

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAM YANSIMALI ODALARDA İLETKEN KUMAŞLARIN
EKRANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ İÇİN ÖZGÜN BİR
ÖLÇÜM TEKNİĞİ

Hakkı Ekin ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Doç. Dr. Hamid TORPİ

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAM YANSIMALI ODALARDA İLETKEN KUMAŞLARIN EKSPANLAMA
ETKİNLİĞİ TESTLERİ İÇİN ÖZGÜN BİR ÖLÇÜM TEKNİĞİ**

Hakkı Ekin ÖZDEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması 02.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hamid TORPİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Serdar KARGIN, Üye
İstanbul Arel Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Hamid TORPİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan TAM YANSIMALI ODALARDA İLETKEN KUMAŞLARIN EKSPANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ İÇİN ÖZGÜN BİR ÖLÇÜM TEKNİĞİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hakkı Ekin ÖZDEMİR

*Biricik eşime
ve aileme*



TEŞEKKÜR

İlk olarak tez süresince her zaman desteğini hissettiren, bilgisi ve tecrübesiyle yardımlarını hiç esirgemeyen çok değerli hocam ve tez danışmanım sayın Doç. Dr. Hamid TORPİ'ye,

Bu tezin geliştirilmesi için çok değerli fikirler veren, kısıtlı zamanlarında bile sorularım için vakit ayıran, laboratuvarımızın değerli danışmanı sayın Doç. Dr. Muhammet Hilmi Nişancı'ya,

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sağladıkları imkanlardan ötürü laboratuvar müdürümüz sayın Coşkun COŞAR'a; çalışma süresince bilgi paylaşımları, destekleri ve yardımlarından ötürü laboratuvar ekibimizden sayın Dr. Ahmet Yasin ÇİTKAYA'ya, sayın Mücahid Taha MERSİN'e ve sayın İsmail PALA'ya,

Son olarak ise bana her zaman inanan ve desteğini hiç esirgemeyen eşime ve aileme, bana olan sonsuz güvenleri ve sevgileri için teşekkürlerimi sunarım.

Hakkı Ekin ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
2 EKLANLAMA ETKİNLİĞİ	3
2.1 Ekranlama Etkinliği Test Ortamları	5
2.1.1 TEM/GTEM Hücreleri	5
2.1.2 Tam Yansımasız Odalar	6
2.1.3 Yarı Yansımasız Odalar	7
2.1.4 Tam Yansımali Odalar	9
2.2 Ekranlama Etkinliği Test Düzenekleri	10
2.2.1 IEC 61000-4-21 Standardına göre Ekranlama Etkinliği Test Düzenegi	10
2.2.2 IEEE 299 Standardına göre Ekranlama Etkinliği Test Düzenegi .	11
2.2.3 MIL-DTL-83528G Spesifikasyonuna göre Ekranlama Etkinliği Test Düzenegi	15
3 TAM YANSIMALI ODALAR	16
3.1 Tam Yansımali Oda İçerisinde Yayılan Modlar	16
3.2 Toplam Yayılan Mod Sayısı	17
3.3 Kullanılabilir En Düşük Frekans (<i>LUF</i>)	18
3.4 Çalışma Hacmi	18
3.5 Elektromanyetik Alan Homojenliği	18

3.6	Q Faktörü	21
4	İLETKEN KUMAŞLARIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ İÇİN ÖNERİLEN ÖLÇÜM TEKNİĞİ	22
4.1	Tam Yansımali Odanın Boyutları ve Elektriksel Performansı	22
4.1.1	Kullanılabilir En Düşük Frekans (<i>LUF</i>)	23
4.1.2	Elektromanyetik Alan Homojenliği	24
4.1.3	Q Faktörü	31
4.2	İletken Kumaşların Önerilen Ölçüm Tekniğı ile Ekranlama Etkinliğı Testleri	31
5	İLETKEN KUMAŞLARIN MIL-DTL-83528G SPESİFİKASYONUNA GÖRE EKRANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ	40
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	46
	KAYNAKÇA	47
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	50

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal Frekans
η	Anten Verimliliği
$\langle \rangle$	Aritmetik Ortalama
B	Çoklu Yansıma Kaybı
λ	Dalga Boyu
δ	Deri Kalınlığı
E	Elektrik Alan
f	Frekans
P	Güç
V	Hacim, Volt
c	Işık Hızı
σ	İletkenlik, Standart Sapma
Q	Kalite Faktörü
f_c	Kesim Frekansı
H	Manyetik Alan
μ	Manyetik Geçirgenlik
t	Malzeme Kalınlığı
Ω	Ohm
N	Toplam Mod Sayısı
R	Yansıma Kaybı
A	Yutulma Kaybı
S	Yüzey Alanı

KISALTMA LİSTESİ

DA	Dinamik Aralık
dB	Desibel
EE	Ekranlama Etkinliği
EM	Elektromanyetik
EMI	Electromagnetic Interference
GTEM	Gigahertz Transverse Electromagnetic
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Comission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LUF	Lowest Usable Frequency
MIL-DTL	Military Detail
RF	Radyo Frekans
TEM	Transverse Electromagnetic
VIRC	Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Bir iletkene gelen dalganın oluşturduğu durumların şematik gösterimi	4
Şekil 2.2	GTEM hücresi	6
Şekil 2.3	Tam yansız oda şematik gösterim	7
Şekil 2.4	Tam yansız oda	7
Şekil 2.5	Yarı yansız oda şematik gösterim	8
Şekil 2.6	Yarı yansız oda	8
Şekil 2.7	Tam yansız oda şematik gösterimi	9
Şekil 2.8	Tam yansız oda ve karıştırıcı	9
Şekil 2.9	IEC 61000-4-21 standardına göre tam yansız oda ekranlama etkinliği test düzeneği	11
Şekil 2.10	IEEE 299 standardına göre düşük frekans bölgesi ekranlama etkinliği test düzeneği	12
Şekil 2.11	IEEE 299 standardına göre düşük frekans bölgesi referans ölçümü .	12
Şekil 2.12	IEEE 299 standardına göre rezonans frekans bölgesi ekranlama etkinliği test düzeneği	13
Şekil 2.13	IEEE 299 standardına göre rezonans frekans bölgesi referans ölçümü	13
Şekil 2.14	IEEE 299 standardına göre yüksek frekans bölgesi ekranlama etkinliği test düzeneği	14
Şekil 2.15	IEEE 299 standardına göre yüksek frekans bölgesi referans ölçümü .	14
Şekil 2.16	MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği test düzeneği	15
Şekil 3.1	Örnek dikdörtgen kavite şematiği	17
Şekil 3.2	IEC 61000-4-21 standardına göre standart sapma limitleri	20
Şekil 4.1	Tam yansız oda ve boyutları	23
Şekil 4.2	Ölçüm hacmi ve ölçüm noktaları	24
Şekil 4.3	Verici/alıcı logperiyodik antenler ve ölçüm hacmi	25
Şekil 4.4	Düşük frekans EM alan homojenliği ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği	25
Şekil 4.5	Düşük frekanslarda tam yansız odanın ölçüm hacminde oluşan E_x alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açısı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	26

Şekil 4.6	Düşük frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_y alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	26
Şekil 4.7	Düşük frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_z alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	27
Şekil 4.8	Düşük frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_{xyz} alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	27
Şekil 4.9	Verici/alıcı double ridged horn antenler ve ölçüm hacmi	28
Şekil 4.10	Yüksek frekans EM alan homojenliği ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği	28
Şekil 4.11	Yüksek frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_x alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	29
Şekil 4.12	Yüksek frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_y alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	29
Şekil 4.13	Yüksek frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_z alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	30
Şekil 4.14	Yüksek frekanslarda tam yansımali odanın ölçüm hacminde oluşan E_{xyz} alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 345^\circ$)	30
Şekil 4.15	Tam yansımali odanın Q faktörü	31
Şekil 4.16	Önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçümü şematik gösterimi	32
Şekil 4.17	Önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği	32
Şekil 4.18	(a) Metal kutudaki açıklık boyutları, (b) metal kutu tabanına yerleştirilen EM yutucular, (c) metal kutu tavanına yerleştirilen EM yutucular, (d) iletken kumaşın açıklığa yerleştirilişi, (e) açıklığı kapatan metal panel ve EMI gasket	33
Şekil 4.19	Önerilen teknik ile referans, ekranlama ve gürültü ölçümü	35
Şekil 4.20	Önerilen teknik ile dinamik aralık ve ekranlama etkinliği	35
Şekil 4.21	Alıcı anten metal kutunun ortasında	36
Şekil 4.22	Alıcı anten metal kutunun ortasındayken önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçümü şematik gösterimi	36
Şekil 4.23	Alıcı anten metal kutunun ortasındayken önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği	37

Şekil 4.24 Alıcı anten metal kutunun ortasındayken önerilen teknik ile referans, ekranlama ve gürültü ölçümü	37
Şekil 4.25 Alıcı anten metal kutunun ortasındayken önerilen teknik ile dinamik aralık ve ekranlama etkinliği	38
Şekil 4.26 Alıcı antenin farklı konumları için dinamik aralık ve ekranlama etkinliği karşılaştırması	38
Şekil 4.27 Önerilen teknik ile referans, ekranlama ve gürültü Ölçümü (EM yutucu yok)	39
Şekil 4.28 Önerilen teknik ile dinamik aralık ve ekranlama etkinliği (EM yutucu yok)	39
Şekil 5.1 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği ölçümü şematik gösterimi	41
Şekil 5.2 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği ölçümü test düzeneği (oda içi)	41
Şekil 5.3 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği ölçümü test düzeneği (oda dışı)	42
Şekil 5.4 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yatay polarizasyon için referans, ekranlama ve gürültü ölçümü	43
Şekil 5.5 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yatay polarizasyon için dinamik aralık ve ekranlama etkinliği	43
Şekil 5.6 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre dikey polarizasyon için referans, ekranlama ve gürültü ölçümü	44
Şekil 5.7 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre dikey polarizasyon için dinamik aralık ve ekranlama etkinliği	44
Şekil 5.8 İletken kumaşın ekranlama etkinliği sonuçlarının karşılaştırması . .	45

TAM YANSIMALI ODALARDA İLETKEN KUMAŞLARIN EKRANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ İÇİN ÖZGÜN BİR ÖLÇÜM TEKNİĞİ

Hakkı Ekin ÖZDEMİR

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hamid TORPİ

Bu çalışmada, tam yansımali odalarda iletken kumaşların ekranlama etkinliği ölçümleri için özgün bir ölçüm tekniğı sunulmaktadır. Test düzeneğı, içinde karıştırıcı olan bir tam yansımali oda içerisinde tavanı ve tabanı elektromanyetik yutucularla kaplı bir metal kutuyu içermektedir. Metal kutu, karıştırıcı içermediğı için yarı yansımali oda karakteristiğı göstermektedir. Bu çalışmada ilk olarak IEC 61000-4-21 standardına göre tam yansımali odanın elektromanyetik alan dağılımının homojenliğı 100MHz - 1GHz frekans aralığında logperiyodik antenler, 1GHz - 10GHz frekans aralığında ise double ridged horn antenler kullanılarak deneysel olarak incelenmiş, daha sonra iletken kumaşın ekranlama etkinliği ölçümleri özgün ölçüm tekniğı ile gerçekleştirilmiş ve bu ölçüm tekniğinin ekranlama etkinliği ölçümlerinde kritik konulardan biri olan dinamik aralığa etkisi incelenmiştir. Son olarak, özgün ölçüm tekniğı ile elde edilen sonuçlar, MIL-DTL-83528G spesifikasyonunda tarif edilen yöntem ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tam yansımali oda, yarı yansımali oda, dinamik aralık, ekranlama etkinliği, iletken kumaş

ABSTRACT

A NOVEL MEASUREMENT TECHNIQUE FOR SHIELDING EFFECTIVENESS TESTS OF CONDUCTIVE FABRICS IN REVERBERATION CHAMBERS

Hakkı Ekin ÖZDEMİR

Department of Electronics and Communication Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hamid TORPİ

In this study, a novel measurement technique is presented for shielding effectiveness measurements of conductive fabrics in reverberation chambers. The test setup consists of a metal box whose ceiling and floor are covered with electromagnetic absorbers in a reverberation chamber with a stirrer inside. Since the metal box does not contain a stirrer, it shows semi anechoic chamber characteristics. In this study firstly, the uniformity of the electromagnetic field distribution of the reverberation chamber according to the IEC 61000-4-21 standard was be experimentally examined using logperiodic antennas in the frequency range of 100MHz - 1GHz and double ridged horn antennas in the frequency range of 1GHz - 10GHz. Then, the shielding effectiveness measurements of the conductive fabric were performed with the novel measurement technique and the effect of the novel measurement technique on the dynamic range was examined. Finally, the results obtained with the novel measurement technique was compared with the results obtained with the method described in the MIL-DTL-83528G specification.

Keywords: Reverberation chamber, semi anechoic chamber, dynamic range, shielding efectiveness, conductive fabric

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde, iletken kumaşlar metal plakalara kıyasla hafif, taşınabilir, esnek ve düşük maliyetli olma avantajlarına sahip olduklarından; giyilebilir sensörler, radar absorpsiyonu, koruyucu giysiler ve EMI koruması gibi çeşitli sivil ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1–4].

İletken kumaşların ekranlama etkinliğinin belirlenmesi için tam yansız odalar, yarı yansız odalar, Gigahertz Transverse Elektromagnetic (GTEM) hücreleri ve tam yansız odalarda kullanılmak üzere birçok ölçüm tekniği geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Tam yansız/yarı yansız odalar veya GTEM hücrelerinde kullanılan ölçüm tekniklerinde iletken kumaş, özellikle tercih edilen bir yönden tek bir polarizasyona sahip EM alanlara maruz kalırken, tam yansız odalarda kullanılan ölçüm tekniklerinde ise gerçek EM ortama daha çok benzeyen farklı geliş yönleri ve polarizasyonları olan EM alanlara maruz kalmaktadır [5–7].

Literatürde iki farklı iç içe tam yansız oda tekniği önerilmektedir. Geleneksel iç içe tam yansız oda tekniğinde, ölçüm hacminde güçlü ve homojen elektromanyetik alan oluşturabilmek amacıyla her iki odanın içerisine mekanik iletken karıştırıcılar konmaktadır [8–11]. İkinci olarak, Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber (VIRC) tekniğinde ise mekanik iletken karıştırıcılar yerine odanın duvarları esnek iletken malzemeler kullanılarak yapılır ve duvarların hareketi ile sınır koşulları değişir, sınır koşullarının değişimi ile de ölçüm hacminde homojen elektromanyetik alan oluşumu hedeflenir [9–13].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, her geçen gün kullanımı yaygınlaşan tam yansız odalarda, iletken kumaşların ekranlama etkinliği testleri için yeni bir ölçüm tekniğı önermek ve bu önerilen tekniğın sonuçları ile MIL-DTL-83528G dokümanına göre icra edilen, yarı yansız odalarda gerçekleştirilen ekranlama etkinliği test sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, tam yansız oda içerisinde IEC 61000-4-21 standardına göre yapılan ekranlama etkinliği testlerinde, ölçülebilecek maksimum ekranlama etkinliği değerini belirleyen ve dinamik aralık olarak adlandırılan parametreyi artırmak için test sisteminde elektromanyetik yutucuların kullanımına dayanan özgün bir ölçüm tekniğı önerilmektedir. İlk olarak tam yansız oda içerisinde iletken bir kumaşın ekranlama etkinliği önerilen ölçüm tekniğı kullanılarak ölçülmüş, ardından önerilen ölçüm tekniğı kullanılmadan ölçümler tekrarlanmış, son olarak ise iletken kumaşın ekranlama etkinliği MIL-DTL-83528G dokümanına göre ölçülerek önerilen ölçüm tekniğı ile MIL-DTL-83528G dokümanına göre yapılan ölçümler karşılaştırmış ve hipotezin doğruluğı bilimsel olarak sınanmıştır.

2 EKRANLAMA ETKİNLİĞİ

Ekranlama etkinliği terimi, genellikle elektromanyetik alanlara bir bariyer gibi davranan iletkenlerin ekranlama performansını değerlendirebilmek için kullanılan ve iletkene gelen elektrik veya manyetik alanın genliğinin, iletken den iletlen elektrik veya manyetik alanın genliğine oranıdır [14]. Ekranlama etkinliği matematiksel olarak ve dB cinsinden Eşitlik 2.1, 2.2 ve 2.3'te sırasıyla elektrik alan, manyetik alan ve güç terimlerine bağılı olarak gösterilmektedir.

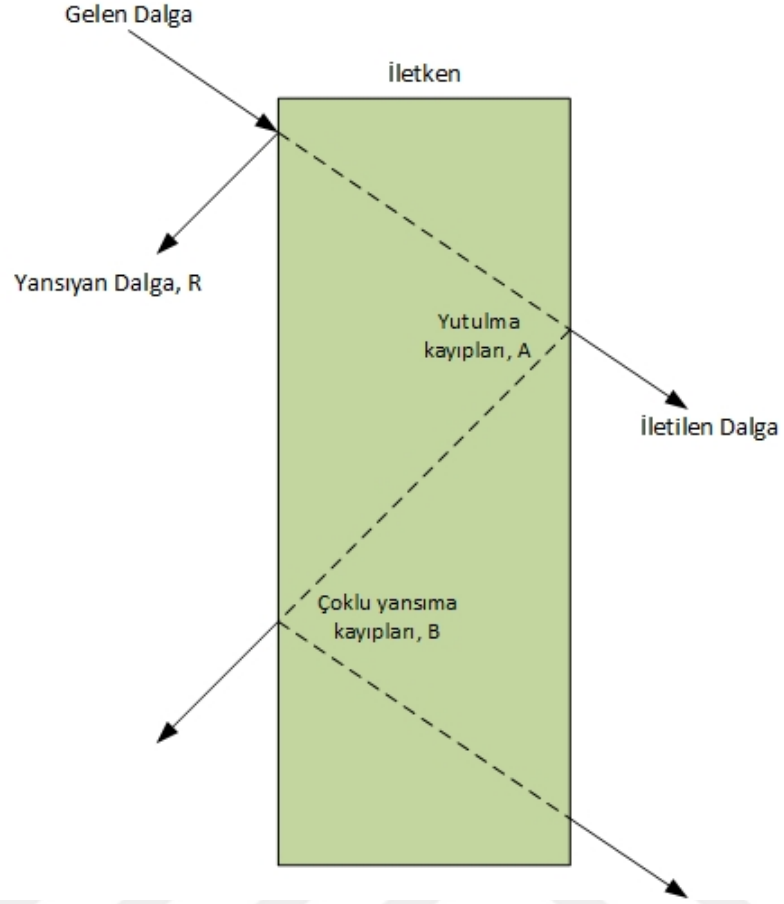
$$EE(dB) = 20 \log_{10} \frac{|\vec{E}_i|}{|\vec{E}_t|} \quad (2.1)$$

$$EE(dB) = 20 \log_{10} \frac{|\vec{H}_i|}{|\vec{H}_t|} \quad (2.2)$$

$$EE(dB) = 10 \log_{10} \frac{|\vec{P}_i|}{|\vec{P}_t|} \quad (2.3)$$

Eşitliklerde $\vec{E}$, elektrik alan (V/m); $\vec{H}$, manyetik alan (A/m); $\vec{P}$ ise güçtür (W). İndis t ve indis i ise sırasıyla iletilen ve yansıyan elektromanyetik dalga terimlerini ifade etmektedir.

Elektromanyetik bir dalga Şekil 2.1'de gösterildiği üzere bir iletkene çarptığında, enerjisinin bir kısmı iletkenin ilk yüzeyinden yansır, bir kısmı iletken tarafından yutulur ve bir kısmı da iletken üzerinden iletilir. Dalga, iletken den daha düşük bir genlikte çıkmadan önce iletken içerisinde çoklu yansımalar da meydana gelir [14].



Şekil 2.1 Bir iletkene gelen dalga ve yansımaları şematik gösterimi

Şekil 2.1’de gösterilen A harfi ile ifade edilen yutulma kayıpları, B harfi ile ifade edilen çoklu yansımalar kayıpları ve R harfi ile ifade edilen iletken sınırlarındaki yansımalar kayıpları bir malzemenin ekranlama etkinliği hesaplamasında kullanılan temel parametrelerdir [14]. Eşitlik 2.1 - 2.3; yansımalar kaybı (R), yutulma kaybı (A) ve çoklu yansımalar kaybı (B) parametrelerine göre dB cinsinden Eşitlik 2.4’teki gösterim ile ifade edilebilir. Eşitlik 2.4’teki her bir terim iletkene düzlemsel dalga geldiği durum için (uzak alan) Eşitlik 2.5 - 2.7 kullanılarak hesaplanabilir [15].

$$EE(dB) = R(dB) + A(dB) + B(dB) \quad (2.4)$$

$$R = 168 - 20 \log_{10} \sqrt{\left(\frac{\mu_r f}{\sigma_r} \right)} \quad (2.5)$$

$$A = 20 \log_{10} \left(e^{\frac{t}{\delta}} \right) \quad (2.6)$$

$$B = 20 \log_{10} [1 - 10^{-(\frac{A}{10})} \cdot (\cos(0,230A) - j \sin(0,230A))] \quad (2.7)$$

μ_r , bakıra bağıl manyetik geçirgenlik

σ_r , bakıra bağıl iletkenlik

f , frekans (Hz)

t , malzeme kalınlığı (m)

δ , deri kalınlığı (m)

Malzemelerin ekranlama etkinliğinin belirlenmesi, malzemenin kullanım alanlarını belirleyeceği için çok önemlidir. Bir malzemenin ekranlama etkinliği, sayısal yöntemler kullanılarak ya da ölçümler yoluyla belirlenebilir. Ancak ekranlama etkinliği hesabı için sayısal yöntemleri kullanmak, malzemelerin karmaşıklığı ve dikkate alınması gereken birçok parametre (iletkenlik, manyetik geçirgenlik vb.) nedeniyle zor ve zaman alıcıdır. Bu nedenle malzemelerin ekranlama etkinliği hesaplamasında ölçümler sıklıkla tercih edilmektedir [16].

2.1 Ekranlama Etkinliği Test Ortamları

Uluslararası organizasyonlar ve devlet kurumları, elektromanyetik emisyonlar, bağışıklık ve ekranlama etkinliği test prosedürleri ile ilgili olarak uyulması gereken çeşitli standartları uygulamaya koymuşlardır. Bu uluslararası standartlara uygunluğun test edilmesi, elektromanyetik uyumluluk için çeşitli test ortamlarının, yöntemlerinin ve tekniklerinin geliştirilmesine yol açmıştır [17–20]. Aşağıda ekranlama etkinliği ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan test ortamları ve yöntemlerinden bazıları verilmiştir:

- Transverse Electromagnetic Hücreleri
- Tam Yansız Oda
- Yarı Yansız Oda
- Tam Yansız Oda

2.1.1 TEM/GTEM Hücreleri

Transverse Electromagnetic (TEM) hücreleri, tek kutuplu, yayılan bir düzlem dalga üretmeyi sağlayan test ortamıdır. Elektromanyetik ortam çalışma hacmi içinde oldukça homojen ve hesaplanabilir. Ayrıca prob kalibrasyonu için kullanılabilir.

kadar düşük bir alan genliği belirsizliğine sahiptir [19–21]. TEM hücreleri hem bağışıklık hem de emisyon testleri için kullanılabilir. Çalışma hacmi frekansa bağlıdır [16]. Örnek bir fotoğraf Şekil 2.2'dedir [22].

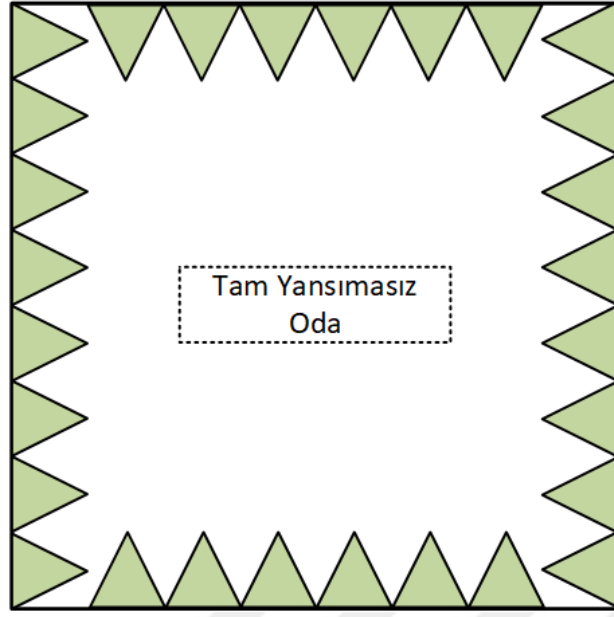


Şekil 2.2 GTEM hücresi

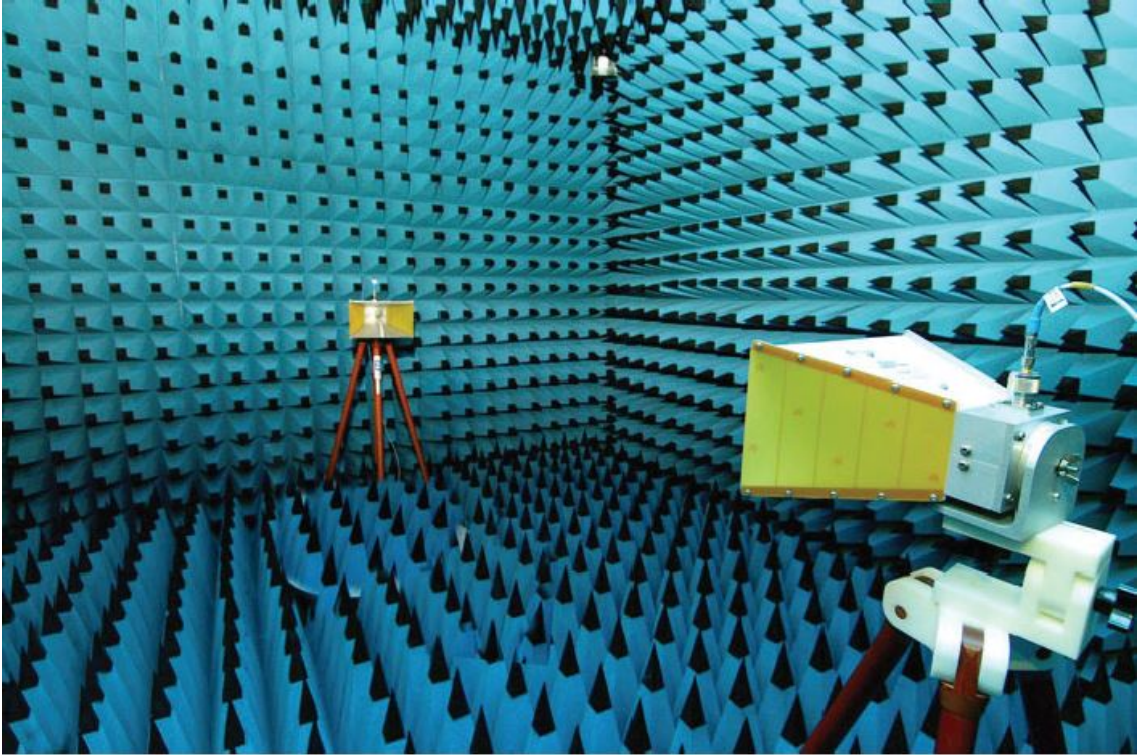
2.1.2 Tam Yansız Odalar

Tam yansız oda, boş uzayı taklit eden bir elektromanyetik ölçüm ortamıdır. Tüm iç yüzey alanı elektromanyetik yutucu malzemelerle kaplanmıştır. Elektromanyetik yutucu malzemeler, test edilen cihazdan veya test edilen antenden yayılan elektromanyetik enerjiyi sönümler, böylece herhangi bir sınırı ve duran dalga oluşumunu ortadan kaldırır [18].

Tam yansız odalar, elektromanyetik yutucular kullanılarak yansız bir ortam oluşturmak amacıyla kullanılır fakat bazı durumlarda ekranlı paneller kullanılarak ekranlı bir oda hüviyetine de bürünebilirler. Tam yansız ekranlı odalar oda içerisindeki yansımaları engellemenin yanında, oda dışarısından gelebilecek her türlü elektromanyetik girişimi de engellemektedir, bu nedenle ekranlama etkinliği testleri tam yansız ekranlı odalarda gerçekleştirilebilir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4, sırasıyla tam yansız oda şematik gösterimi ve örnek bir fotoğrafıdır [23].



Şekil 2.3 Tam yansımaz oda şematik gösterim



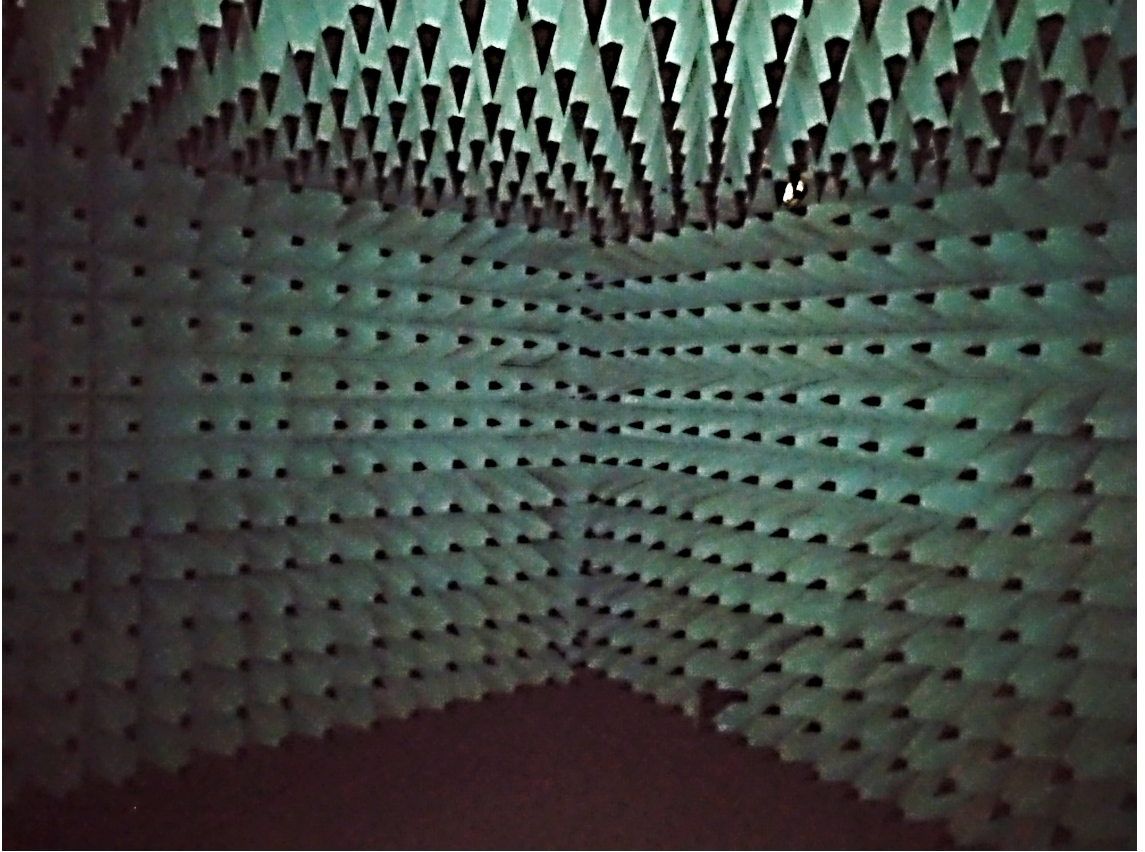
Şekil 2.4 Tam yansımaz oda

2.1.3 Yarı Yansımaz Odalar

Yarı yansımaz odalar ilk olarak 1970'lerde genellikle emisyon ölçümleri için açık alan test sahalarına alternatif olarak kullanılmıştır. Bu odaların tam yansımaz odalardan farkı, açık alan test sahalarındaki yer düzlemini simüle etmek için oda tabanının iletkenle donatılmasıdır [24]. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6, sırasıyla yarı yansımaz odanın şematik gösterimi ve örnek bir fotoğrafıdır.



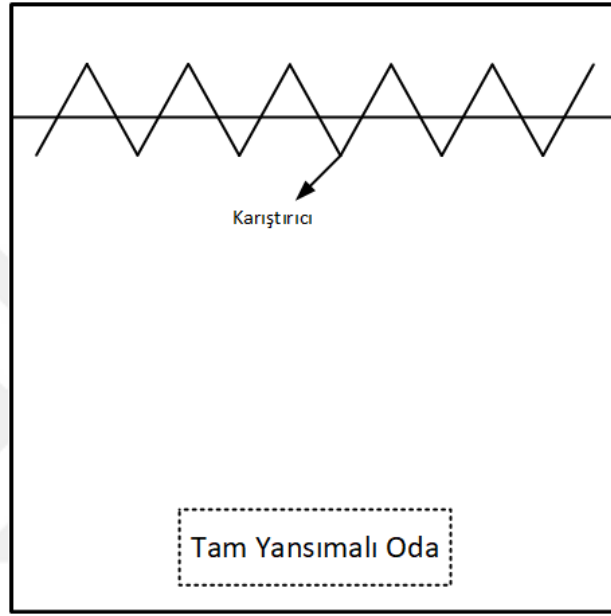
Şekil 2.5 Yarı yansımaz oda şematik gösterim



Şekil 2.6 Yarı yansımaz oda

2.1.4 Tam Yansımalı Odalar

Tam yansımalı odalar, ısıma yoluyla emisyon, ısıma yoluyla bağışıklık ve ekranlama etkinliği testleri için kullanılabilen, iletken panellerle oluşturulmuş ve dış elektromanyetik ortamdan izole edilmiş yapılardır. İçerisinde oluşan elektromanyetik alanı odanın tamamına homojen bir şekilde yaymak için içerisinde genellikle karıştırıcı adı verilen iletken bir yapı da bulunmaktadır [17, 25, 26]. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8, sırasıyla karıştırıcı yapısı bulunan tam yansımalı oda şematik gösterimi ve örnek bir fotoğrafıdır.



Şekil 2.7 Tam yansımalı oda şematik gösterimi



(a) Tam yansımalı oda dıştan görünüm



(b) Tam yansımalı oda içerisinde karıştırıcı yapısı

Şekil 2.8 Tam yansımalı oda ve karıştırıcı

2.2 Ekranlama Etkinliği Test Düzenekleri

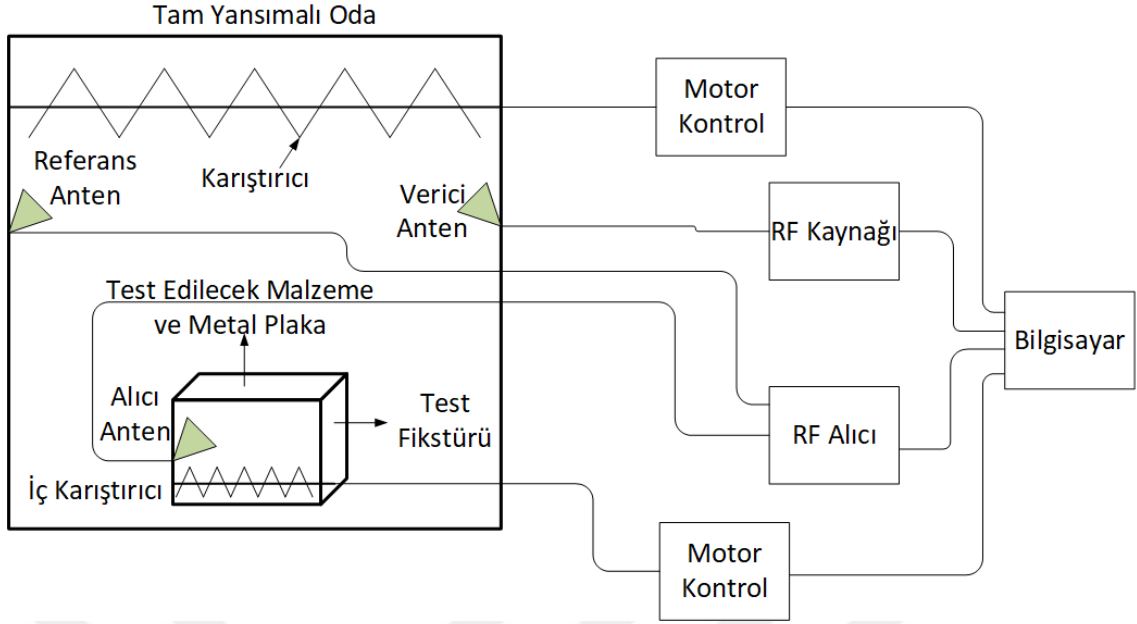
Farklı amaçlarla kullanılan malzeme, materyal, ekranlı paneller, ekranlı odaların ekranlama etkinliği seviyelerinin belirlenebilmesi için çeşitli özel kuruluşlar ve devlet kurumları bazı standartlar/spesifikasyonlar yayınlamışlardır. Bu bölümde bu standart/spesifikasyonların tarif ettiği ekranlama etkinliği test düzenekleri anlatılmıştır. Ekranlama etkinliği testlerinde yaygın olarak kullanılan standart/spesifikasyonlar aşağıda listelenmiştir.

- IEC 61000-4-21
- IEEE 299
- MIL-DTL-83528G

2.2.1 IEC 61000-4-21 Standardına göre Ekranlama Etkinliği Test Düzeneği

IEC 61000-4-21 standardı tam yansımali odalar için yazılmış bir standarttır. Bu standartta tam yansımali odaların sağlaması gereken kriterler ve tam yansımali odalarda gerçekleştirilebilecek testler anlatılmaktadır.

Tuned veya stirred mod prosedürleri kullanarak ekranlama etkinliği testi gerçekleştirilebilir. Tuned mod tercih edildiğinde, tam yansımali odadaki karıştırıcı adım aralığı, en az tam yansımali oda doğrulamasında kullanılan karıştırıcı adım aralığı olarak ayarlanmalıdır. Test için kullanılan ikinci tam yansımali odanın (test fikstürü) karıştırıcı adım aralığı ise, test fikstürünün doğrulamasında kullanılan karıştırıcı adım aralığıyla aynı olmalıdır. Tuned mod kullanılırken, test fikstrünün karıştırıcısı, tam yansımali oda karıştırıcısının her adımı için bir tam dönüş yapmasıyla sonuçlanacak şekilde döndürülmelidir. Stirred mod tercih edildiğinde, karıştırıcının maksimum dönüş hızı, test altındaki cihaz ve ilgili ölçüm ekipmanının en az tuned mod kullanılarak elde edilen veri sayısına maruz kalmasını sağlamalıdır. Standartta göre örnek bir test düzeneği Şekil 2.9'da gösterilmiştir [26].



Şekil 2.9 IEC 61000-4-21 standardına göre tam yansımali oda ekranlama etkinliği test düzeneği

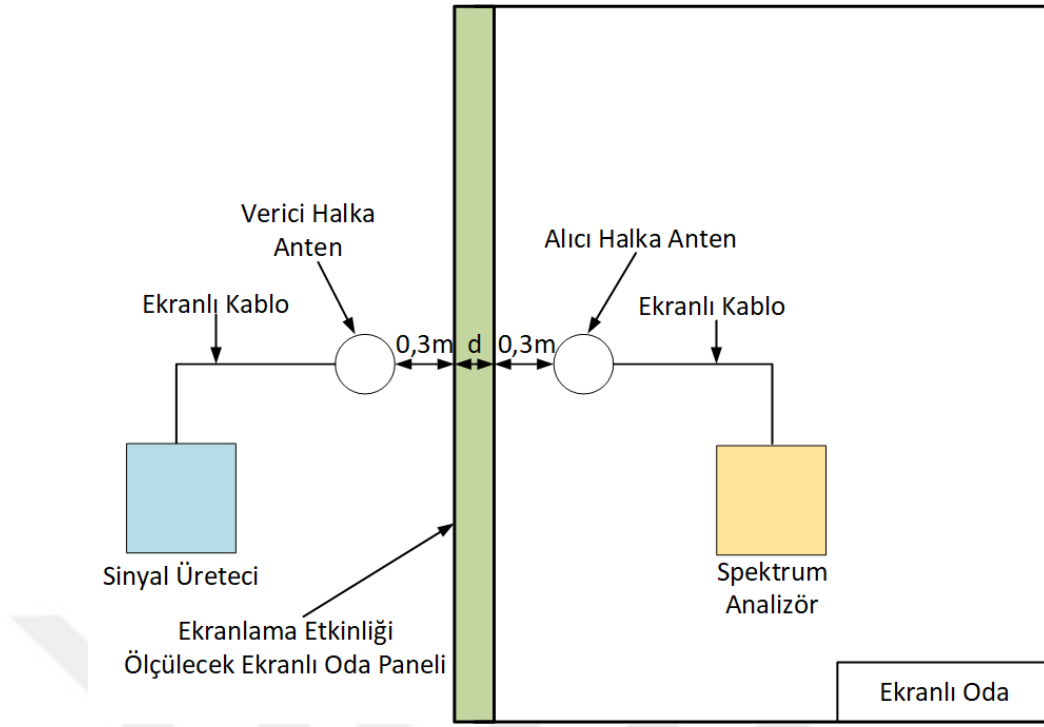
2.2.2 IEEE 299 Standardına göre Ekranlama Etkinliği Test Düzeneği

IEEE 299 standardı, ekranlı yapıların (oda, kutu vb.) ekranlama etkinliği testlerinin yapılışını anlatmaktadır.

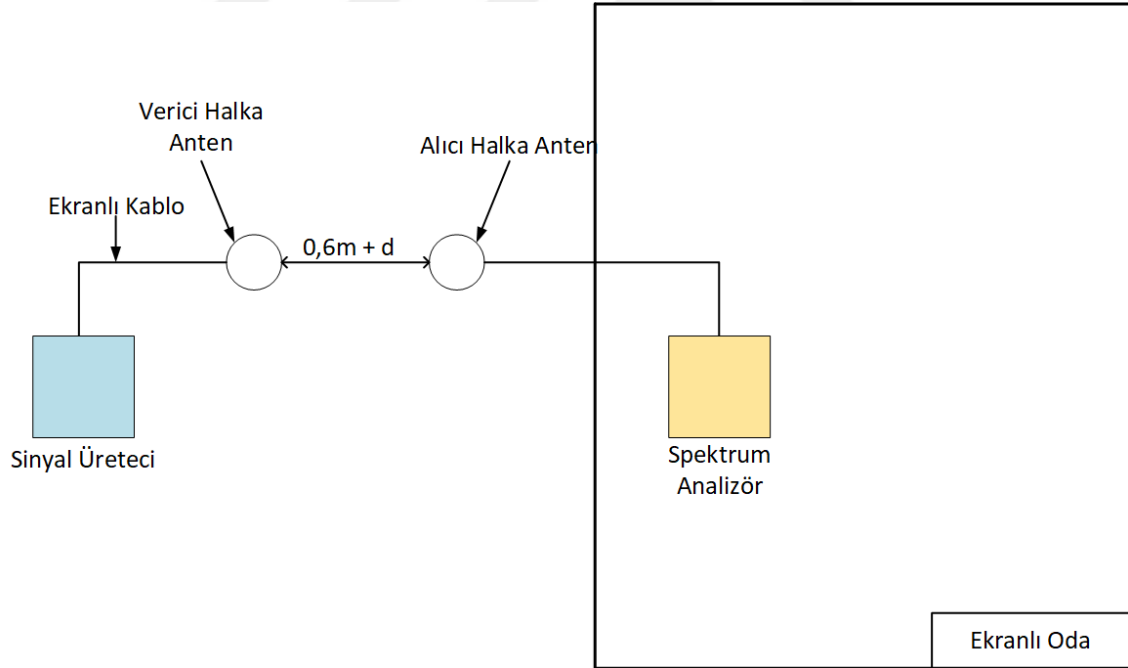
Standarta göre ekranlama etkinliği testleri, aşığıda listelendiği gibi test frekans bölgelerine göre üç ana kısımda incelenebilir [27].

- Düşük Frekans Bölgesi (9kHz - 20MHz)
- Rezonans Frekans Bölgesi (20MHz - 300MHz)
- Yüksek Frekans Bölgesi (300MHz - 18GHz)

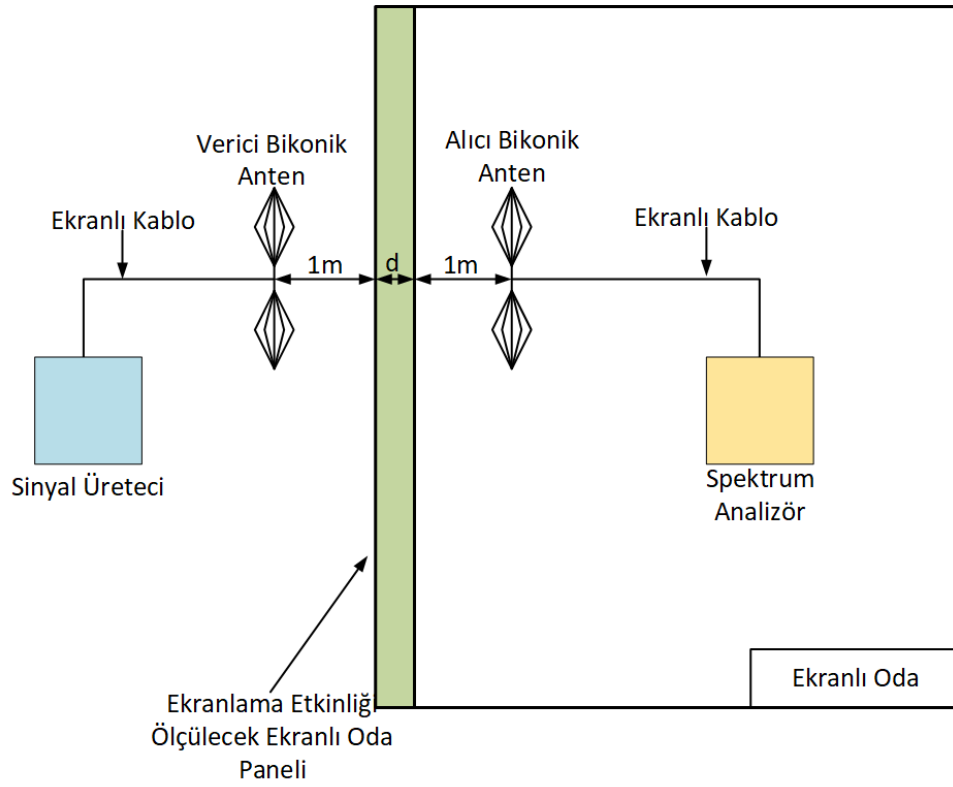
Ekranlama etkinliği kısaca verici ve alıcı antenler arasında test edilecek malzeme yokken alınan ölçümler ile verici ve alıcı antenler arasında test edilecek malzeme varken alınan ölçümler arasındaki farktır. Ekranlama etkinliği testi, Şekil 2.10 - 2.15'te gösterilen mesafelere bağlı kalınarak icra edilmelidir [27].



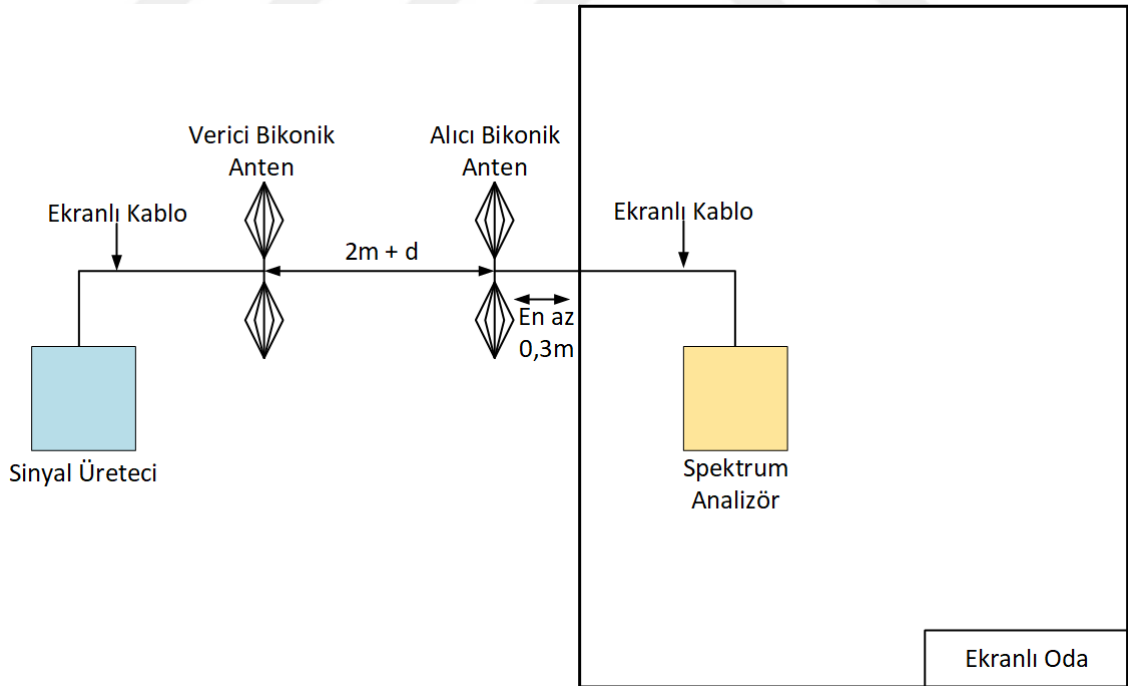
Şekil 2.10 IEEE 299 standardına göre düşük frekans bölgesi ekranlama etkinliği test düzeneği



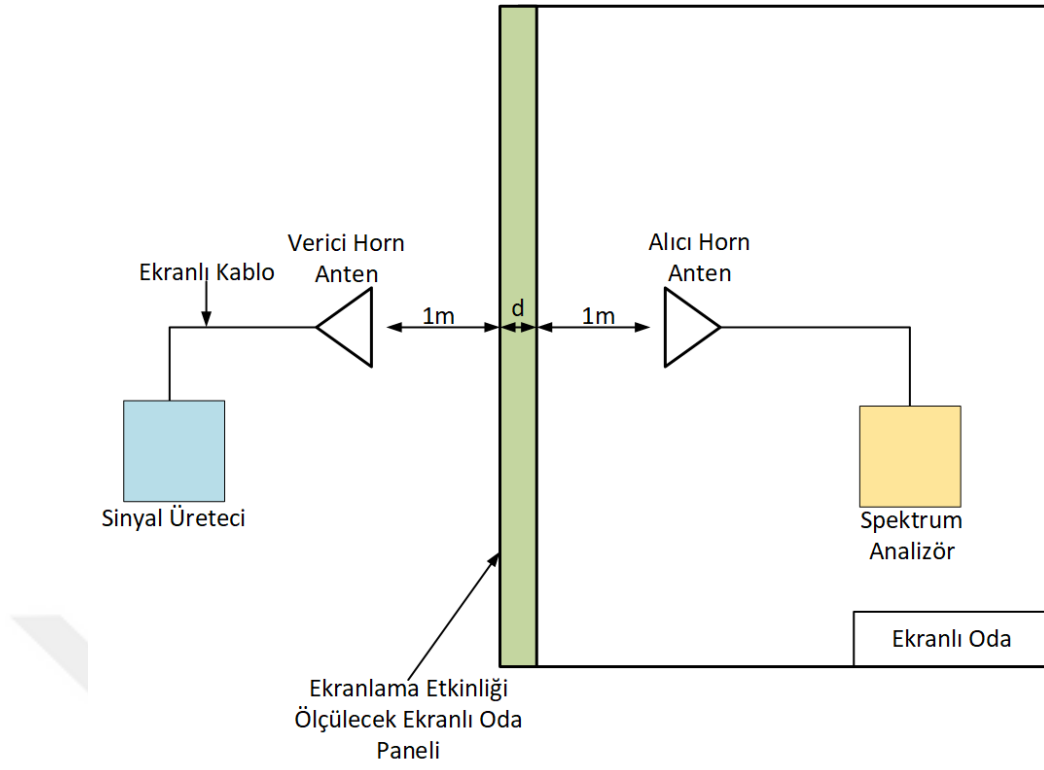
Şekil 2.11 IEEE 299 standardına göre düşük frekans bölgesi referans ölçümü



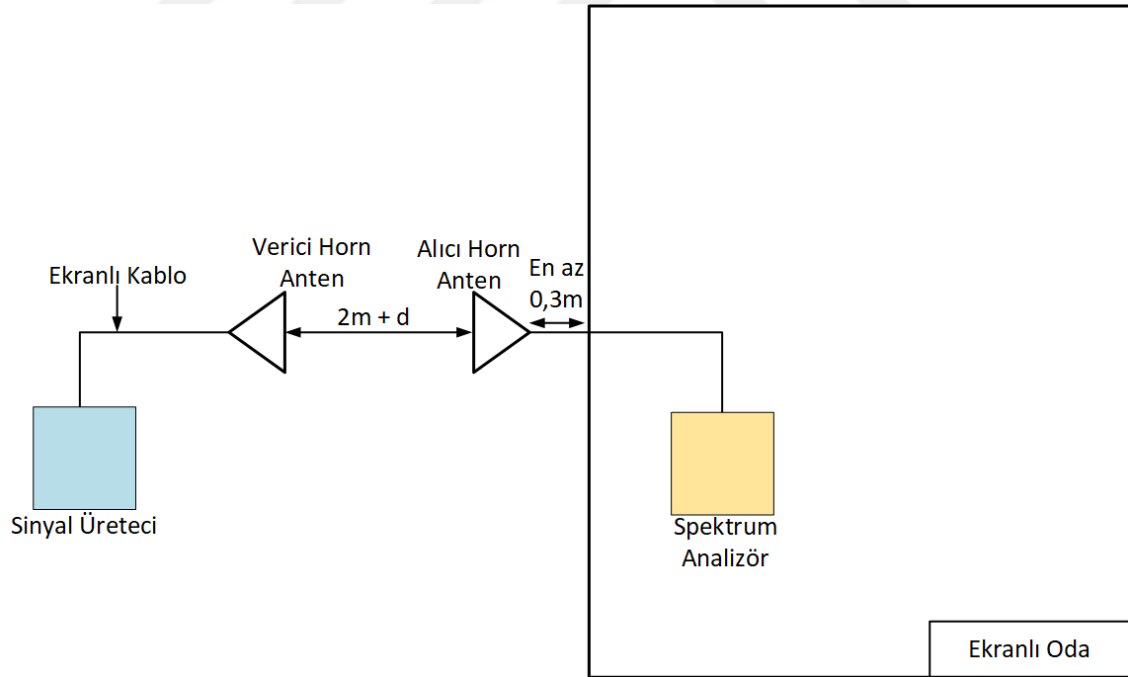
Şekil 2.12 IEEE 299 standardına göre rezonans frekans bölgesi ekranlama etkinliği test düzeneği



Şekil 2.13 IEEE 299 standardına göre rezonans frekans bölgesi referans ölçümü



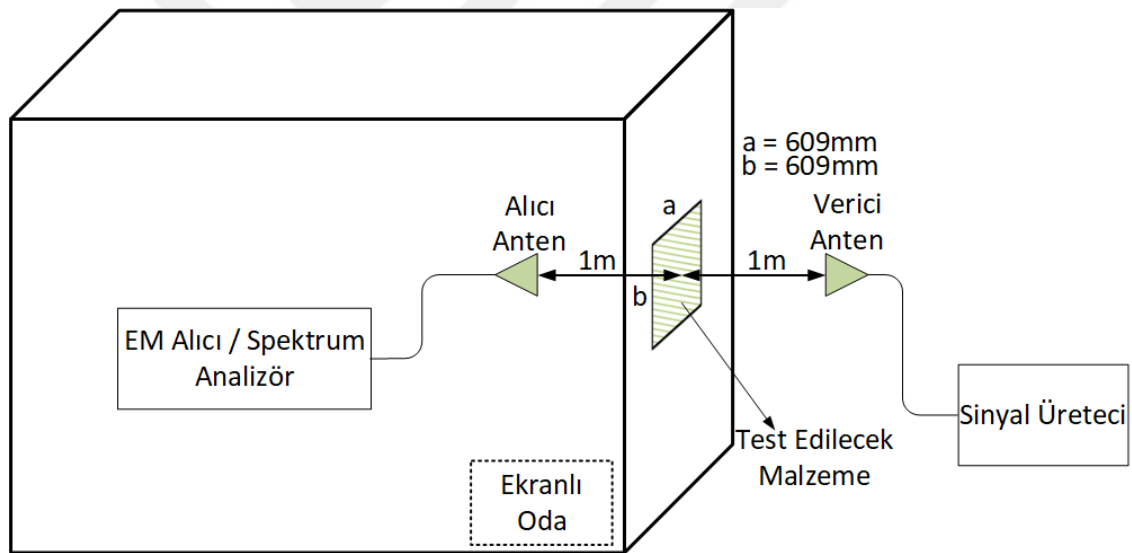
Şekil 2.14 IEEE 299 standardına göre yüksek frekans bölgesi ekranlama etkinliği test düzeneği



Şekil 2.15 IEEE 299 standardına göre yüksek frekans bölgesi referans ölçümü

2.2.3 MIL-DTL-83528G Spesifikasyonuna göre Ekranlama Etkinliği Test Düzenegi

Ekranlama etkinliği ölçümleri, bağıl ölçümlerdir. Ekranlama etkinliği, ekranlama etkinliği ölçülecek malzemenin, bir test kapak panelini bir mahfaza flanşına, $(61*61)cm^2$ boyutlarındaki açıklıktan yayılan elektromanyetik dalgaların belirtilen faktörler tarafından zayıflatılacağı şekilde, elektriksel olarak bağlama yeteneği olarak tanımlanmıştır. Testlerin, ölçüm cihazının "frequency sweep" özelliği kullanılarak yapılması önerilmektedir ancak asgari olarak, veriler 20MHz - 10GHz aralığında 1, 2, 4, 6, 10 kat frekanslarda kaydedilmelidir. Ekranlı odadaki antenlerin, ekipmanın veya diğer metal içeren nesnelerin konumu, açıklığın açık ve kapalı olduğu durumdaki ölçümler arasında hareket ettirilmemelidir. Verici anten mahfaza içinde ve alıcı anten mahfaza dışında olacak şekilde ekranlama etkinliği testi yapılabilir ve tüm frekanslarda yeterli dinamik aralık elde edilebilir. Mahfazanın, verici antenin hiçbir parçası mahfaza yüzeyinin bir metre yakınında olmayacak kadar büyük olmasına dikkat edilmelidir. Örnek test düzenegi Şekil 2.16'da verilmiştir [28].



Şekil 2.16 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği test düzenegi

Özellikle askeri cihazların test edilmesinde önemli avantajlar getiren tam yansımali odalar zamanla daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Tam yansımali odalar, duvarları ve içindeki karıştırıcının yüksek derecede iletken malzemelerden yapıldığı kapalı bir oda olarak düşünülebilir ve istenen testlerde kullanılacak frekans bandına bağlı olarak herhangi bir boyutta tasarlanabilir. Tam yansımali odalar, 5G antenlerinin toplam ışıma gücü, mühimmata elektromanyetik radyasyon tehlikesi, ekranlama etkinliği, kabloları elektromanyetik alan indüksiyonu gibi çeşitli testlerde kullanılmaktadır. Tam yansımali odaların temel prensibi, içindeki karıştırılmış modlar nedeniyle elektromanyetik alanın düzgün dağılmasıdır. Alan homojenliğini sağlamak için, tam yansımali oda içerisine genellikle karıştırıcılar monte edilir. Tam yansımali odalar, içindeki karıştırıcının çalıştırılma şekline göre tuned mod ve stirred mod olarak iki modda kullanılabilir [26, 29].

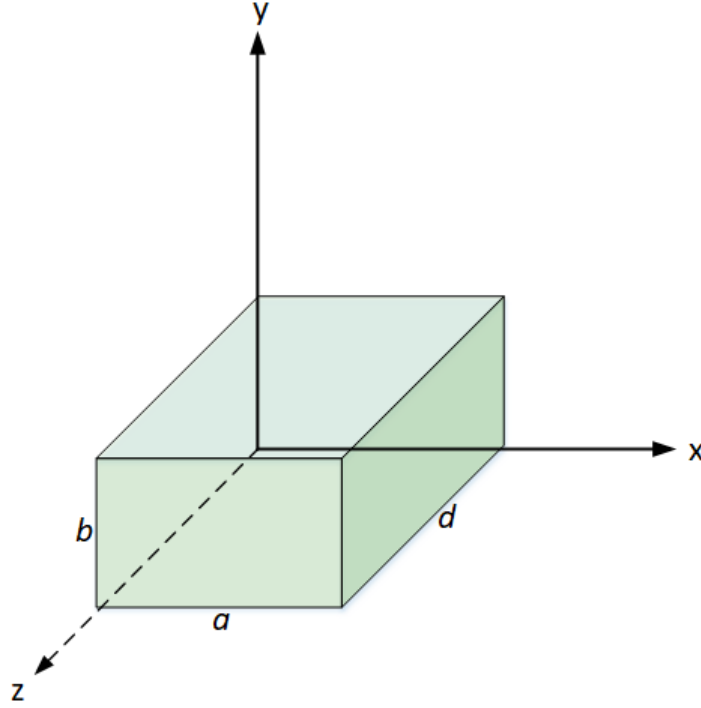
Tuned Mod: Karıştırıcının tam bir turunu (360°) küçük ve eşit adım aralıkları ile tamamlamayacak şekilde çalıştırıldığı moddur.

Stirred Mod: Karıştırıcının sabit hızda sürekli döndürüldüğü moddur.

3.1 Tam Yansımali Oda İçerisinde Yayılan Modlar

Tam yansımali odalar, temelde içerisinde karıştırıcı bulunan dikdörtgen kaviteler olduğundan, dikdörtgen kaviteler için türetilmiş olan Eşitlik 3.1'i karşılamalıdır. Belirli güçte bir EM enerji tam yansımali odaya verildiğinde, karıştırıcı vasıtasıyla bu enerji karıştırılarak oda yüzeylerine rastgele ve farklı açılarda çarpar. Bu durum, sınır koşullarını etkili bir şekilde değiştirerek karmaşık bir EM alan yapısına neden olur. Oda içerisinde rezonans modları ve çok yollu yansımalar oluşur.

Rezonans modları, Eşitlik 3.1'e göre odanın boyutları tarafından belirlenen farklı rezonans frekanslarında meydana gelir. Örnek bir dikdörtgen kavite Şekil 3.1'de verilmiştir [26].



Şekil 3.1 Örnek dikdörtgen kavite şematığı

$$f_{m,n,p} = 150 \left(\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \right) \quad (3.1)$$

Burada, f kavitenin rezonans frekansları (MHz); m, n, p tam sayı (aynı anda en az ikisi sıfır olmamalı); a, b, d ise 3.1’de görüldüğü üzere kavite boyutlarıdır (m). Eşitlik 3.1’e göre hesaplanan en küçük $f_{m,n,p}$ değeri, kavitenin ilk kesim frekansı ya da en düşük rezonans frekansı olarak adlandırılır. En düşük rezonans frekansı, kavite içerisinde en düşük rezonans frekansından daha küçük frekanslarda elektromanyetik dalga yayılamayacağını ifade eder. Örnek olarak $a < b < d$ değerleri için kavitenin en düşük rezonans frekansı $m=0, n=1, p=1$ değerleri için oluşmaktadır [26]. En düşük rezonans frekansı aynı zamanda kesim frekansı (f_c) olarak da adlandırılmaktadır.

3.2 Toplam Yayılan Mod Sayısı

Bir tam yansımali oda içerisindeki elektromanyetik alan, yayılan modların bir kombinasyonudur. Tam yansımali oda tasarımında, yayılma modlarının toplam sayısı dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Tam yansımali odada yayılan modların toplam sayısı N ile gösterilir ve şuna eşittir [18]:

$$N = \frac{8\pi abdf^3}{3c^3} - (a + b + d)\frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (3.2)$$

Burada; a , b , d tam yansımali oda boyutları, f frekans, c ise ışık hızıdır.

3.3 Kullanılabilir En Düşük Frekans (LUF)

Kullanılabilir en düşük frekans (LUF), tam yansımali odanın içerisinde elektromanyetik alan homojenliğinin sağlandığı ve yeterli mod sayısının olduğu en düşük frekanstır. LUF , genelde tam yansımali odanın en düşük rezonans frekansının 3 katı olarak kabul edilir [26]. LUF için diğeri bir kabul ise, oda içerisinde toplam yayılan mod sayısı (N), 60'a eşit iken hesaplanan frekans değeridir. Eşitlik 3.3 ve 3.4'te bu durum gösterilmektedir.

$$LUF = 3f_c \quad (3.3)$$

$$60 = \frac{8\pi abdf^3}{3c^3} - (a + b + d)\frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (3.4)$$

3.4 Çalışma Hacmi

Çalışma hacmi, tam yansımali oda içerisinde elektromanyetik alan homojenliğinin sağlandığı hacimdir. Elektromanyetik uyumluluk testleri bu homojenliğin sağlandığı hacim içerisinde yapılır.

IEC 61000-4-21 standardına göre, çalışma hacmi belirlenirken oda duvarlarından, karıştırıcıdan ve verici antenden en az $(\lambda_{LUF}/4)m$ mesafede minimum 8 nokta belirlenir ve ölçümler alınarak elektromanyetik alan homojenliği doğrulanır. Burada λ_{LUF} kullanılabilir en düşük frekansa (LUF) karşılık gelen dalga boyudur ve birimi metredir.

3.5 Elektromanyetik Alan Homojenliği

Tam yansımali oda içerisinde elektromanyetik uyumluluk testlerinin yapılabilmesi için EM alan homojenliğinin sağlanması şarttır. Tam yansımali oda içerisinde, alan homojenliğinin saptanması için standart bir prosedür vardır. Kartezyen koordinatlar için EM alan homojenliği, 8 ölçüm noktası için elektrik alan şiddeti cinsinden aşağıdaki Eşitlikler ile ifade edilir [26].

$$\tilde{E}_{x,y,z} = \frac{E_{\max(x,y,z)}}{\sqrt{P_{in}}} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te, $E_{\max(x,y,z)}$ tüm karıştırıcı adımları için her bir eksen boyunca V/m cinsinden elde edilen alan seviyelerinin maksimumu iken, P_{in} maksimum alan seviyelerinin ölçümlerinde tam yansımali odaya verilen W cinsinden ortalama giriş gücüdür. $\tilde{E}_{x,y,z}$ ise giriş gücünün kareköküne bölünen her bir eksen için elde edilen normalize edilmiş maksimum alan değerleridir.

$$\langle \tilde{E}_x \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{x,i} \quad (3.6)$$

$$\langle \tilde{E}_y \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{y,i} \quad (3.7)$$

$$\langle \tilde{E}_z \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{z,i} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.6 - 3.8'de her bir x, y, z ekseni boyunca normalize edilmiş maksimum alan değerlerinin ortalamaları gösterilmektedir.

$$\langle \tilde{E} \rangle = \frac{\langle \tilde{E}_x \rangle + \langle \tilde{E}_y \rangle + \langle \tilde{E}_z \rangle}{3} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da gösterilen $\langle \tilde{E} \rangle$ ise üç eksen boyunca alınan 24 ölçümün normalize edilmiş maksimum alan seviyelerinin aritmetik ortalamasıdır.

Tüm bileşenlerin standart sapmaları Eşitlik 3.10 - 3.13'te verilmiştir.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{8-1} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{x,i} - \langle \tilde{E}_x \rangle)^2} \quad (3.10)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{8-1} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{y,i} - \langle \tilde{E}_y \rangle)^2} \quad (3.11)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{8-1} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{z,i} - \langle \tilde{E}_z \rangle)^2} \quad (3.12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{24-1} \sum_{i=1}^8 \sum_{p=x,y,z} (\tilde{E}_{p,i} - \langle \tilde{E} \rangle)^2} \quad (3.13)$$

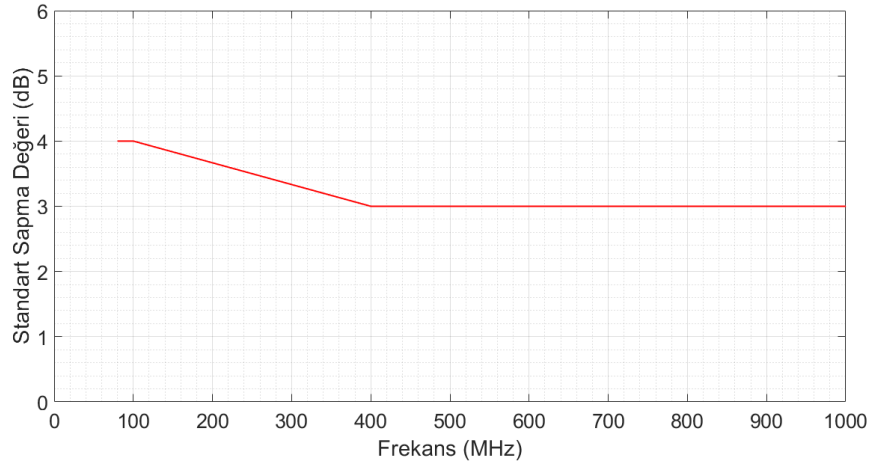
Hesaplanan standart sapma değerleri Eşitlik 3.14 kullanılarak dB cinsinden ifade edilebilir.

$$\sigma(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma + \langle \tilde{E}_{x,y,z} \rangle}{\langle \tilde{E}_{x,y,z} \rangle} \right) \quad (3.14)$$

IEC 61000-4-21 standardına göre oda içerisinde elektromanyetik alan homojenliğinin sağlanabilmesi için, yukarıdaki Eşitlikler ile hesaplanan tüm eksenlerdeki elektrik alan şiddeti ve mutlak elektrik alan şiddetinin standart sapmalarının aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir [26]:

- 80 - 100MHz arası en fazla 4dB,
- 100 - 400MHz arası 4dB'den 3dB'ye lineer azalarak,
- 400MHz ve üzeri frekanslarda en fazla 3dB.

Şekil 3.2'de IEC 61000-4-21 standardına göre oda içerisinde elektromanyetik alan homojenliğinin sağlanması için tanımlanan standart sapma limitlerinin grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.2 IEC 61000-4-21 standardına göre standart sapma limitleri

3.6 Q Faktörü

Tam yansımali odanın kalite faktörü olan Q , bir odanın enerjiyi ne kadar iyi depolayabileceğini tanımlar ve belirler. Verici bir anten yoluyla tam yansımali odaya sinyal enjekte edildiğinde, sinyalin tamamı alıcı anten tarafından alınamaz. Bunun nedeni büyük ölçüde, oda duvarındaki kayıplardır. Diğer nedenlere örnek olarak açıklıklardan kaynaklanan kayıpları ve yüklemekten kaynaklanan kayıpları verebiliriz. Daha yüksek bir Q değeri, elektromanyetik alanın oda duvarlarından daha kayıpsız yansıyacağını ve odanın enerjiyi iyi depolayacağını gösterirken, düşük Q faktörüne sahip bir oda ise, oda duvarlarındaki kayıplar daha baskın olduğundan elektromanyetik enerjiyi iyi depolayamaz. Teorik olarak, tam yansımali odanın Q faktörü, Eşitlik 3.15'e göre hesaplanır [30]. Eşitlik 3.15, ölçümler sırasında Eşitlik 3.16'ya dönüşür [26].

$$Q = \frac{3V}{2S} \sqrt{\frac{\omega_0 \mu_0 \sigma}{2\mu_r}} \quad (3.15)$$

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{input}} \right\rangle \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.15 ve 3.16'da; V odanın hacmi (m^3), S odanın yüzey alanı (m^2), ω açısal frekans, μ manyetik geçirgenlik, σ kullanılan malzemenin iletkenliği, η anten verimliliği, λ dalgaboyu (m), P_{AveRec} karıştırıcının tam bir tur dönüşünde alınan ortalama güç (W), P_{input} karıştırıcının tam bir tur dönüşünde iletilen ortalama güçtür (W).

Çok yüksek Q değerine sahip tam yansımali odalar, oda içersine enjekte edilen sinyalin sönümlenmesi uzun süreceğinden, elektromanyetik testlerin de süresini artırmaktadır. Test süresinin artması, istenen bir durum değildir. Bu yüzden, çok yüksek Q değerine sahip odaların bir bölümüne, enerjiyi soğurarak Q faktörünü düşürmek için EM yutucular koyulabilir [16].

4

İLETKEN KUMAŞLARIN EKLANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ İÇİN ÖNERİLEN ÖLÇÜM TEKNİĞİ

Bu tez çalışmasında, iletken kumaşların ekranlama etkinliği testleri için tam yansımali ve yarı yansımali oda kullanılarak özgün bir ölçüm tekniğı önerilmektedir. Bu bölümde ilk olarak TÜBİTAK BİLGEM EMI/EMC Test ve Değerlendirme Laboratuvarı bünyesinde bulunan tam yansımali odanın elektriksel performansı incelenmiş, ardından önerilen ölçüm tekniğı ile iletken bir kumaşın ekranlama etkinliği testi gerçekleştirilmiştir.

4.1 Tam Yansımali Odanın Boyutları ve Elektriksel Performansı

Tam yansımali odanın Faraday kafesi etkisi gösterebilmesi için tavanı, zemini ve duvarları yüksek iletkenlik değerine sahip metal malzemeden yapılır. Bu sayede odanın içinde oluşan elektromanyetik (EM) alanların, odanın dışında bulunan cihazlara ve odanın dışında bulunan EM alanların ise odanın içindeki ölçüm düzeneğine etki etmesi engellenerek iç ve dış EM gürültüden yalıtılmış bir test ortamı oluşur. Oda içerisindeki karıştırıcının fiziksel boyutları ve konumu, içeride oluşacak elektromanyetik alanı etkilemektedir.

Tam yansımali ve yarı yansımali odalarda ise dışarıdan kaynaklanan EM alanların bastırılması amacıyla odanın tavanı, zemini ve duvarları metal malzeme ile kaplanırken, odanın içindeki yüzeylerden kaynaklanacak yansımaların soğrulması amacıyla metal yüzeylere EM yutucular konumlandırılır. Tam yansımali odalar, kurulum maliyeti dikkate alındığında tam yansımali ve yarı yansımali odalardan daha ekonomiktir. Ayrıca duvarlarında EM yutucu bulunmamasından dolayı tam yansımali odalar düşük giriş gücü seviyelerinde bile yüksek EM alan kuvvetlerinin oluşmasına olanak sağlarlar. Bu avantajların aksine tam yansımali odaların kullanılabileceğı frekans değerlerinin sınırlı olması ve oda içerisinde homojen dağılımlı EM alanın oluşturulmasındaki zorluklar (karıştırıcının geometrisinin tasarlanması, karıştırıcı konumu vb.) gibi bazı dezavantajları mevcuttur.



Şekil 4.1 Tam yansımali oda ve boyutları

İletken kumaşların ekranlama etkinliği testi için kullanılacak tam yansımali oda boyutları Şekil 4.1’de gösterildiği üzere $(3,10*3,07*2,45)m^3$ ’tür. Oda kapısının boyutları $(212,4*90,5)cm^2$ ’dir. Odanın duvarları arasındaki süreksizliklerden kaynaklanacak elektromanyetik sızıntıları önlemek amacıyla genişliği ve kalınlığı sırası ile $5cm$ ve $3,5mm$ olan bağlantı flanşları panel aralarına yerleştirilmiştir. Ayrıca güç, RF, fiber optik vb. diğer kablo bağlantılarının yapılabilmesi için odanın duvarına $(59,4*59,4)cm^2$ boyutlarında erişim paneli konumlandırılmıştır. Hem kablo yolu ile dışarıdan içeriye sinyal taşınmasını engellemek hem de testlerde gürültüden arındırılmış bir ortam oluşturmak için elektrik beslemeleri RF güç filtrelerinden geçirilmiştir. Son olarak odanın tavan ve yan duvarına birer adet düşük hava akış direncine ve yüksek ekranlama etkinliğine sahip havalandırma panelleri konumlandırılmıştır.

4.1.1 Kullanılabilir En Düşük Frekans (LUF)

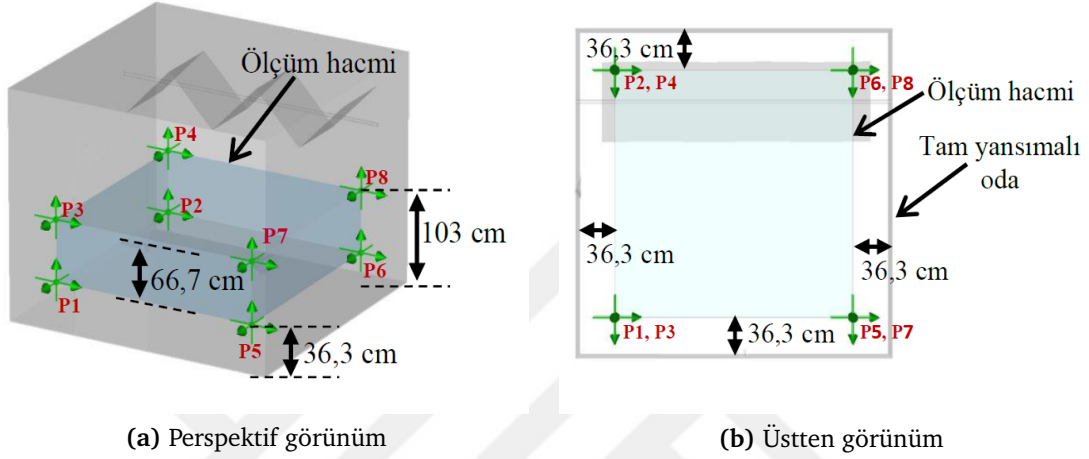
Bu bölümde, bölüm 3.1, 3.2, 3.3’te anlatıldığı üzere kullanılabilir en düşük frekans (LUF) Eşitlik 3.3 ve 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Tam yansımali odanın içerisinde karıştırıcı yokken Eşitlik 3.3 ve 3.4 kullanılarak elde edilen kullanılabilir en düşük frekans değeri Eşitlik 4.1’de ve 4.2’de gösterildiği üzere sırasıyla 206,29MHz ve 207,86MHz olarak hesaplanmıştır.

$$LUF_{fc} = 206,29MHz \quad (4.1)$$

$$LUF_N = 207,86MHz \quad (4.2)$$

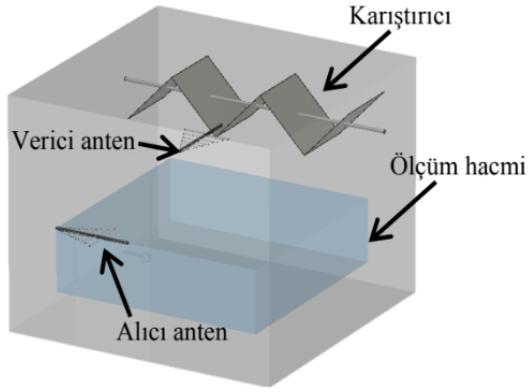
4.1.2 Elektromanyetik Alan Homojenliği

Bu bölümde, ölçüm hacmi içerisinde oluşan elektromanyetik alan dağılımının homojenliğinin düşük ve yüksek frekanslarda sağlandığının elektriksel testler ile gösterilmesi hedeflenmiştir. Testlerde düşük frekanslarda (100MHz - 1GHz) logperiyodik antenler kullanılırken, yüksek frekanslar (1GHz - 10GHz) için double ridged horn antenler kullanılmıştır. Şekil 4.2’de ölçüm hacmi ve ölçümlerin alındığı konumlar gösterilmektedir.

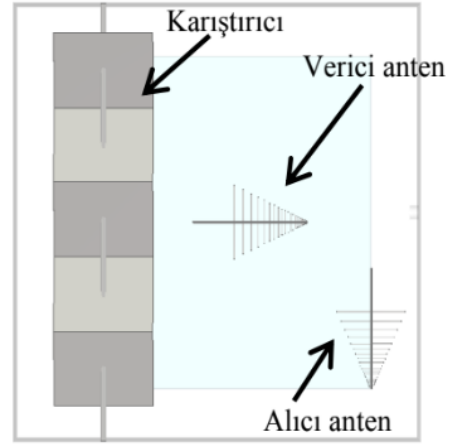


Şekil 4.2 Ölçüm hacmi ve ölçüm noktaları

Bu amaçla öncelikle düşük frekanslardaki ölçümler için Şekil 4.3 ve 4.4’te gösterildiği gibi IEC 61000-4-21 standardında belirtilen asgari koşullar göz önüne alınarak 100MHz - 1GHz frekans aralığında, 24 karıştırıcı adımı için Şekil 4.2’de gösterilen ölçüm hacminin köşelerindeki elektrik alan seviyeleri, logperiyodik antenler yardımı ile ölçülmüştür. Ölçümler sonucu elde edilen E_x , E_y , E_z , E_{xyz} alan seviyelerinin frekansa bağlı standart sapma değerleri Eşitlik 3.5 - 3.14 yardımı ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.5 - 4.8’de gösterilmiştir.



(a) Perspektif görünüm

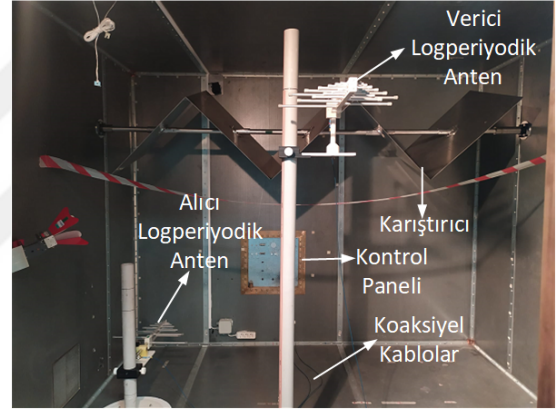


(b) Üstten görünüm

Şekil 4.3 Verici/alıcı logperiyodik antenler ve ölçüm hacmi

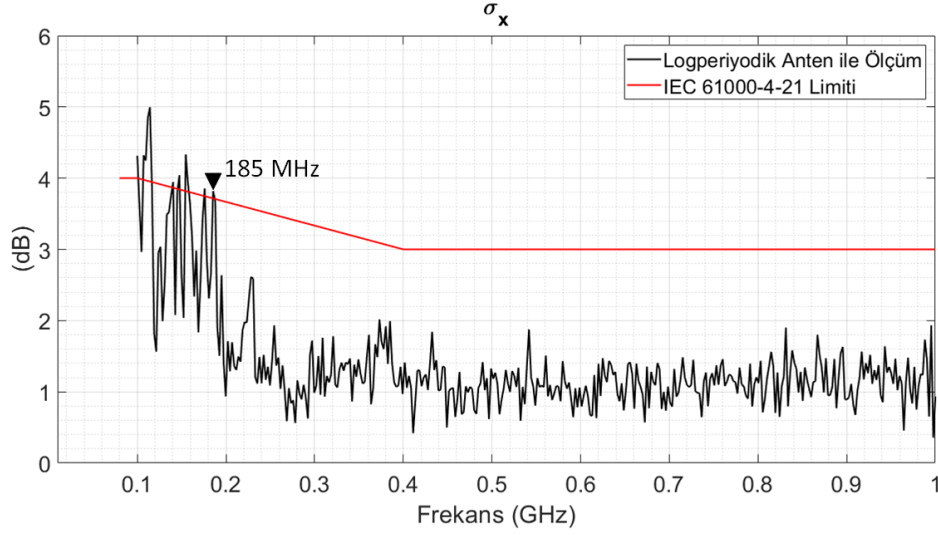


(a)

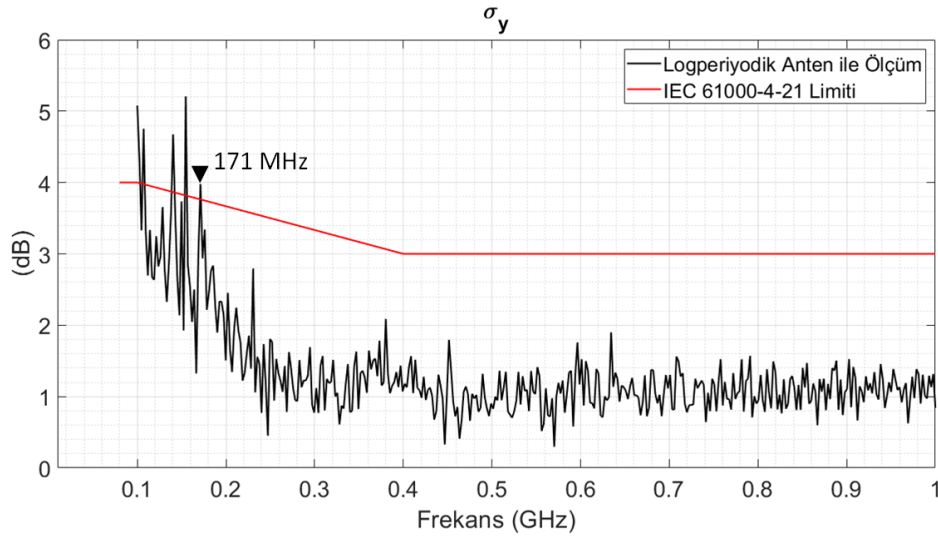


(b)

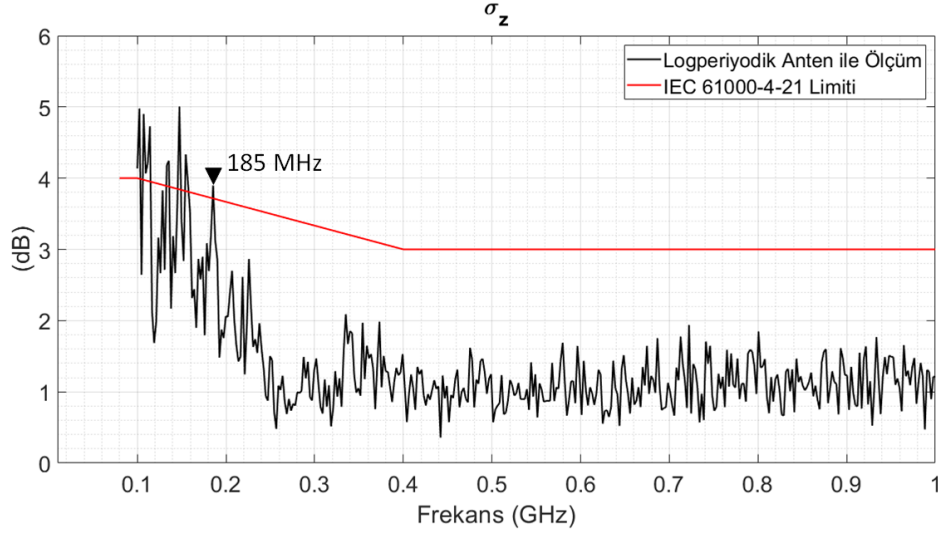
Şekil 4.4 Düşük frekans EM alan homojenliği ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği



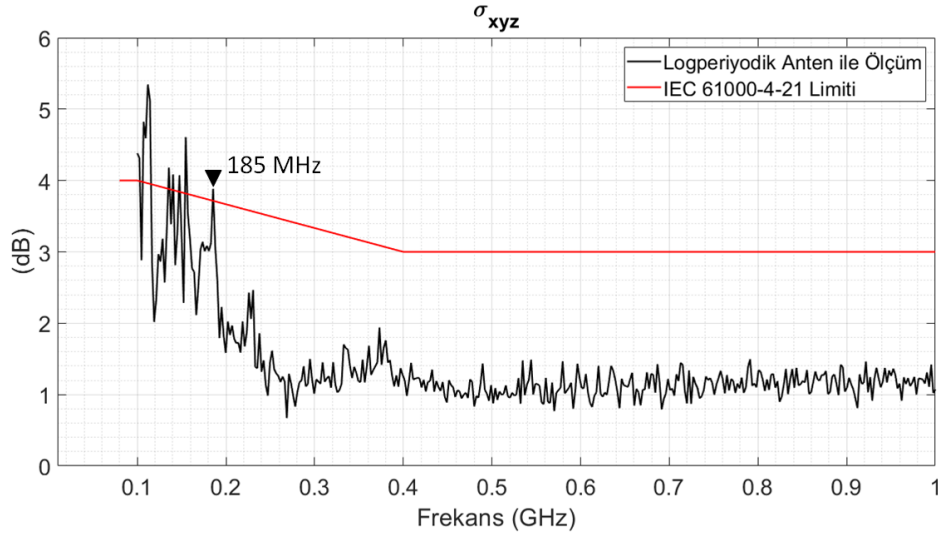
Şekil 4.5 Düşük frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_x alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)



Şekil 4.6 Düşük frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_y alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)



Şekil 4.7 Düşük frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_z alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)

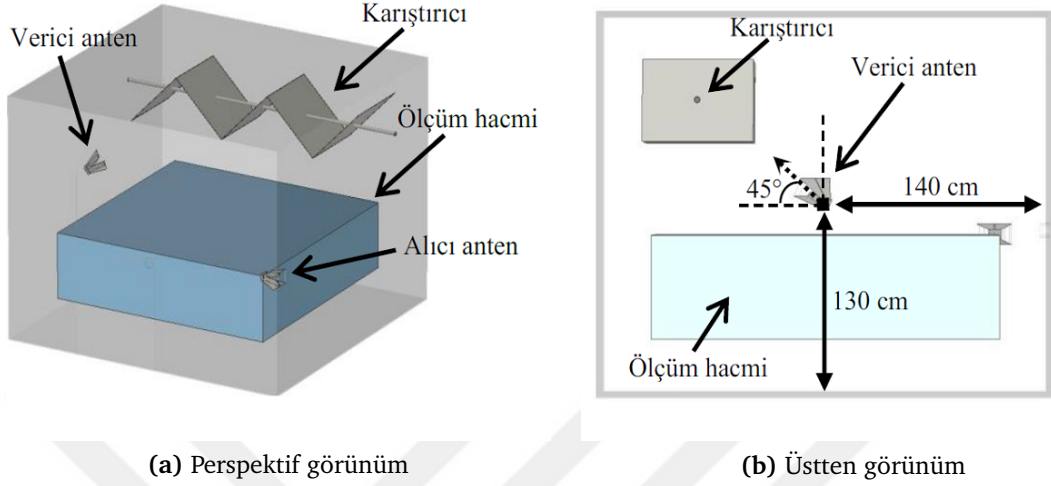


Şekil 4.8 Düşük frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_{xyz} alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)

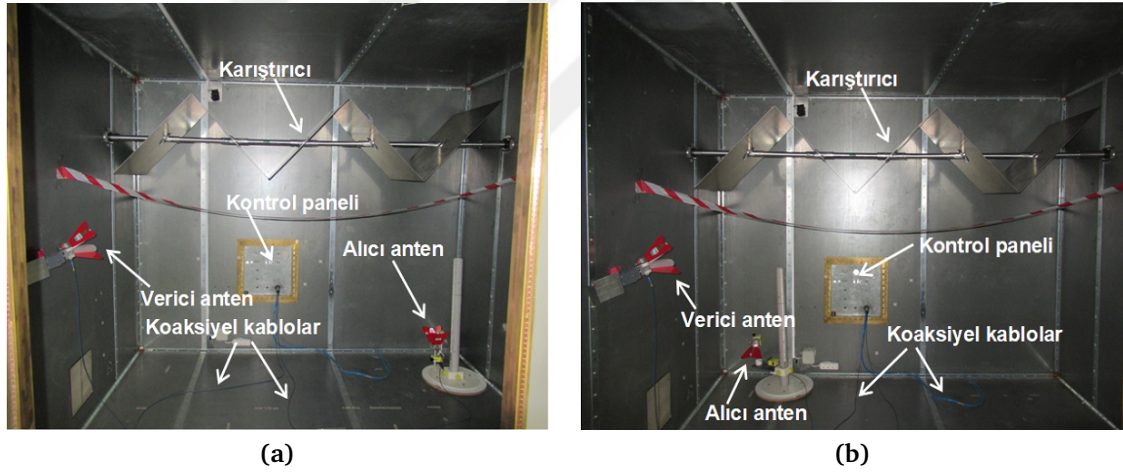
Şekil 4.5 - 4.8'de sunulan sonuçlar ile Eşitlik 4.1 ve 4.2 ile hesaplanan sonuçlar karşılaştırıldığında odanın kullanılabilir en düşük frekans değerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Sonuçlar arasındaki kabul edilebilir fark, tam yansmalı oda içine eklenen karıştırıcıdan kaynaklanmaktadır.

Yüksek frekanslardaki ölçümler için Şekil 4.9 ve 4.10'da gösterildiği gibi IEC 61000-4-21 standardında belirtilen asgari koşullar göz önüne alınarak 1GHz - 10GHz frekans aralığında, 24 karıştırıcı adımı için Şekil 4.2'de gösterilen ölçüm hacminin köşelerindeki elektrik alan seviyeleri, double ridged horn antenler yardımı

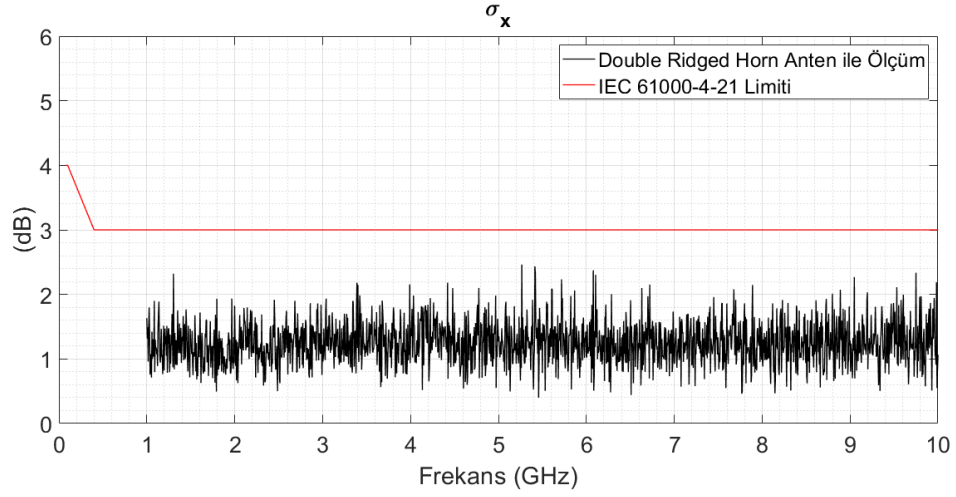
ile ölçülmüştür. Ölçümler sonucu elde edilen E_x , E_y , E_z , E_{xyz} alan seviyelerinin frekansa bağlı standart sapma değerleri Eşitlik 3.5 - 3.14 yardımı ile hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.11 - 4.14'te gösterilmiştir.



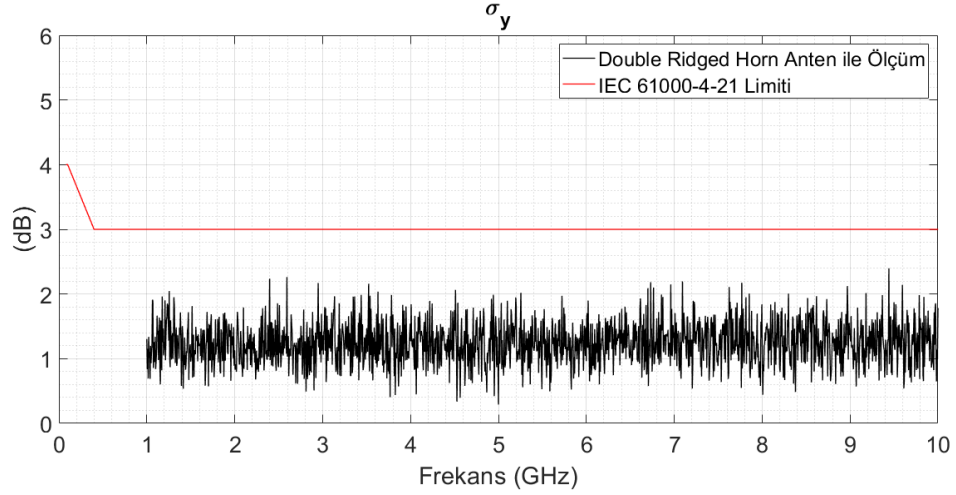
Şekil 4.9 Verici/alıcı double ridged horn antenler ve ölçüm hacmi



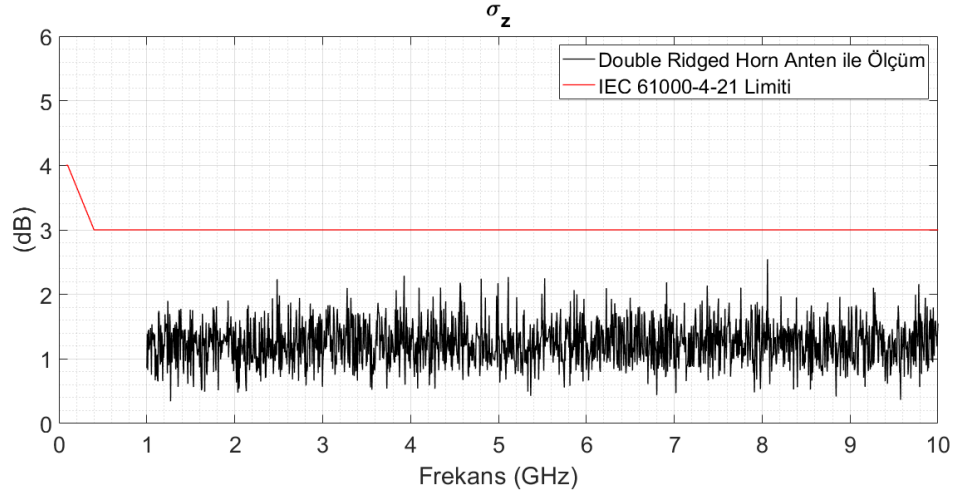
Şekil 4.10 Yüksek frekans EM alan homojenliği ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği



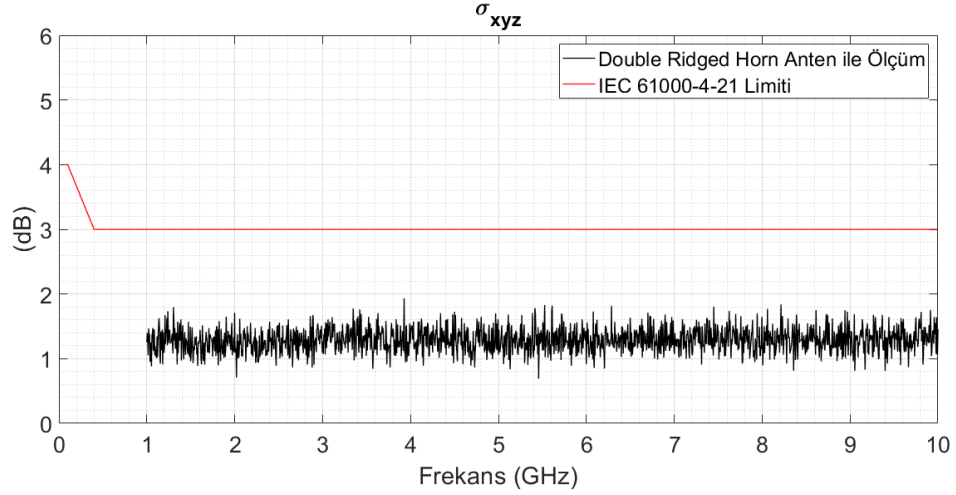
Şekil 4.11 Yüksek frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_x alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)



Şekil 4.12 Yüksek frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_y alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)



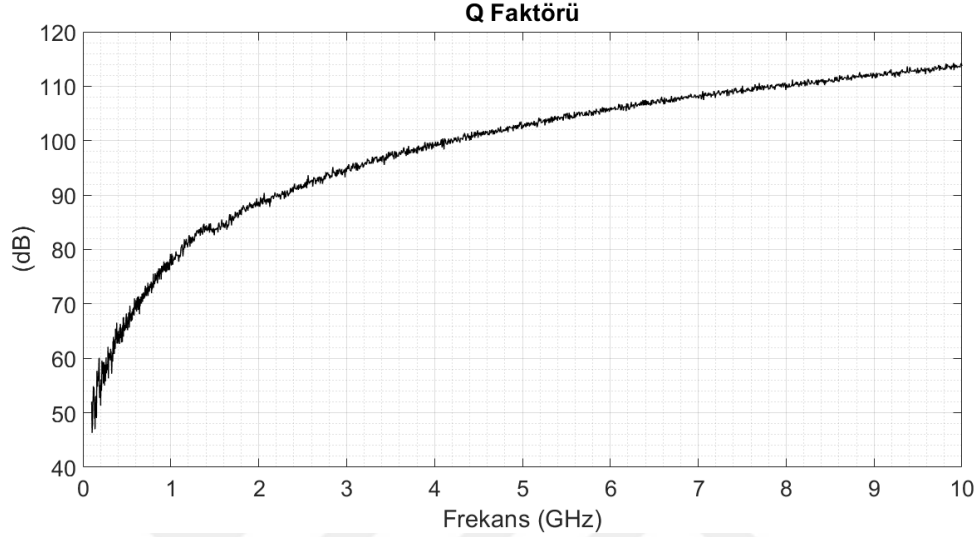
Şekil 4.13 Yüksek frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_z alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)



Şekil 4.14 Yüksek frekanslarda tam yansmalı odanın ölçüm hacminde oluşan E_{xyz} alan seviyesi için elde edilen standart sapma değerleri (karıştırıcı açı adımları 0° , 15° , 30° ,..., 345°)

4.1.3 Q Faktörü

Tam yansımali odanın kalite faktörü (Q), düşük frekanslarda (100MHz - 1GHz) logperiyodik antenler, yüksek frekanslarda (1GHz - 10GHz) double ridged horn antenler kullanılarak alınan ölçüm verileri ve Eşitlik 3.16 yardımıyla hesaplanmış ve Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



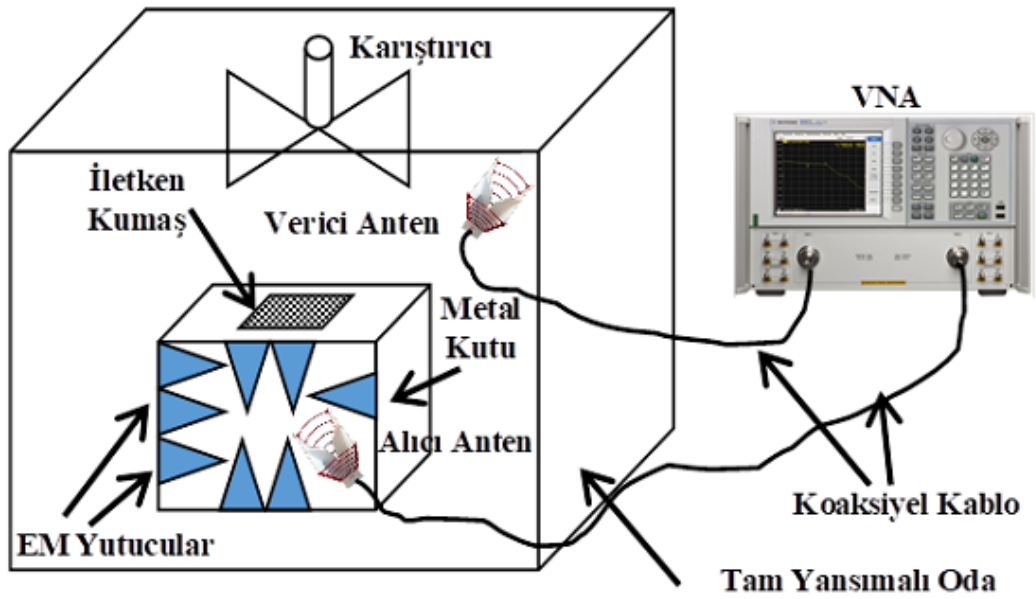
Şekil 4.15 Tam yansımali odanın Q faktörü

4.2 İletken Kumaşların Önerilen Ölçüm Tekniği ile Ekranlama Etkinliği Testleri

Önerilen teknik, toplam boyutları $(3,10 \times 3,07 \times 2,45)m^3$ olan ve yaklaşık 210MHz'lik en düşük kullanılabilir frekansı (LUF) sağlayan geleneksel bir tam yansımali oda içerisinde uygulanmaktadır. Sınır koşullarını değiştirmek ve ölçüm hacmi $(234,4 \times 238 \times 66,7)cm^3$ içerisinde yeterince homojen bir alan sağlamak için, beş adet $(0,75 \times 0,75)m^2$ alüminyum panelden oluşan asimetrik Z formunda katlanmış yatay karıştırıcı tam yansımali odaya yerleştirilmiştir. Karıştırıcı bir otomasyon yazılımı ile uzaktan kontrol edilebilmektedir.

Bölüm 4.1'deki ölçüm ve hesaplamalar ile tam yansımali odanın elektromanyetik alan homojenliği deneysel olarak doğrulandıktan sonra, boyutları $(0,61 \times 0,76 \times 0,59)m^3$ olan galvanizli çelikten yapılmış metal kutu ölçüm hacminin merkezine, metal kutunun dış tabanı ise oda zemininin $(\lambda_{LUF}/4)m$ kadar üzerine yerleştirilmiştir. Kutunun ekranlama etkinliğinin artırılması için hem kutunun taban ve yan yüzeyleri birleşme noktalarından birbiri ile kaynaklanmış, hem de kutu ile kapak arasına elektromanyetik girişim engelleyici contalar (gasket) yerleştirilmiştir. Ayrıca kutu içine konumlandırılacak alıcı antenin kablo bağlantısı için kasa üzerine SMA

konnektör monte edilmiştir. Şematik bir gösterim Şekil 4.16’da, test düzeneği ise Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



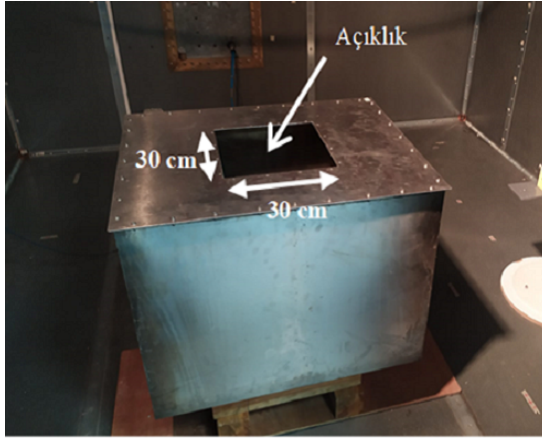
Şekil 4.16 Önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçümü şematik gösterimi



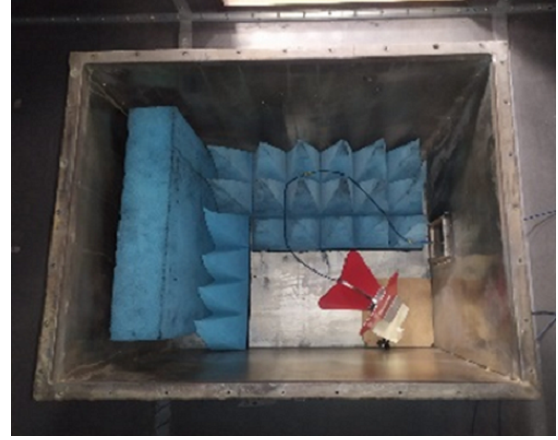
Şekil 4.17 Önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği

Şekil 4.18’de görüldüğü üzere, iletken kumaşın ekranlama etkinliğinin ölçülmesi için metal kutunun tavanında $(0,3 \times 0,3) m^2$ ’lik bir açıklık bırakılmıştır. Ayrıca kutunun tabanı ve tavanı EM yutucular ile kaplanmış, açıklığın kapatılması gereken ölçümlerde

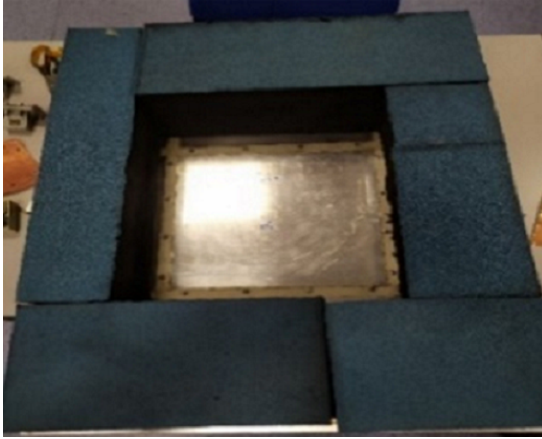
kullanmak için ise galvaniz çelikten üretilmiş, kenarları EMI gasket ile kaplanmış bir panel hazırlanmıştır.



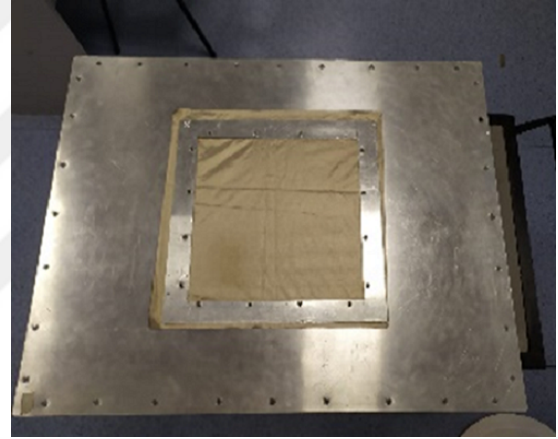
(a)



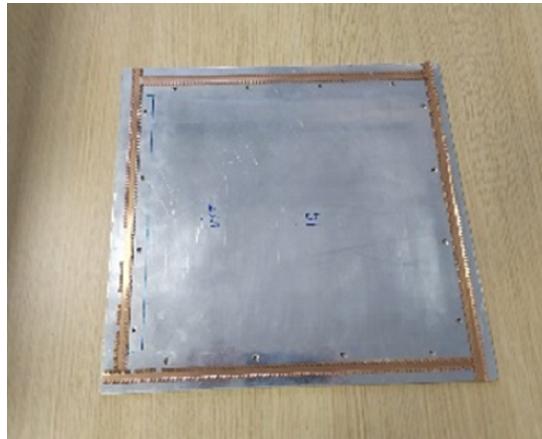
(b)



(c)



(d)



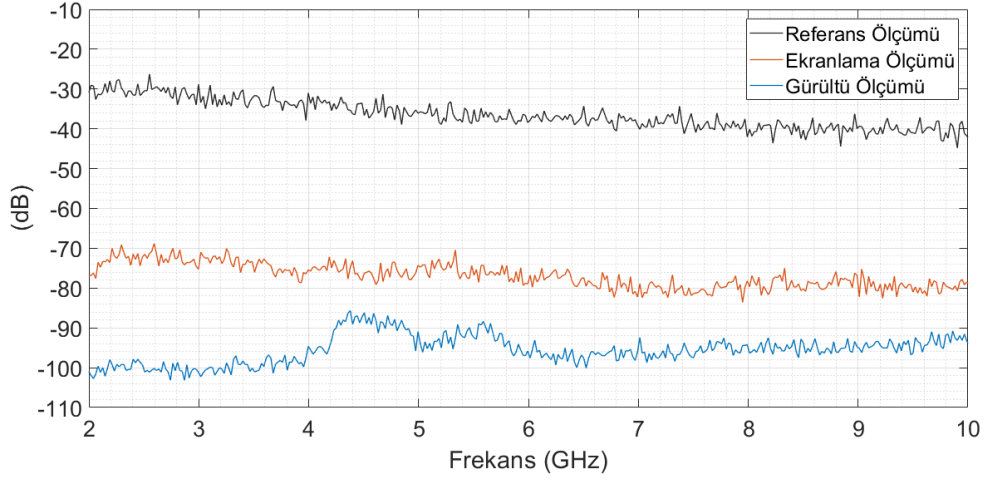
(e)

Şekil 4.18 (a) Metal kutudaki açıklık boyutları, (b) metal kutu tabanına yerleştirilen EM yutucular, (c) metal kutu tavanına yerleştirilen EM yutucular, (d) iletken kumaşın açıklığa yerleştirilişi, (e) açıklığı kapatan metal panel ve EMI gasket

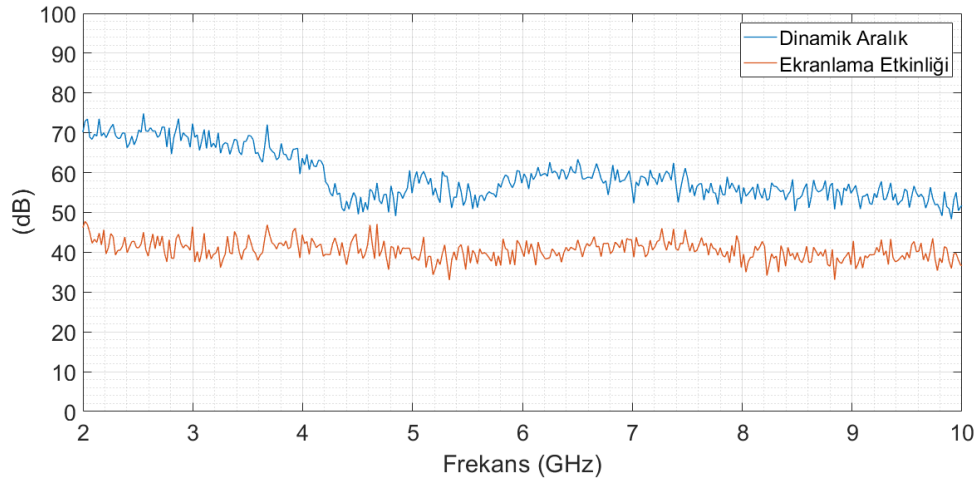
Karıştırıcının tam bir dönüşü için ekranlama etkinliği ölçümü üç temel aşamadan oluşur. Bunlar sırasıyla; referans ölçümü, ekranlama ölçümü ve gürültü ölçümüdür. Referans ölçümünde alıcı anten, Şekil 4.18 (b)'de gösterildiği gibi metal kutunun iç köşesine yerleştirilir ve hüzmeleri tavana bakacak şekilde yönlendirilir. Tavandaki açıklık, açık pozisyonda iken referans ölçümleri alınır. Referans ölçümünden sonra tavandaki açıklık iletken kumaş ile kapatılarak ekranlama ölçümleri alınır. Bilindiği üzere ölçüm sisteminin dinamik aralığı, tüm test sisteminin ölçebileceği maksimum ekranlama etkinliği seviyesini belirler. Bu amaçla sistemin gürültü seviyesine dayalı olarak üç farklı gürültü ölçümü alınmıştır. İlk ölçüm olarak açıklık üzerine alüminyum panel yerleştirilerek alıcı ve verici antenler arasındaki frekansa bağlı iletim parametresi değerleri (S_{21}) elde edilir. İkinci ve üçüncü ölçüm olarak, ölçüm düzeneğinde koaksiyel kablolar sırasıyla verici ve alıcı antenler yerine 50Ω yük ile sonlandırılır. Bu üç ölçümün ardından, nihai gürültü seviyesi, üç ölçümde kaydedilen en yüksek değerlerin kombinlenmesi ile elde edilir. Bu kombinlenmiş değerler, gürültü ölçümü olarak adlandırılır. Bu çalışmada gözlemlenen en yüksek gürültü seviyesi verici ve alıcı antenler kullanılarak alınan ilk gürültü ölçümü olduğundan dinamik aralık bu seviye kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.19'da, referans, ekranlama ve gürültü ölçüm değerleri gösterilmiştir. İletken kumaşın ekranlama etkinliği ve önerilen teknik için kullanılan test sisteminin dinamik aralığı ise Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

$$EE(dB) = 20 \log_{10} \frac{|S_{21_{ReferansOlcumu}}|}{|S_{21_{EkranlamaOlcumu}}|} \quad (4.3)$$

$$DA(dB) = 20 \log_{10} \frac{|S_{21_{ReferansOlcumu}}|}{|S_{21_{GurultuOlcumu}}|} \quad (4.4)$$



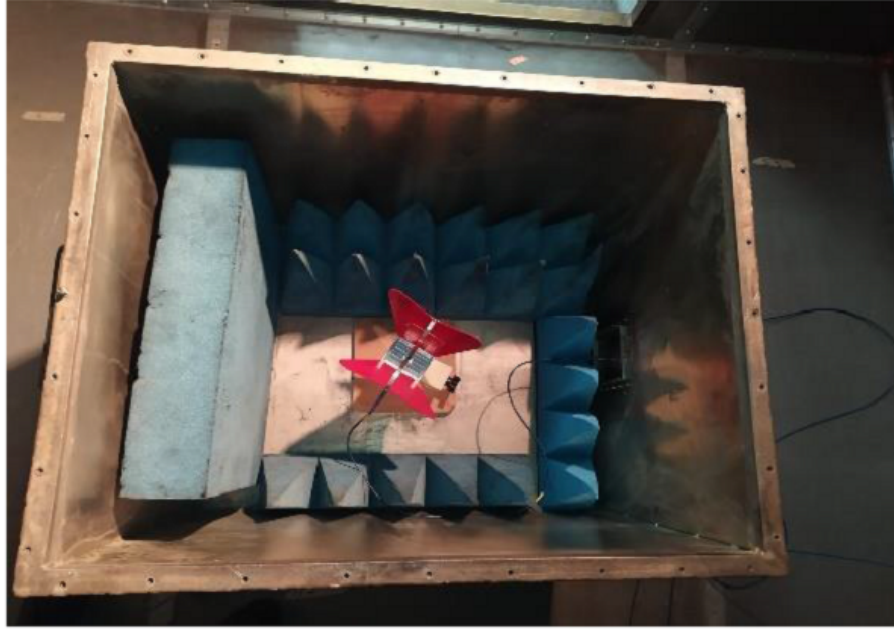
Şekil 4.19 Önerilen teknik ile referans, ekranlama ve gürültü ölçümü



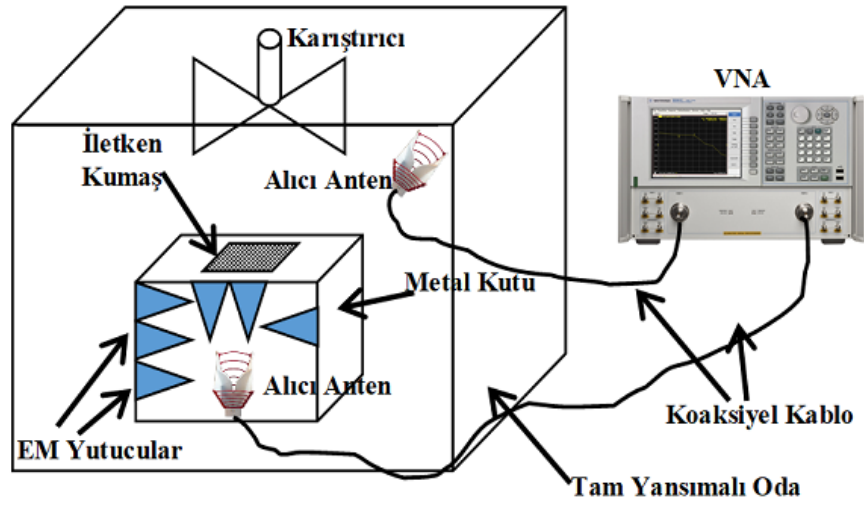
Şekil 4.20 Önerilen teknik ile dinamik aralık ve ekranlama etkinliği

Şekil 4.20'de görüldüğü üzere, iletken kumaşın ekranlama etkinliği 2GHz - 10GHz frekans aralığında yaklaşık olarak 40 dB seviyelerindedir. Ölçüm sisteminin dinamik aralığı ise her bir frekans değeri için iletken kumaşın ekranlama etkinliğinden daha yüksektir. Bu durum ölçüm düzeneğinin, iletken kumaşın ekranlama etkinliği ölçümlerini sağlıklı bir şekilde yapabileceğini göstermektedir.

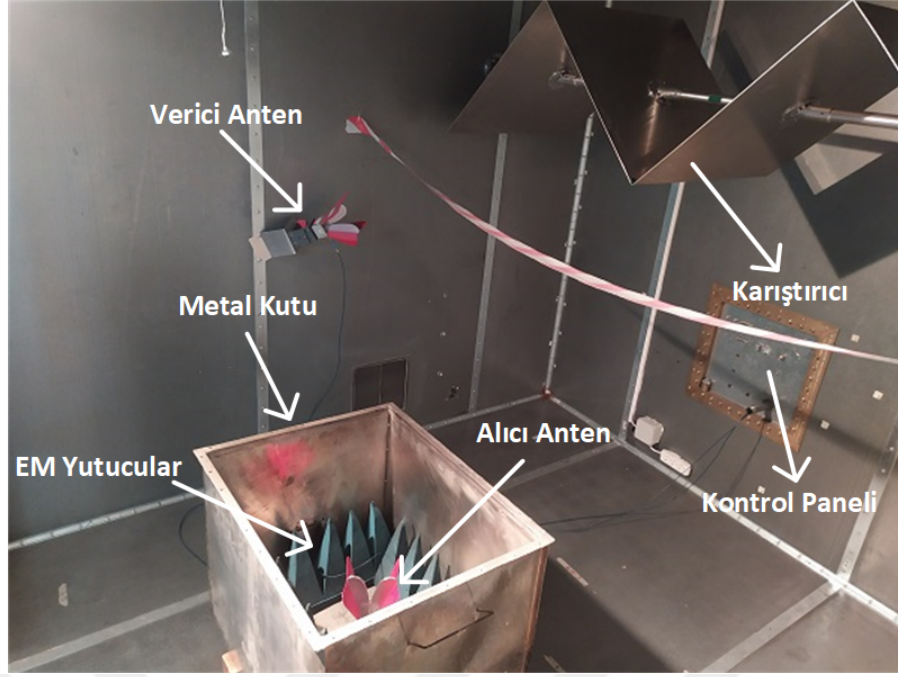
Alıcı anten, metal kutu içerisindeki konumunun ölçüm sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla metal kutunun ortasına konumlandırılmış ve ölçümler tekrarlanmıştır. Alıcı antenin metal kutu içerisindeki konumu Şekil 4.21'de, ölçümlerin şematik bir gösterimi Şekil 4.22'de ve test düzeneği ise Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Alıcı anten metal kutunun ortasında

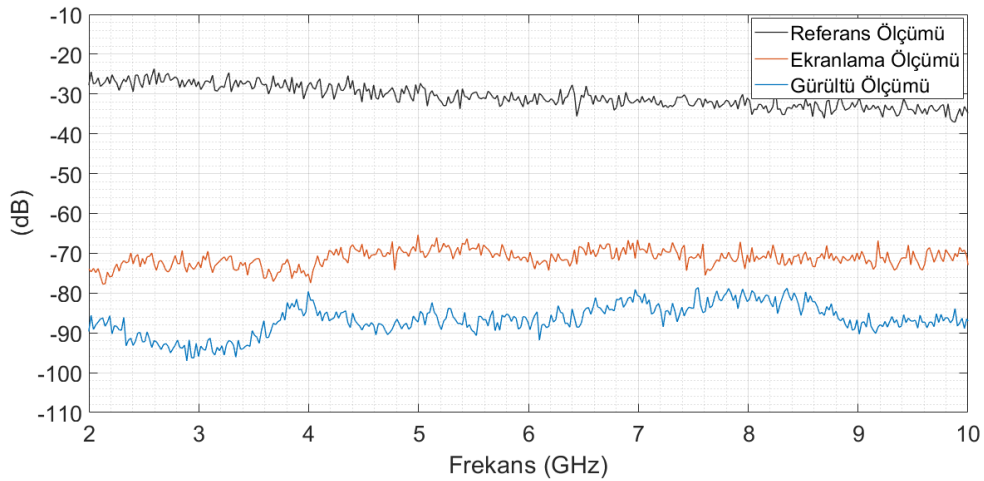


Şekil 4.22 Alıcı anten metal kutunun ortasındayken önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçümü şematik gösterimi

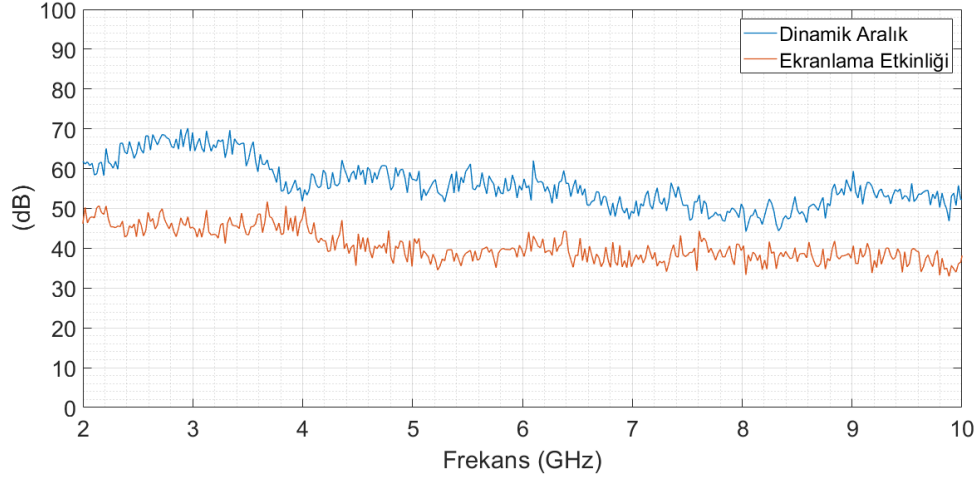


Şekil 4.23 Alıcı anten metal kutunun ortasında iken önerilen teknik ile ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği

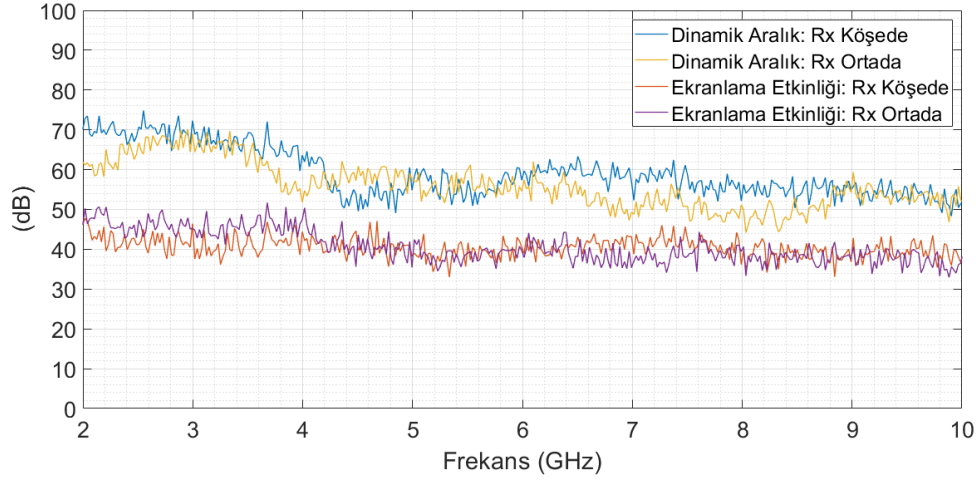
Şekil 4.24'te alıcı anten metal kutunun ortasında iken alınan referans, ekranlama ve gürültü ölçüm değeri gösterilmiştir. İletken kumaşın ekranlama etkinliği ve test sisteminin dinamik aralığı ise Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Farklı alıcı anten konumları için sonuçların karşılaştırması ise Şekil 4.26'dadır.



Şekil 4.24 Alıcı anten metal kutunun ortasında iken önerilen teknik ile referans, ekranlama ve gürültü ölçümü



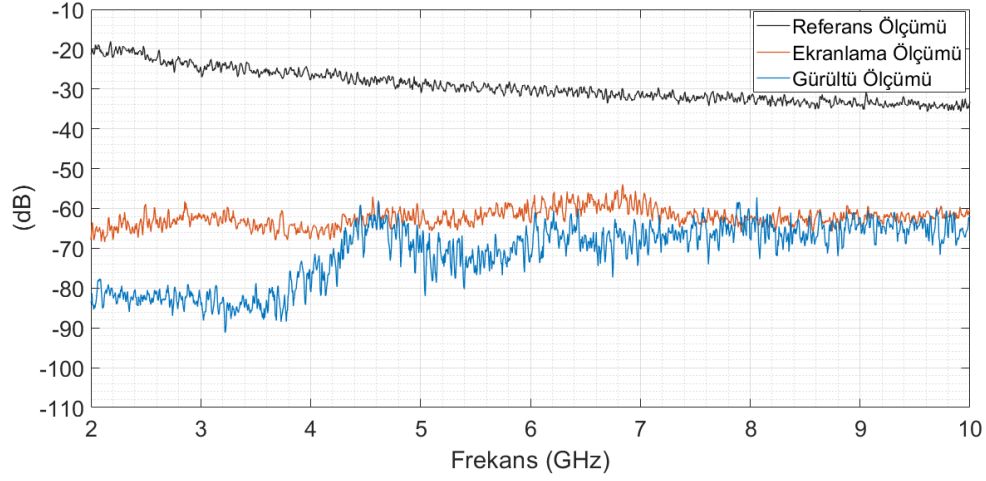
Şekil 4.25 Alıcı anten metal kutunun ortasındaiken önerilen teknik ile dinamik aralık ve ekranlama etkinliği



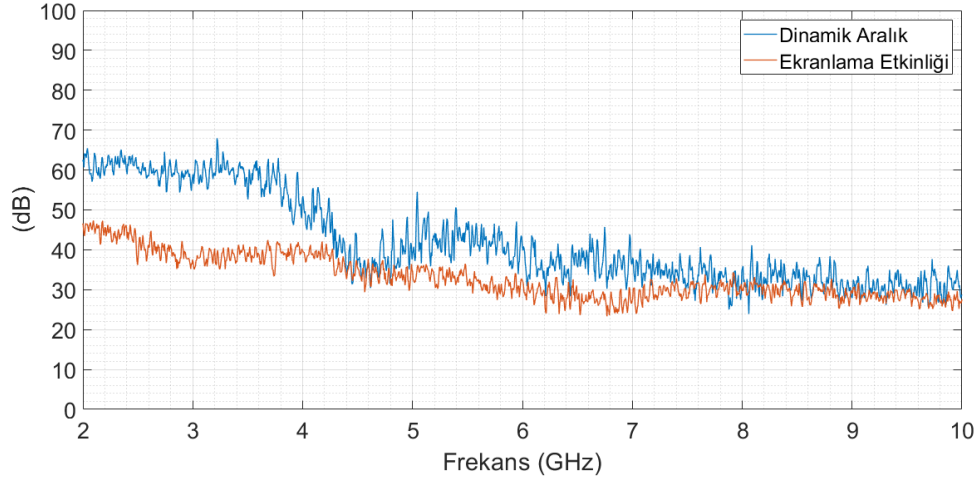
Şekil 4.26 Alıcı antenin farklı konumları için dinamik aralık ve ekranlama etkinliği karşılaştırması

Şekil 4.26’da görüldüğü üzere, alıcı antenin metal kutunun ortasında ya da köşesinde olması dinamik aralık ve ekranlama etkinliği seviyelerinde aşırı bir farklılığa neden olmamaktadır.

MIL-DTL-83528G spesifikasyonu ile ekranlama etkinliği ölçümlerine geçmeden önce, önerilen teknikte EM yutucuların etkisini gözlemlemek için metal kutu içerisindeki EM yutucular çıkarılmış ve 24 adımlı karıştırıcının tam bir tur dönüşü için ölçümler tekrarlanmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’dedir.



Şekil 4.27 Önerilen teknik ile referans, ekranlama ve gürültü Ölçümü (EM yutucu yok)



Şekil 4.28 Önerilen teknik ile dinamik aralık ve ekranlama etkinliği (EM yutucu yok)

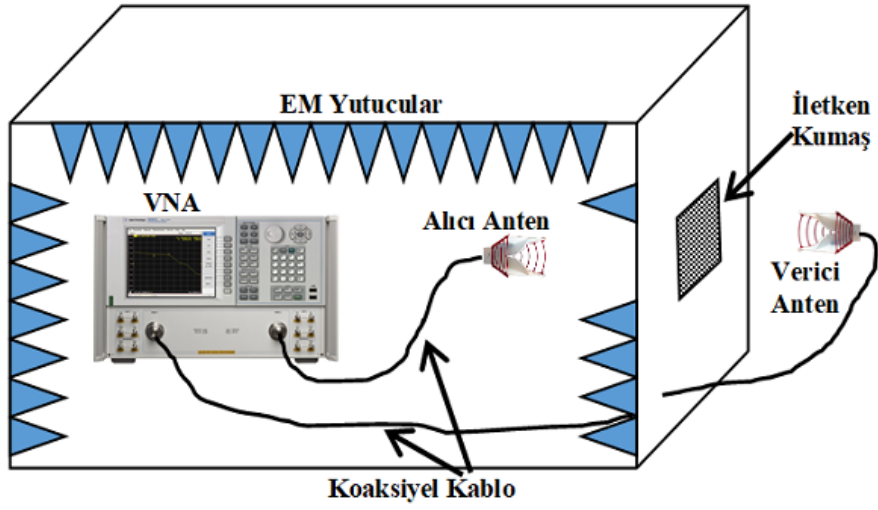
Şekil 4.28’de görüldüğü üzere, EM Yutucusuz metal kutu yüksek frekanslarda yeterli dinamik aralığı sağlamamaktadır. Bu sebeple iletken kumaşın ekranlama etkinliği tam olarak ölçülemez. Sonuç olarak sırasıyla Şekil 4.19, 4.27 ve Şekil 4.20, 4.28 karşılaştırıldığında; önerilen teknik, sistemin gürültü seviyesini düşürerek dinamik aralığı artırmakta ve bu sayede daha yüksek ekranlama etkinliğine sahip iletken kumaşların ölçümlerini gerçekleştirebilmektedir.

5

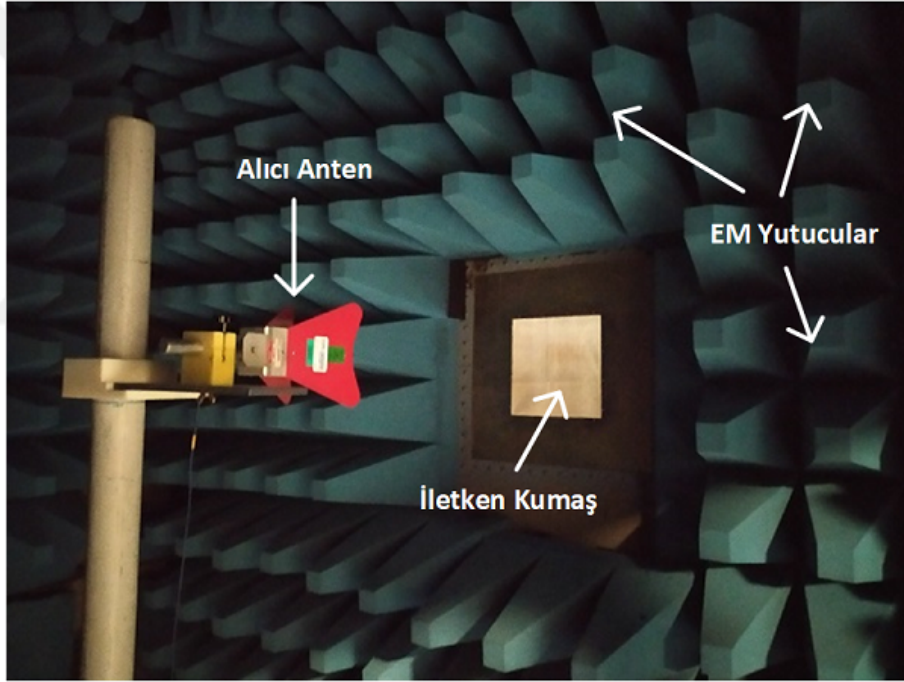
İLETKEN KUMAŞLARIN MIL-DTL-83528G SPESİFİKASYONUNA GÖRE EKLANLAMA ETKİNLİĞİ TESTLERİ

Bu bölümde ilk olarak iletken kumaşın ekranlama etkinliği MIL-DTL-83528G spesifikasyonunda belirtilen şekilde ölçülmüş ve sonrasında sonuçlar önerilen ölçüm tekniği ile karşılaştırılmıştır.

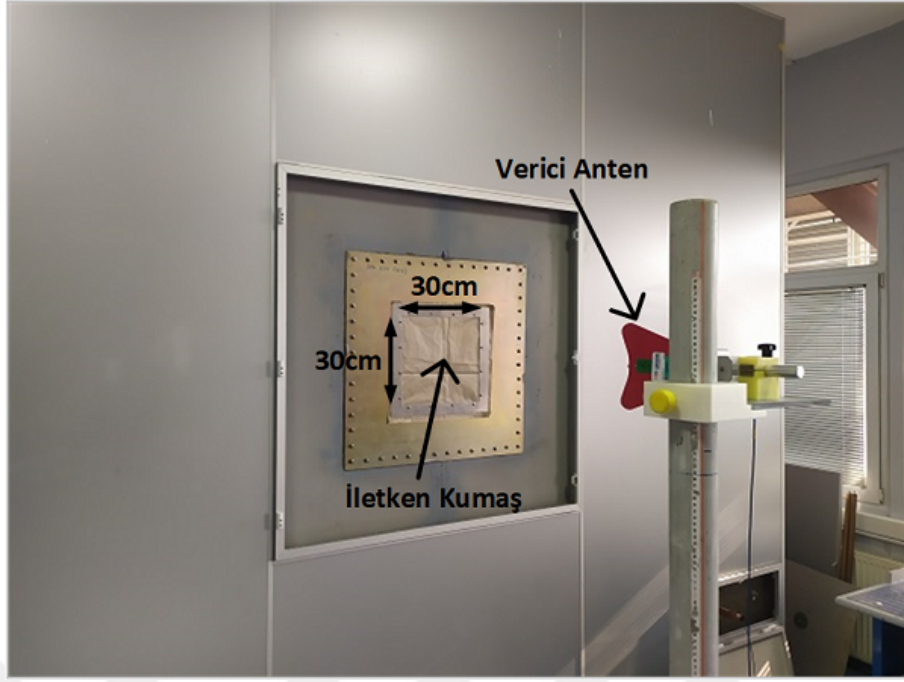
MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yapılan ölçümlerde alıcı double ridged horn anten yarı yansız oda içerisine yerleştirilirken verici double ridged horn anten yarı yansız odanın dışına yerleştirilmiş ve aralarında 2m mesafe bırakılmıştır. Spesifikasyona göre oda üzerindeki açıklık $(61*61)cm^2$ olmalıyken önerilen teknikte elde edilen sonuçlarla, spesifikasyona göre elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için oda üzerindeki açıklık $(30*30)cm^2$ olarak kullanılmıştır. Bu açıklıktan ekranlama etkinliği ölçümleri antenlerin hem yatay hem de dikey polarizasyonları için gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin şematik gösterimi Şekil 5.1’de, test düzeneği ise Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.1 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği ölçümü şematik gösterimi



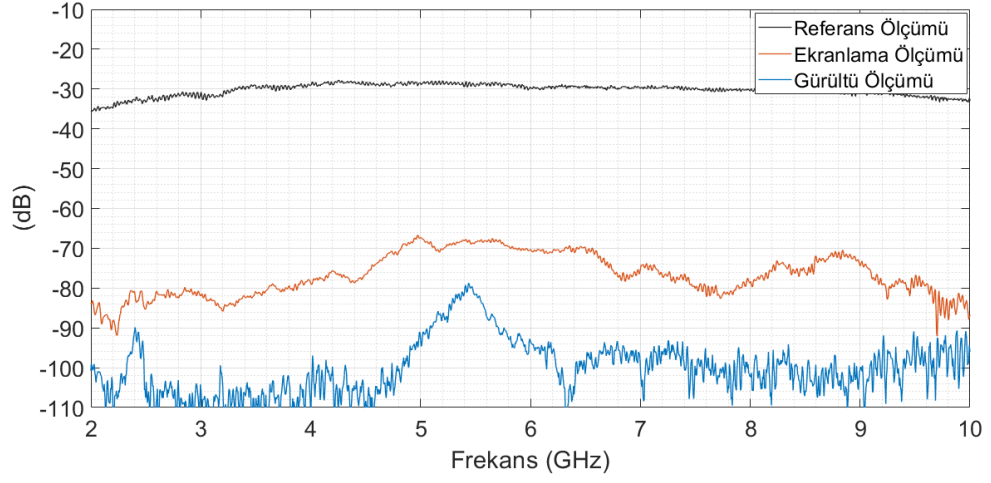
Şekil 5.2 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği ölçümü test düzeneği (oda içi)



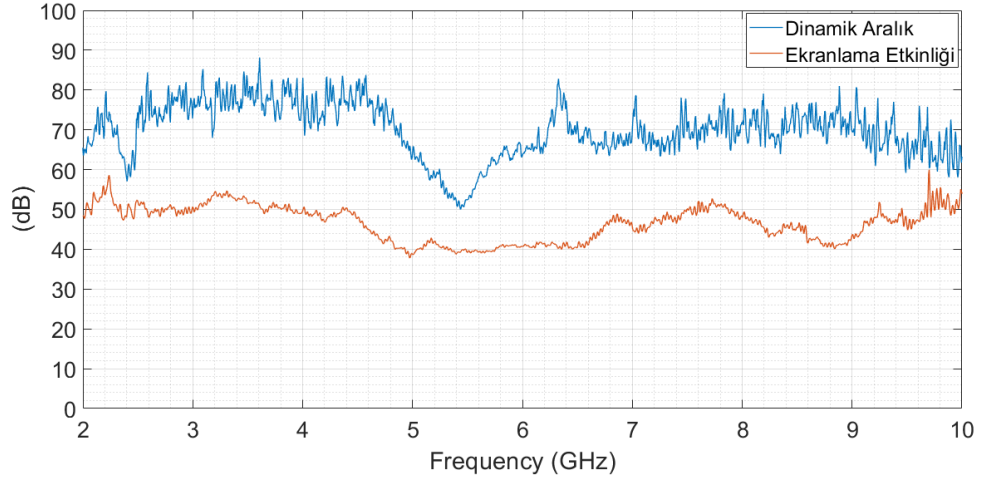
Şekil 5.3 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre ekranlama etkinliği ölçümü test düzeneği (oda dışı)

İletken kumaşın ekranlama etkinliğinin tespit edilmesi için referans, ekranlama ve gürültü ölçümleri 2GHz - 10GHz frekans aralığında yapılmıştır. Referans ölçümünde oda üzerindeki açıklık boş iken ekranlama ölçümünde iletken kumaşla kapatılmıştır. Gürültü ölçümünde ise açıklık alüminyum bir panel ile kapatılmıştır.

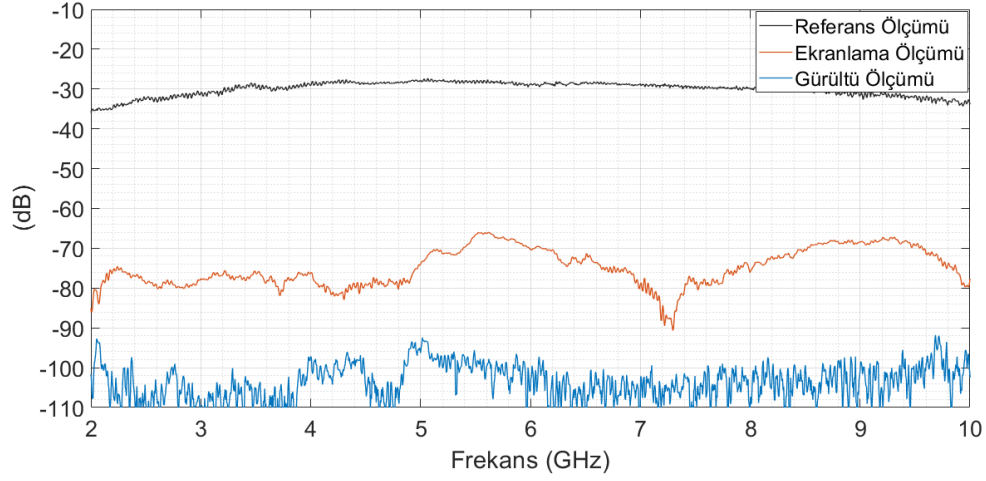
Şekil 5.4'te MIL-DTL-83528G spesifikasyonu kullanılarak antenlerin yatay polarizasyonu için alınan referans, ekranlama ve gürültü ölçüm değerleri gösterilmiştir. İletken kumaşın ekranlama etkinliği ve test sisteminin dinamik aralığı ise Eşitlik 4.4 ve 4.3 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Aynı şekilde antenlerin dikey polarizasyonu için alınan referans, ekranlama ve gürültü ölçüm değerleri Şekil 5.6'da, sistemin dinamik aralığı ve kumaşın ekranlama etkinliği Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



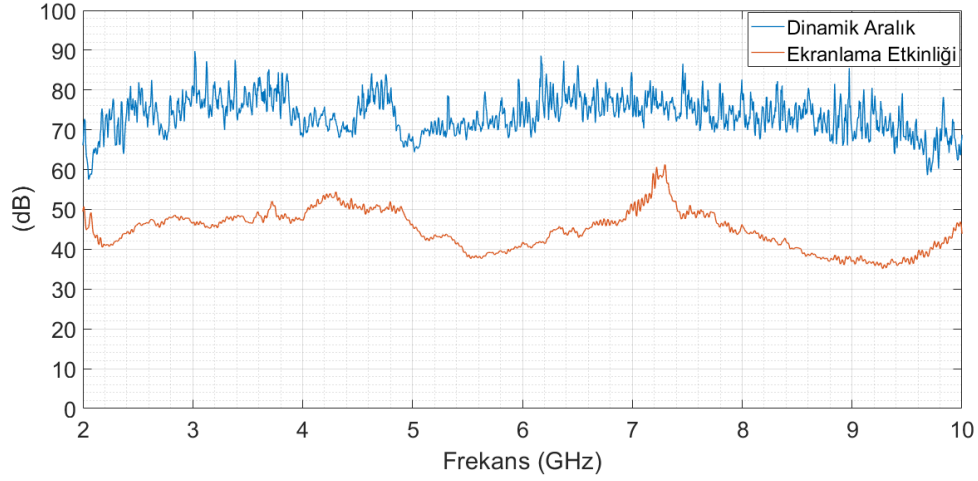
Şekil 5.4 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yatay polarizasyon için referans, ekranlama ve gürültü ölçümü



Şekil 5.5 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yatay polarizasyon için dinamik aralık ve ekranlama etkinliği



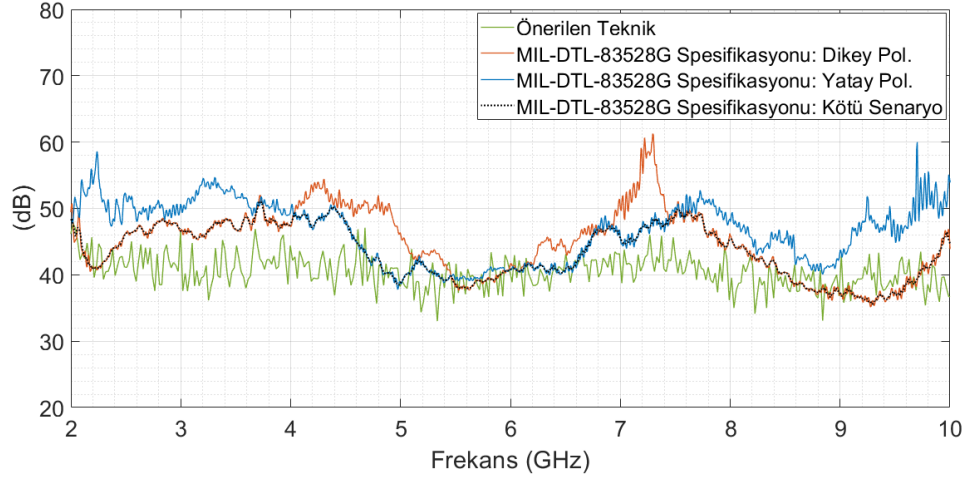
Şekil 5.6 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre dikey polarizasyon için referans, ekranlama ve gürültü ölçümü



Şekil 5.7 MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre dikey polarizasyon için dinamik aralık ve ekranlama etkinliği

Şekil 5.5 ve 5.7 incelendiğinde, iletken kumaşın ekranlama etkinliğinin yaklaşık olarak 35dB ve daha üzeri olduğu ve sistemin dinamik aralığının tüm frekanslarda ekranlama etkinliğini ölçmek için yeterli olduğu görülmektedir.

Son olarak Şekil 5.8'de önerilen teknik ile MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yapılan ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları her iki polarizasyon için de karşılaştırılmıştır. Her frekans için her iki polarizasyondan düşük olanı siyah noktalı olarak işaretlenmiş ve kötü senaryo olarak adlandırılmıştır.



Şekil 5.8 İletken kumaşın ekranlama etkinliği sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 5.8’de gösterilen tüm sonuçlar tutarlıdır ancak kötü senaryo olarak adlandırılan siyah noktalı değerler, önerilen teknik sonuçlarına daha yakındır. Bunun nedeni, EM dalgaların MIL-DTL-83528G test düzeneğinde iletken kumaşa tek polarizasyonda ve tek bir açıda gelirken; önerilen teknikte ise farklı polarizasyonlarda ve farklı açılarda gelmesi olarak düşünülmektedir.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tam yansımali odalarda iletken kumaşların ekranlama etkinliği ölçümleri için metal bir kutu kullanılarak yeni bir ölçüm tekniği önerilmiştir. Öncelikle 100MHz - 1GHz ve 1GHz - 10GHz frekans aralığında tam yansımali odanın elektromanyetik alan homojenliği deneysel olarak incelenmiş olup elde edilen sonuçlar, E_x , E_y , E_z ve E_{xyz} 'nin standart sapmalarının IEC 61000-4-21 standardının gereksinimlerini karşıladığını göstermektedir. Sonrasında hem iletken kumaşın ekranlama etkinliği hem de önerilen tekniğin dinamik aralığı 2GHz - 10GHz frekans bandında elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları, iletken kumaşın 2GHz - 10GHz frekans aralığında yaklaşık olarak 40dB seviyelerinde ekranlama etkinliği sağladığını göstermektedir. Ayrıca, önerilen teknik ile elde edilen sonuçları karşılaştırmak için MIL-DTL-83528G spesifikasyonu dikkate alınmıştır. Bu spesifikasyon kullanılarak alınan ölçümlerde iletken kumaşın yaklaşık olarak 35dB ve üzeri ekranlama etkinliği sağladığı gözlemlenmiştir. Önerilen teknik ve MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yapılan ölçüm değerleri benzer ve birbiriyle uyumludur. Önerilen teknik kullanıldığında elektromanyetik dalgaların geliş açısı ve polarizasyonları her yönde olabileceğinden, iletken kumaşların ekranlama etkinliği ölçümlerinde önerilen tekniğin daha doğru sonuç verebileceği düşünülmektedir. Ayrıca önerilen teknikte elektromanyetik yutucuların kullanılması ile dinamik aralık arttığından çok daha yüksek ekranlamaya sahip kumaşların ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilebilir.

Daha sonraki çalışmalarda, önerilen teknik ile elde edilen sonuçlar; MIL-DTL-83528G spesifikasyonuna göre yapılan ölçümlerde yalnızca dikey ve yatay polarizasyon için değil, antenlerin belli açılar ile döndürölmesiyle elde edilen birçok farklı polarizasyonun sonuçları ile karşılaştırılabilir.

- [1] J. Yin, W. Ma, Z. Gao, X. Lei, C. Jia, "A review of electromagnetic shielding fabric, wave-absorbing fabric and wave-transparent fabric," *Polymers*, vol. 14, no. 3, p. 377, 2022.
- [2] T. Ramachandran, C. Vigneswaran, "Design and development of copper core conductive fabrics for smart textiles," *Journal of industrial textiles*, vol. 39, no. 1, pp. 81–93, 2009.
- [3] M. Krifa, "Electrically conductive textile materials—application in flexible sensors and antennas," *Textiles*, vol. 1, no. 2, pp. 239–257, 2021.
- [4] H. Baskey, T. Shami, R. Kumar, S. Kumar, A. Dixit, N. E. Prasad, "Monolithic composite based on multilayered fabrics for w-band radar absorber," in *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [5] J. Carlsson, K. Karlsson, A. Johansson, "Validation of shielding effectiveness measurement method using nested reverberation chambers by comparison with aperture theory," in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*, IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [6] C. L. Holloway, D. A. Hill, J. Ladbury, G. Koepke, R. Garzia, "Shielding effectiveness measurements of materials using nested reverberation chambers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, no. 2, pp. 350–356, 2003.
- [7] K. W. Jin, T. Y. K. Roland, N. Y. Seng, "Shielding effectiveness measurement conducted in a reverberation chamber and in a gtem cell," in *2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, 2008, pp. 383–386.
- [8] D. Fedeli, M. Iuale, V. M. Primiani, F. Moglie, "Experimental and numerical analysis of a carousel stirrer for reverberation chambers," in *2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, 2012, pp. 228–233.
- [9] J. Clegg, A. C. Marvin, J. F. Dawson, S. J. Porter, "Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 4, pp. 824–832, 2005.
- [10] M. Magdowski, E. Suthau, K. Pasche, R. T. Jacobs, R. Vick, "Field homogeneity and isotropy analysis of a reverberation chamber equipped with a pair of hemispherical diffractors," in *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*, IEEE, 2020, pp. 1–6.

- [11] D. Izzo, A. Rommel, R. Vogt-Ardatjew, F. Leferink, "Validation and use of a vibrating intrinsic reverberation chamber for radiated immunity tests," in 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), IEEE, 2020, pp. 56–60.
- [12] M. Hara, Y. Takahashi, R. Vogt-Ardatjew, F. Leferink, "Validation of vibrating intrinsic reverberation chamber using computational electromagnetics," in 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC), IEEE, 2019, pp. 593–596.
- [13] F. Leferink, J.-C. Boudenot, W. van Etten, "Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber," in IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 00CH37016), IEEE, vol. 2, 2000, pp. 639–644.
- [14] C. R. Paul, Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons, 2006.
- [15] R. B. Schulz, V. Plantz, D. Brush, "Shielding theory and practice," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, no. 3, pp. 187–201, 1988.
- [16] N. A. Omollo, "Shielding effectiveness investigations using a reverberation chamber," Ph.D. dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2019.
- [17] M. Bäckström, O. Lundén, P.-S. Kildal, "Reverberation chambers for emc susceptibility and emission analyses," Proc. Review of Radio Science 1999-2002, pp. 429–452, 2002.
- [18] Q. Xu, Y. Huang, "Anechoic and reverberation chambers: Theory, design, and measurements," 2019.
- [19] A. Manara, "Measurement of material shielding effectiveness using a dual tem cell and vector network analyzer," IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 38, no. 3, pp. 327–333, 1996.
- [20] N. Dvurechenskaya, P. R. Bajurko, R. J. Zieliński, Y. Yashchyshyn, "Measurements of shielding effectiveness of textile materials containing metal by the free-space transmission technique with data processing in the time domain," Metrology and Measurement Systems, no. 2, 2013.
- [21] M. Badic, M.-J. Marinescu, "On the complete theory of coaxial tem cells," in IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 00CH37016), IEEE, vol. 2, 2000, pp. 897–902.
- [22] M. T. Mersin, F. Güneş, E. Demirel, "Design and realization of 3d printed electromagnetic pulse probe," IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, vol. 14, no. 2, pp. 1–4, 2019.
- [23] J. T. Foley, V. Omelianov, S. Koziel, A. Bekasiewicz, "Low-cost antenna positioning system designed with axiomatic design," in MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, vol. 127, 2017, p. 01 015.
- [24] C. L. Holloway, R. R. Delyser, R. F. German, P. McKenna, M. Kanda, "Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 39, no. 1, pp. 33–47, 1997.

- [25] D. A. Hill, *Electromagnetic fields in cavities: deterministic and statistical theories*. John Wiley & Sons, 2009.
- [26] IEC 61000-4-21: *Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-21: Testing and Measurements techniques - Reverberation Chamber methods*, 2003.
- [27] IEEE 299: *IEEE Recommended Practice for Measurement of Shielding Effectiveness of High-Performance Shielding Enclosures*, 2006.
- [28] MIL-DTL-83528G: *Gasketing Material, Conductive, Shielding Gasket, Electronic, Elastomer, EMI/RFI General Specification*, 2017.
- [29] J. A. Andriambeloson, "Reverberation chamber time and frequency metrology for meerkat systems shielding evaluation," Ph.D. dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2014.
- [30] D. Hill, M. Ma, A. Ondrejka, B. Riddle, M. Crawford, R. Johnk, "Aperture excitation of electrically large, lossy cavities," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 3, pp. 169–178, 1994. DOI: 10.1109/15.305461.

Konferans Bildirisi

- [1] H. E. Ozdemir, M. H. Nisanci, F. Ustuner, A. Y. Citkaya, H. Torpi, M. T. Mersin, R. Aba, C. Cosar, “A novel hybrid nested reverberation chamber measurement technique for shielding effectiveness of conductive fabrics,” in 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility–EMC Europe, IEEE, 2022, pp. 201–205.

