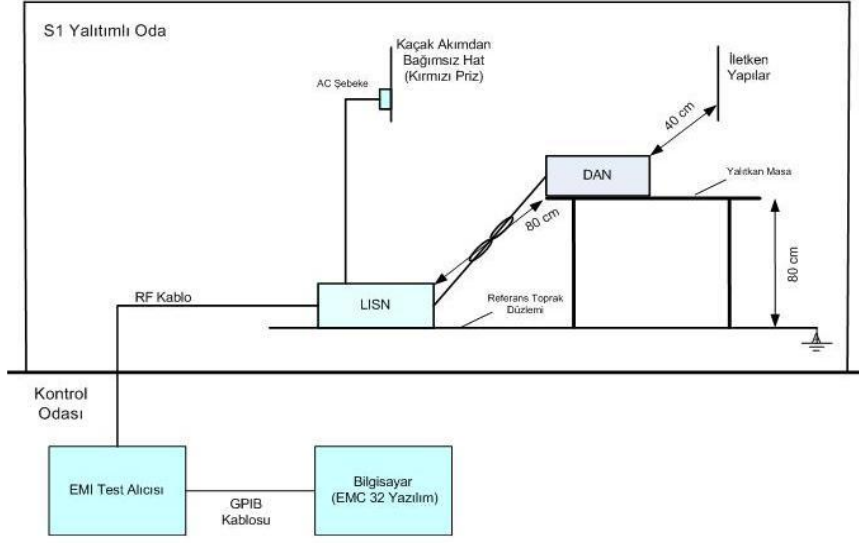
5.2. EMC Deney Bulguları

900 ve 1800 MHz GSM bandında 2 adet GSM mobil telefon için deney yapılarak deney ve ölçüm sonuçları aşağıda verilmektedir. Burada seçilen iki cihazdan biri, iletim ve ışınlama deneyleri açısından yani EMC açısından “UYGUN” olan diğeri ise “UYGUN OLMAYAN” cihazlar seçilmiştir. Bundaki amaç, bu iki deneyin kıyaslamasının yapılarak EMC iletim ve ışınlama deneyleri açısından değerlendirme yapma imkanı sağlayacaktır. Bu EMC deneylerinin yapılması için, Akreditasyon Kurumunca akredite olmuş olan, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Piyasa Gözetim Laboratuvarı imkanlarından faydalanılmıştır.

5.2.1. Deney raporu (EMC açısından uygun bir cihaz için)

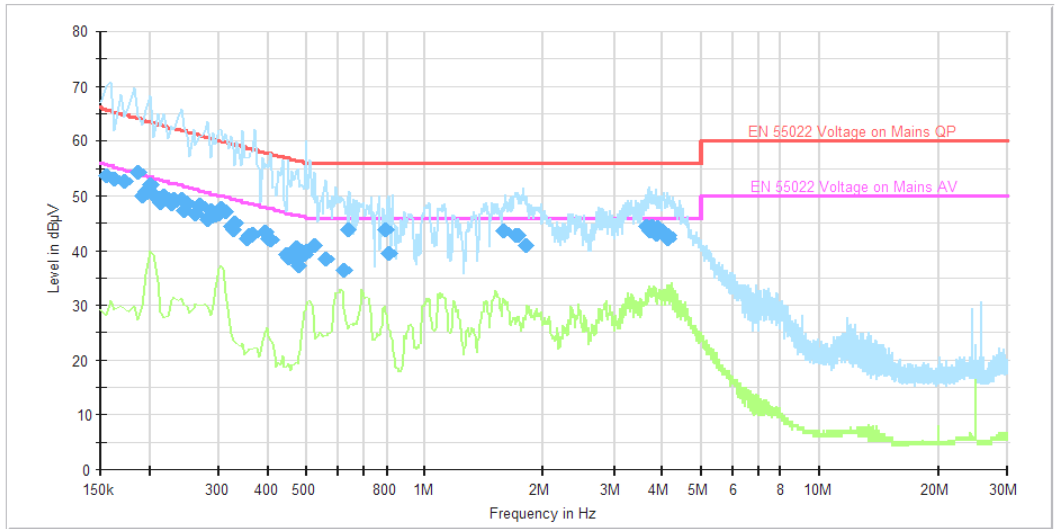
EMC açısından uygun olan GSM mobil telefon için iletim ve ışınlama deney sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

İletimle yayılım deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.3.’de belirtilmektedir. Deney düzeneği şekil 5.7’deki gibidir. Deney 900 ve 1800 MHz frekans bandında İletişim/Şarj konumunda, 150 kHz–30 MHz frekans aralığında uygulanmaktadır. Ölçümlerde sözde-tepe ve ortalama dedektör kullanılmakta olup, IF band genişliği 9 kHz dir. Alıcı olarak EMI test alıcısı kullanılmaktadır. Çevresel şartlar, deney esnasında ölçülen sıcaklık değeri 23,0 °C, nem değeri % 53,7 dur.



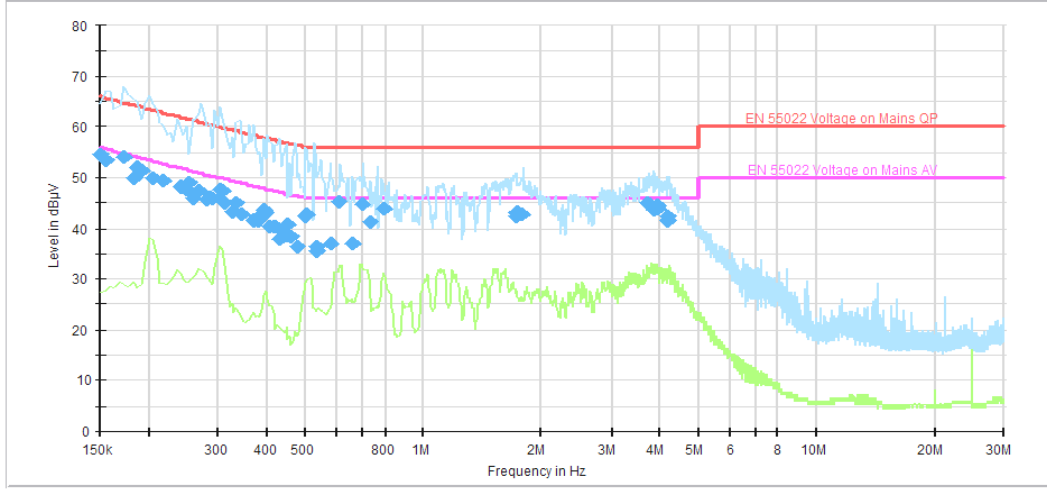
Şekil 5.7. İletimle yayılım genel deney düzeneği

900 MHz, İletişim/Şarj konumunda,



Şekil 5.8. 900 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği

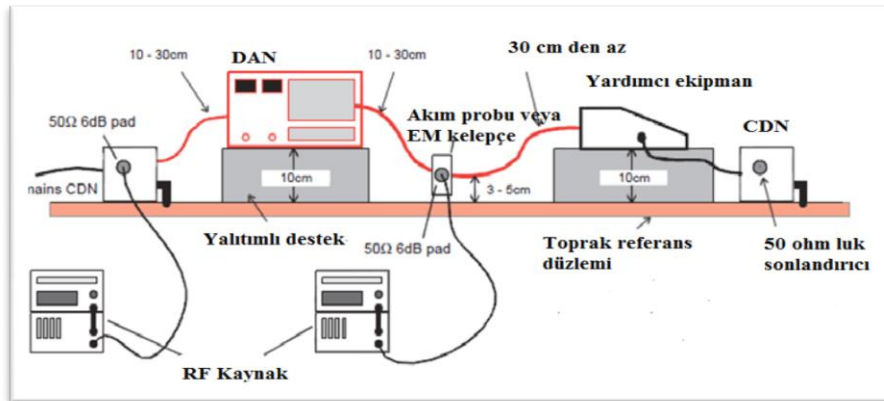
1800 MHz, İletişim/Şarj konumunda,



Şekil 5.9. 1800 MHz İletimle yayını ölçüm sonuç grafiği

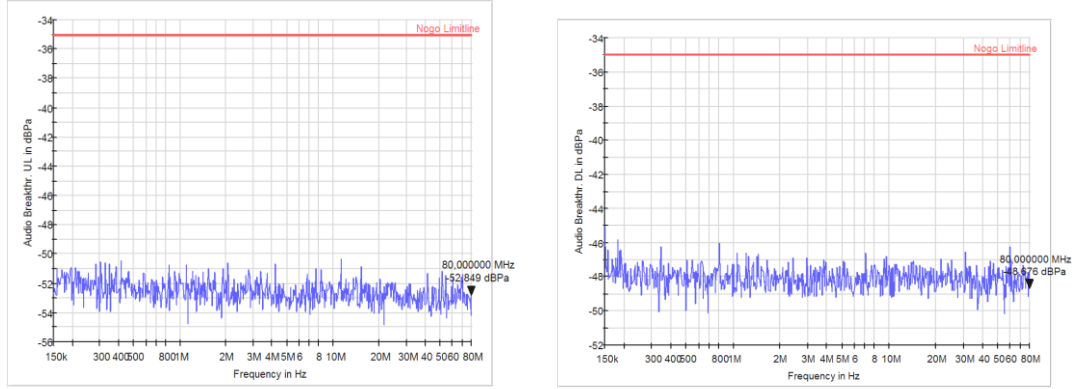
Yukarıdaki grafiklerde, kırmızı limit çizgisi sözde-tepe (Quasi-peak) dedektörü limit değerleri, mor çizgi ise ortalama dedektörü limit değerleridir. Bu değerler çizelge 5.2.'de verilmiştir. mavi çizgiler sözde-tepe (Quasi-peak) dedektörü ölçüm sonucu, yeşil çizgiler ise ortalama dedektörü ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, ölçüm değerleri limit değerlerin altında olduğundan 900 ve 1800 MHz GSM bandında iletimle yayını deney sonuçları “UYGUN” dur.

İletimle bağışıklık deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.4.'de belirtilmektedir. Deney 900 ve 1800 MHz frekans bandında, iletişim ve şarj konumunda, 150 kHz-80 MHz frekans aralığında, 3V elektrik alan şiddet seviyesi ve % 80 Genlik modülasyonlu (AM), 1 kHz ses sinyali uygulanarak yapılmaktadır. Genel olarak deney düzeneği şekil 5.10.'da gösterildiği gibidir.

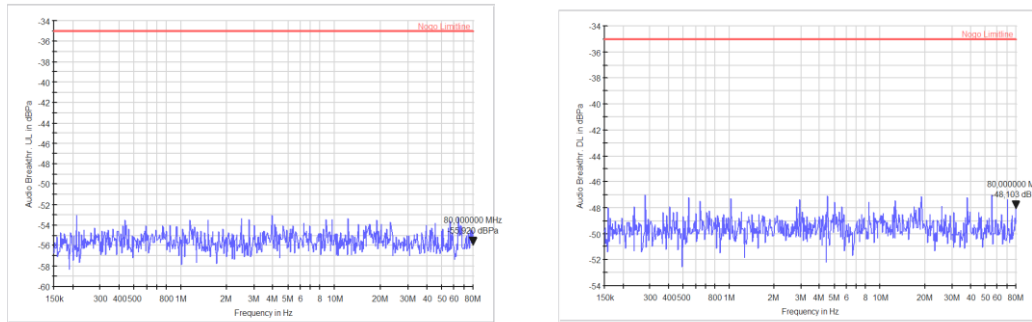


Şekil 5.10. İletimle bağışıklık genel deney düzeneği

Çevresel şartlar, deney esnasında ölçülen sıcaklık değeri 23,8 °C ve nem değeri % 53,6 dır.



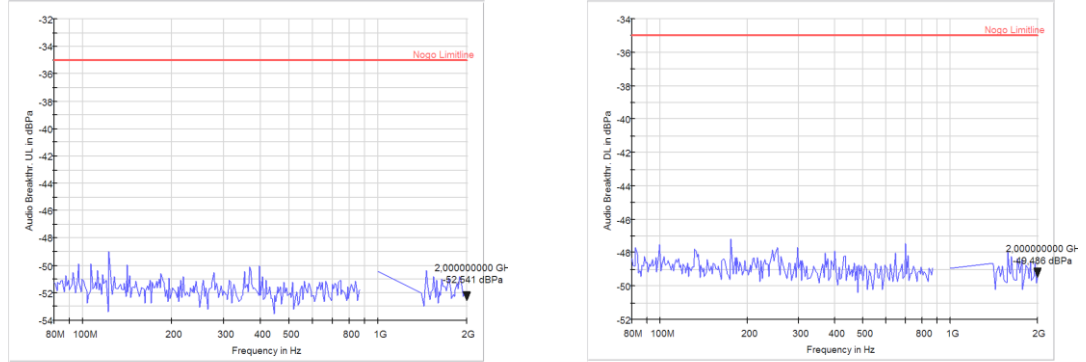
Şekil 5.11. 900 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği



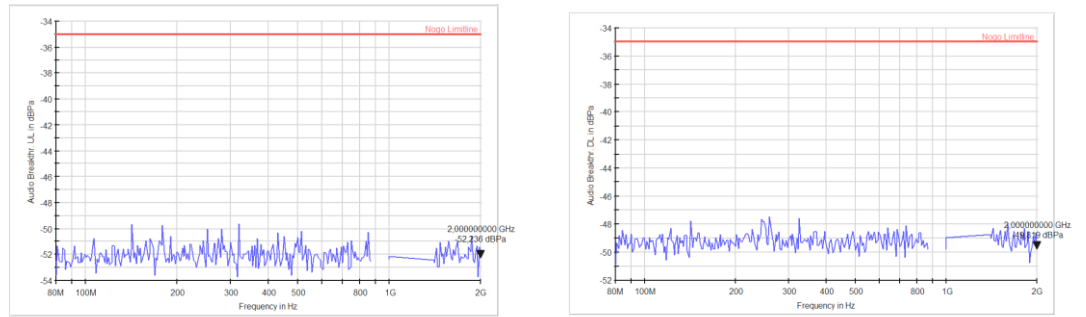
Şekil 5.12. 1800 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

Yukarıdaki grafiklerde kırmızı çizgi limit değerleri (35 dB limit değeri), mavi ise ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, 900 ve 1800 MHz GSM frekans bandında, yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) ses seviyesine göre, ölçüm değerleri limit değerlerin altında olduğundan iletimle bağlılık deney sonuçları “UYGUN” dur.

Işınımla yayılım deneyinde kullanılan ölçüm cihazları ise çizelge 5.5.’de belirtilmektedir. Deney yarı yansız odada, 30 MHz-1 GHz frekans aralığında uygulanmaktadır. Deney altındaki numune (DAN) ile anten arasındaki mesafe 10 m’dir. DAN yerden 80 cm yükseklikte yalıtımlı masa üzerine konmaktadır. Döner tabla 360 derece döndürülme kabiliyetine sahiptir. Deney için çevre şartları sıcaklık

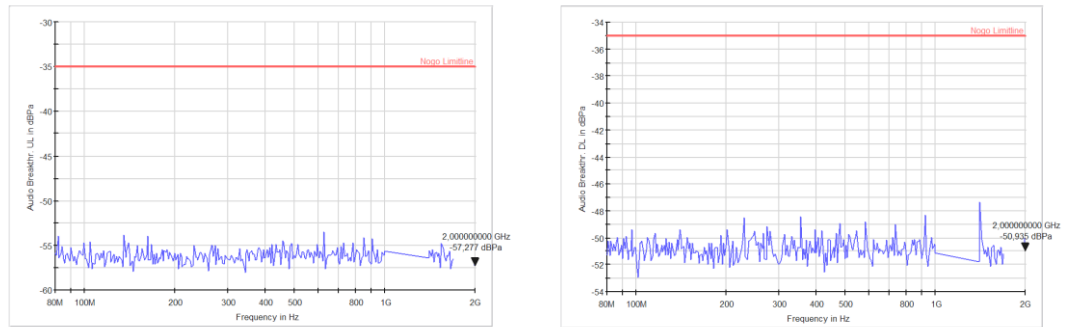


Şekil 5.16. 900 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

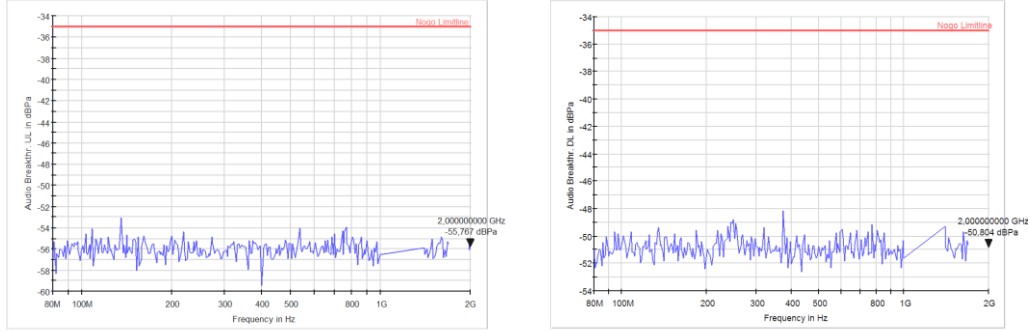


Şekil 5.17. 900 MHz ses kalibrasyonu dikey polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

1800 MHz'de iletişim ve şarj konumunda,



Şekil 5.18. 1800 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği



Şekil 5.19. 1800 MHz ses kalibrasyonu dikey polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

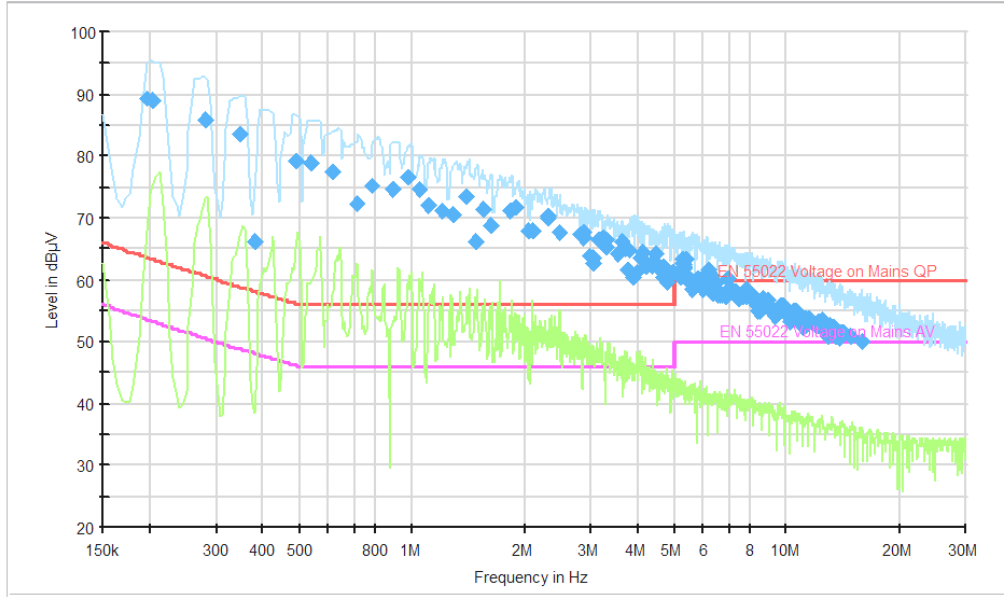
Yukarıdaki grafiklerde kırmızı çizgi limit değerleri (35 dB limit değeri), mavi ise ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, 900 ve 1800 MHz GSM frekans bandında, dikey ve yatay polarizasyonda ve yukarı bağlantı (Uplink) ve aşağı bağlantı (Downlink) ses kalibrasyonu için, ölçüm değerleri limit değerlerin altında olduğundan ışınlama bağımsızlık deney sonuçları “UYGUN” dur.

5.2.2. Deney raporu (EMC açısından uygun olmayan bir cihaz için)

EMC açısından uygun olmayan GSM mobil telefon için iletim ve ışınlama deney sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

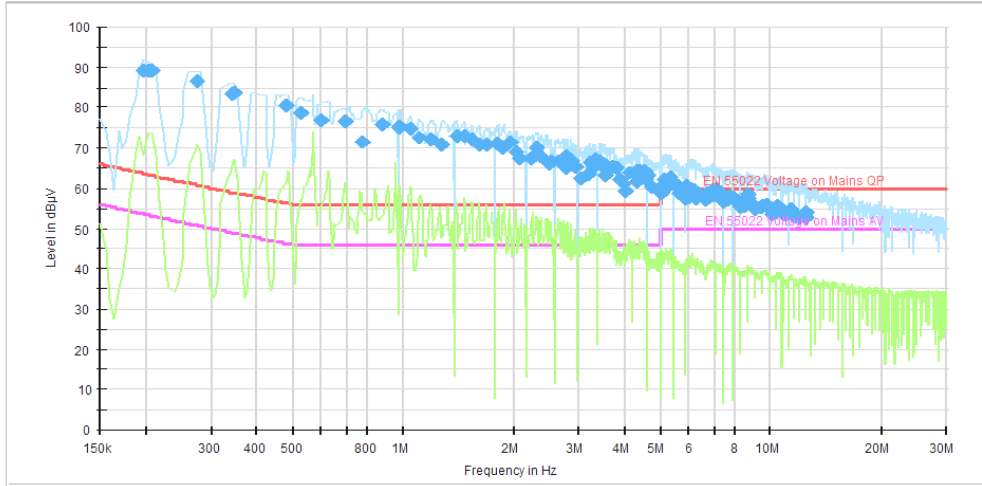
İletimle yayılım deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.3.’de belirtilmektedir. Deney düzeneği şekil 5.7’de gösterildiği gibidir. Deney 900 ve 1800 MHz frekans bandında iletişim/şarj konumunda, 150 kHz–30 MHz frekans aralığında uygulanmaktadır. Ölçümlerde sözde-tepe ve ortalama dedektör kullanılmakta olup, IF band genişliği 9 kHz dir. Alıcı olarak EMI test alıcısı kullanılmaktadır. Çevresel şartlar, deney esnasında ölçülen sıcaklık değeri 23,7 °C ve nem değeri % 55,7 dir. A/B sınıfı için iletimle yayılım sınır değerleri çizelge 5.2.’de belirtilmektedir.

Deney verileri, 900 MHz, iletişim/Şarj,



Şekil 5.20. 900 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği

1800 MHz, iletişim/Şarj,

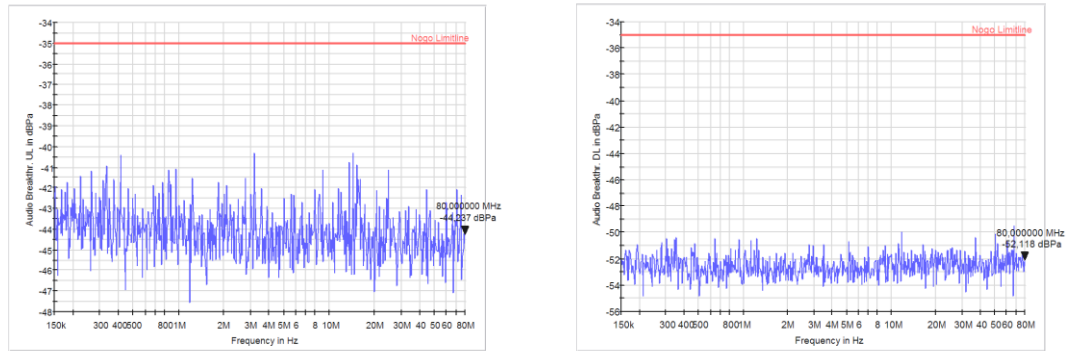


Şekil 5.21. 1800 MHz İletimle yayılım deneyi ölçüm sonuç grafiği

Yukarıdaki grafiklerde kırmızı çizgi sözde-tepe (Quasi-peak) dedektörü limit değerleri, mor çizgi ise ortalama dedektörü limit değerleridir. Bu değerler çizelge 5.2.'de verilmiştir. mavi çizgiler sözde-tepe (Quasi-peak) dedektörü ölçüm sonucu, yeşil çizgiler ise ortalama dedektörü ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, ölçüm değerleri limit değerlerin üzerinde olduğundan 900 ve 1800 MHz GSM bandında iletimle yayılım deney sonuçları “UYGUN DEĞİL” dir.

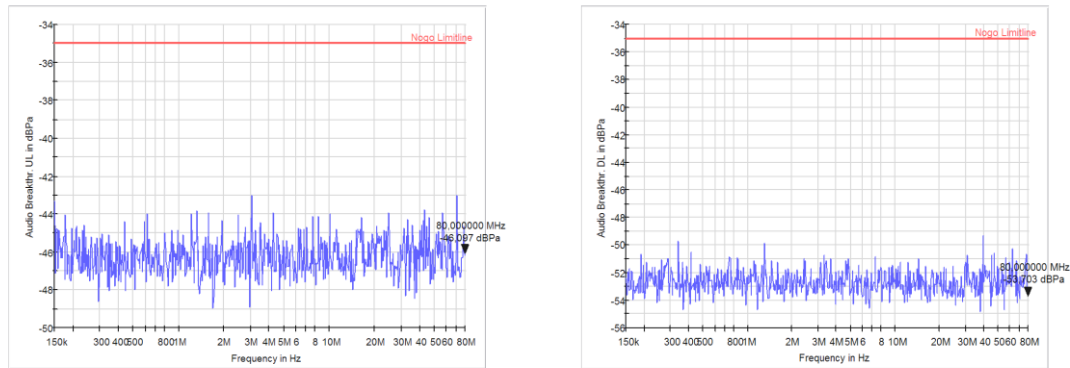
İletimle bağımsızlık deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.4.'de belirtilmektedir. Deney 900 ve 1800 MHz frekans bandında İletişim/Şarj 150 kHz-80 MHz frekans aralığında, 3V elektrik alan şiddet seviyesi ve % 80 Genlik modülasyonlu (AM), 1 kHz ses sinyali uygulanarak yapılmaktadır. Genel olarak deney düzeneği şekil 5.10.'da gösterildiği gibidir. Çevresel şartlar, deney esnasında ölçülen sıcaklık değeri 24,3 °C ve nem değeri % 52,7 dir. Bu deneyde, yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı (Uplink-Downlink) ses seviyeleri ve link kalitesi (Rxqual) izlenmiştir.

900 MHz, iletişim/Şarj,



Şekil 5.22. 900 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

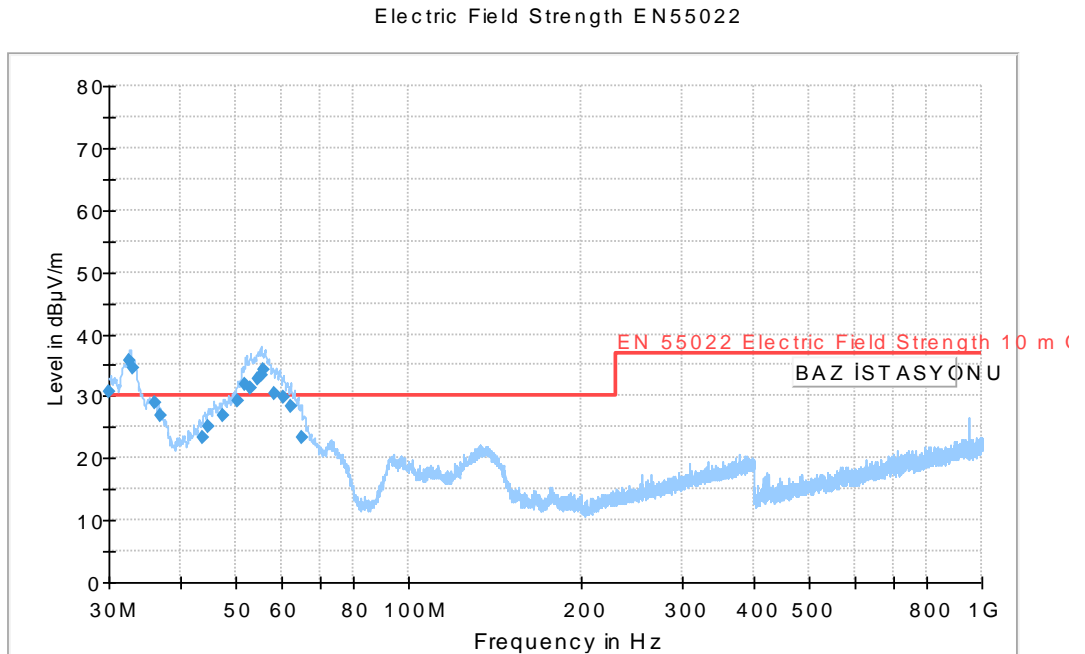
1800 MHz, İletişim/Şarj,



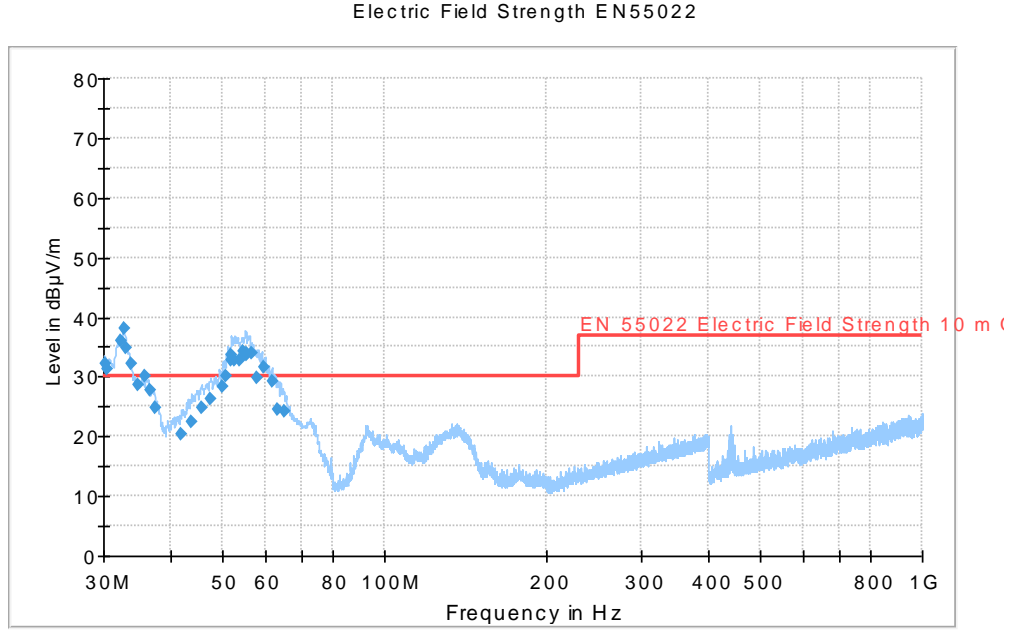
Şekil 5.23. 1800 MHz ses kalibrasyonu yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

Yukarıdaki grafiklerde kırmızı çizgi limit değerleri (35 dB limit değeri), mavi ise ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, 900 ve 1800 MHz GSM frekans bandında, UL (Uplink) ve DL (Downlink) ses kalibrasyonu için, ölçüm değerleri limit değerlerin altında olduğundan iletimle bağışıklık deney sonuçları “UYGUN” dur.

Işınımla yayını deneyinde kullanılan ölçüm cihazları ise çizelge 5.5.’de belirtilmektedir. Deney yarı yansız odada, 30 MHz-1 GHz frekans aralığında uygulanmaktadır. Deney altındaki numune (DAN) ile anten arasındaki mesafe 10 m’dir. DAN yerden 80 cm yükseklikte yalıtımlı masa üzerine konmaktadır. Döner tabla 360 derece döndürölme kabiliyetine sahiptir. Deney düzeneği şekil 5.13.’de gösterildiği gibidir. Çevresel Şartlar, deney esnasında ölçülen sıcaklık değeri 24,0 °C ve nem değeri % 52,9’ dur. Deney 900 ve 1800 Mhz frekans bandlarında Bekleme/Şarj konumunda yapılır.



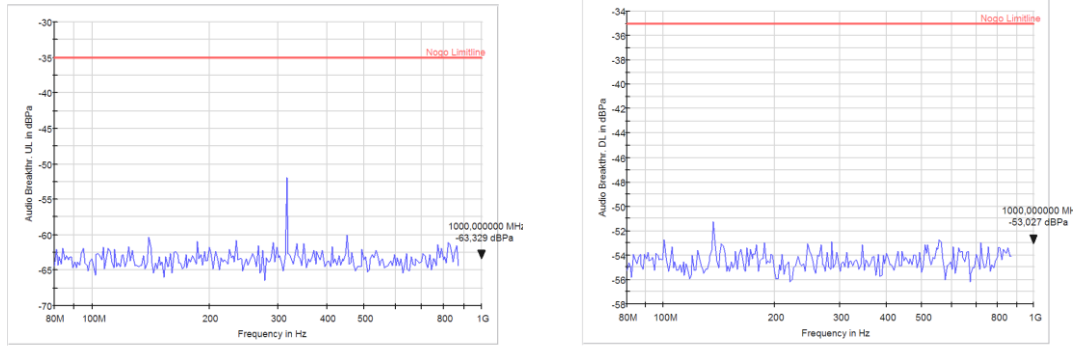
Şekil 5.24. 900 MHz Işınımla yayını deneyi ölçüm sonuç grafiği



Şekil 5.25. 1800 MHz Işınımla yayınımla deneyi ölçüm sonuç grafiği

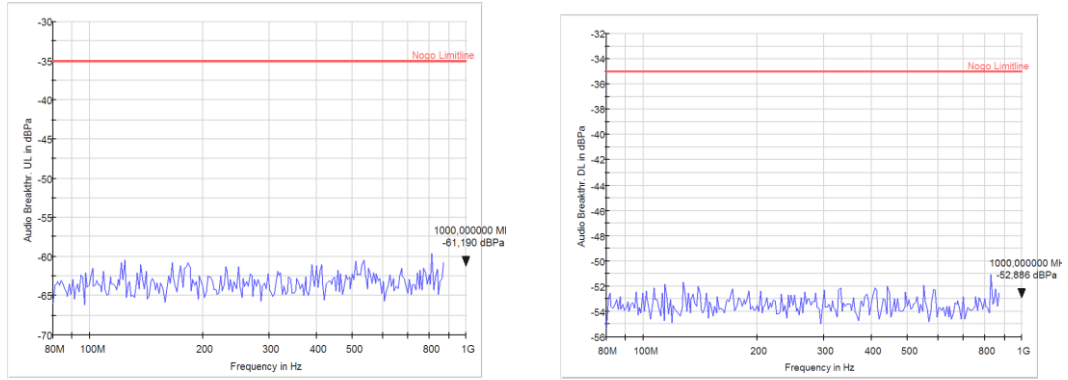
Yukarıdaki grafikte kırmızı çizgi limit değerleri (Çizelge 5.6.) mavi ise ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, ölçüm değerleri limit değerlerin üzerinde olduğundan 900 ve 1800 MHz GSM bandında ışınımla yayınımla deney sonucu bekleme ve şarj durumunda “UYGUN DEĞİL”dir.

Işınımla bağımsızlık deneyinde kullanılan ölçüm cihazları çizelge 5.7.’de belirtilmektedir. Deney düzeneği şekil 5.6.’da gösterildiği gibidir. Deney tam yansız test odasında gerçekleştirilmektedir. Çevresel şartlar, deney esnasında ölçülen sıcaklık değeri 25,1 °C ve nem değeri % 49,5 dur. Deney 900 ve 1800 MHz için iletişim ve şarj konumunda, anten hem yatay hem de dikey pozisyonlar olmak üzere Frekans aralığı 80 MHz - 1 GHz, elektrik alan şiddeti seviyesi 3 V/m, % 80 genlik modülasyonu (AM), 1 kHz ses sinyali uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 900 MHz İletişim/Şarj anten polarizasyonu yatay,



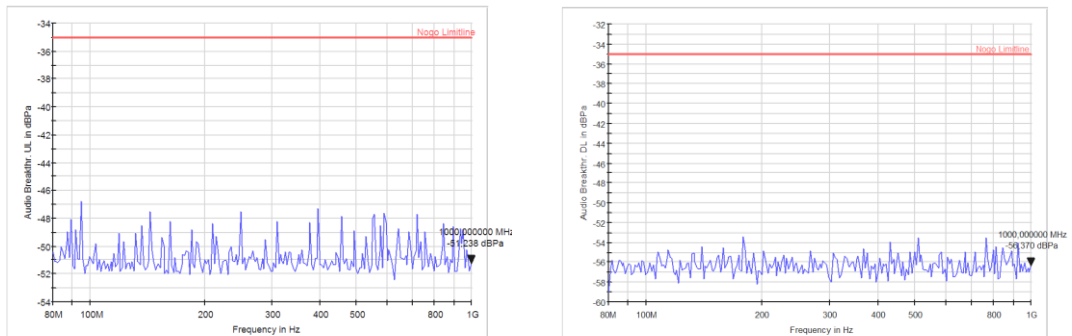
Şekil 5.26. 900 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

Anten polarizasyonu dikey,



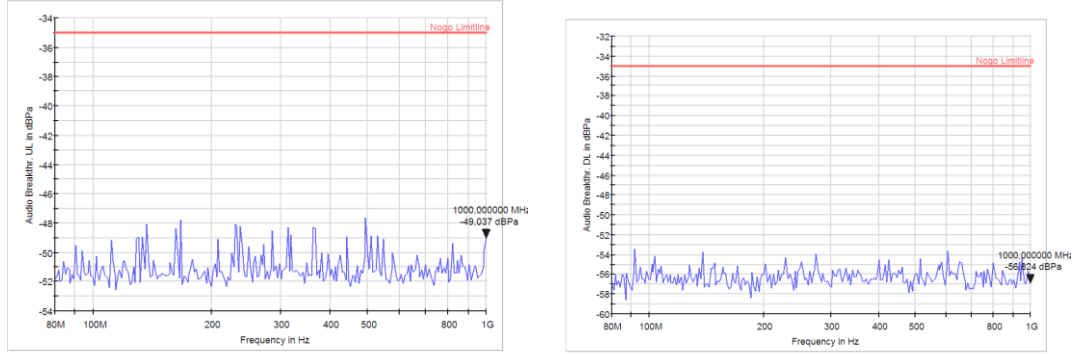
Şekil 5.27. 900 MHz ses kalibrasyonu dikey polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

1800 MHz İletişim/Şarj anten polarizasyonu yatay,



Şekil 5.28. 1800 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

Anten polarizasyonu dikey,



Şekil 5.29. 1800 MHz ses kalibrasyonu yatay polarizasyon yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) grafiği

Yukarıdaki grafiklerde kırmızı çizgi limit değerleri (35 dB limit değeri), mavi ise ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, 900 ve 1800 MHz GSM frekans bandında, yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı (Uplink-Downlink) ses kalibrasyonu için, ölçüm değerleri limit değerlerin altında olduğundan iletimle bağışıklık deney sonuçları “UYGUN” dur. Deney sonuçlarına göre bu cihaz ışınlama yayılım ve iletimle yayılım deneyleri için “UYGUN DEĞİL” dir.

5.3. Diğer Elektromanyetik Uyumluluk Deneyleri

Diğer elektromanyetik uyumluluk deneyleri ise, harmonik akım yayılımı (harmonic flicker), gerilim dalgalanması, ani yükselmelere karşı bağışıklık (Surge), EFT/Patlama, elektrostatik boşalma (ESD), gerilim çukurları, kısa kesintiler ve gerilim değişimleridir. Kısaca bunları tanımlarsak;

Ani yükselmelere karşı bağışıklık deneyi (Surge): Anahtarlama ve yıldırım darbesi sonucunda güç ve ara hatlarda meydana gelen yüksek enerji bozulmalarına maruz kalan cihazın çalışma niteliğinin değerlendirilmesidir [4,35].

Elektriksel hızlı geçişler /Ani darbe deneyi (EFT/Burst): Elektrikli ve elektronik cihazların, güç kaynağı, işaret, kontrol ve toprak uçlarında elektriksel hızlı geçici rejimlere/ani darbelerle maruz kalmaları durumundaki performanslarının değerlendirilmesidir [4,27].

Gerilim çukurları, kısa kesintiler ve gerilim değişmeleri deneyi: Deney, numunenin gerilim düşmesi, kısa süreli kesinti yada gerilim değişimine maruz kalması durumunda, bağışıklık seviyesinin tespit edilebilmesi amacıyla, 50 Hz/60 Hz alternatif akım şebekelerine bağlanan cihazlar için faz başına 16 A'yı aşmayan beyan giriş akımına sahip elektrikli ve elektronik cihazlara uygulanmaktadır [4,24].

Elektrostatik boşalma deneyi (ESD): Deney, numunenin elektrostatik boşalmalara maruz kalması durumunda bağışıklık seviyesinin tespit edilebilmesi amacıyla, operatörlerden doğrudan temasla veya yakınında bulunan cisimler aracılığıyla elektrostatik boşalmalara maruz kalabilen elektrikli ve elektronik cihazlara uygulanır [4,11].

Harmonik akım yayınımlı: Harmonikler, elektrik besleme şebeke frekansının (50 Hz/60 Hz) tam katlarındaki frekansa sahip sinüzoidal gerilim veya akımlardır. Ara harmonik, temel frekansın tam sayı olmayan katlarındaki frekanslara sahip herhangi bir işaret bileşenidir. Bu deney, AC elektrik şebekesine bağlanan ve faz başına 16 A'den düşük akım çeken tüm elektrikli ve elektronik cihazlarına uygulanmaktadır [4,18].

Gerilim dalgalanması ve kırpışma: Şehir şebeke geriliminde düşük genlikli fakat hızlı değişimler özellikle aydınlatma sistemlerinde hissedilir rahatsızlıklar yaratmaktadırlar. Şebekeye bağlı bütün cihazların belli ve sonlu bir giriş empedansı olduğundan şehir şebekesinde bu gerilim düşmelerine neden olabilmektedir. Bunu önlemek amacıyla, şebekeye bağlanacak herhangi bir elektrik yada elektronik cihazın girişindeki frekans ve genlik değişimleri için EN 61000-3-3 standardında limitlere göre tasarlanması gerekmektedir [4,32].

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, EMC deneylerinin fiziksel olarak anlaşılması amacıyla, temel parametreler olan elektrik, manyetik alan kavramları ve elektromanyetik alan ve dalga kavramları fiziksel olarak izah edilerek teorik bilgiler verilmiştir. Elektromanyetik dalganın çeşitli ortamlardaki hareketleri izah edilerek genel açıklayıcı bilgi verilmiştir. Elektromanyetik dalga hareketinin davranışı EMC ve EMI oluşumlarını anlamamıza büyük fayda sağlamıştır. Bununla birlikte, elektronik cihazların devre elemanlarını EMC açısından ele aldığımızda, bir iletken DC akımı uygulandığında, iletken kesiti boyunca akım dağılımı oluşur. Eğer bu iletken AC akımı uygulanırsa, iletkende indüklenen gerilim, yüklerin iletkenin dış yüzeye yönelmesine neden olur ki bu etkiye deri etkisi denir ve; $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\sigma\mu}}$ ile verilir. Burada ω akım frekansı, μ manyetik geçirgenlik, σ iletkenlik sabitidir. Düşük frekanslar için iletken kesitindeki akım dağılımı kesitte homojen özellik gösterir. İletkenin dış yüzeyine doğru kaymaya başlar. Yüksek frekanslarda iletken yüzeyine yaklaşır. Yüksek frekanslarda iç endüktans biraz daha küçük olur ve bu endüktans çok yüksek frekanslarda ihmal edilebilir. EMC açısından temel devre elemanlarından direnç eşdeğer devresini ele aldığımızda, Z empedansının frekansa bağlı olarak davranışı, $f=0$ Hz için eşdeğer empedans R direncine eşit olmaktadır. Frekansı arttırdığımızda devredeki C_p kapasitesi tarafından empedans azalmaya başlar frekansı daha arttırdığımız zaman eşdeğer empedans küçülmeye başlar ve L_L ve C_p etkisiyle direnç rezonansa girinceye kadar sürer ve rezonans frekansında minimum olur. Sığa için ise, frekans arttırıldığında, empedans azalır ve kapasitenin rezonans frekansında meydana gelir. Daha yüksek frekanslarda, endüktans empedans üzerinde etkin olur ve empedans artışı gözlenir. Endüktans eşdeğer devresi içinde frekans arttırıldığında, direnç empedans değeri L 'nin empedans değerine eşit oluncaya kadar azalır ve eşdeğer devre rezonansa girer. Rezonans frekansından büyük frekanslarda C_p eşdeğer empedans üzerinde etkin olur. EMC için kullanılan yaygın birim desibeldir. Akım, Gerilim, Elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti, güç ve güç yoğunluğu hesaplamaları dB olarak yapılmaktadır. EMC'de zamanla değişen bir sinyali frekansa bağlı olarak açıklamak için Fourier dönüşümü kullanılır. EMC'de standart

emiyon limitleri, 30 MHz ile 10 GHz frekans aralığındadır. Bu frekans aralığındaki sinyal analizlerini dikkate alırsak, akım gerilim sinyalleri için, fourier dönüşümü yerine daha çok sinyalin fourier zarf metodu tercih edilir. EMC, elektronik ve elektriksel sistemlerin kendileri veya diğer sistemler arasında EMI (Elektromanyetik girişim) oluşmasını engellemek amacıyla geliştirilen bir yöntem ve metodlar sistemidir. Burada EMC açısından önemli bir faktör olan EMI üzerinde durulmuştur. Elektromanyetik girişim türleri olan iç ve dış gürültü kaynakları ve Elektromanyetik girişim modelleri tanıtılarak bunlar hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, temel EMC birimleri, EMC sinyal analizi EMC açısından temel devre elemanlarının davranışı, EMC deneylerinde kullanılan antenler fiziksel olarak ele alınmış ve genişband antenler tanıtılmıştır. Bir ürün ve sistem açısından EMC kavramının iki önemli unsuru vardır. Bunlar iletim ve ışıdır. Bir ürün veya sistem kendi çalışma ortamında, iletim veya ışı yaparken iki türlü etki yapar veya maruz kalır. Bunlar “yayınım” ve “bağışıklık” kavramlarıdır. Bir ürün veya sistem için EMC açısından “iletimle yayınım ve bağışıklık” ile “ışımla yayınım ve bağışıklık” deneylerinin altyapısı ve fiziksel özellikleri ele alınarak teorik bilgi ve uygulama yöntemleri verilmiştir. EMC deneylerinde kullanılan ölçüm cihazlarının fiziksel işlevi açıklanmıştır. İletimle yayınım deneyleri bir cihazın enerji ve telekomünikasyon portlarından iletkenlik yoluyla yayılan elektromanyetik emiyon seviyelerini tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. İletimle yayınım deneylerinde kullanılan en önemli cihaz hat empedans uyumlaştırma şebeke (LISN) cihazıdır. Bu cihaz,

- İletimle yayınım deneyi frekans bandı boyunca, ürünün güç kablosu çıkış noktasına sabit empedans sağlar.
- Ölçüm sistemi ile şebeke arasında izolasyon sağlar.
- Güç şebekesindeki ölçüm sistemini etkileyebilecek harici gürültüyü engeller
- Şebekeye bağılı diğer cihazların DAN kaynaklı olası gürültülerden etkilenmesini engeller.

LISN’in amacı, cihazın faz ve toprak için standart empedansı sağlamaktadır. İletimle yayınım, bu empedanslar üzerindeki voltajın ölçümüyle tespit edilir. Bu nedenle iletimle yayınım deneyleri için çok önemlidir. LISN cihazı, güç hatlarındaki Line ve

Nötr hatlarında oluşan ortak ve diferansiyel mod akımlarının oluşturduğu voltajlardır. Bu nedenle LISN cihazı daha detaylı olarak ele alınmıştır. Bir ürün için iletimle yayınıma neden olan unsurlardan biri, onların güç kaynaklarıdır. Bir akım kaynağı, AC hat voltajını DC voltaja dönüştüren bir güç kaynağı kullanarak oluşturur. Bu süreç içinde bunu yaparken, pek çok güç kaynağı, ürünün çalışma fonksiyonlarına girişim yapmayan istenmeyen yüksek frekans sinyallerini yaratır. Bu istenmeyen Elektromanyetik enerji, düzenleme testlerinde başarısız olan ürünün neden olabileceği gürültü seviyesi iletimle yayınımla ölçülebilmektedir. Güç kaynaklarındaki bu yayınımla önlemek amacıyla, güç kaynağı filtresi bir cihazın güç girişlerine eklenir. Böylece, Bu filtreler cihaz çıkışından itibaren iletimle yayınımla akımlarını önler. Yapılan iletimle yayınımla testleri yüksek frekans aralığından dolayı, bu filtreler hem ortak hem de diferansiyel mod akımlarını azaltması gerekir, geleneksel elektrik filtreleri, iletimle yayınımla azaltmak için yeterli olmadığından bunun yerine, güç kaynağı filtreleri, tüm iletimle yayınımla frekans spektrumu boyunca hem ortak hemde diferansiyel mod akımlarını azaltmak için tasarlanmıştır. Işınımla yayınımla deneyi, bir elektriksel veya elektronik cihazın bulunduğu ortama ışınımla yayınımla yaydığı elektromanyetik dalga gürültü seviyelerinin belirlendiği deneylerdir. Bu tür ışınımla yayınımla ölçümlerinin yapıldığı yer elektromanyetik olarak temiz ve çevre nesnelere yansımaların olmadığı açık alanlar veya bu şartların sağlanamadığı durumlarda, bu tip ortamları temsil eden yapay TEM hücreleri veya elektromanyetik olarak yalıtılmış yarı yansımaz deney odalarıdır (semi anechoic chamber - SAC). Işınımla yolu ile oluşan yayınımla sonucu oluşabilecek muhtemel girişim yolları;

- Güç kabloları uzun olması durumunda, ya diğer kaynaklardan alınan sinyaller ya da radyo TV yayınlarıyla bir anten olarak rol oynayabilir. daha yüksek frekans sinyalleri güç girişinde var olabilmesine rağmen AC güç girişi veya 50/60 Hz sinyali taşımak için planlanmıştır. Örneğin transformerler, Bilgisayar işlemcileri veya vakum tüpleri sinyalleri yayabilir veya alabilirler.
- Yeterince uzun olmak kaydıyla, bir bilgisayar içindeki iç kablolar veya bağlantılar örneğin bir bilgisayar içindeki veri yol veya şeritleri bir anten olarak rol oynayabilir.

- Hatalı olarak tasarlanmış metalik koruma muhafazaları harici sinyalleri alabilir veya yayabilir.

İletimle bağışıklık olayı bir cihazın, kendi AC güç kablosu yoluyla oluşan elektromanyetik girişim için bir ürünün dayanıklılığı ifade eder. Ancak, çoğu durumda, kendi AC güç kablosu aracılığıyla bir ürüne etki eden sinyallerin genliği genellikle çok küçüktür, cihazın güç kaynağı ve güç kaynağı filtresiyle bu sinyaller daha fazla azaltılır. İletimle bağışıklıkla olan sorunun en önemli sebebi diğer ürünler tarafından bir bina veya evdeki güç dağıtım ağı vasıtasıyla alınan ve ışılan elektromagnetik enerji olduğunu unutmamak gerekir. İletimle bağışıklık sorunları, öncelikle voltajdaki dalgalanmalar veya bu voltajı alan ürünün olduğu yerde güç dağıtım ağıyla geçmektedir. Işınım bağışıklık, ışınım yoluyla elektromanyetik dalgalara maruz kalan elektrikli ve elektronik cihazların, bağışıklık seviyelerinin değerlendirilmesidir.

Genel olarak EMI kaynaklarını sıralayacak olursak,

- İletkenlik yoluyla; İşaret, iletim hattı yada güç kablolarında istenmeyen gerilim, akım ve frekans spektrumunun oluşmasıyla meydana gelir.
- Yayılım yoluyla; Uzaya elektrik veya manyetik alan şeklinde yayılan EMI kaynağının genliği ve frekans spektrumu yoluyla oluşur.
- Sürekli; Zamanda sürekli var olan EMI işaretleriyle oluşur.
- Aralıklı; Zaman zaman ortaya çıkan EMI işaretleriyle oluşur.
- Doğal; Atmosferik, galaktik gürültüler, yıldırım düşmesi, şimşek çakması vb.
- Yapay; Generatör, motor, ateşleme sistemleri, roleler, bilgisayar saatleri, haberleşme sistemleri, endüstriyel cihazlar, vb.
- Analog işaretlerden; AM-FM yayın istasyonları, radar sistemleri, endüstriyel kontrol (dar veya geniş frekans bandlı olabilir) cihazları.
- Sayısal işaretlerden; Bilgisayar saatleri, veri işaretleri, veri kontrolü (genelde geniş frekans bandlıdır) sağlayan cihazlar.

EMI açısından diğer önemli konu olan kuplajlamadır.

İletkenlik yoluyla oluşan EMI kuplajı;

- Devreler arası ortak empedans yolu ile,
- Toprak empedans yolu ile,
- Ortak işaret yolu ile,
- Güç ve enerji iletim kabloları ile,
- Kontrol yada ara bağlantı kabloları ile,
- Metal yüzeylerde oluşan yüzey akımları ile oluşmaktadır.

Yayınım yoluyla EMI kuplajı;

- Kablo-anten ve anten- kablo kuplajı
- Tel ve uzak alanlara kablo kuplajı(anten kuplajı)
- Anten-anten kuplajı
- Yakın alan endüktif ve kapasitif kuplaj,

EMI etkilerine maruz kalma nedenleri;

- Yüksek duyarlılık (düşük işaret seviyelerinde çalışma)
- Geniş frekans bandına sahip olma
- Düşük gürültü limitlerinde çalışma
- Frekans seçiciliğin zayıflığı
- İç ve çapraz modülasyon
- Uzun kablolar ve büyük devre elemanları
- Topraklanmamış ve ekranlanmamış düzenler ve devreler

olarak belirtilmektedir.

Bu tezin 4 üncü bölümünde elektromanyetik gürültü azaltma teknikleri anlatılmıştır. Elektromanyetik gürültü sorunlarına karşı alınabilecek önlemler olarak, ekranlama, filtreleme, elektromanyetik kuplaj, topraklama ile ilgili fiziksel incelemeler bu bölümde ele alınmış ve elektromanyetik sistemlerin tasarımında gürültü azaltma

tekniklerinin kullanılması elektromanyetik girişimlere karşı önemli kazanımlar sağlayacaktır.

Deneysel yöntem ve bulgular kısmında, 900 ve 1800 MHz frekans bandında GSM mobil telefonlar için iletim ve ışıyım deney yöntemleri tanıtılarak bu deneylerin uygulama metodları ve deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının fiziksel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Söz konusu uygulanan EMC deneyleri iletimle yayınım, iletimle bağışıklık, ışıyım ile yayınım, ışıyım ile bağışıklıktır. Bu deneylerden İletim deneyleri elektromanyetik olarak yalıtılmış odalarda gerçekleştirilmektedir. İletimle yayınım deneylerinde kullanılan LISN cihazı bu deney için en önemli cihazlardan biridir. Bu cihaz, 3 üncü bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Bu deneyde, GSM mobil telefonların iletişim ve şarj halinde iken 900 ve 1800 MHz de 150 kHz- 30 MHz frekans aralığında Line ve Nötr hatları için ayrı ayrı uygulanmaktadır. İletimle yayınım deneyleri bir cihazın enerji ve telekomünikasyon girişlerinden iletkenlik yoluyla yayılan elektromanyetik yayınım seviyelerini tespit etmek amacıyla uygulanmaktadır. İletimle yayınım ölçümü sınır değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.2. A/B sınıfı cihazlar için iletimle yayınım sınır değerleri

FREKANS(MHz)	A Sınıfı (dBµV)		B Sınıfı (dBµV)	
	Sözde-tepe (Quasi-peak)	Ortalama (Average)	Sözde-tepe (Quasi-peak)	Ortalama (Average)
0,15 – 0,5	79	66	66 - 56	56 - 46
0,5 – 5,0	73	60	56	46
5,0 – 30,0	73	60	60	50

İletimle bağışıklık olayı bir cihazın, kendi AC güç kablosu yoluyla oluşan elektromanyetik girişim için bir ürünün dayanıklılığı ifade eder. Ancak, çoğu durumda, kendi AC güç kablosu aracılığıyla bir ürüne etki eden sinyallerin genliği genellikle çok küçüktür, cihazın güç kaynağı ve güç kaynağı filtresiyle bu sinyaller büyük ölçüde azaltılır. İletimle bağışıklıkla olan sorunun en önemli sebebi diğer ürünler tarafından bir bina veya evdeki güç dağıtım ağı vasıtasıyla alınan ve ışıyan elektromagnetik enerji olduğunu unutmamak gerekir. İletimle bağışıklık sorunları,

öncelikle voltajdaki dalgalanmaları veya bu voltajı alan ürünün olduğu yerde güç dağıtım ağı vasıtasıyla oluşmaktadır. Bu deneyin amacı, test altındaki cihazın normal kullanımda bağlı kabloları üzerinden maruz kalabileceği elektromanyetik enerjiye karşı tepkisinin kontrol edilmesidir. Bu deneyin kapsamında en az bir iletim kablosu bulunan elektrik/elektronik cihazların maruz kalabileceği ortak mod RF enerjinin 150 kHz - 80 MHz frekans bölgesindeki aralığını kapsar (DAN boyutu $< \lambda/4$) üst frekans, numunenin ve kabloların boyutuna göre 230 MHz olabilir ve ortak modda yapılır. (Akım yönü ortak referans toprağa göre eşit) Ürün standardına göre deney seviyeleri; 1V, 3V, 10V olarak uygulanır, uygulanan frekans band aralığı, 150 kHz–80 MHz, test esnasında uygulanan RF sinyali 1kHz % 80 genlik modülasyonludur (AM). Deneye başlamadan önce, 1 kHz lik ses sinyalinin cihaza tanıtılması amacıyla yapay ağız yardımıyla her cihaz için uplink ve downlink değerleri tespit edilir.

Işınım ile yayılım deneyi, DAN, yarı yansız odada (SAC) yerden 80 cm yükseklikte yalıtkan bir masa üzerine konulur. Masa en yüksek ışınım seviyesini belirlemek için 360 derece döndürülme yeteneğine sahiptir. Ölçüm, numune cihaz ile alıcı anten arası uzaklık 10 metre olacak şekilde 30 MHz - 1000 MHz frekans aralığında önce tepe alıcısıyla tüm band taranarak sonra şüphelenilen frekanslar için sözde-tepe (Quasi-peak) alıcısı kullanılarak yapılır. Bu noktalar için en kötü yayılım değerini tespit etmek için masa 360 derece döndürüldüğü gibi anten yüksekliği de değiştirilebilmektedir. GSM Mobil telefon cihazları B sınıfı cihaz kategorisindedir. A ve B sınıfı için ışınım ile yayılım sınır değerleri standarda göre çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.6. A/B sınıfı cihazlar için ışınım ile yayılım ölçüm sınır değerleri

FREKANS	A sınıfı (10 m'de)	B sınıfı (10 m'de)
	dB μ V/m	dB μ V/m
30-230	40	30
230-1000	47	37

Işınım ile bağımsızlık deneyi, frekans Aralığı, 80 MHz–1000 MHz (Cihaza özel standart varsa, o standarttaki frekans aralığı uygulanır). Deney tam yansız test odasında

(FAC) gerçekleştirilmiştir. Deney süresince, yukarı bağlantı (UL-Uplink) ve aşağı bağlantı (DL-Downlink) için ses kalibrasyon seviyesi eşik değeri kalibrasyonunda elde edilen değer 35 dB altındadır. RxQuality parametresi link kalitesini gösteren bir parametredir. Eşik seviyesi 3'tür. Bununla birlikte GSM mobil telefonlar için iletim ve ışınlama deneyleri standartlarda belirtildiği şekilde anlatıldıktan sonra, EMC açısından uygun bir GSM mobil telefon için iletim ve ışınlama deneyleri uygulanmış ve deney sonucunda cihazın iletim ve ışınlama deneyleri yapılmıştır. Buna karşın EMC açısından uygun olmayan bir GSM mobil telefon cihazında aynı deneylere tabi tutulmuş ancak bu cihazın iletimle yayılım ve ışınlama yayılım deney sonuçlarının uygun olmadığı deney sonuçlarında görülmektedir. Burada önemli bir husus hem uygun hemde uygun olmayan GSM mobil cihazında 900 ve 1800 MHz frekans bandları ölçümlerinde her dört deney için aynı sonuç elde edilmiştir. GSM mobil cihazı 900 MHz frekans bandındaki deney sonuçları ile 1800 MHz frekans bandındaki deney sonuçlarının birbirine çok yakındır. Örneğin uygun olmayan cihaz numunesinde iletimle yayılım deneyi için cihaz 900 MHz ve 1800 MHz frekans bandlarının ikisinde de limitleri geçmiştir. Deneysel bulgularla ilgili diğer bir husus uygun olmayan cihazın hem iletim hem de ışınlama yayılım deneylerinden başarısız olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak cihazın şarj konumunda iken oluşturduğu gürültü seviyesinin limit değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak cihazın üretim aşamasında bu tezin 4 üncü bölümünde elektromanyetik gürültü azaltma tekniklerinin dikkate alınmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, ürün tasarımı ve üretim aşamasında, ürünün iyi bir kuplajlama yolu, iyi bir filtre kullanımı, iyi bir topraklama, iyi bir ekranlama yapılması ve kablo, konektör bağlantılarının dikkate alınması EMC açısından çok önemli hususlardır. Enterferansın azaltılmasına ilişkin çözüm, kaynakta, yolda ve alıcıda olabilir. Enterferansların çözümü için,

- Kaynaktaki gürültüyü ortadan kaldırmak veya azaltmak (dekuplaj, ekranlama, düşük gürültülü tasarım, vb.)
- Kuplaj yolunu ortadan kaldırmak ya da zayıflatmak (açıklık, ekranlama, filtreleme, yeniden-yön verme, ayırma, vb.)

- Mağdurun bağışıklığını arttırmak (dekuplaj, ekranlama, filtreleme, yüksek bağışıklığa sahip tasarım, vb.)

gibi tedbirler alınmasının EMC açısından önemi büyüktür.

Bu sonuçlar dorultusunda, piyasaya arz edilen her türlü elektriksel ve elektronik sistem ve cihazların (her türlü elektrikli ev aletleri, bilgi teknolojileri cihazları, bilgisayarlar, uydu sistemleri, AC ve DC motor ve jeneratörler, DECT ve kablolu telefonlar v.b.) EMC açısından istenilen standartlarda olması kullanıcılar açısından önemlidir. Evlerimizde ve işyerlerimizde kullandığımız her türlü elektrikli ve elektronik sistem ve cihazların mevcut çalışma ortamlarında birbirlerini etkilememeleri yani birbirlerine girişim oluşturmaması için EMC açısından alınacak önlemler hakkında bu tez yardımcı bir kaynak olacaktır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fizik Bölümü “Bölüm III.2 Elektrik Alanı”
<http://sciart.karaelmas.edu.tr/bolumler/fizik/Ders%20Notlari/E02.pdf> (2001).
2. İnternet: Orhun Ö., Prof., Dr., Tanışlı M., Yrd., Doç.,Dr., “Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Bölüm 11. Elektromagnetik Dalgalar” 177-182,
<http://www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/ioltp/2279/unite11.pdf> (2008).
3. İnternet: Çınar K., Bilim ve Teknik, “Elektromanyetik Alan”
<http://www.biyoloji.egitim.yyu.edu.tr/mkpdf/ea06.pdf> (2006)
4. Bakmaz H., “Piyasa Gözetimi ve Denetimi Kapsamında Elektromanyetik Uyumluluk Deneylerinin Telekomünikasyon Cihazlarına Uygulanması, Avrupa İncelemeleri ve Türkiye İçin Öneriler”, Uzmanlık Tezi, **Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu**, 1-6, 23-27, 29-48, (2009)
5. internet: Elektromanyetik Uyumluluk Test/Ölçüleri – II: Örnekler
[www3.dogus.edu.tr/lsevgi/LSevgi/E&O/EO .pdf](http://www3.dogus.edu.tr/lsevgi/LSevgi/E&O/EO.pdf) (2004).
6. İnternet: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü “Fizik ders notları, Bölüm 30, Manyetik Alan Kaynakları”
<http://www.gyte.edu.tr/dosya/218/Dersnot/fiz122/ders9.pdf>
7. İnternet: Sevgi L., “Elektromanyetik Uyumluluk ve Elektromanyetik Kirlilik”, Ankara, <http://www3.dogus.edu.tr/lsevgi/> (2008).
8. Arı N, Özen Ş, “Elektromanyetik Uyumluluk”, **Palme Yayıncılık**, 1-5, 23-32, 35-80, 137-146, 170-251, (2008).
9. Clayton, R., P., “Introduction to Electromagnetic Compatibility” **John Wiley & Sons, Inc.**, 1-37, 49-118, 142-151, 299-550, 713-850, 871-930, (2006).
10. İnternet: Michigan State University Research Groups “ Electromagnetic course notes”
www.egr.msu.edu/em/research/goali/notes/ (2008).
11. TS EN 61000-4-2: Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-2: Deney ve Ölçme Teknikleri -Elektrostatik boşalma bağışıklık deneyi, **TSE**, 1-4, (2005).
12. Ott, H. W., “Electromagnetic Compatibility Engineering”, **A John Wiley & Sons, Inc.**, Publication, 3-18, 30-40, 44-98, 106-155, 158-265, 464-658, 688-728, (2009).

13. Griffiths, J.,D./Çev:Ünal, B., Electromagnetik Teori, *Gazi Kitabevi*, 58-105, 165-199, 208-286, 374-420, (2005).
14. Taylor, C.D., Satterwhite, R.S., ve Harrison, C.W., “The Response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field”, *IEEE Trans.*, AP-13, 987-989, (1965).
15. Hoefl, L.O., ve Hofstra, J.S., “Measured Electromagnetic shielding Performance of commonly Used Cables and Connectors”, *IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility*, EMC-30, 260-275, (1988).
16. Vance, E.F., “Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields”, *IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility*, EMC-17, 71-77, (1975).
17. İnternet: “Electromagnetic Compatibility Research at NIST”, Boulder, www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/.../summer02/nist.html (2002).
18. TS EN 61000-3-2 : Elektromanyetik Uyumluluk (EMU) - Bölüm 3-2: sınır değerleri – Harmonik akım yayınları için sınır değerleri (Donanım giriş akımı faz başına 16 A), *TSE*, 13-33, (2006).
19. Kodali, V., P., “Engineering Electromagnetic Compatibility”, *IEEE Press*, 1-8, 17-60, 81-157, 196-289, (1996).
20. Morrison, R., “The Fields of Electronics /Understanding Electronics Using Basic Physics” , *John Wiley& Sons, Inc.*,1-85, 101-127, 129-148, (2002).
21. İnternet: ETS-Lindgren, “Common EMC Measurement Terms” www.ets-lindgren.com (2011)
22. Cheng, K., D., /Çev:Köksal A.,Saka, B., “Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri”, *Palme Yayıncılık*, 72-88, 150-189, 229-330, (2006).
23. İnternet: Sevgi L., “EM Uyumluluk Test ve Ölçüleri”, EMO, <http://www3.dogus.edu.tr/lsevgi> , (2004).
24. TS EN 61000-4-11: Bölüm 4-11: Deney ve ölçme teknikleri - Gerilim çukurları, kısa kesintiler ve gerilim değişimleri ile ilgili bağışıklık Deneyleri, 1-3, (2005)
25. İnternet: Edminister A.,J./Çev. Aydemir T.,M., Afacan E., Nakiboğlu C.,K., “ELEKTRİK VE MANYETİZMA” www.fizikevreni.com/ElektrikveManyetizma.pdf (2000).
26. Sevgi, L., “Electromanyetik Uyumluluk - Electromanyetik Kirlilik” *EMO, Elektrik Mühendisleri Odası ISBN No: 975 - 395 - 396 -8*, 17-42, 57-104, 126-209, 259-274, (2000).

27. TS EN 61000-4-4:Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-4: Deney ve Ölçme Teknikleri -Elektriksel Hızlı Geçici Rejime / Ani Darbeye Karşı Bağışıklık Deneyleri, *TSE*, 1-4, (2006)
28. Lattarulo F.,“Electromagnetic Compatibility in Power Systems” *Elsevier*, 1st edition, 1-40, 79-107, 165-188, 191-225, (2007).
29. Schmitt, R.,“Electromagnetics Explained/A Handbook For Wireless/RF, EMC, and High-Speed Electronics”, *Elsevier*, 25-26, 51-59,75-87,153-303, (2002).
30. İnternet: Sevgi, L., Endüstriyel & Otomasyon, “EMC ve Devre Elemanları”, <http://www3.dogus.edu.tr/lsevgi> (2005).
31. İnternet: Sevgi, L., Endüstriyel & Otomasyon, “EMC ve antenler”, <http://www3.dogus.edu.tr/lsevgi> (2005).
32. TS EN 61000-3-3: Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 3-3: Sınır değerler–Beyan akımı faz başına 16 A (dahil) olan ve şartlı bağlantıya tabii ve şartlı bağlantıya tabii olmayan cihazlar için alçak gerilim besleme s istemlerindeki gerilim değışiklikleri, dalgalanmaları ve kırpışma sınırları, *TSE*, 1-5, (2005).
33. Xingcun, C.,T., “Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding”, *CRC Press*, 1-7, 11-30, 37-65, 67-105, 237-312, (2009)
34. Sevgi, L., “Elektromanyetik Problemler ve Sayısal Yöntemler” *Raytheon Systems Canada Limited*, 1-7,75-110, (1999)
35. TS EN 61000-4-5: Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-5: Deney ve Ölçme Teknikleri -Ani Yükselmelere Karşı Bağışıklık Deneyi,1-3, (2004)
36. İnternet: “Rohde & Schwarz International” <http://www.rohde-schwarz.com/en/search/query=emc+antennas> (2010).
37. Ünlerşen, F., M., “PIC Tabanlı Elektronik Devreler için EMC Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri*, Konya, 5-12, 14-25, 30-35, (2004).
38. Kitchen, R., “RF&Microwave Radiation Safety”, Second edition, *Butterworth-Heineman*,1-78,129-172,317-392,(2001)
39. Özdemir R.A., “Ankara, İstanbul ve İzmir Şehirlerinde Elektromanyetik Kirlilik Haritasının Hazırlanması ve Elektromanyetik Kirliliğın Azaltılması Yönünde Öneriler”, Uzmanlık Tezi, *Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu*, 4-10, 24-28, (2004).
40. Williams, T., “EMC for Product Designers”,Fourth Edition, *Elsevier Ltd.*, 1-19,23-52,65-98,118-286,340-378,403-428, (2007).

41. Montrose, I.,M., Nakauchi, M.,E., “Testing For EMC Compliance/Approaches and Techniques”, *AJohn Wiley & Sons Inc., Publication*, 17-46, 77-112,122-156, 157-250, (2004).
42. Christopoulos, C.,“Principles and Techniques of Electrmagnetic Compatibility” Second Edition, *CRC Press Taylor & Francis Group.*, 1-15,34-39,111-139,291-342,371-397,(2007).
43. EN 301 489-1 V1.6.1, “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements” Candidate Harmonized European Standard (Telecommunications series), *ETSI*, 5-41,(2005).
44. EN 301 489-7 V1.3.1,“Electromagnetic compatibility and radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 7: Specific conditions for mobile and portable radio and ancillary equipment of digital cellular radio telecommunications systems (GSM and DCS), Candidate Harmonized European Standard, *ETSI*, 5-21,(2005).
45. Döner, H., “Radiated Emission EMC Testing Using Full Anechoic Chambers” Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri*, İzmir, 1-3,20-73, 77-88, (2006)
46. Türk standardı TS EN 55022, “Bilgi Teknolojisi Cihazları-Radyo Bozulma Karakteristikleri- Sınır Değerleri ve Ölçme Metodları”,*TSE*, (2009).
47. Türk standardı TS EN 55022,“Bilgi Teknolojisi Cihazları-Radyo Bozulma Karakteristikleri- Sınır Değerleri ve Ölçme Metodları”, *TSE*, (2005)
48. Türk standardı TS EN 55024, “Bilgi Teknolojisi Cihazları-Bağışıklık özellikleri-Sınır Değerleri ve Ölçme Metodları”,*TSE*,1-32, (2004).
49. Türk Standardı TS EN 61000-4-3 “Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-3:Deney ve Ölçme Teknikleri-Işıyan, Radyo Frekans, Elektromanyetik Alan, Bağışıklık Deneyi”,*TSE*, 7-111,(2006).
50. Türk Standardı, TS EN 61000-4-6, “Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-6:Deney ve Ölçme Teknikleri –Radyo Frekans Alanlar Tarafından İndüklenen İletilen Bozulmalara Karşı Bağışıklık”,*TSE*, 1-36,(2005).
51. İnternet: Bilgi Teknolojileri İletişim Kurumu,
<http://www.btk.gov.tr/tdspgd/laboratuvar/pgdlabanasayfa.htm> (2008)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KARABULUT, Tuğfan
 Uyuğu : T.C.
 Medeni hali : Evli
 Doğum tarihi ve yeri : 02.11.1965 Ankara
 Telefon : 0 (312) 321 25 27
 GSM : 0 (536) 235 02 74
 e-mail : tkarabulut@btk.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü	1989
Lise	Ankara Demetevler Lisesi	1982

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1990-1998	Milli Savunma Bakanlığı	Mühendis
1998-2000	Ulaştırma Bakanlığı Telsiz Genel Md.lüğü	Mühendis
2000-2008	Telekomünikasyon Kurumu	Mühendis
2008-	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Kitap okuma, Bilgisayar