
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BİKONİK ANTEN VE ELEKTRİK ALAN ÜRETECİ TARAFINDAN RS103 TESTİNDE OLUŞTURULAN ELEKTRİK ALAN SEVİYELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Burak DEMİRDÖĞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burak DEMİRDÖĞEN

25/07/2022

BİKONİK ANTEN VE ELEKTRİK ALAN ÜRETECİ TARAFINDAN RS103 TESTİNDE OLUŞTURULAN ELEKTRİK ALAN SEVİYELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak DEMİRDÖĞEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Bu tezin amacı, askeri sistemlerin elektromanyetik uyumluluk karakteristiğini belirlemede geçerli olan RS103 testini 30 MHz – 100 MHz frekans aralığında iki farklı anten ile gerçekleştirmek ve oluşturulan elektrik alan seviyesi farklarını ortaya koymaktır. Bu amaçla elektrik alan üreteci ve bikonik antenin ekranlı ve ekransız bir kablo üzerinde indüklediği akımlar karşılaştırılmıştır. Aynı elektrik alan seviyesi oluşturulduğunda, kablolar üzerine indüklenen akımların farklı genlikte olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçların elektronik bir cihazdaki nicel etkilerini görebilmek için dijital bir termometre her iki ışıma aracı ile RS103 testine tabi tutulmuştur. Elektrik alan üreteci ve bikonik anten ile dijital termometre üzerinde aynı elektrik alan seviyeleri oluşturulsa da deneyler ışıma saçılmaları nedeniyle termometrenin farklı davranışlar sergilediğini göstermiştir. Laboratuvarlar arasında, tercih ettikleri anten tipine (elektrik alan üreteci ve bikonik) bağlı olarak 30 MHz – 100 MHz frekans aralığında RS103 testine tabi tutulan cihazda farklı performans kayıpları oluşabilir. Bu durum, cihazın bir EMC laboratuvarında testten geçmesini sağlarken diğerinde cihazın başarısız olmasına yol açabilir.

Bilim Kodu : 90516
Anahtar Kelimeler : RS103, bikonik anten, elektrik alan üreteci
Sayfa Adedi : 53
Danışman : Prof. Dr. Erkan AFACAN

COMPARISON OF ELECTRIC FIELD STRENGTH IN RS103 TEST GENERATED BY THE BICONICAL ANTENNA AND E-FIELD GENERATOR

(M. Sc. Thesis)

Burak DEMİRDÖĞEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

The aim of this thesis is to conduct RS103 test between 30 MHz – 100 MHz for determining military equipment EMC (Electromagnetic Compatibility) characteristics and to compare electric field strength generated by the electric field generator and biconical antenna. For his purpose, the current levels induced on the shielded and unshielded cable by both antennas were compared. When the same electric field levels were generated, it was shown that induced current levels on cables differed. To investigate the quantitative effects of the obtained results on an electronic device, a digital thermometer was subjected to RS103 test with both radiation sources. Although the same electric field levels were generated on the digital thermometer by the electric field generator and biconical antenna, experimental setups revealed that the thermometer malfunctioned due to radiation scattering. Different malfunction levels can be observed between the laboratories related to their type of antenna preferences (e-field generator and biconical) during RS103 test between the 30 MHz – 100 MHz. This leads to test pass of a device at an EMC test laboratory while it causes the same device's failure at another EMC test laboratory.

Science Code : 90516
Key Words : RS103, biconical antenna, electric field generator
Page Number : 53
Co-Supervisor : Prof. Dr. Erkan AFACAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecinde sabrını ve akademik desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Erkan AFACAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Araştırma döneminde bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Osman ŞEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitiminin her aşamasında beni teşvik eden, bana inanan, sabır ve özveri ile bana yol gösteren sevgili ablam Doç. Dr. Betül DEMİRDÖĞEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez araştırmamı destekleyerek altyapı desteğinden yararlanma fırsatı sunan, akademik teşvik konusunda gösterdiği özen nedeniyle üyesi olmaktan gurur duyduğum Roketsan'a teşekkür ederim.

En içten teşekkürlerimi bu uzun soluklu çalışmada beni yalnız bırakmayan ve ferdi olmaktan gurur duyduğum sevgili DEMİRDÖĞEN ailesine sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..... iv

ABSTRACT…… v

TEŞEKKÜR……..…….. vi

İÇİNDEKİLER……..... ... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ……. viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ……..... ix

SİMGELER VE KISALTMALAR……. xv

1. GİRİŞ……..... 1

2. ELEKTROMANYETİK ALAN VE MAXWELL DENKLEMLER…….... 5

2.1. Faraday Yasası……..... 5

2.2. Ampere Yasası……..... 6

2.3. Gauss Yasası……. 7

2.4. Manyetizma için Gauss Yasası……. 7

3. İLETİM HATTI VE ELEKTRİK ALAN ÜRETECİ……... 9

3.1. Karakteristik Empedans…… 10

3.2. Yayılım Sabiti……... 11

3.3. İletim Hattı Hesaplamaları…… 12

3.3.1. Rasgele bir yük ile sonlandırılan hat……..... 12

3.3.2. Z_0 yükü ile sonlandırılan hat……..... 13

3.4. Elektrik Alan Üreteci…… 13

3.5. Bikonik Antenler……... 16

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI…… 21

4.1. Genel Deney Düzeneği……..... 21

Sayfa

4.2. Deney Ekipmanları……... 22

4.3. Tasarlanan Deneye Özel Düzenek ve Ekipman Gereksinimi……..……. 23

4.4. Kablo Üzerinde İndüklenen Akımın Hesaplanması……. 24

4.4.1. Ölçüm birimleri dönüşümü…… 25

4.4.2. Örnek bir hesaplama……... 25

4.5. Deney Sonuçları…… 28

4.5.1. Taban gürültüsü ölçümü……. 29

4.5.2. Üç prob yöntemi……. 33

4.5.3. Ekranlı kablo ile RS103 testi……..... 35

4.5.4. Dijital termometre deneyi…….. 38

5. SONUÇ VE ÖNERİLER……..... 47

KAYNAKLAR……..... 51

ÖZGEÇMİŞ……. 53

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Işınım yolu ile bağışıklık deneyi ekipmanları……. 22

Çizelge 4.2. Akım ölçümü için kullanılan ekipmanlar…… 24

Çizelge 4.3.15 V/m E-alan altında EMI alıcı kablosunda indüklenen akım seviyeleri (yatay)……... 31

Çizelge 4.4.15 V/m E-alan altında EMI alıcı kablosunda indüklenen akım seviyeleri (dikey)……... 32

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Bir iletim hattı ve matematik modeli……..... 9

Şekil 3.2. İki hatlı bir iletim hattının alan yayılım çizgileri [6]……... 12

Şekil 3.3. Z_R yükü ile sonlandırılmış bir hat…… 12

Şekil 3.4. Elektrik alan üreteci (Amplifier Research)…….. 15

Şekil 3.5. Elektrik alan üreteci eşdeğer devre şeması…….. 15

Şekil 3.6. Konik antenler [10]…….. 16

Şekil 3.7. Bikonik Anten: (a) Bikonik antenin TEM modu, (b) bikonik anten besleme noktası detayları, (c) x-y düzleminde ışıma deseni, (d) y-z düzleminde ışıma deseni [9]…..……..... 17

Şekil 3.8. Bikonik Anten (Schwarzbeck)…… 20

Şekil 4.1. Elektrik alan üreteci yatay kutuplanma yerleşim bölgeleri……. 22

Şekil 4.2. Deney düzeneği ve ölçüm ekipmanları yerleşimi……... 23

Şekil 4.3. Okuma kayıplarının hesaplanması…….. 26

Şekil 4.4. Akım probu transfer empedansı……..... 27

Şekil 4.5. Akım orobu RF kablosuna yerleştirilmiş ferit bloğu ve sonlandırıcı……..... 30

Şekil 4.6. Elektrik alan okuma sensörü ve frekans cevabı…….. 33

Şekil 4.7. Prob yerleşim bölgeleri…… 34

Şekil 4.8. E-alan üreteci yatay kutuplanma elektrik alan değerleri……. 35

Şekil 4.9. Ekranlı kablo ile kurulan deney düzeneği…… 36

Şekil 4.10. Ekranlı kablo dikey kutuplanma RS103 deneyi……. 37

Şekil 4.11. Ekranlı kabloda oluşan akım seviyeleri (Dikey kutuplanma)……. 37

Şekil 4.12. Ekranlı kabloda oluşan akım seviyeleri (Yatay kutuplanma)……. 38

Şekil 4.13. Omega HX93DA dijital termometre (DAC)…….. 39

Şekil 4.14. Dijital termometre ışınım yolu ile bağışıklık deneyi düzeneği……... 40

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.15. Dijital termometre RS103 deney sonucu (dikey kutuplanma)……..... 41

Şekil 4.16. Dijital termometre güç kablosu üzerinde indüklenen akım (dikey kutuplanma)……..…… 42

Şekil 4.17. Elektrik alan üreteci yatay kutuplanma deney düzeneği……... 43

Şekil 4.18. Bikonik anten yatay kutuplanma deney düzeneği……. 43

Şekil 4.19. Dijital termometre RS103 deney sonucu (yatay kutuplanma)…….. 44

Şekil 4.20. RS103 deneyi esnasında dijital termometre davranışı (bikonik anten)……. 45

Şekil 4.21. RS103 deneyi esnasında dijital termometre davranışı (elektrik alan üreteci)... 45

Şekil 4.22. Dijital termometre güç kablosu üzerinde indüklenen akım (yatay kutuplanma)…..…… 46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Amper
B	Manyetik akı yoğunluğu
c	Işık hızı
C	Coulomb
D	Elektriksel akı yoğunluğu
dB	Desibel
E	Elektrik alan şiddeti
f	Frekans
G	Giga, 10^9
H	Manyetik alan şiddeti
Hz	Hertz
J	Joule
K	Kilo, 10^3
m	Metre
M	Mega, 10^6
rad	Radyan
s	Saniye
S	Siemens
V	Volt
μ	Manyetik geçirgenlik
σ	İletkenlik
γ	Yayılma sabiti
λ	Dalga boyu
Ω	Ohm

Kısaltmalar	Açıklamalar
BALUN	Balanced-Unbalanced
DAC	Deney Altındaki Cihaz
DC	Direct Current
EMI	Electromagnetic Interference
EMC	Electromagnetic Compatibility
HF	High Frequency
LISN	Line Impedance Stabilization Network
RF	Radio Frequency
RS	Radiated Susceptibility
SİHA	Silahlı İnsansız Hava Aracı
TV	Televizyon
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
VHF	Very High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
vb	ve benzeri

1. GİRİŞ

Askeri alana hizmet etmek amacıyla geliştirilen tüm elektronik sistemler hava, kara ya da deniz platformuna entegre edilmektedir. Bu platformlar; savaş yeteneği olan uçak, helikopter, silahlı insansız hava araçları, gemi, denizaltı, kara hava savunma sistemleri ve taktik zırhlı araçlardan oluşmaktadır.

Askeri araçların üzerlerinde, hedef tespit etmek, irtifa ölçmek, elektronik karşı tedbir almak ve kablosuz haberleşme yapmak gibi görevlerini yerine getirebilmek amacı ile geniş bir elektromanyetik spektrumda çalışan almaç ve göndermeçler yer almaktadır. Bu sistemler elektronik taarruz, koruma ve destek amaçlı kullanılmaktadır. Bununla birlikte savaş ortamında görev yapan düşman askeri araçları, karşı tedbir almak için karıştırma amaçlı elektromanyetik enerji veya yönlendirilmiş enerji silahlarını kullanmaktadırlar.

Bir savaş uçağı ele alınırsa; üzerinde bilgisayar, yer tespit sistemi, irtifa ölçer, hassas ivme ve dönü ölçere sahip mühimmat vb. elektronik sistemler bulundurmaktadır. Savaş uçağının görev yapabilme ve emniyetli kalabilme yeteneği, üzerindeki elektronik cihazların beklenen performansını yerine getirebilmesine bağlıdır.

Uçak üzerinde bulunan tüm elektronik sistemler, tehdit unsuru olan elektromanyetik karıştırıcılar, hedef üstü göndermeç sistemleri, karadan ve denizden havaya yönlendirilmiş radar vb. sistemler elektromanyetik gürültü oluşturmaktadır. Hava aracının sahip olduğu hassas elektronik sistemler, elektromanyetik gürültü altında görevini yerine getirecek düzeyde çalışabilmelidir.

Bir sistemin bulunduğu ortamdaki elektromanyetik tehditler altında beklenen performansı yerine getirebilmesi elektromanyetik uyumluluk (EMC) olarak tanımlanmaktadır. Bir askeri platforma entegre edilmek üzere geliştirilen elektronik sistemler tasarım doğrulama aşamasında laboratuvar ortamında elektromanyetik uyumluluk testlerine tabi tutulurlar. Ortamdaki ışınımla yayınım tehditleri simule edilerek elektronik bileşenin bu tehlike altında çalışabildiğini gösterebilmesi gerekmektedir.

Askeri cihazların elektromanyetik uyumluluk testleri MIL-STD-461G standardına göre gerçekleştirilmektedir. Standart, ışınım yollu bağışıklık testlerini modellemek amacıyla belirli

frekans aralığında manyetik alan ve elektrik alan oluşturulup askeri elektronik bileşenlere belirlenen normlar içerisinde uygulanmasını işaret etmektedir.

Bu tezde, MIL-STD-461G standardında tanımlı olan ışıma yollu bağışıklık testlerinden RS103 (Radiated Susceptibility) ele alınmıştır [1]. Testin, platforma göre elektrik alan seviyesi ve uygulama frekanslarında farklılık göstermekle birlikte 2 MHz – 40 GHz arasında uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

RS103 testinin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi için;

- sinyal üreteci,
- uygun frekans aralıklarında görev yapabilen RF güç yükselteci,
- güç seviyelerini belirli bir desende deney altındaki cihaza yayabilecek tasarıma sahip anten veya elektrik alan üreteci,
- antenin 1 metre uzaklıkta oluşturabildiği elektrik alan seviyesini ölçmeye yarayan elektrik alan probu,
- RF sinyal iletiminde güç kaybı yaşanmaması için düşük kayıplı RF kablolar kullanılmaktadır.

RS103 testleri yarı yansımasız test odasında gerçekleştirilir. Burada amaç deney altındaki cihazın sadece belirli frekansta üretilen ışınıma maruz kalmasını sağlamaktır. Laboratuvarın, dış dünya elektromanyetik tehditlerinden izole olması Faraday kafesi mantığı ile sağlanmış olmaktadır. Laboratuvarın yarı yansımasız olması ise, antenden yapılan ışımanın test hücresi duvarlarından olası yansımalarının önüne geçmektedir.

RS103, geniş bir frekans bandında gerçekleştirilmektedir. Dolayısı ile tek bir anten ile tüm bantta ışınımla yayınım yapılamayacağından birden fazla anten gerekmektedir.

MIL-STD-461G standardı içerisinde RS103 testinde kullanılacak anten çeşitleri ve özellikleri tanımlanmamaktadır. Sadece deney altındaki cihazın maruz bırakılacağı elektrik alan seviyeleri, test masası üzerine yerleşimi, kablo oryantasyonu ve antenin deney altındaki cihazdan uzaklığı belirtilmiştir. Testi gerçekleştirmek için kullanılan anten tercihleri test laboratuvarlarına bırakılmıştır. Bu tercihin ortaya çıkaracağı ölçüm sonucu farklılıkları konusunda ise yapılan araştırmalar yapılan farklı tercihleri ortaya koymaktadır.

Deneylerde kullanılan antenlerin üretici dokümanlarında verilen 3dB huzme genişliklerinin tekrar karakterize edilmeden direkt kullanılmasının deney sonucunu etkilediğini çalışmalar göstermektedir [2].

VHF bandında kullanılan EMC test antenleri standart bir tasarıma sahip olmamalarının yanı sıra, laboratuvarların ölçülerine istinaden özel olarak üretilebilmektedirler. Tasarlanan antenlerin kol uzunluklarının değiştirilmesinin deney altındaki cihaz üzerinde oluşturulan elektrik alanın homojenliğini etkilediği de yapılan çalışmalarla göstermiştir [3].

Deney yöntemi aynı olsa da kullanılan farklı antenler, deney altındaki cihazın uygulanan elektrik alan altındaki davranışlarında farklılık oluşturabilmektedir.

MIL-STD-461G standardında tanımlı RS103 testi kurgusuna uygun olarak kurulan bir düzenek ile 30 – 100 MHz frekans aralığında elektrik alan üreteci ve bikonik antenin yatay ve dikey kutuplanmada ekranlı ve ekransız bir kablo üzerinde indüklediği akım seviyeleri karşılaştırılmıştır. Ekransız bir kabloya sahip olan dijital termometre ışıma yollu elektrik alana elektrik alan üreteci ve bikonik antenle maruz bırakılarak etkilenme seviyeleri arasındaki farklar ortaya koyulmuştur.

2. ELEKTROMANYETİK ALAN VE MAXWELL DENKLEMLERİ

Basit bir ifade ile elektromanyetik, durgun haldeki ve hareket halindeki elektrik yüklerinin etkilerinin incelenmesidir. Pozitif ve negatif olmak üzere iki tür yük bulunmaktadır. Her iki polaritedeki yükler elektrik alan şiddetinin (E veya $\vec{E}$) kaynağıdır. Hareketli yükler daha fazla manyetik alan şiddetine (H veya $\vec{H}$) yol açabilecek bir akım üretir. Zamanla değişen elektrik alana her zaman bir manyetik alan eşlik eder. Bunun tam tersi durum da geçerlidir [4, 5].

Elektrik alan ve manyetik alan, genliği ve yönü olan vektörel büyüklüklerdir. Elektrik ve manyetik alanın, yüklerin ve akımların ilişkileri fiziksel yasalara tabidir. Farklı bilim insanları tarafından elektrik ve manyetizma arasında kurulan bağıntılar Maxwell tarafından derlenerek dört yasa ile açıklamıştır. Değişken manyetik alanın elektrik alan ürettiğini Faraday yasası ile, değişken manyetik alanların elektrik alan ürettiğini Ampere yasası ile, elektrik alanın elektrik yükleri tarafından oluşturulduğunu Gauss yasası ile ve manyetik yükün manyetik alanın kaynağı olmadığını manyetizma için Gauss yasası ile açıklamıştır.

2.1. Faraday Yasası

Faraday yasası, zamanla değişen bir manyetik alanın bir elektrik alan oluşturduğunu söylemektedir [4, 5]. Faraday yasasını ifade eden matematiksel denklem şu şekildedir:

Diferansiyel form:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.1}$$

İntegral form:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \tag{2.2}$$

eşitlikte,

$\vec{E}$: elektrik alan şiddeti (V/m)

$\vec{B}$: manyetik akı yoğunluğu (Tesla veya Weber/m^2)

$d\vec{l}$: S yüzeyini çevreleyen teğetsel diferansiyel vektör elemanı (metre)

ϕ : manyetik akı (Weber)

olarak verilmektedir.

2.2. Ampere Yasası

Bu yasa, zamanla değişmeyen akım taşıyan bir iletkenin oluşturduğu manyetik alanları betimler [4, 5].

Diferansiyel form:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2.3}$$

İntegral form:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \oint_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \tag{2.4}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Burada,

$\vec{H}$: Manyetik alan şiddeti (Amper/metre)

$\vec{J}$: İletkenlik akım yoğunluğu (Amper/m^2)

$\vec{D}$: Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m^2)

$\vec{B}$: Manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indüksiyon (Tesla veya Weber/m^2)

$d\vec{l}$: S yüzeyini çevreleyen teğetsel diferansiyel vektör elemanı (metre)

I : Elektrik akımı (Amper)

σ : İletkenlik katsayısı (Siemens/metre)

olarak verilmektedir.

2.3. Gauss Yasası

Elektrik alan ve onu oluşturan bileşenler arasındaki ilişkiyi açıklayan yasadır. Gauss yasası kapalı yüzeyin bir noktasındaki elektrik alan ile yüzeyi çevreleyen toplam yük arasındaki ilişkiyi diferansiyel ve integral form olarak şu şekilde açıklamaktadır [4, 5]:

Diferansiyel form:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{2.5}$$

İntegral form:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{2.6}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \tag{2.7}$$

Burada,

$\vec{D}$: Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m^2)
ρ : Elektrik yük yoğunluğu (Coulomb/m^3)
$d\vec{s}$: S yüzeyinin sonsuz küçük diferansiyel vektör elemanı (m^2)
ε_0 : Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği (8,854187817x10^{-12} $C^2N^{-1}m^{-2}$)
$\vec{E}$: Elektrik alan şiddeti (Volt/metre)
Q : Yük miktarı (Coulomb)

olarak verilmektedir.

2.4. Manyetizma için Gauss Yasası

Bu yasa, kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akının sıfır olduğunu, yani manyetik yükün olmadığını ifade etmektedir. Bu durum, kapalı bir hacme giren manyetik alan çizgilerinin kapalı alandan çıkan manyetik alan çizgilerine eşit olduğunu göstermektedir [4, 5].

Diferansiyel form:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2.8}$$

İntegral form:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \tag{2.9}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \tag{2.10}$$

Burada,

$\vec{B}$: manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indüksiyon (Tesla veya Weber/m^2)

$d\vec{A}$: sonsuz küçük A yüzeyinin diferansiyel vektör elemanı (m^2)

μ_0 : Serbest uzayın manyetik geçirgenliği ($4\pi x10^{-7} NA^{-2}$)

$\vec{H}$: Manyetik alan şiddeti (Amper/metre)

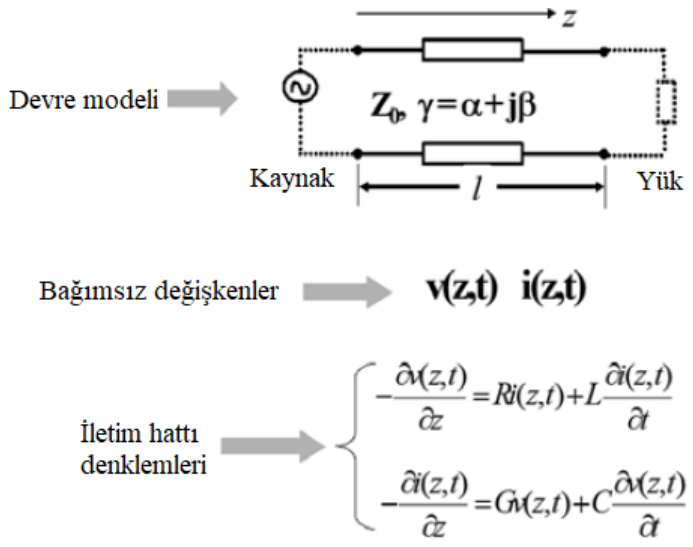
olarak verilmektedir.

3. İLETİM HATTI VE ELEKTRİK ALAN ÜRETECİ

Bir iletim hattı bir dizi uzun ve paralel hatlardan öte dağıtık parametreli fiziksel bir sistemdir. İletim hatları, elektrik enerjisi ve haberleşme sinyallerini bir noktadan diğer bir noktaya iletmek için kullanılmaktadır. İletim hattı, bir kaynağı bir yüke bağlar. Kaynak ve yükü; bir verici ve anten, TV veya radyo anteni ile alıcı sistem ile örneklendirebiliriz. Karakteristik parametreleri ve miktarları ile birlikte iki hatlı bir iletim hattı modeli Şekil 3.1'de verilmiştir.

Bu iletim hattı modelinde kaynak ve yük; güç kaynağı ve verici anten, EMI alıcı ve alıcı anten olabilir. Ne olduklarından bağımsız olarak, hepsi basitleştirilebilir bir iletim hattı olarak modellenebilir. Bağlantı tipi; ikili iletim hattı, koaksiyel hat veya dalga kılavuzu olabilir. İkili iletim hattı yüzlerce MHz kesim frekansına sahip bir alçak geçiren filtre olarak davranır. Koaksiyel kablolu bir iletim hattı GHz bandında kesim frekansına sahip bir alçak geçiren filtre olarak davranır. Dalga kılavuzları farklı bir yapıya sahiptirler ve yüksek geçiren filtre gibi davranmaktadırlar.

Yüksek frekansta gerilim ve akım bir iletim hattı boyunca dalga olarak yayılırlar. Diğer bir deyişle, odak noktası akım ve gerilim dalgalarıdır [6].



Şekil 3.1. Bir iletim hattı ve matematik modeli

Şekil 3.1'de karakteristik denklemi verilen iletim hattı modelinde bağımsız değişkenler $v(z,t)$ ve $i(z,t)$'dir. Bir iletim hattı boyunca gerilim ve akım zamana bağlı olarak değişir.

Şekil 3.1'de verilen iki eşitlikteki R/L/C/G, başlıca iletim hattı parametreleridir.

Burada;

R : birim uzunluktaki direnç (Ω/m)
L : birim uzunluktaki indüktans (H/m)
C : birim uzunluktaki kapasitans (F/m)
G : birim uzunluktaki admitans (S/m)

şeklinde ifade edilir.

İletim hattında bulunan R ve G kayıpları ifade ederken; L ve C depolanan enerjiyi ifade etmektedir. Pratikte, karakteristik empedansı ve yayılım sabitini hesaplamak için bu parametrelere ihtiyaç vardır ve bu parametreler ya üretici tarafından sağlanır ya da özel ekipmanlarla ölçülebilir. Bu yüzden hesaplamalarda aşağıda verilen ikincil parametreler kullanılır.

Z_0 : iletim hattı karakteristik empedansı (Ω);
$\gamma = a + j\beta$: iletim hattı kompleks yayılım sabiti

3.1. Karakteristik Empedans

İletim hattı teorisinde empedans karakteristiği önemli bir parametredir. Birincil hat sabitleri ile ilintili bir parametredir ve kayıpsız bir ideal iletim hattı için şarttır. Sonsuz homojen bir iletim hattının herhangi bir noktasındaki empedans, gerilimin akıma oranı olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (\Omega) \tag{3.1}$$

İyi bir güç transferi için bir koaksiyel kablonun optimum transfer empedansı 30Ω civarında olmalıdır. Bir iletim hattının en düşük kayba uğradığı empedans değeri ise 77Ω'dur. Bu yüzden koaksiyel iletim hattı için ideal empedans 50Ω olarak seçilmiştir [7].

3.2. Yayılım Sabiti

İletim hattının kompleks yayılım sabiti γ, hat boyu oluşan zayıflama ve faz farkını temsil etmektedir. Yayılım sabitinin reel kısmı olan a [dB/km] metre veya km'deki zayıflamayı gösterir. Sanal kısmı olan β [rad/km] ise metre veya km'deki faz farkını göstermektedir. Yayılım sabiti birincil parametrelerle şu şekilde hesaplanabilir;

$$\gamma = a + j\beta = [(\mathrm{R} + j\omega L)(\mathrm{G} + j\omega C)]^{1/2} \tag{3.2}$$

Kayıpsız bir iletim hattı sabitinde;

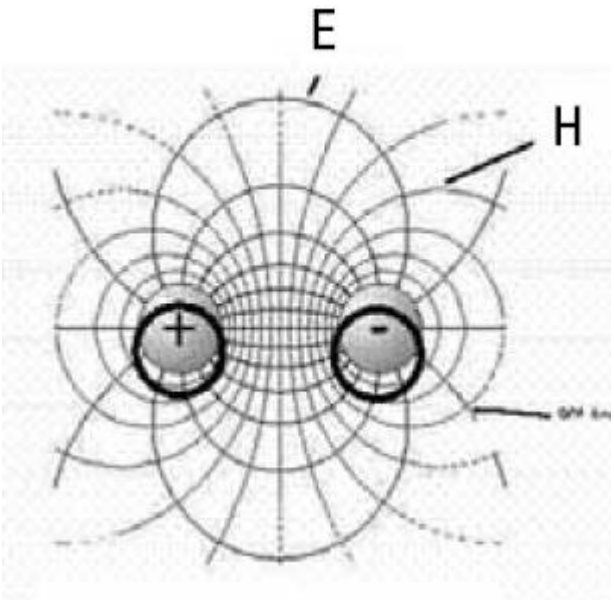
$\mathrm{R} = \mathrm{G} = 0$ ve $a = 0$ alınırsa, Z_0 Eş. 3.3'e, γ ise Eş. 3.4'e indirgenir.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3.3}$$

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} \tag{3.4}$$

Pratikte iletim hatları kayıpsız olarak varsayılabilir. Sadece yansımalara ve faz kaymalarına neden olurlar.

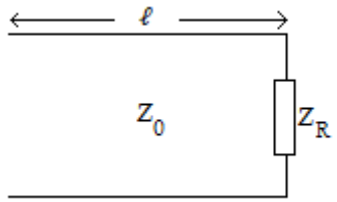
EMC testlerinde, ışınım yolu ile alınganlık testlerinde kullanılan iletim hatlarında elektrik alan dağılımı önem arz etmektedir. Tipik bir iki hatlı iletim hattına ait elektrik ve manyetik alan yayılım karakteristiği Şekil 3.2'de gösterilmiştir [6].



Şekil 3.2. İki hatlı bir iletim hattının alan yayılım çizgileri [6]

3.3. İletim Hattı Hesaplamaları

3.3.1. Rasgele bir yük ile sonlandırılan hat



Şekil 3.3. Z_R yükü ile sonlandırılmış bir hat

Şekil 3.3'te Z_R yükü ile sonlandırılmış bir genel iletim hattına ait giriş empedansı Eş. 3.5'teki formül ile verilmiştir.

$$Z_{giriş} = Z_0 \left(\frac{Z_R \cosh \gamma l + Z_0 \sinh \gamma l}{Z_0 \cosh \gamma l + Z_R \sinh \gamma l}\right) (\Omega) \tag{3.5}$$

Eş. 3.5, kayıpsız bir iletim hattı için Eş. 3.6'ya indirgenir.

$$Z_{giriş} = Z_0 \left(\frac{Z_R \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l}{Z_0 \cos \beta l + jZ_R \sin \beta l}\right) (\Omega) \tag{3.6}$$

Burada,

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3.7}$$

$$\gamma = j\beta = \frac{j2\pi}{\lambda} \tag{3.8}$$

olarak verilmektedir. Eş. 3.5 ve Eş. 3.6'da görüldüğü üzere giriş empedansı $Z_{giriş}$, yük empedansı olan Z_R'nin, hat parametreleri olan α ve β'nin ve de yükün uzaklığı olan ℓ'nin bir fonksiyonudur. Eşitliklerde kullanılan α ve β parametreleri bir birim dalga boyu baz alınarak kullanılmaktadır. Bu, bir dalga boyu için sabit bir kayıp anlamına gelmektedir. βℓ sabiti radyan cinsinden elektriksel uzunluğu ifade eder [8].

3.3.2. Z_0 yükü ile sonlandırılan hat

Eş. 3.5'te verilen rasgele bir yük olan Z_R'nin, iletim hattının karakteristik empedansına eşit olması durumunda,

$$Z_{giriş} = Z_0\ (\Omega) \tag{3.9}$$

olur. Elde edilen eşitlikte giriş empedansı yüke olan uzaklığın bir fonksiyonu olmaktan çıkmıştır. Böylece, "uyumlu hat" şartı sağlanmış olur [8].

3.4. Elektrik Alan Üreteci

Bir noktadan belirli bir uzaklıkta elektrik alan üretmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Kullanılacak yöntem belirli parametreler ile birlikte belirlenmektedir. Bunlardan birkaçı; oluşturulmak istenen elektrik alan genliği, frekans, mesafe gibi parametrelerdir. Askeri elektromanyetik uyumluluk testleri, MIL-STD-461G standardı gereği RS103 deneyinde elektrik alan oluşturmak için frekans bandını, elektrik alan seviyesini, antenin test edilecek cihazdan uzaklığını tanımlamaktadır. Anten tercihini ise deneyi gerçekleştirecek laboratuvara bırakmaktadır. Deneylerin gerçekleştirileceği VHF bandı baz alındığında anten tasarım parametreleri göz önüne alınarak gereken anten boyutları hesaplanmıştır. İstenilen frekansta ışıma yapabilmek için kullanılan anten tasarım parametrelerinden biri de dalga boyu hesabıdır.

Deneyin gerçekleştirildiği spektrumun (VHF) başlangıç frekansı 30 MHz'e göre anten boyutları gereksinimi hesaplanmıştır. Frekansa bağlı dalga boyu hesabı Eş. 3.10'daki formül ile ifade edilir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.10}$$

Burada;

λ : dalgaboyu (metre)

c : ışık hızı ($2{,}997925 \times 10^8$ m/sn)

f : frekans (Hertz)

30 MHz'e karşılık gelen dalga boyunu hesaplamak için Eş. 3.10'daki denklem kullanılarak anten kolu uzunluğu hesaplanır.

$$\lambda = \frac{2{,}997925 \times 10^8}{30 \times 10^6} \cong 10 \text{ metre} \tag{3.11}$$

Bu boyutlarda antenlerin yatay ve dikey kutuplanmada kullanılması yarı yansımasız test hücresinin fiziksel ölçülerini belirlemekte olup büyük hacimde laboratuvar ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Bunların maliyet etkin projelerde kullanımı mümkün görünmemektedir.

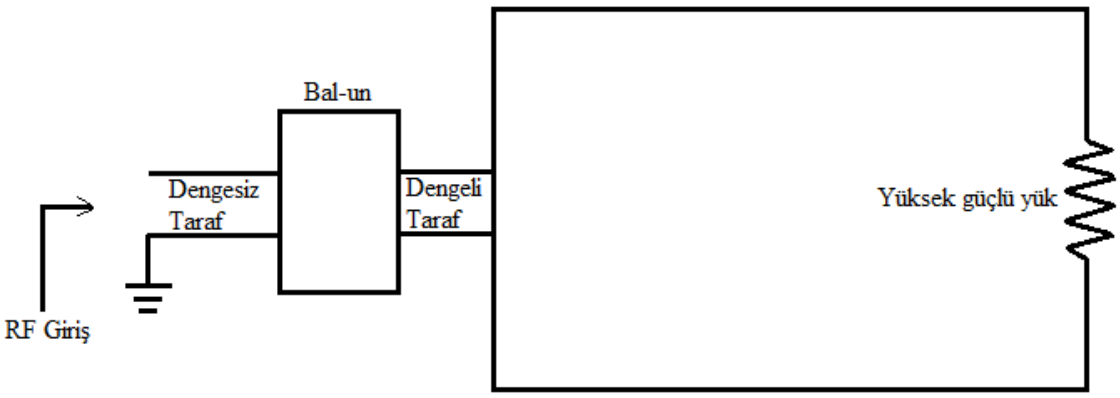
Standartta belirtilen elektrik alan seviyelerinde VHF bandında ışıma yapmak için anten yerine paralel iletim hattı olan E-alan üreteci kullanılmaktadır. E-alan üreteci bir paralel iletim hattı yapısına sahip olup çalışma ilkesi hatlara uygulanan gerilim ile yine hatlar arasındaki mesafe ile ilişkilendirilmektedir.

Deneylerde 30 – 100 MHz frekans aralığında elektrik alan üreteci olarak Amplifier Research firmasının ATP10K100M model numaralı geniş bant elektrik alan üreteci kullanılmıştır. Kullanılan elektrik alan üretecine ait görsel Şekil 3.4'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.4. Elektrik alan üreteci (Amplifier Research)

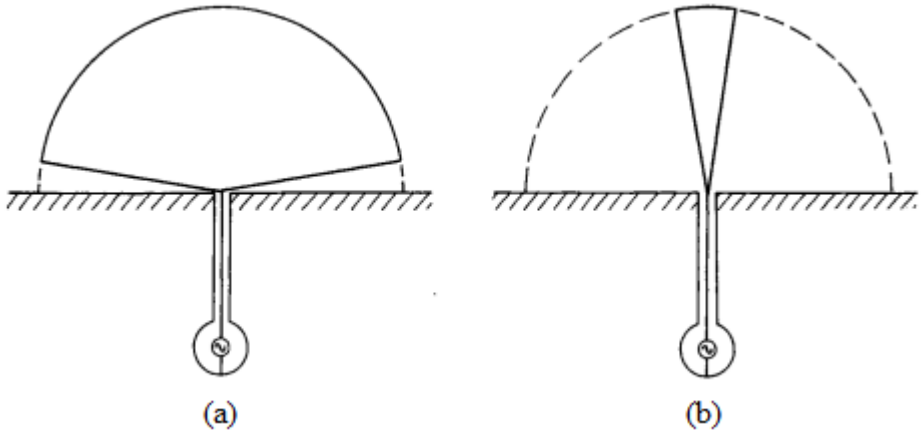
Elektrik alan üreteçleri adından da anlaşılacağı gibi tam olarak bir anten değildir. Çevresinde lokalize yüksek elektrik alanı üreten kompakt bir ışıma cihazıdır. Tanımlı bir ışıma deseninde yayın yapamazlar. Üreteçler, güç yükselteçlerinin yüksek gerilimi ile beslenen geniş bantlı RF transformatörlerden faydalanmaktadırlar. Şekil 3.5'te tipik bir yüksek elektrik alan üreteci eşdeğer devre şeması paylaşılmıştır.



Şekil 3.5. Elektrik alan üreteci eşdeğer devre şeması

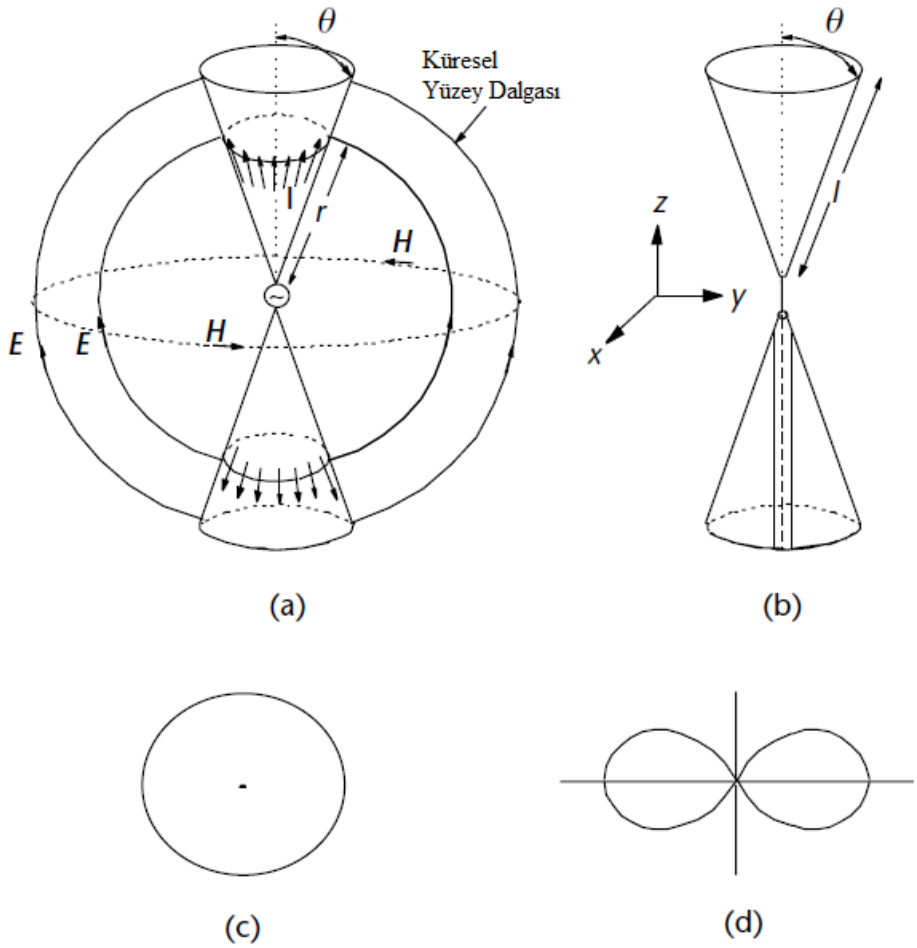
3.5. Bikonik Antenler

Konik biçiminde olan iletim hattındaki akımların elektromanyetik alana katkısı koninin açısına bağlıdır. Şekil 3.6'da paylaşılan konik iletim hatlarından geçen akım elektromanyetik alan oluşumunda büyük rol oynar. Basit özellikteki sınır koşuluna izin veren yüzeye sahip olmasının yanında konik antenler bu durumu baskın bir şekilde iletim hattı elektromanyetik özellikleri gösteren bir devre ile bütünleştirirler. Konik yüzeyin tepesine yaklaştıkça, akımlar daha fazla iletim hattı formülleri ile açıklanabilir şekilde davranırlar. Bunun anlamı; antenin konik yüzeyleri ve silindirik yüzeyleri birleşim noktası, anten ve iletim hattı arasından öte iletim hatları birleşim noktasında daha etkili olduğudur. Koaksiyel hat ile konik hat arasındaki empedans karakteristiğini eşitlemek birleşim noktasının bu duruma etkisini büyük ölçüde düşürür. Eşit empedansa sahip iki koaksiyel hattaki genlik farkı hatların büyüklüğüne bağlıdır. Dolayısı ile, koaksiyel hatta ölçülen görünür yük empedansı birleşim noktasındaki empedansa paralel çok küçük bir kapasitans olarak konik antenin giriş empedansında etkilidir [10].



Şekil 3.6. Konik antenler [10]

Şekil 3.7'de gösterilen sonsuz uzunluktaki bikonik antenler küresel dalga kılavuzu gibi davranırlar fakat pratikte kullanımı belirli ölçüde kırpılarak mümkün olmaktadır.



Şekil 3.7. Bikonik Anten: (a) Bikonik antenin TEM modu, (b) bikonik anten besleme noktası detayları, (c) x-y düzleminde ışıma deseni, (d) y-z düzleminde ışıma deseni [9]

Bu durumda Maxwell'in ikinci eşitliği kullanılarak

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \tag{3.12}$$

elde edilir.

Eş. 3.12'nin sol tarafını küresel koordinatta genişletirsek,

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\hat{a}_r}{r^2 \sin\theta}\left[\frac{\partial(r\sin\theta E_\phi)}{\partial\theta} - \frac{\partial(rE_\phi)}{\partial\phi}\right] + \frac{\hat{a}_\theta}{r\sin\theta}\left[\frac{\partial E_r}{\partial\theta} - \frac{\partial(r\sin\theta E_\phi}{\partial r}\right] + \frac{\hat{a}_\phi}{r}\left[\frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial\theta}\right] \tag{3.13}$$

buluruz.

Elektrik alanın ϕ ve r yönlerinde bileşeni yoktur ve E_Θ bileşeni ϕ'den bağımsızdır. Bu yüzden, Eş. 3.13'ün sağ tarafı şu şekilde indirgenir:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\hat{a}_\phi}{r}\frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} \tag{3.14}$$

Eş. 3.12'nin sağ tarafı dikkate alındığında sadece H_ϕ bileşeni göz önünde bulundurulmalıdır ve şunu vermektedir,

$$-j\omega\mu\vec{H} = -\hat{a}_\phi j\omega\mu H_\phi \tag{3.15}$$

Eş. 3.14 ve Eş. 3.15'i birleştirdiğimizde,

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} = -j\omega\mu H_\phi \tag{3.16}$$

buluruz.

Eğer Maxwell'in birinci denklemini iletken olmayan ortamlar için (σ=0) dikkate alırsak,

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\mu\vec{\mathrm{E}} \tag{3.17}$$

elde ederiz.

TEM mod için elimizde tekrar sadece H_ϕ ve E_θ bileşenleri bulunmaktadır, böylece Maxwell'in birinci denklemi şu denkleme indirgenmektedir:

$$\frac{\partial(rH_\phi)}{\partial r} = -j\omega\varepsilon(rE_\theta) \tag{3.18}$$

H_ϕ bileşeni şu şekilde verilmiştir:

$$H_\phi = \frac{E_\theta r \sin\theta}{H_0} e^{-j\beta r} \tag{3.19}$$

Burada H_0 manyetik alanın genliğini ifade etmektedir.
Karakteristik empedans değeri Z_0, E_θ'nın H_ϕ'ye oranı olarak şu şekilde verilmiştir:

$$Z_0 = \frac{E_\theta r \sin\theta}{H_0} e^{-j\beta r} \tag{3.20}$$

Eş. 3.20'den E_θ çekildiğinde,

$$E_\theta = \frac{Z_0 H_0}{r \sin\theta} e^{-j\beta r} \tag{3.21}$$

olarak bulunur.

"r" radyal mesafesindeki noktalar arasındaki gerilimi, iki nokta arasındaki büyük bir daire boyunca E_θ elektrik alanın (θ'ya göre) integralini alarak hesaplayabiliriz. θ açısı bu yol boyunca – θ_1 ve +θ_1 arasında değişir ve burada θ_1 konik yarı açısıdır [9]. Böylece, gerilim şu şekilde hesaplanır:

$$V(r) = Z_0 H_0 e^{-j\beta r} \int_{\theta_2}^{\pi-\theta_1} \frac{d\theta}{\sin\theta} \tag{3.22}$$

Genellikle koaksiyel hattan bir bal-un ile beslenen bikonik anten şematik olarak Şekil 3.7(b)'de gösterilmiştir. Bikonik antenin ışıma deseni bir dipolünkine benzemektedir. x-y düzleminde yönsüz bir antendir (Şekil 3.7(c)) ve y-z düzleminde Şekil 3.7(d)'de verilen sekiz şeklindedir. y-z düzleminde huzme genişliği 20° ile 100° arasındadır. Konik yarım açısı θ_{hc}'nin 30º ve 60º arasında olması durumunda bikonik anten geniş bant empedans karakteristiği ortaya çıkmaktadır. Bu açı değeri kritik olmamakla birlikte genellikle empedans uyumunu sağlamak için anteni besleyen iletim hattına mümkün olduğunca yakın olarak seçilir [11].

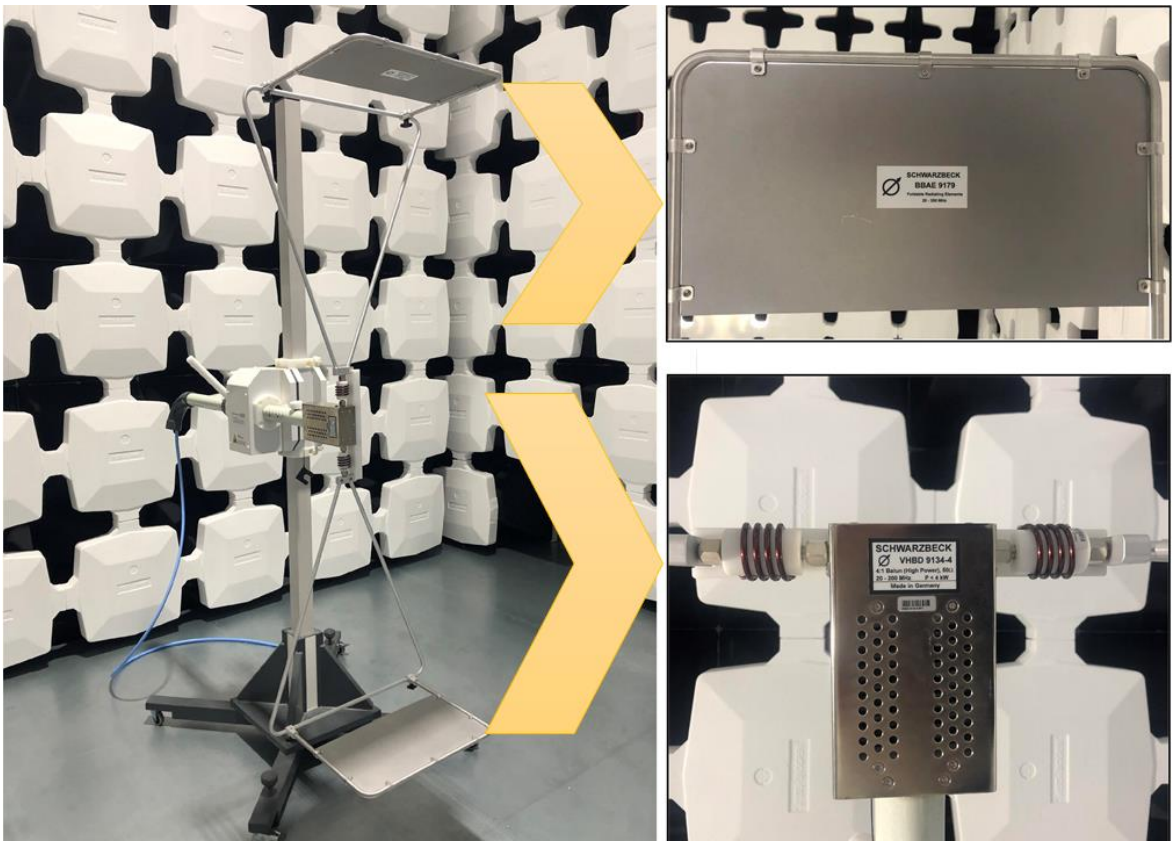
Bikonik antenin empedans karakteristiği şu şekildedir,

$$Z = 120 \log_e \left[\cot\left(\frac{\theta_{hc}}{2}\right)\right] \tag{3.23}$$

Burada θ_{hc}, konik yarım açısıdır.

Bikonik antenler elektromanyetik uyumluluk testlerinde emisyon ölçümünde kullanıldığı gibi alınganlık testlerinde ışıma yapmak üzere de kullanılmaktadır. Bu tez kapsamındaki deneylerde ışıma kaynağı olarak kullanılmıştır.

Elektromanyetik uyumluluk testlerini VHF bandında gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan anten ise Şekil 3.8'de paylaşılan bikonik antendir. Deneyler, 30 – 100 MHz frekans bandında gerçekleştirildiğinden 20 – 200 MHz aralığında ışıma yapabilen Schwarzbeck marka BBAE 9179 model numaralı bikonik anten kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Bikonik Anten (Schwarzbeck)

Bikonik antenler, uzun bir anten koluna ihtiyaç duymadan geniş bantta ışıma yeteneğine sahiptirler.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

4.1. Genel Deney Düzeneği

Işınım yolu ile bağışıklık deneyini (RS103) gerçekleştirmek üzere MIL-STD-461G standardı içerisindeki genel deney düzeneği referans alınmıştır [1]. Deney düzeneği gereğince DAC (Deney Altındaki Cihaz) yerden 80 – 90 cm yükseklikte iletken zemine sahip bir masa üzerine yerleştirilmiştir. DAC'a ait 2 metre kablo deney masası kenarından 10 cm içeride olacak şekilde iletken zeminden 5 cm yükseklikte iletken olmayan bir malzeme üzerine masa boyunca serilmiştir.

Işınım yolu ile bağışıklık deneyi; DAC'ın deney masasına yerleşimi için yukarıda bahsedilen düzeni önerirken, deneyi uygulamak için kullanın ekipmanlar için yine kurallar ihtiva etmektedir.

Anten yerleşimi

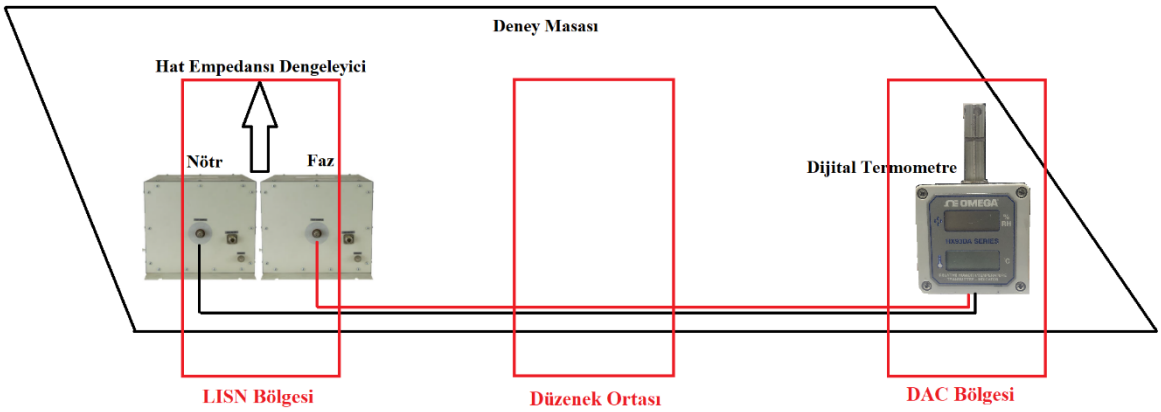
MIL-STD-461G standardı; RS103 deneyinin gerçekleştirilmesi için kullanılan antenlerin frekansa bağlı olarak yerleşimini şu şekilde detaylandırmıştır.

- 2 – 200 MHz
    - Eğer deney düzeneği (DAC ve kabloları) 3 metreden kısa ise, anten düzeneğin ortasına yerleştirilmelidir. Düzenek sınırları, DAC ve buna bağlı 2 metre kablosunu ifade etmektedir.
    - Eğer deney düzeneği (DAC ve kabloları) 3 metreden uzun ise düzeneğin tüm uzunluğu 3 metrelik bölümlere ayrılarak tam sayı olarak çıkmayan bölge sayısı olması durumunda bir üst tam sayıya yuvarlanarak anten ölçüm bölgesi hesaplanmalıdır.
- 200 MHz ve üstü frekanslar
    - 0,2 – 1 GHz frekans aralığında DAC'ın tamamı ve DAC'a bağlı kabloların ilk 35 cm'lik bölümü anten 3 dB huzme genişliğine bölünerek anten pozisyonları belirlenmelidir.

- 1 – 18 GHz frekans aralığında DAC'ın tamamı ve DAC'a bağlı kabloların ilk 7 cm'lik bölümü anten 3 dB huzme genişliğine bölünerek anten pozisyonları belirlenmelidir.

Deneyler 30 – 100 MHz frekans aralığında gerçekleştirildiğinden ve deney düzenekleri 3 metreden kısa olduğu için kullanılan bikonik anten, düzeneğin orta noktasına yerleştirilmiştir.

Elektrik alan üretecinin teknik dokümanında çalışma frekans aralığı üst limiti 100 MHz olarak belirtilmiştir. Tasarımı gereği dikey kutuplanmada kolları arası mesafe 2,4 metre, yatay kutuplanmada ise 1 metredir. Dikey kutuplanmada deney düzeneği sınırlarını kapsaması nedeniyle tek bölgede deney gerçekleştirilmiştir. Yatay kutuplanmada sadece 1 metrelik bölgeye yayın yapabileceği değerlendirilerek gözlemlemek amacı ile 3 bölgede deneyler gerçekleştirilmiştir. İlgili bölgeler Şekil 4.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.1. Elektrik alan üreteci yatay kutuplanma yerleşim bölgeleri

4.2. Deney Ekipmanları

Işınım yolu ile bağışıklık deneyi düzeneğinin kurulması için kullanılacak ekipmanlar Çizelge 4.1'de marka/model bilgisi ile paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1. Işınım yolu ile bağışıklık deneyi ekipmanları

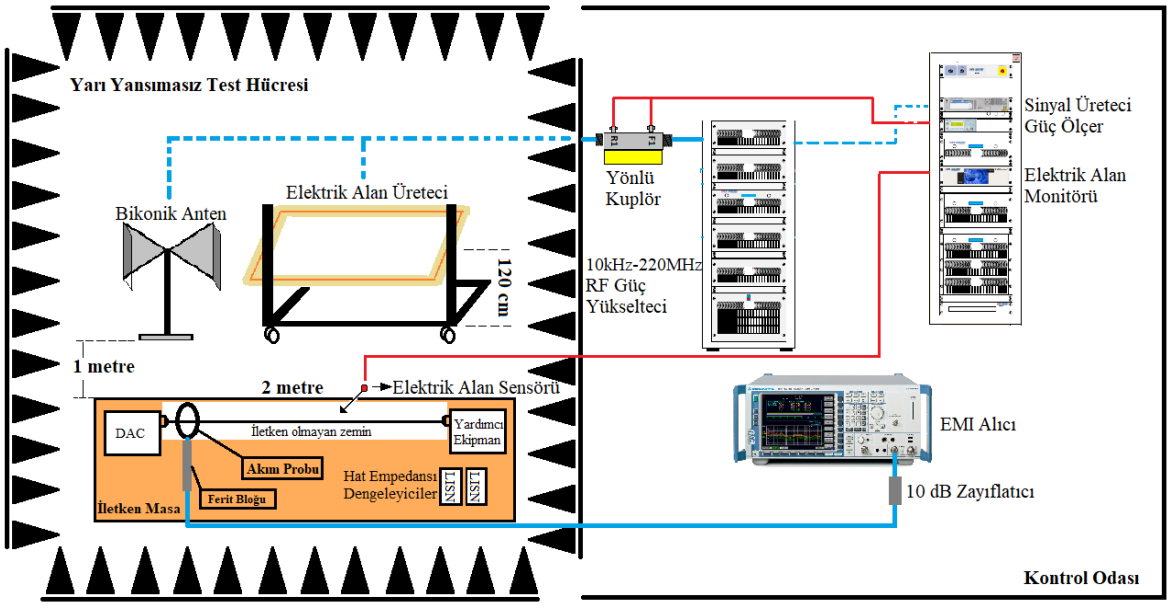
Ekipman Adı	Marka/Model	Açıklama
Sinyal Üreteci	Keysight / N5171B	9 kHz – 1 GHz
Güç Yükselteci	ETS-Lindgren / 8000-026	10 kHz – 250 MHz, 2.5 kWatt

Çizelge 4.1. (devam) Işınım yolu ile bağışıklık deneyi ekipmanları

Anten	Schwarzbeck / BBAE 9179 (Anten) ve VHBD 9134-3 (Balun)	20 – 200 MHz
Elektrik Alan Üreteci	Amplifier Research / ATP10K100M	10 kHz – 100 MHz
Elektrik Alan Okuma Sensörü	ETS-Lindgren / HI-6053	10 MHz – 40 GHz
RF Güç Ölçer	Boonton / 4242-30	10 kHz – 100 GHz
Yönlü Kuplör	Werlatone / C4080-627	10 kHz – 250 MHz
Hat Empedansı Dengeleyici	Solar/9233-50-TS-50-N	50 µH, 0.25 µF

4.3. Tasarlanan Deneye Özel Düzenek ve Ekipman Gereksinimi

Başlık 4.1'de tanımı yapılan genel deney düzeneği, DAC'ın belirlenen frekans aralığında tanımlı bir elektrik alana tabi tutulması için gerekli ekipman yerleşimini açıklamaktadır. Deney; amacı gereği elektrik alan üreteci ve anten tarafından üretilen sabit bir elektrik alan altında ekranlı kabloda, dijital termometre güç kablosunda indüklenen akımları ve dijital termometre etkilenme seviyesini ölçmeyi amaçlamaktadır. DAC'a ait kablo üzerine indüklenen akım seviyesini ölçmek amacıyla genel deney düzeneğine 50Ω empedanslı akım probu ve EMI (Electromagnetic Interference) alıcı eklenmiştir. Deneyde kullanılan ekipmanlar ve yarı yansımasız test hücresi içerisindeki yerleşimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Deney düzeneği ve ölçüm ekipmanları yerleşimi

Şekil 4.2'de gösterildiği üzere deneyler yarı yansımasız oda içerisinde gerçekleştirilmiştir. Burada amaç olası yansımaların test hücresi duvarlarında bulunan emiciler tarafından sönümlenmesidir. Bu sayede belirlenen frekans ve genlikte istenen ışıma direkt DAC'a uygulanabilmektedir.

Şekil 4.2'de verilen ölçüm düzeneğine, Çizelge 4.1'de verilen genel ekipmanların dışında, kablo üzerinde indüklenen akım seviyesini okuyabilmek için yerleştirilen prob EMI alıcıya bağlanmıştır. Akım okumak amaçlı kullanılan ekipmanlar ve özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Akım ölçümü için kullanılan ekipmanlar

Ekipman Adı	Marka/Model	Açıklama
EMI Alıcı	Rohde&Schwarz / ESU40	20 Hz – 40 GHz
Akım Probu	Pearson / 8705C	10 kHz – 400 MHz
RF Zayıflatıcı	Schwarzbeck / VTSD-9561	10dB, DC – 200 MHz
Ferit Bloğu	Teseq / KEMA 801A	150 kHz – 1 GHz

4.4. Kablo Üzerinde İndüklenen Akımın Hesaplanması

E-alan altında kablo üzerinde oluşan akım seviyeleri kablo üzerine akım probu yerleştirilerek ölçülmektedir. EMI alıcıda okunan akım değerleri ham verilerden oluşmaktadır. Ham veri; akım probunun okuma faktörünü ve okuma yolu üzerinde bulunan zayıflatıcı değerini hesaba katmamaktadır. Dolayısı ile kablo üzerinde oluşan akım her bir frekans için kaydedildikten sonra prob okuma faktörü ve zayıflatıcı değerleri ile bir hesaplamaya tabi tutulmuştur.

Kablo üzerinde indüklenen akım değeri genliğinin EMI alıcı gibi hassas bir ölçüm cihazına zarar vermesini önlemek amacıyla alıcı girişine Çizelge 4.2'de özellikleri paylaşılan 10 dB'lik bir RF zayıflatıcı eklenmiştir. Dolayısıyla EMI alıcı, her veriyi 10 dB'lik bir kayıpla ölçmektedir. Akım değeri hesaplamasında her bir frekanstaki ölçüme zayıflatıcı değeri eklenmiştir.

4.4.1. Ölçüm birimleri dönüşümü

Şekil 4.2'de paylaşılan deney düzeneğinde okuma yapan akım probu EMI alıcıya bağlanmıştır. Alıcı, her frekansta dBm cinsinden değer okumaktadır. Akım probu temelde sarımlar üzerine indüklenen gerilimi ölçmektedir. Bu nedenle alıcıda okunan gerilim değeri dBm cinsinden dbμV'a dönüştürülmüştür. Daha sonra bu gerilim değeri probun transfer empedansına (Z_t) bölünerek akım değeri (dbμA) hesaplanır [12].

dBm-dBμV dönüşümü

İki birim arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanmıştır [13].

$$dB\mu V = dBm + 90 + 20\log\left(\sqrt{Z_0}\right) \tag{4.1}$$

Deney düzeneğinde kullanılan tüm ölçüm ekipmanları 50Ω giriş empedansına sahiptir, dolayısı ile "Z_0" değeri 50Ω olarak alınmıştır.

Eş. 4.1'te deney düzeneğine ait 50Ω empedans kullanıldığında;

$$dB\mu V = dBm + 90 + 20\,log\left(\sqrt{50}\right)$$

$$dB\mu V = dBm + 107 \tag{4.2}$$

olarak elde edilir.

4.4.2. Örnek bir hesaplama

Lineer skalada akım, gerilim ve empedans arasındaki ilişki Eş. 4.3'te verilmiştir.

$$I = V \,/\, Z_t \tag{4.3}$$

Eş. 4.3'ün logaritması alındığında dB cinsinden,

$$I\ (dB\mu A) = V\ (dB\mu V) - \ Z_t\ (\text{dB}\Omega) \tag{4.4}$$

eşitliği elde edilir.

I : Kablo üzerinde indüklen akım (dBμA)

V : EMI alıcıda okunan değer (dbμV)

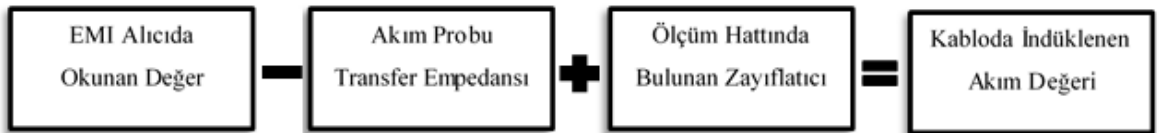
Z_t : Prob transfer empedansı (dBΩ)

Deneylerde EMI alıcı girişinde kullanılan 10dB'lik zayıflatıcı kaybını Eş. 4.4'e eklersek,

$$I(dB\mu A) = V\ (dB\mu V) + 10 - Z_t\ (\text{dB}\Omega) \tag{4.5}$$

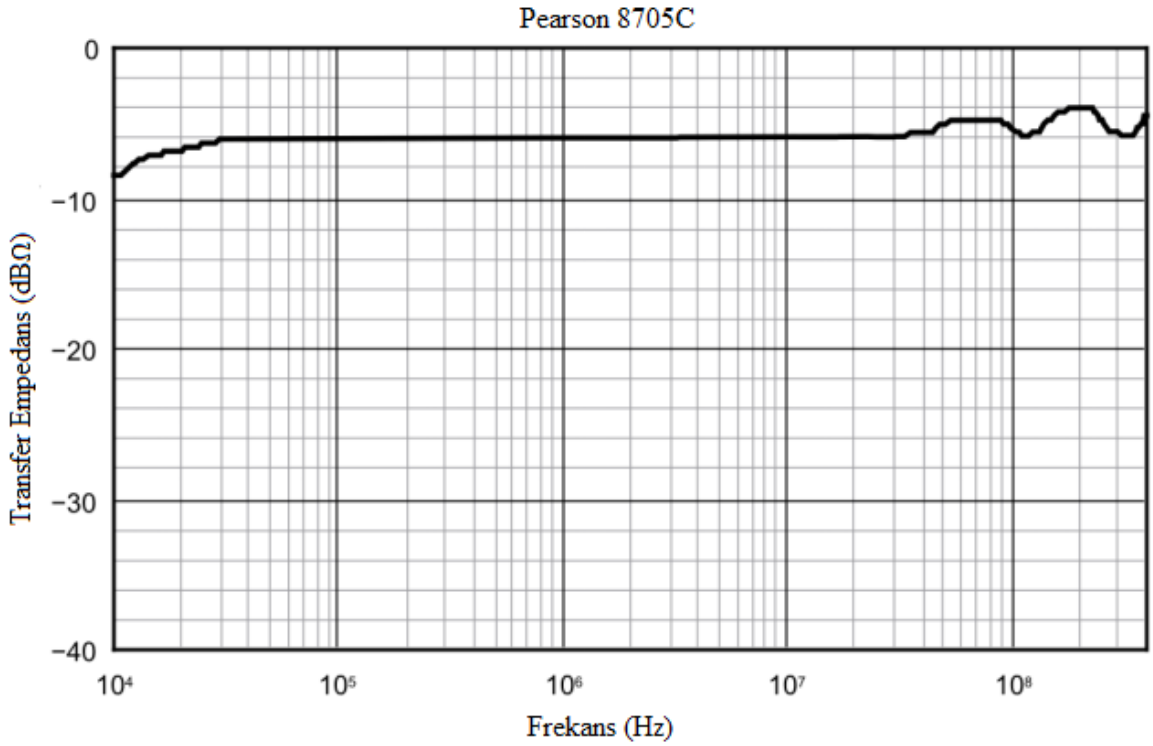
eşitliği elde edilir.

Şimdiye kadar EMI alıcıda okunan değere zayıflatıcının etkisi ve gerekli birim dönüşümü ele alınmıştır. Akım hesabının yapılabilmesi için eşitliğe Şekil 4.3'te paylaşıldığı üzere prob transfer empedansının eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.3. Okuma kayıplarının hesaplanması

Şekil 4.4'te 10 kHz – 400 MHz frekans aralığında Pearson 8705C model akım probuna ait transfer empedansı grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.4. Akım probu transfer empedansı

Deneyin gerçekleştiği 30 MHz – 100 MHz frekans aralığı ele alındığında prob empedans değerlerinin

30 – 49 MHz → -6,1 dBΩ,
50 – 55 MHz → -6 dBΩ,
56 – 73 MHz → -5,9 dBΩ,
74 – 77 MHz → -5,8 dBΩ,
78 – 85 MHz → -5,7 dBΩ,
86 – 100 MHz → -5,6 dBΩ

olduğu görülmektedir.

Örnek bir değer olarak 30 MHz frekansında 15 V/m alan üretildiğinde ekranlı kablo üzerinde oluşturulan akım değerinin -45 dBm olarak EMI alıcı tarafından ölçüldüğünü varsayalım.

Eş. 4.2 kullanıldığında EMI alıcıda okunan değer;

$$db\mu V = -45\ (dBm) + 107$$

$$db\mu V = 62 \tag{4.6}$$

olarak hesaplanır.

Eş. 4.6'da elde edilen değer Eş. 4.5'te verilen denklemde kullanılarak akım değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır. Örnek hesaplama 30 MHz frekansı için gerçekleştirildiğinden transfer empedansı olarak -6,1 dBΩ değeri kullanılmıştır.

$$I\ (dB\mu A) = 62\ db\mu V + 10\ dB - (-6{,}1\ dB\Omega) = 78{,}1$$

4.5. Deney Sonuçları

Bu bölümde, yapılan deneylere ait veriler belirli bir kural çerçevesinde paylaşılmıştır. Deneylere ek olarak ölçümlerin doğruluğunu göstermek amacı ile dikkat edilen diğer hususlar detaylandırılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılabilir olması amacıyla DAC pozisyonu, yardımcı ekipman ile olan kablo bağlantıları ve elektrik alan sensörü konumu sabit tutulmuştur. Antenler yatay ve dikey kutuplanmada deney düzeneğinden 1 metre uzaklıkta, zeminden 120 cm yükseklikte konumlandırılmıştır. Elektrik alan üreteci merkez noktası boyutları nedeni ile (merkezinin yerden 120 cm olarak yerleştirilmesine fiziksel yapısı elverişli değildir) yatay kutuplanmada yerden 150 cm yükseklikte kullanılmıştır. Deneyler; 30 – 100 MHz frekans aralığında 1 MHz'lik adım aralıklarıyla gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm senaryoları

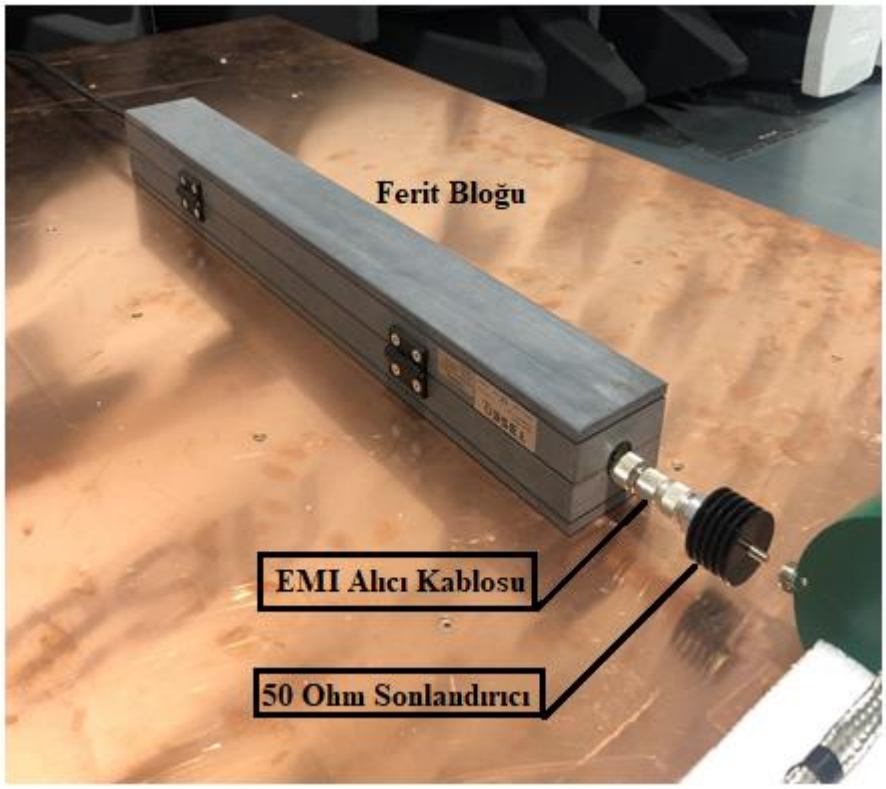
Deneyler, temelde farklı iki düzenek kurularak gerçekleştirilmiştir. Fakat ölçümler ışıma yolu ile gerçekleştirildiğinden istenmeyen gürültülerin neden olabileceği okuma hatalarını bertaraf etmek için ek düzenek ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Deneylerin gerçekleştirilmesinde aşağıda belirtilen sıra izlenmiştir.

1. *Taban gürültüsü ölçümü*; antenler tarafından üretilen elektrik alanın akım probunun olmadığı durumda EMI alıcıya bağlı RF kablo üzerinde oluşturduğu akım seviyesini göstermeyi amaçlamaktadır.
2. *3 prob yöntemi*; yatay kutuplanmada iken kolları arası 1 metre mesafeye sahip olan elektrik alan üretecinin 2 metreden büyük bir düzeneği tek bölgede ışıtma kapasitesini gözlemlemeyi amaçlamaktadır.
3. *Ekranlı kablo üzerinde akım ölçümü*; metalik bir kutu ve buna bağlı 2 metrelik ekranlı kablosu üzerinde 30 – 100 MHz frekans aralığında 15 V/m elektrik alan oluşturularak kabloda indüklenen akım seviyeleri sonuçları karşılaştırılmıştır.
4. *Dijital termometre alınganlık ölçümü*; antenlerin askeri EMC deneylerinde kullanılmasının sonuca etkisini göstermek amacı ile dijital termometre ve ekransız güç kablosu DAC olarak belirlenmiştir. 5 V/m elektrik alana tabi tutularak ışıma altındaki davranışları incelenmiştir.

4.5.1. Taban gürültüsü ölçümü

Bir kablo üzerinden geçen akımı ölçmek için deney frekansları aralığında çalışabilen akım probuna ve bu probun bağlanacağı bir EMI alıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Deney gereği 30 – 100 MHz aralığında üretilen elektrik alan DAC ve kablolarını ışıtırken akım probuna ait RF kablosuna da tesir etmektedir. Bu durum, EMI alıcıda okunan akım değerinin yarı yansımasız hücrede DAC'a yapılan ışımanın akım probuna ait RF kablosuna gürültü olarak indüklenmediğini gösterme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. EMI alıcıya giden kablonun anten ışımalarından etkilenmesi durumunda ölçümlere etkisi olmaktadır. Böylelikle elde edilen akım değerleri sadece DAC'a bağlı kabloya ait olmayıp EMI alıcı kablosunun taban gürültüsünü de içerecektir.

Akım probuna ait RF kablosuna gürültü indüklenmesini önlemek amacı ile belirli ölçüde RF sinyali geçirmeyen, bünyesinde sönümleyen ferit bloğu kullanılmıştır. Ferit bloğu ve deneyde kullanım yöntemi Şekil 4.5'te verilmiştir. Işıma yapılan frekansta prob kullanılarak okunmak istenen sinyal ile gürültü arasındaki farkı artırarak geniş bir dinamik ölçüm aralığı sağlanmaktadır.



Şekil 4.5. Akım orobu RF kablosuna yerleştirilmiş ferit bloğu ve sonlandırıcı

EMC deney düzeneklerinde kullanılan ekipmanlar 50Ω empedansa sahiptirler. Dolayısı ile empedans uyumluluğu açısından 50Ω sonlandırıcı ile EMI alıcıya giden RF kablo sonlandırılmıştır. Bu sayede empedans farklılığının ortaya çıkaracağı yansımalardan etkilenilmemektedir.

Alıcıya giden RF kablo üzerinde oluşan gürültü ölçümleri 30 – 100 MHz frekanslarında 1 MHz adım aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yatay ve dikey kutuplanma için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.3. 15 V/m E-alan altında EMI alıcı kablosunda indüklenen akım seviyeleri (yatay)

Frekans	Değer (dBµA)	Frekans	Değer (dBµA)	Frekans	Değer (dBµA)
30 MHz	39,1	54 MHz	44	78 MHz	38,7
31 MHz	41,1	55 MHz	44	79 MHz	38,7
32 MHz	43,1	56 MHz	38,9	80 MHz	38,7
33 MHz	46,1	57 MHz	40,9	81 MHz	38,7
34 MHz	49,1	58 MHz	41,9	82 MHz	38,7
35 MHz	51,1	59 MHz	41,9	83 MHz	36,7
36 MHz	51,1	60 MHz	40,9	84 MHz	36,7
37 MHz	51,1	61 MHz	39,9	85 MHz	36,7
38 MHz	50,1	62 MHz	37,9	86 MHz	37,6
39 MHz	49,1	63 MHz	34,9	87 MHz	37,6
40 MHz	49,1	64 MHz	32,9	88 MHz	38,6
41 MHz	48,1	65 MHz	31,9	89 MHz	37,6
42 MHz	48,1	66 MHz	33,9	90 MHz	36,6
43 MHz	45,1	67 MHz	35,9	91 MHz	35,6
44 MHz	45,1	68 MHz	39,9	92 MHz	34,6
45 MHz	47,1	69 MHz	39,9	93 MHz	34,6
46 MHz	47,1	70 MHz	40,9	94 MHz	33,6
47 MHz	47,1	71 MHz	40,9	95 MHz	33,6
48 MHz	44,1	72 MHz	41,9	96 MHz	33,6
49 MHz	41,1	73 MHz	41,9	97 MHz	34,6
50 MHz	41	74 MHz	40,8	98 MHz	34,6
51 MHz	43	75 MHz	40,8	99 MHz	33,6
52 MHz	43	76 MHz	39,8	100 MHz	33,6
53 MHz	44	77 MHz	38,8		

Çizelge 4.4. 15 V/m E-alan altında EMI alıcı kablosunda indüklenen akım seviyeleri (dikey)

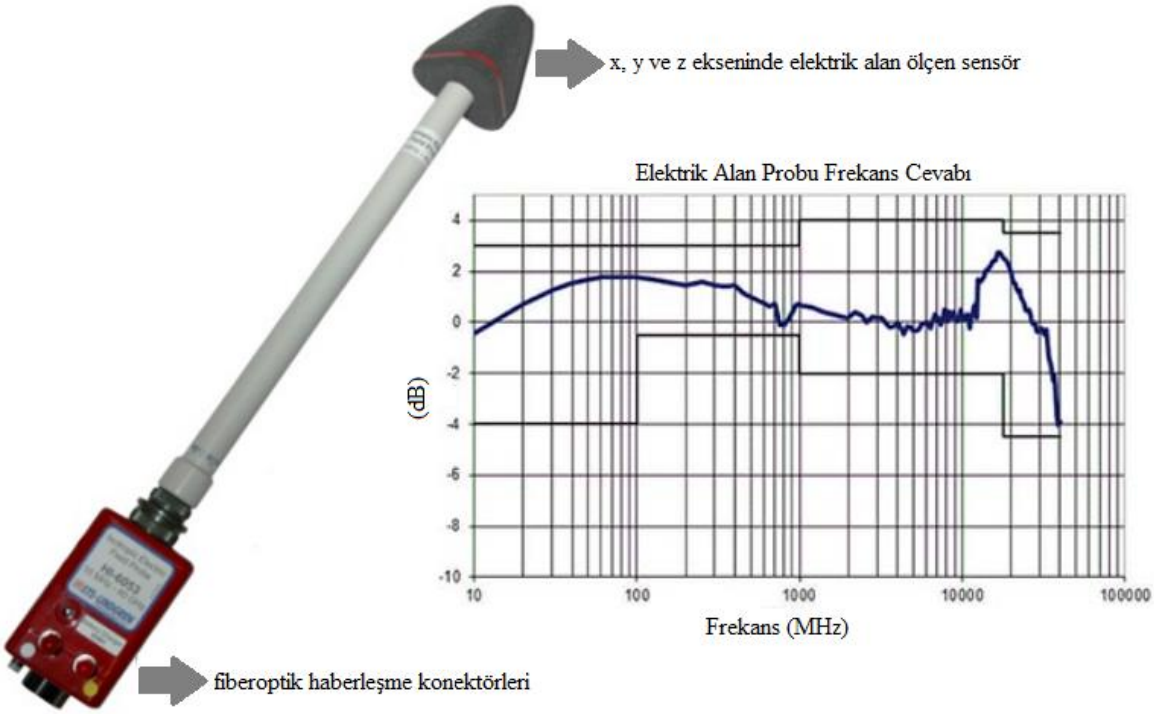
Frekans	**Değer (dBµA)**	**Frekans**	**Değer (dBµA)**	**Frekans**	**Değer (dBµA)**
30 MHz	27,1	54 MHz	40,9	78 MHz	45,7
31 MHz	31,1	55 MHz	40,9	79 MHz	46,7
32 MHz	36,1	56 MHz	40,9	80 MHz	47,7
33 MHz	41,1	57 MHz	42,9	81 MHz	47,7
34 MHz	44,1	58 MHz	43,9	82 MHz	47,7
35 MHz	48,1	59 MHz	44,9	83 MHz	46,7
36 MHz	51,1	60 MHz	44,9	84 MHz	45,6
37 MHz	50,1	61 MHz	45,9	85 MHz	44,6
38 MHz	45,1	62 MHz	45,9	86 MHz	42,6
39 MHz	43,1	63 MHz	44,9	87 MHz	42,6
40 MHz	42,1	64 MHz	42,9	88 MHz	41,6
41 MHz	42,1	65 MHz	42,9	89 MHz	41,6
42 MHz	42,1	66 MHz	43,9	90 MHz	41,6
43 MHz	43,1	67 MHz	44,9	91 MHz	41,6
44 MHz	43,1	68 MHz	44,9	92 MHz	42,6
45 MHz	43,1	69 MHz	44,9	93 MHz	42,6
46 MHz	43,1	70 MHz	44,9	94 MHz	43,6
47 MHz	43,1	71 MHz	44,9	95 MHz	43,6
48 MHz	44,1	72 MHz	44,8	96 MHz	43,6
49 MHz	44,1	73 MHz	44,8	97 MHz	43,6
50 MHz	44	74 MHz	44,8	98 MHz	44,6
51 MHz	45	75 MHz	45,8	99 MHz	45,7
52 MHz	45	76 MHz	45,7	100 MHz	46,7
53 MHz	45	77 MHz	45,7		

Yatay ve dikey kutuplanmada RF kablo üzerinde oluşan gürültü seviyeleri deney altındaki cihaz kablolarında oluşan akım seviyeleri ile karşılaştırmalı olarak Başlık 4.5.3'te değerlendirilmiştir.

4.5.2. Üç prob yöntemi

RS103 testini gerçekleştirmek amacıyla kullanılan ekipmanlar arasında elektrik alan okuma sensörü yer almaktadır. Kurulan deney düzeneklerinde, yaklaşık 2 metre olan düzeneğin orta noktasına anten merkezinin karşısına denk gelecek şekilde, deney masası iletken zemininden MIL-STD-461G standardında belirtildiği şekilde 30 cm yükseklikte elektrik alan okuma sensörü yerleştirilmiştir [1]. Deneylerde 10 MHz – 40 GHz frekans aralığında 2 – 800 V/m dinamik ölçüm aralığında elektrik alan okuması yapabilen izotropik okuma sensörü kullanılmıştır. Sensörün amacı, antenler tarafından üretilen elektrik alan seviyesinin, 15 V/m'ye ulaştığını ölçmektir. Daha sonra, DAC üzerinde oluşturulan elektrik alan seviyesi, Şekil 4.2'de gösterilen elektrik alan monitörüne iletilir.

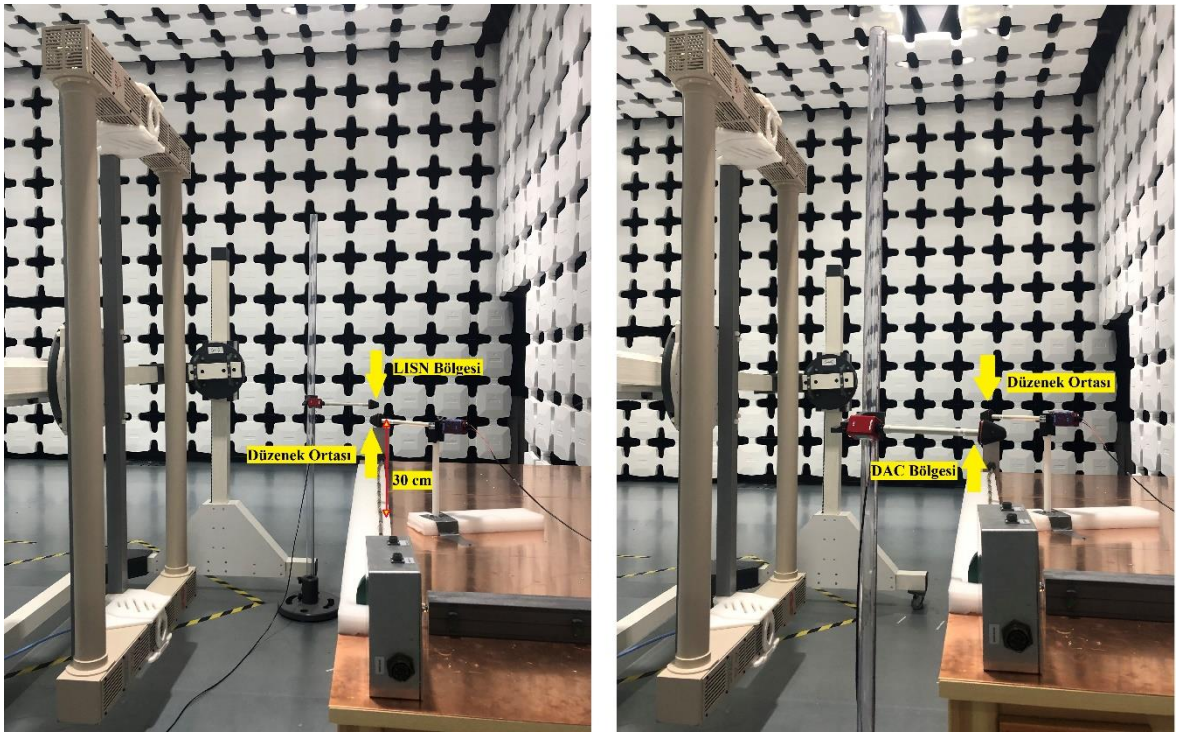
Deneylerde kullanılan elektrik alan okuma sensörü ve frekans cevabı Şekil 4.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.6. Elektrik alan okuma sensörü ve frekans cevabı

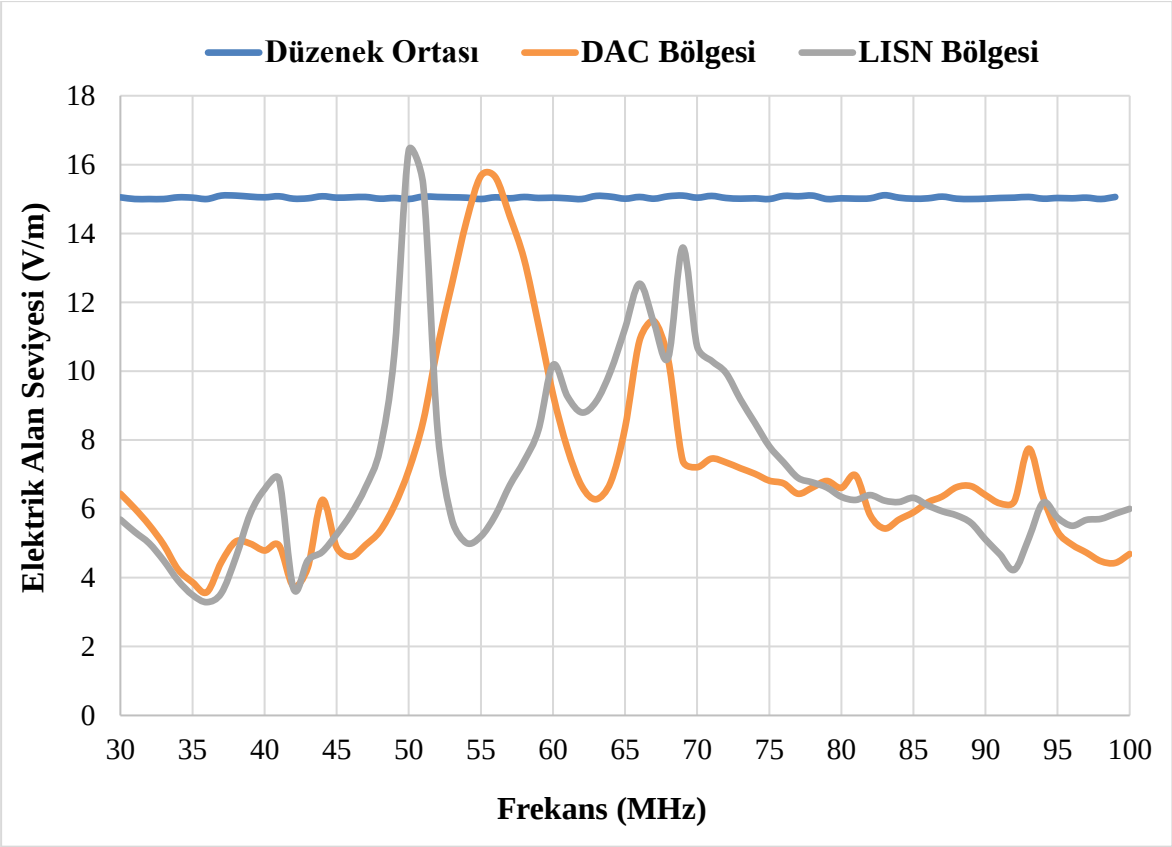
Başlık 4.1'de paylaşıldığı üzere bikonik anten tüm düzeneği orta noktadan ışıtabilmektedir. Elektrik alan üreteci dikey kutuplanmada yeterli anten kolu uzunluğu ile tüm düzeneği ışıtabilirken, yatay kutuplanmada kolları arası mesafe 1 metre olduğundan düzeneğin orta bölgesine prob yerleştirilmesinin yeterli olamayacağı değerlendirilerek üç farklı bölgeye yerleştirilmiştir.

Düzenek ortasına yerleştirilen prob sabitlenmiştir. Prob üzerinde 30 – 100 MHz frekans aralığında her 1 MHz'lik frekans adımında 15 V/m oluşturulmuştur. Aynı zamanda problardan bir tanesi LISN bölgesine yerleştirilmiştir. Daha sonra LISN bölgesinde bulunan prob DAC bölgesine yerleştirilmiştir. Elektrik alan üreteci yatay kutuplanmada konumu sabit olarak düzenek ortasında bırakılmıştır. Ölçüm düzeneğine ait görsel Şekil 4.7'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.7. Prob yerleşim bölgeleri

Deney altındaki herhangi bir cihazı ve kablolarını tek bir noktadan elektrik alan üreteci ile ışıtarak her bölgesinde 15 V/m elektrik alan oluşturabilme durumu incelenmiştir. Şekil 4.7'de DAC ve ekranlı kablosu üzerinde 15 V/m elektrik alan oluşturulmuştur. Probların okuduğu değerler Şekil 4.8'de paylaşılmıştır.



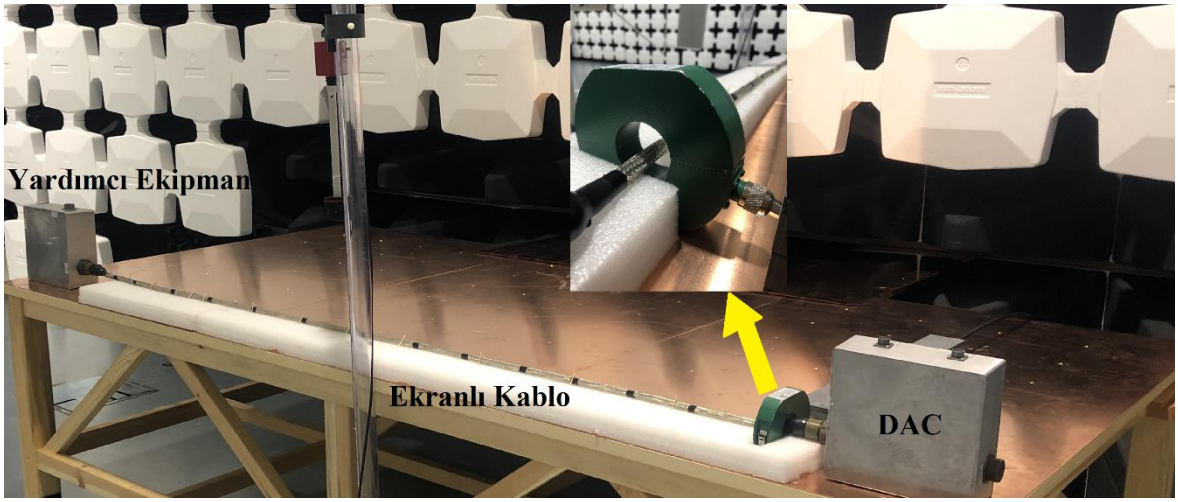
Şekil 4.8. E-alan üreteci yatay kutuplanma elektrik alan değerleri

Şekil 4.8'de verilen ölçüm sonucu incelendiğinde; düzenek 15 V/m elektrik alana maruz bırakıldığında DAC bölgesi ve LISN bölgesine yerleştirilen problarda aynı elektrik alan seviyesinin oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, elektrik alan üreteci ışıma deseninin saçılma özelliği gösterdiği ve sadece anten kollarının arasındaki mesafe kadar (1 metre) alanda etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Tüm frekans bandı değerlendirildiğinde 50 – 51 MHz ve 55 – 56 MHz frekanslarında gerekli elektrik alan seviyesi (15V/m) oluşturulabilmiştir.

4.5.3. Ekranlı kablo ile RS103 testi

Askeri standartlara göre tasarlanan ekipmanlar ortamda bulunan RF tehditlerden etkilenmemek için genellikle ekranlı kablo ile güç ve veri iletişimi sağlamaktadır. Ekranlı kablo, bağlı bulunduğu askeri konektörün üzerinde 360 derece sonlandırılır. Askeri konektör gövdeleri iletken olduğundan herhangi bir RF tehdit kablo üzerine indüklendiğinde öncelikle DAC şasesine daha sonra ise DAC'ın bağlı bulunduğu toprağa doğru yönelir. Bu sayede güç hatları ve haberleşme hatları RF tehditten kısmen daha az etkilenirler veya etkilenmezler.

Ekranlı bir kabloya sahip bir DAC 30 – 100 MHz frekans aralığında 15 V/m altında bikonik anten ve elektrik alan üreteci ile deneye tabi tutulmuştur. Bu kapsamda kullanılan deney düzeneği Şekil 4.9'da paylaşılmıştır.

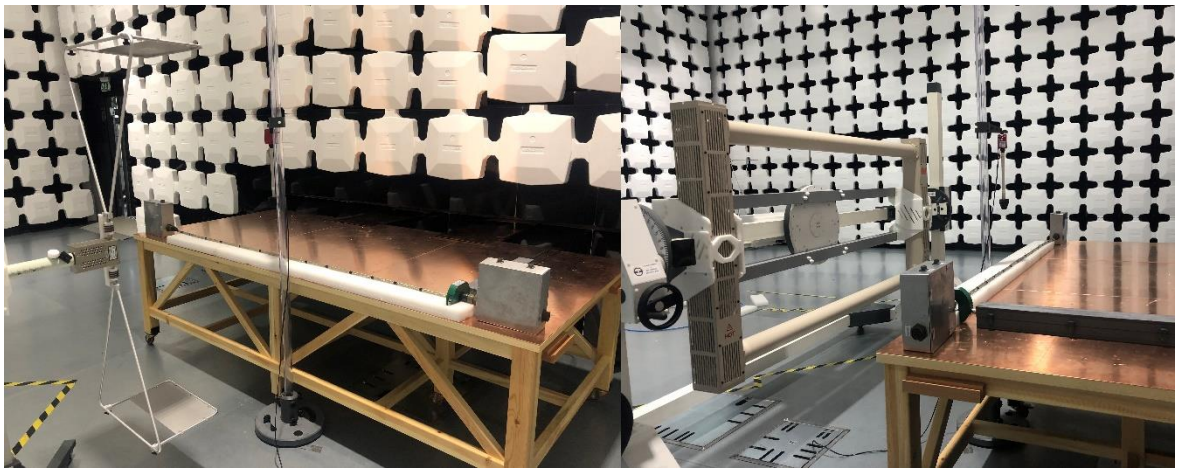


Şekil 4.9. Ekranlı kablo ile kurulan deney düzeneği

DAC ve ilgili kablolarına RS103 deneyi uygulanmıştır. MIL-STD-461G standardında her bir platform için farklı elektrik alan seviyeleri önerilmiştir. Deney, antenlerin karşılaştırılmasını amaçlamaktadır ve standartta gösterilen RS103 deneyinin düzeneğinde akım okuma probu bulunmamaktadır. Deneyde kullanılan metal kutuların fonksiyonel bir görevi olmadığından ancak kablo üzerinde oluşan akım seviyeleri ile anten etkinlikleri gözlenmiştir. Akımı okuyabilmek için düzeneğe eklenen prob, EMI alıcı gibi hassas bir ölçüm cihazına bağlı bulunduğundan alıcıyı korumak amaçlı 15 V/m elektrik alan seviyesi belirlenmiştir.

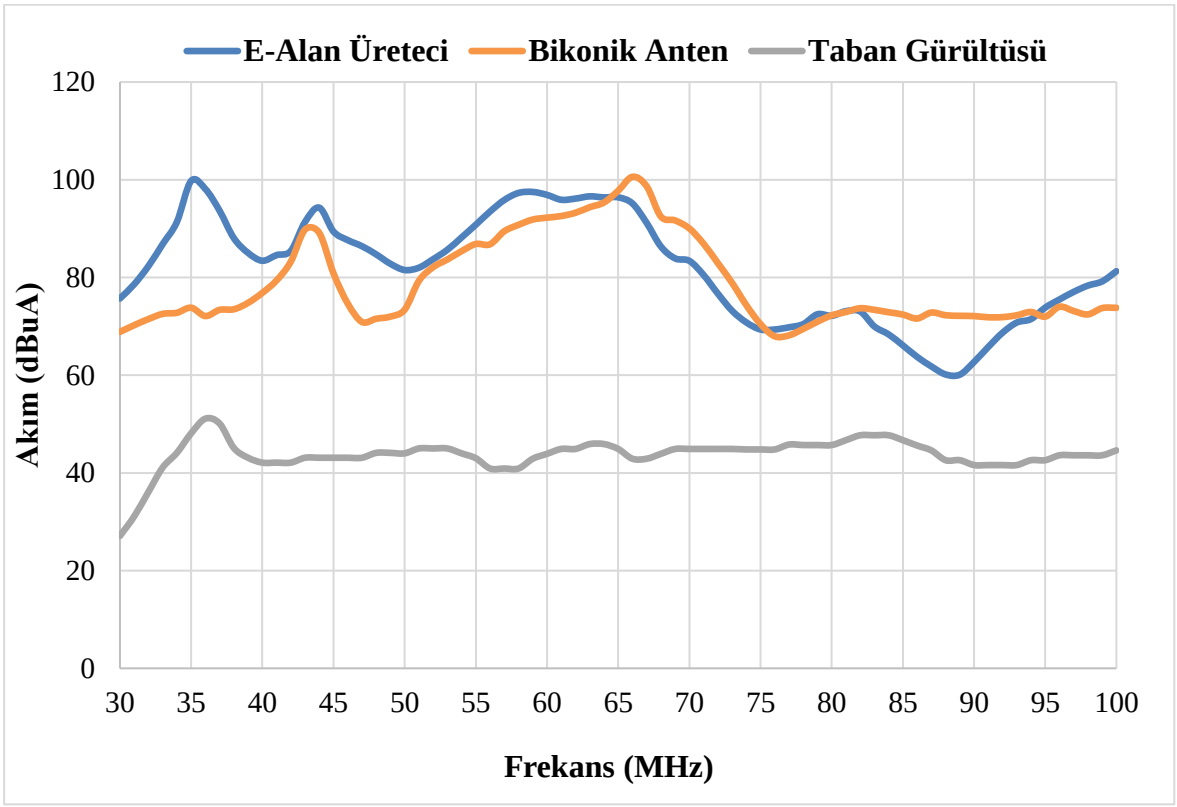
Dikey kutuplanma

30 -100 MHz frekans aralığında elektrik alan üreteci ve bikonik anten kullanılarak dikey kutuplanmada gerçekleştirilen RS103 deneyine ait görsel Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Ekranlı kablo dikey kutuplanma RS103 deneyi

Şekil 4.10'da gösterilen düzenekler kurularak ekranlı kablo üzerinde indüklenen akım seviyeleri Şekil 4.11'de paylaşılmıştır.

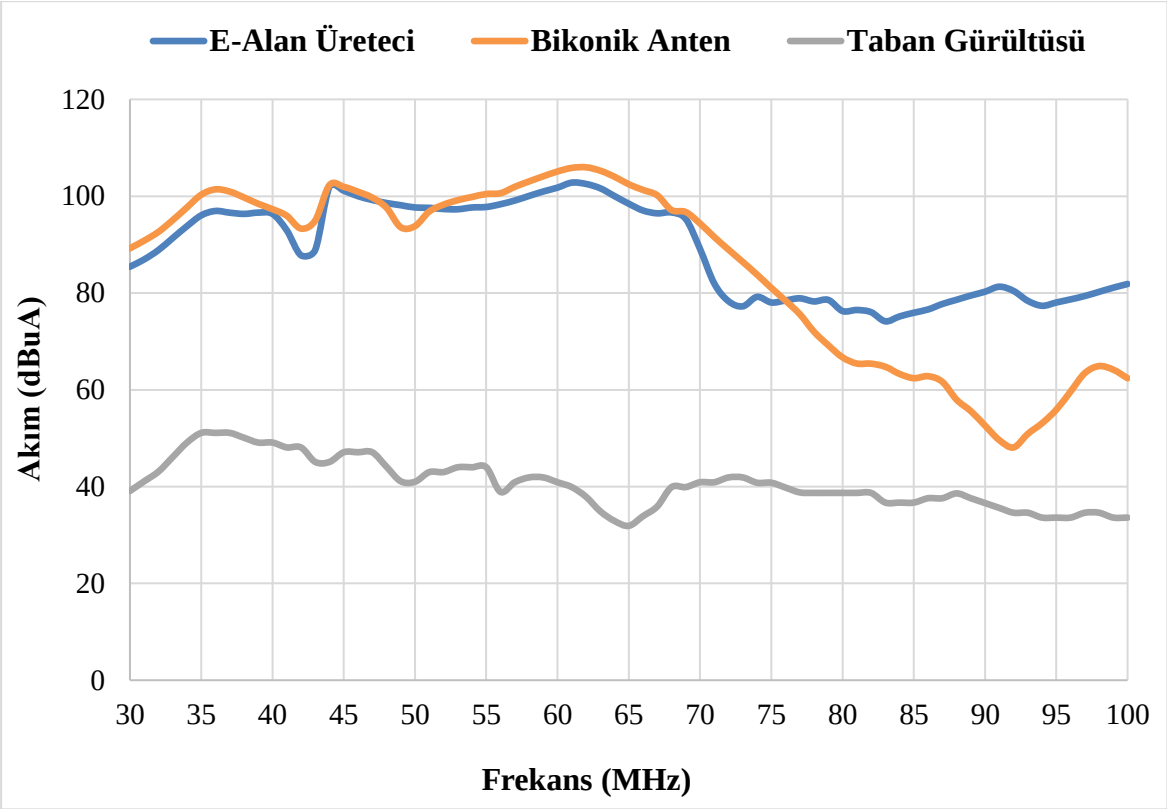


Şekil 4.11. Ekranlı kabloda oluşan akım seviyeleri (Dikey kutuplanma)

Şekil 4.11'de verilen sonuç grafiği incelendiğinde dikey kutuplanmada çeşitli frekanslarda kablo üzerinde aynı elektrik alan seviyesi altında farklı akımlar oluştuğu görülmüştür. Maksimum farkın ise 35 MHz frekansında oluştuğu tespit edilmiştir. Elektrik alan üreteci 99,77 dBµA akım oluştururken bikonik anten 73,81 dBµA akım oluşturabilmiştir.

Yatay Kutuplanma

Yatay kutuplanmada gerçekleştirilen RS103 deneyi sonucunda ekranlı kablo üzerinde oluşan akımlara ait sonuçlar Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Ekranlı kabloda oluşan akım seviyeleri (Yatay kutuplanma)

Yatay kutuplanmada 3-prob yönteminin çıktısı olarak elektrik alan üreteci, maksimum elektrik alanı oluşturabilmesi için düzeneğin ortasına yerleştirilmiştir. Deney sonucu, 30 -70 MHz frekans aralığında bikonik anten ve E-alan üretecin benzer davranış sergilediğini gösterirken 70 – 100 MHz frekans aralığında DAC'ta farklı etkilenmelere neden olabileceğini göstermiştir. Grafiğe göre maksimum fark oluşan nokta ise 92 MHz frekansı olarak belirlenmiştir. Elektrik alan üreteci 80,42 dBµA akım oluştururken bikonik anten 48,1 dBµA akım oluşturabilmiştir.

4.5.4. Dijital termometre deneyi

Ekranlı kablo deneyinde aynı elektrik alan seviyesinin elektrik alan üreteci ve bikonik anten ile üretilmesi durumunda kablo üzerinde indüklediği akımların farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Oluşan farklı akımların DAC'ta neden olacağı etkilenmeleri inceleyebilmek

amacı ile Şekil 4.13'te paylaşılan Omega marka HX93DA model dijital termometre kullanılmıştır. Dijital termometre -20ºC ile +75ºC aralığında sıcaklık okuyabilme yeteneğine sahiptir. Termometrenin nem ölçer özelliği RS103 deneyine tabi tutulmamıştır.

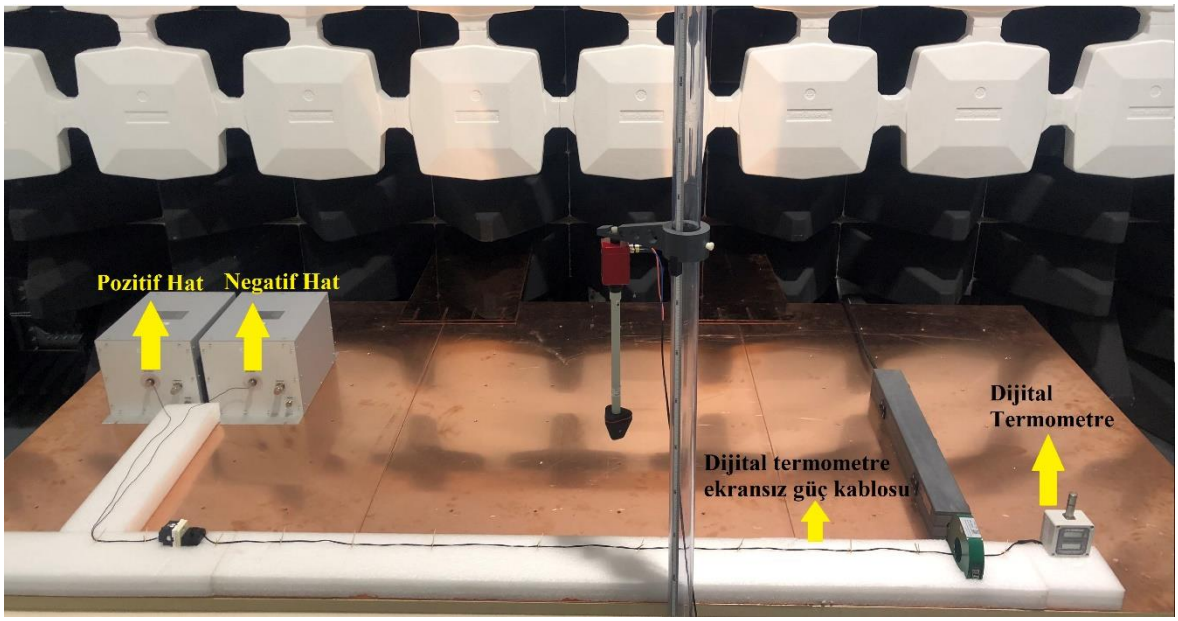


Şekil 4.13. Omega HX93DA dijital termometre (DAC)

İlk olarak ekranlı kablo deneyinde oluşturulan 15 V/m elektrik alan seviyesi altında dijital termometrenin etkilenme durumu incelenmiştir. Deney sonucunda 15 V/m elektrik alan altında termometre davranışlarının farklı frekanslardaki doğrusallığını koruyamadığı tespit edilmiştir. Daha sonra 10 V/m elektrik alan uygulanmıştır. Doğrusal bir etkilenme bu seviyede de gerçekleştirilememiştir. 5 V/m elektrik alan seviyesine düşülerek doğrusal bir etkilenme senaryosu oluşturulduktan sonra deneye bu elektrik alan seviyesi ile devam edilmeye karar verilmiştir.

Dijital termometrenin 30 – 100 MHz frekans aralığında 5 V/m elektrik alana ışıma yolu ile maruz bırakıldığında etkilenme durumu araştırılmıştır. Deneyin gerçekleştirilmesinde "elektrik alan üreteci" ve "bikonik anten" kullanılmıştır. Deneyler yatay ve dikey kutuplanmada gerçekleştirilmiştir.

Dijital termometre ve güç kablosu Şekil 4.2'de gösterilen düzeneğe uygun bir şekilde deney masası üzerine yerleştirilmiştir. Düzeneğe ait görsel Şekil 4.14'te paylaşılmıştır.

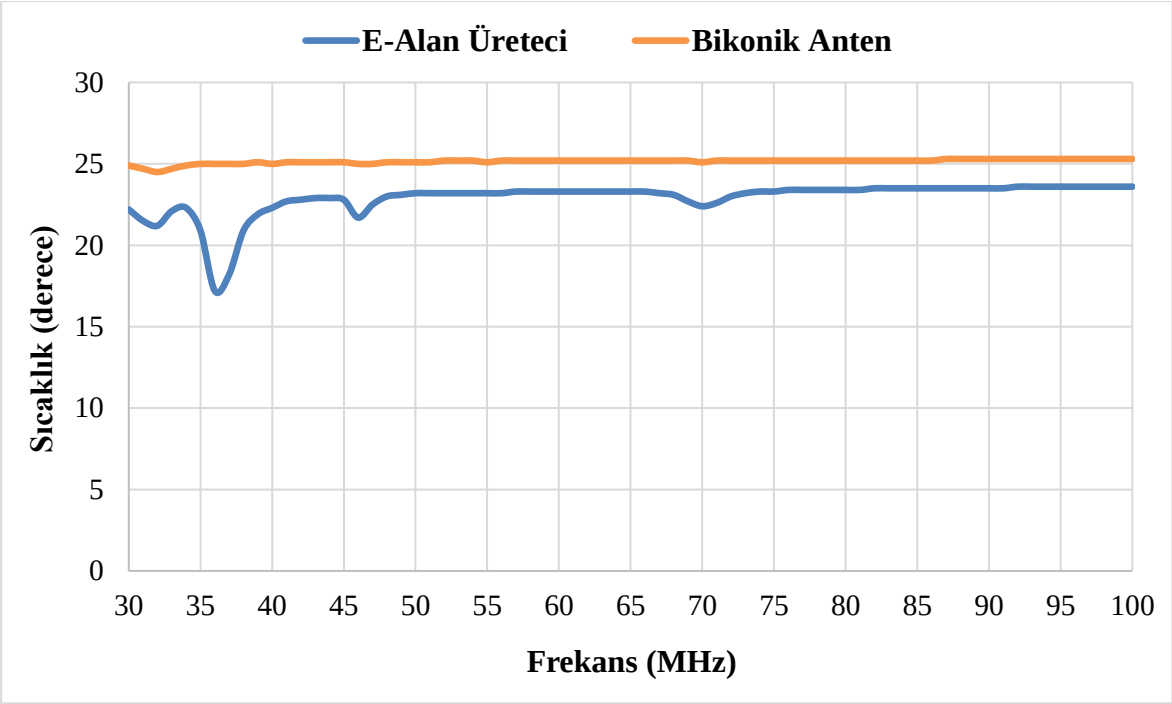


Şekil 4.14. Dijital termometre ışınım yolu ile bağışıklık deneyi düzeneği

Dijital termometrenin güç beslemesi hat empedans dengeleyicileri üzerinden yapılmıştır. MIL-STD-461G standardı gereği termometre ve güç kablosu masa kenarından 10 cm içeride olacak şekilde iletken zemine yerleştirilmiştir. Elektrik alan okuma sensörü düzenek ortasına konumlandırılmıştır. Akım okuma probu termometreden 5 cm ötede yer almaktadır.

Dikey Kutuplanma

Dikey kutuplanmada dijital termometrenin 30 – 100 MHz frekans aralıklarında ışıma yolu ile oluşturulan 5 V/m altındaki davranışları incelenmiştir. Deneyin gerçekleştirildiği yarı yansımasız test hücresi ortam sıcaklığı 25ºC olarak ölçülerek kaydedilmiştir. Bikonik anten ve elektrik alan üreteci ile oluşturulan elektrik alan değeri altında termometrenin davranışı gözlemlenmiştir. Dijital termometrenin deney esnasındaki davranışına ait sonuçlar Şekil 4.15'te paylaşılmıştır.



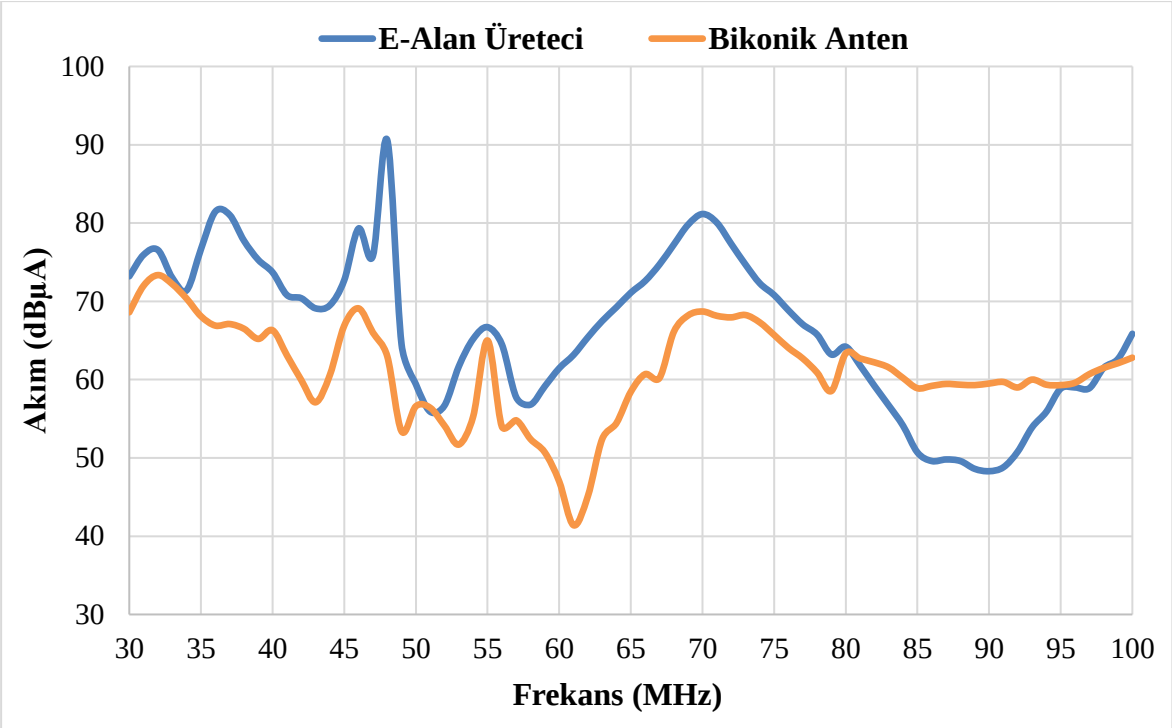
Şekil 4.15. Dijital termometre RS103 deney sonucu (dikey kutuplanma)

Şekil 4.15'te verilen sonuçlar incelendiğinde dikey kutuplanmada bikonik anten ile gerçekleştirilen RS103 testinde termometre ortam sıcaklığı değerini göstermeye devam ederek etkilenmemiştir.

Elektrik alan üreteci ile gerçekleştirilen deneyde ise termometre etkilenerek kendinden beklenen performansı yerine getirememiştir.

Aynı elektrik alan seviyeleri (5V/m) oluşturulduğu durumda dijital termometrenin farklı davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

RS103 deneyi esnasında termometre davranışları kaydedilirken, güç kablosu üzerinde bulunan akım probu ile kablo üzerinde indüklenen akım seviyeleri de kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16'da paylaşılmıştır.

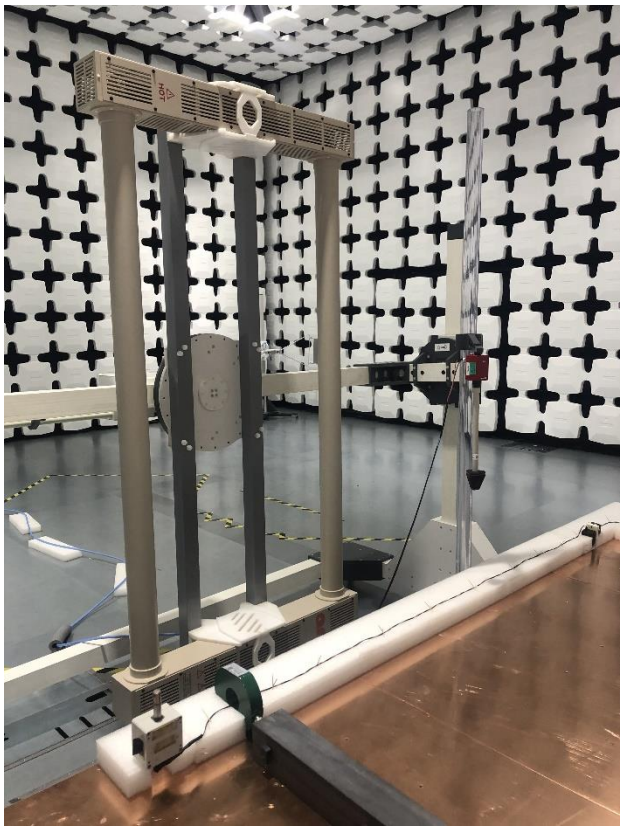


Şekil 4.16. Dijital termometre güç kablosu üzerinde indüklenen akım (dikey kutuplanma)

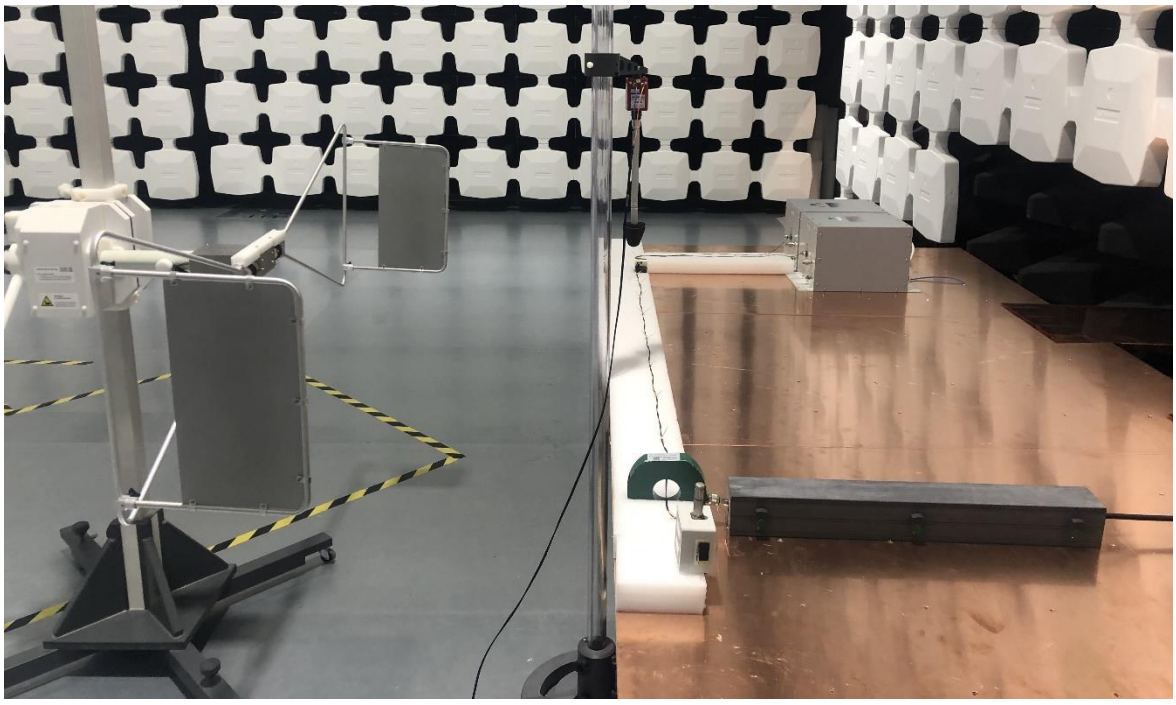
Termometre güç kablosu üzerinde dikey kutuplanmada elektrik alan üretecinin bikonik antene kıyasla daha yüksek seviyeli akım indüklediği frekanslarda termometre etkilenme seviyesi ile açıklanabilir bir sonuç elde edilmiştir.

Yatay Kutuplanma

Dikey kutuplanma deneyindeki dijital termometre ve kablolarına ait yerleşimde bir değişiklik yapılmadan sadece Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterildiği üzere bikonik anten ve elektrik alan üreteci yatay kutuplanma pozisyonuna getirilmiştir.



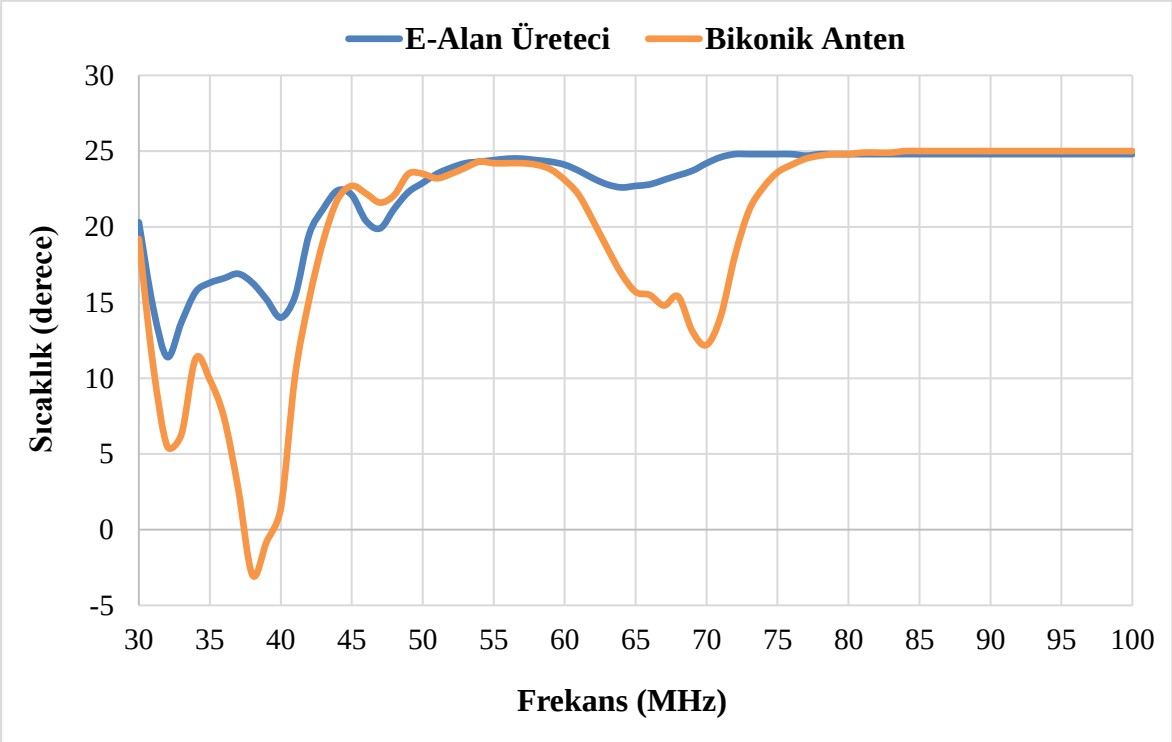
Şekil 4.17. Elektrik alan üreteci yatay kutuplanma deney düzeneği



Şekil 4.18. Bikonik anten yatay kutuplanma deney düzeneği

Yatay kutuplanmada 30 – 100 MHz frekans aralığında sırasıyla elektrik alan üreteci ve bikonik anten ile sensör ve güç kablosu 5 V/m elektrik alana maruz bırakılmıştır. Her bir frekans için dijital termometre etkilenme seviyeleri kaydedilirken güç kablosu üzerinde her

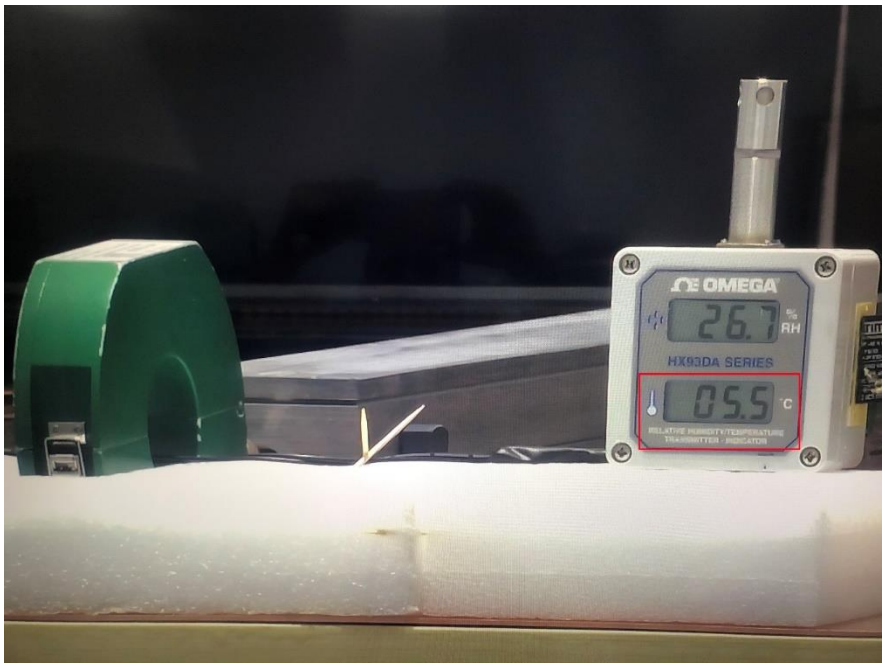
iki göndermecin indüklediği akım seviyeleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına ait veriler Şekil 4.19'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.19. Dijital termometre RS103 deney sonucu (yatay kutuplanma)

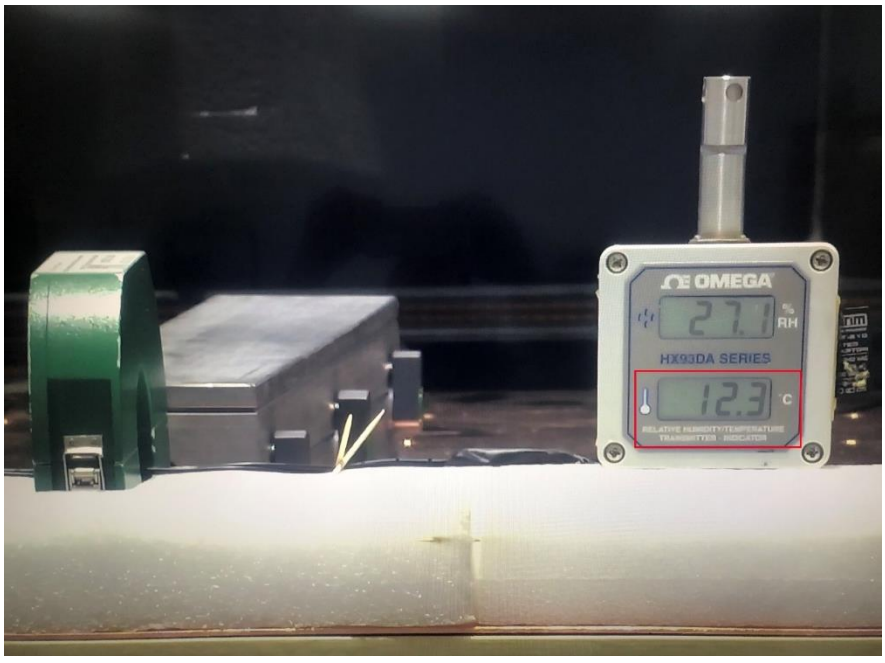
Deney sonucu incelediğinde 30 – 75 MHz frekans aralığında aynı elektrik alan seviyesi (5V/m) oluşturulsa da dijital termometre davranışlarında dramatik farklar oluştuğu tespit edilmiştir.

Bikonik anten ile gerçekleştirilen RS103 deneyi esnasında yatay kutuplanmada uygulanan 5 V/m elektrik alan altında dijital termometredeki etkilenme seviyesine ait örnek bir görsel Şekil 4.20'de paylaşılmıştır.



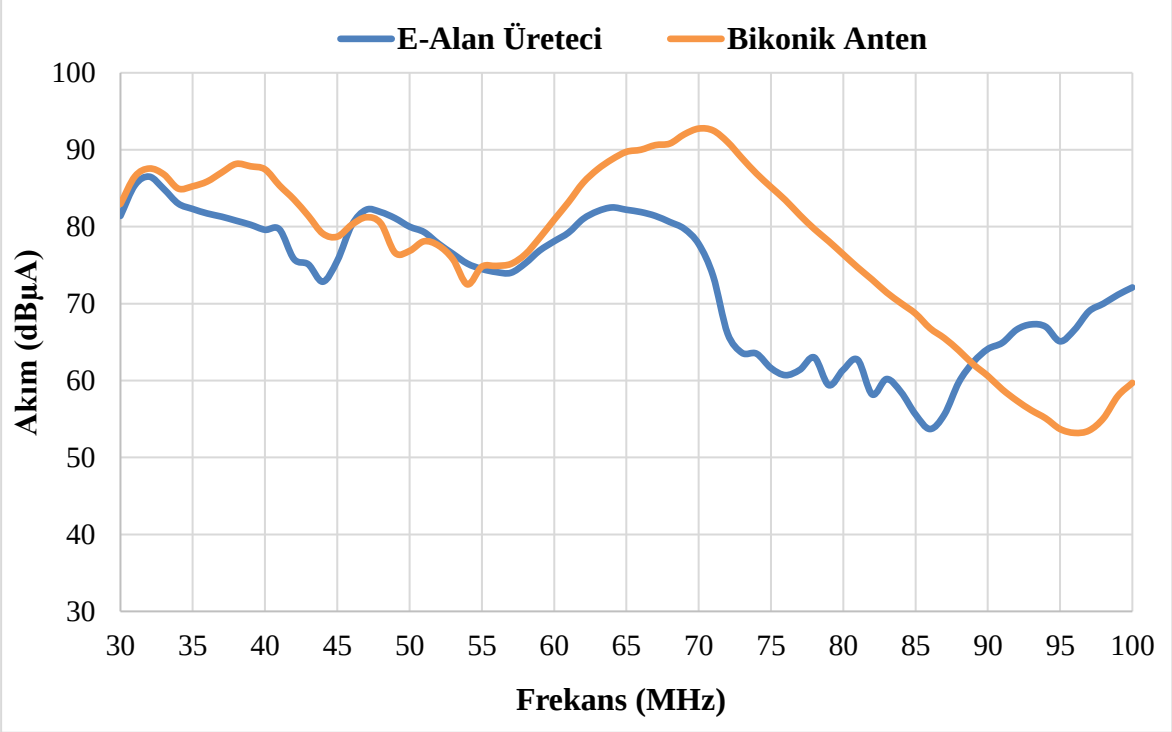
Şekil 4.20. RS103 deneyi esnasında dijital termometre davranışı (bikonik anten)

Elektrik alan üreteci ile gerçekleştirilen RS103 deneyi esnasında yatay kutuplanmada uygulanan 5 V/m elektrik alan altında dijital termometredeki etkilenme seviyesine ait örnek bir görsel Şekil 4.21'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.21. RS103 deneyi esnasında dijital termometre davranışı (elektrik alan üreteci)

RS103 deneyi esnasında termometre davranışları kaydedilirken, güç kablosu üzerinde bulunan akım probu ile kablo üzerinde indüklenen akım seviyeleri de kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.22'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.22. Dijital termometre güç kablosu üzerinde indüklenen akım (yatay kutuplanma)

Termometrenin yatay kutuplanmada RS103 testi sırasında karşılaştığı performans kayıplarının kablolar üzerine indüklenen akım seviyeleri ile ilintisi araştırılmıştır. Termometrenin etkilenmesinin ortadan kalktığı (25ºC gösterebildiği) 77 MHz frekansına kadar Şekil 4.19'da görüldüğü üzere bikonik anten daha fazla etkileyebilmiştir. Bu duruma paralel olarak ise bikonik anten için Şekil 4.22'de görüldüğü üzere elektrik alan üretecine göre daha yüksek akımlar ölçülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Askeri cihazların entegre edileceği platformda ve görev yapacağı muharebe ortamında 2 MHz – 40 GHz frekans aralığı gibi geniş bir bantta istemli veya istemsiz olarak üretilen elektromanyetik tehditler bulunmaktadır. Bu tehditler altında askeri cihazların kendinden beklenen performansları yerine getirme yeteneği MIL-STD-461G standardına uyumlu olarak platforma entegre edilmeden laboratuvar ortamında test edilmektedir.

MIL-STD-461G standardı, ışıma yolu ile tehditlerin askeri cihazlara etkilerini incelemek üzere RS103 testini işaret etmektedir. RS103 testi 2 MHz – 40 GHz aralığında uygulanabilir olup bu tezde VHF bandına denk gelen ışıma yolu ile tehditleri kapsayan 30 – 100 MHz frekansı aralığı ele alınmıştır.

MIL-STD-461G standardı; RS103 test esasları bölümünde, test frekansları, platforma uygun elektrik alan seviyesi, antenin deney altındaki cihazdan uzaklığı ve elektrik alan okuma sensörü yerleşimini tanımlamaktadır. Kullanılacak anten tipi, kazancı, çalışma frekans aralıkları ve VSWR değeri konusunda ise gereksinim bildirmemektedir. Dolayısı ile 30 – 100 MHz frekans aralığında elektrik alan üretebilen ve EMC laboratuvarlarında kullanılan birkaç anten tipi bulunmaktadır.

Deneylerde kullanılan Amplifier Research firmasına ait ATP10K100M model numaralı elektrik alan üreteci 2 – 100 MHz frekans aralığında ışıma yapabilmektedir. Elektrik alan üreteci tam bir anten olmayıp sadece paralel kolları arasında potansiyel farkı yaratarak bir elektrik alan bölgesi oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu durum, yönlendirilmeyen ışımanın saçılma durumunun incelenmesi ve yönlendirilmiş bir ışıma yapabilen bikonik anten ile karşılaştırılması ihtiyacını doğurmuştur. 30 – 100 MHz bandında ışıma yapabilen ve dünyada kullanımı yaygın olan anten ise Schwarzbeck firmasına ait BBAE9179 (VHBD-9134-4 bal-un ile) model numaralı bikonik antendir. 20 – 200 MHz frekans bandında ışıma yapabilme yeteneğine sahiptir.

Bikonik anten önceki bölümlerde paylaşıldığı üzere geniş bir huzmeye sahip olup, 3 metreye kadar bir düzeneği tek seferde hem yatay hem dikey kutuplanmada ışıtabilmektedir (deneylerde kurulan düzenek 2,5 metre uzunluğundadır). Elektrik alan üretecinin dikey kutuplanmada 2,6 metre kol uzunluğa sahip olması nedeni ile tek noktadan ışıma

gerçekleşmiş ve tüm düzeneği elektrik alana tabi tutabilmiştir. Elektrik alan üretecinin yatay kutuplanmada ışıtabileceği alanın tespiti için düzenek, üreteç kolları arası mesafe olan 1 metrelik bölgelere bölünerek 3 farklı noktaya okuma sensörü yerleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre ise elektrik alan üreteci yatay kutuplanma ölçümlerinin üç farklı bölgede gerçekleştirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Bu kapsamda, biri DAC diğeri yardımcı ekipman olmak üzere iki adet metalik yapı MIL-STD-461G standardı genel deney düzeneğine uygun olarak 15 V/m elektrik alan seviyesinde RS103 deneyine tabi tutulmuştur. DAC ve yardımcı ekipmanı ekranlı bir kablo ile bağlanmıştır. 15 V/m elektrik alan altında ekranlı kablo üzerinde elektrik alan üreteci ve bikonik antenin oluşturduğu akım seviyeleri 10 kHz – 400 MHz frekans bandında akım okuyabilen bir prob ile ölçülerek karşılaştırılmıştır.

Dikey kutuplanmada ekranlı kablo üzerinde oluşan akım değerinde maksimum fark 35 MHz'te olup 25,96 dBuA'dır. Bu değer, her iki akım değeri arasında 18 katlık bir fark olduğunu göstermektedir.

Yatay kutuplanmada 30 MHz'ten 70 MHz'e kadar olan ışıma altında elektrik alan üreteci ve bikonik anten benzer akımları indükleyebilmiştir. 70 MHz'ten 100 MHz'e kadar olan frekans aralığında ise elektrik alan üretecinin kablo üzerinde daha yüksek akım indüklediği ölçülmüştür.

Her iki çözümün aynı elektrik alan seviyesini oluşturabildiği elektrik alan sensörü tarafından doğrulansa da ışıma deseni farklılığının RS103 test sonuçlarına olan etkisini gözlemlemek için dijital termometre ve ekransız güç kablosu deneye tabi tutulmuştur. Deney esnasında 30 – 100 MHz frekans aralığında dijital termometre 5 V/m elektrik alana maruz bırakılmıştır.

Deneyler esnasında yarı yansımasız test hücresi ortam sıcaklığı 24 – 25 ºC seviyesinde ölçülmüştür. Daha sonra 5 V/m elektrik alan altında etkilenme seviyeleri incelenmiştir.

Dikey kutuplanmada neredeyse tüm frekans bandında elektrik alan üreteci ve bikonik anten dijital termometre çalışma performansını düşürememiştir.

Yatay kutuplanmada 30 – 45 MHz frekans aralığında bikonik antenin ürettiği elektrik alan altında termometre ışımadan etkilenerek 25 ºC olan ortam sıcaklığını en fazla etkilendiği durumda -3 ºC olarak göstermiştir. Aynı frekans bandında elektrik alan üreteci, dijital termometreyi 25 ºC olan ortam sıcaklığını 11,4 ºC gösterecek kadar etkileyebilmiştir. 45 – 60 MHz frekans aralığında termometre elektrik alandan her iki yöntemle de etkilenmemiştir. 60 – 75 MHz frekans aralığında ise bikonik anten termometreyi etkileyebilmişken elektrik alan üreteci aynı performansı gösterememiştir.

Oluşturulan düzenekler; EMC test laboratuvarlarında gerçekleştirilen RS103 testinin 30 -100 MHz frekans bandında gerekli elektrik alan seviyesinin farklı antenler ile oluşturabildiğini göstermiştir. Bu araştırmada, aynı elektrik alan seviyelerini oluşturan anten ve elektrik alan üretecinin ışıma desenindeki farklar ve test sonuçlarına etkileri ortaya koyulmuştur. Ekranlı kablo üzerinde indüklenen akım seviyelerinin farkları sunulmuştur. Aynı şekilde deney numunesi olarak ele alınan dijital termometre davranışlarının aynı elektrik alan seviyesi altında farklı ışıma araçları ile farklı davrandığı tespit edilmiştir.

Askeri EMC testlerinde; deneylerde ele alınan dijital termometre yerine bir savaş uçağının, helikopterin, SİHA'nın, fırkateynin ya da taktik zırhlı bir askeri aracın sahip olduğu kritik bir alt sistem (görev bilgisayarı, konum sensörü, ivme ölçer vb.) RS103 testine tabi tutulmaktadır. VHF bandında gerçekleştirilecek ışıma testlerinde anten tercihine göre deney altındaki cihazın aynı frekans ve aynı elektrik alan seviyesi altında etkilenme seviyelerinin farklılık gösterdiği ölçümlerle karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

RS103 testinde kullanılan antenlerin deneylere olan bu etkisinin, askeri bir görev sırasında doğrulandığı (RS103 testinden geçebildiği) düşünülen kritik bir alt sistemin elektronik harp ortamında olası bir ışınım yollu tehditten etkilenip görevini yerine getirememesine ya da ölümcül bir hataya neden olabileceği anlaşılmıştır.

Çalışmada ele alınan elektrik alan üretecinin RS103 testinin sadece dikey kutuplanmada gerçekleştirilen 2 – 30 MHz frekans bandı için uygun olduğu değerlendirilmektedir. 30 – 100 MHz frekans bandı hem yatay hem dikey kutuplanmada test gerektirdiğinden özellikle yatay kutuplanmada üreteç yetersiz kalmaktadır. Örneğin 2,5 metrelik bir test düzeneği ile gerçekleştirilecek bir RS103 testi esnasında E-alan üreteci kullanılması durumunda deney

altındaki cihazı tümüyle teste tabi tutabilmek için minimum 3 bölgede deneyler gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Huzme genişliğinin ötesinde, elektrik alan üreteci tam olarak bir anten olmadığı için yönlendirilmiş bir ışıma yapamadığından 30 – 100 MHz frekans aralığında RS103 testini gerçekleştirmek için bikonik antenin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Department of Defense (2015). MIL-STD-461G, *Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*.

2. Yuan, Y. X. (2009, September). *The Influence of the Beamwidth of Transmit Antenna on RS103, Radiated Susceptibility*. Paper presented at the 5th Asia-Pacific Cenference on Environmental Electromagnetics, Xi'an, China.

3. Cakir, S., Sen, O., Tektas, C.B., Ozturk, M., Ayaydin, A. (2021 September). *Improved Field Uniformity over Metallic Table in Military Radiated Susceptibility Testing by Adjusting Lengths of Antenna Elements and Test Table*. Paper presented at the 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Bali, Indonesia.

4. Cheng, D. K. (2006). *Field and Wave Electromagnetics (2nd Edition)*. Pearson Education China: Asis Limited and Tsinghua University Press, 307-326.

5. Balanis, C. A. (2012). *Advanced Engineering Electromagnetics (2nd Ed.)*. New Jersey: John Wiley & Sons, 1-5.

6. Sevgi, L. (2017). *A Practical Guide to EMC Engineering*. London: Artech House, 77.

7. Morgan, D. (2007). *Handbook for EMC Testing and Measurement*. London: The Institution of Engineering and Technology, 115-120.

8. Wadell, B. C. (1991). *Transmission Line Design Handbook*, London: Artech House, 28-31.

9. Macnamara, T. M. (2018). *Handbook of Antennas for EMC (2nd Ed.)*. London: Artech House, 119-122.

10. King, R. W. P. (1956). *The Theory of Linear Antennas With Charts and Tables for Practical Applications*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 821.

11. Department of Defense (1967). MIL-STD-462D, *Measurement of Electromagnetic Inteference Characteristics*.

12. İnternet: Wyatt, K. (2012). *The HF current probe: Theory and application*. Web: http://www.idconline.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/The_HF_current_Probe_Theory_and_Application.pdf , Son Erişim Tarihi: 16.10.2021.

13. İnternet: Amplifier Research. (2021, May 28). *RF and EMC Formulas and Charts*. Web: https://www.arworld.us/html/posterrequest.asp?poster=formulas, Son Erişim Tarihi: 28.05.2021.



GAZİ GELECEKTİR...