

**DÜZLEM MALZEMELERİN EKSPANLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ İÇİN TEM HÜCRE
TASARIMI**

**DESIGN OF A TEM CELL FOR THE MEASUREMENT OF
SHIELDING PROPERTIES OF PLANAR MATERIALS**

SERHAN KAYIK

PROF. DR. BİRSEN SAKA

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2018

**DÜZLEM MALZEMELERİN EKSPANLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ İÇİN TEM HÜCRE
TASARIMI**

**DESIGN OF A TEM CELL FOR THE MEASUREMENT OF
SHIELDING PROPERTIES OF PLANAR MATERIALS**

SERHAN KAYIK

PROF. DR. BİRSEN SAKA

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

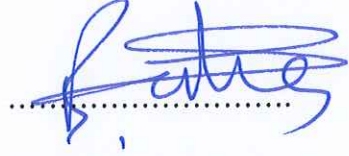
2018

SERHAN KAYIK'ın hazırladığı “Düzlem Malzemelerin Ekranlama Özelliklerinin Ölçümü İçin TEM Hücre Tasarımı” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adnan KÖKSAL
Başkan



Prof. Dr. Birsen SAKA
Danışman



Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN
Üye



Prof. Dr. Erkan AFACAN
Üye



Prof. Dr. Semra İDE
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphaneye bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinizin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

25 / 06 / 2018


(İmza)

Serhan KAYIK

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25./06./2018



SERHAN KAYIK

ÖZET

DÜZLEM MALZEMELERİN EKLANLAMA ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMÜ İÇİN TEM HÜCRE TASARIMI

Serhan KAYIK

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA

Haziran 2018, 81 Sayfa

Ekranlama etkinliği ölçümlerinde kullanılacak yöntem belirlenirken, ekran malzemesinin büyüklüğü ve şekli ile birlikte maliyet, uygulanabilirlik, zaman tüketimi ve malzemenin kullanılacağı frekans aralığı özellikleri dikkate alınmaktadır.

Boş uzay ve ekranlı oda yöntemleri en temel ekranlama etkinliği ölçüm yöntemlerindedir. Ancak, kullanılan yansız test odalarının ve test düzeneği donanımlarının oldukça maliyetli olması nedeniyle yeni yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Bu bağlamda, ekran malzemesinin büyüklüğü ve şekli göz önünde bulundurulduğunda, düzlem malzemelerin küçük boyutlarda numunelerinin alınarak testlerde kullanılabilmesi uygulanabilirlik ve maliyet açısından kazanç sağlamaktadır.

Tüm bu nedenlerden dolayı, düzlem malzemelerin ekranlama etkinliği değerlendirilirken eş eksenli iletim hattı yöntemleri ve ikili TEM hücresi yöntemi gibi daha düşük maliyetli ve yapısal olarak daha basit yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ikili TEM hücresi metodundan farklı olarak, iletim yoluyla ekranlama etkinliği yöntemini benimseyen tek bir TEM hücresinin eş iki parça halinde kullanılması ile ortaya çıkan Ayrık TEM hücresi (TEM-t) metodu üzerinde çalışılmıştır. TEM hücresi yapısal olarak orta noktasından simetrik bir şekilde ikiye ayrılmıştır. Test edilen ekran malzemeleri iletim hattının orta noktasına yerleştirilir. Hem referans hem de

test edilen ekran malzemesi ile birlikte yapılan ölçümler sonucunda ekranlama etkinliği ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma ile, ayrık TEM hücresi üretilmiştir. Bu çalışmanın amacı ise küçük boyutlardaki düzlem malzemelerin ekranlama özelliklerini, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen TEM-t hücreleri ile analiz etmektir.

Anahtar kelimeler: TEM hücresi, TEM-t hücresi, elektromanyetik ekranlama, elektromanyetik ekranlama etkinliği, saçılma parametreleri, düzlem malzemeler, elektromanyetik girişim, elektromanyetik uyumluluk

ABSTRACT

DESIGN OF A TEM CELL FOR THE MEASUREMENT OF SHIELDING PROPERTIES OF PLANAR MATERIALS

Serhan KAYIK

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA

June 2018, 81 Pages

When determining the method to be used in shielding effectiveness measurements, the size and shape of the screen material together with the cost, applicability, time consumption and frequency range characteristics to be used in for the screening material are taken into account.

Free space and shielded box methods are the most basic methods of shielding effectiveness measurement. However, the need for the development of new methods has arisen, as the use of anechoic test chambers and testing equipment is costly.

In this context, considering the size and shape of the screen material, the ability to use the small size samples of the planar materials in the tests provides benefits in terms of applicability and cost.

For all these reasons, lower cost and structurally simpler methods such as the coaxial holder method and the dual TEM cell method have been developed while evaluating the shielding effectiveness of plane materials.

In this study, unlike the dual TEM Cell method, a single TEM Cell was used in two identical parts called the flanged TEM Cell (TEM-t) method. TEM Cell is structurally divided into two symmetrically parts from the midpoint. Test samples are placed at the midpoint of the transmission line. It is aimed to perform shielding effectiveness

measurements as a result of the measurements performed with both the reference and the sample materials.

With this study, a flanged TEM cell was produced. The purpose of this study is to analyze the screening properties of small sized planar materials with TEM-t cells that are designed and manufactured.

Key words: TEM cell, TEM-t cell, electromagnetic shielding, electromagnetic shielding effectiveness, scattering parameters, planar materials, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aőamasında değerli katkı ve eleőtirileriyle yol gösteren, sonsuz sabırla beni her zaman çalıőmaya teővik eden ve gőven veren danışmanım Sayın Prof. Dr. Birsen SAKA'ya, simőlasyon çalıőmalarını gerçekleőtiren değerli arkadaőım Tunç İLGAR'a, test dőzeneęinin oluőturulmasında ve őlőmlerin alınmasında destek olan değerli iş arkadaőlarım Aydın DOğAN'a ve Cihan Barıő TUNCER'e, ASELSAN'daki tőm iş arkadaőlarıma, tez çalıőmamı gerçekleőtirmem için olanak sağlayan ASELSAN'a, her zaman yanımda olan ve hayatımın her aőamasında beni destekleyen sevgili aileme iten teőekkőrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	İ
ABSTRACT	İİİ
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ŞEKİLLER	Vİİİ
ÇİZELGELER.....	Xİİ
1. GİRİŞ	1
1.1. Ekranlama.....	1
1.1.1. Ekranlama Etkinliği.....	1
1.1.2. Ekranlama Etkinliği Ölçme Çalışmaları ve Yöntemler.....	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
2. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ TEORİSİ.....	6
2.1. Yakın Alan ve Uzak Alan.....	7
2.2. Ekranlama Etkinliği.....	9
2.2.1. Uzak Alan Ekranlama Etkinliği	11
2.2.2. Yakın Alan Ekranlama Etkinliği	16
3. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	18
3.1. İletim Yolu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri	18
3.1.1. Dairesel Eş Eksenli İletim Hattı Yöntemleri.....	19
3.1.2. Dikdörtgen Eş Eksenli İletim Hattı Yöntemleri.....	25
3.2. Işıma Yolu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri.....	29
3.2.1. Işıma Yolu İle Ekranlama Etkinliği Deneysel Çalışmaları	32
4. KÜÇÜK BOYUTLARDA TEM HÜCRESİ TASARIMI, HESAPLAMALAR VE ÖLÇÜMLER	37
4.1. TEM Hücresi Tasarımı	37

4.1.1. Tasarım Parametreleri	39
4.1.2. TEM-t Hücresi Tasarımı	43
4.2. Hesaplamalar ve Vektör Ağ Analizörü ile Ölçümler	46
4.3. Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	60
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	69
KAYNAKLAR.....	74
EK-1 GÜMÜŞ KATKILI MALZEMENİN EKSPANLAMA ETKİNLİĞİ RAPORU	77
EK-2 ÇELİK KATKILI MALZEMENİN EKSPANLAMA ETKİNLİĞİ RAPORU	78
EK-3 NİKEL KATKILI MALZEMENİN TEKNİK ÖZELLİK DOKÜMANI	79
EK-4 MONTENA MODEL TEM 1000 İLETİM VE YANSIMA KARAKTERİSTİĞİ ...	80
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1. EMI Problemi	6
Şekil 2.2. Ekran Muhafazasının Kullanım Şekilleri a) Emisyonu Tutan Ekran, b) Emisyondan Koruyan Ekran.....	6
Şekil 2.3. Elektromanyetik Girişim Kaynağına Olan Uzaklık ile Dalga Empedansının Değişimi [24].....	8
Şekil 2.4 İletken Bir Ekran Malzemesinin Ekranlama Etkinliğinin, Yüzeye Dik Gelen Düzlem Dalga Bileşenleri İle Gösterimi [2].....	10
Şekil 3.1 Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [4]	19
Şekil 3.2 Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzenegi.....	20
Şekil 3.3 İdeal Bir Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu Devre Modeli	21
Şekil 3.4 Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [7]	22
Şekil 3.5 Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu Kesit Alanı.....	23
Şekil 3.6 Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzenegi.....	23
Şekil 3.7 İdeal Bir Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu Devre Modeli [4].....	24
Şekil 3.8 TEM-t Hücresi [22].....	26
Şekil 3.9 TEM-t Hücresi Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzenegi	26
Şekil 3.10 TEM-t Hücresi Devre Modeli [32].....	27
Şekil 3.11 İkili TEM Hücresi Yanal Görünümü [10].....	28
Şekil 3.12 Ekranlı Oda Yöntemi Ekranlama Etkinliği Ölçümü Düzenegi [24]	30
Şekil 3.13 Boş Uzay Yöntemi Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzenegi.....	31
Şekil 3.14 Çelik (sol taraf) ve Gümüş (sağ taraf) Katkılı Kumaş Malzemeler	33
Şekil 3.15 Test Düzenegi.....	33
Şekil 3.16 Ekranlı Oda Yöntemi İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzenegi.....	34
Şekil 3.17 Çelik Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	35

Şekil 3.18 Gümüş Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.1 Üretilen TEM Hücresi	37
Şekil 4.2 TEM Hücresi Üstten Görünümü	38
Şekil 4.3 TEM Hücresi Kesit Alanı.....	38
Şekil 4.4 TEM Hücresi Kesit Alanı - Elektrik Ve Manyetik Alan Yönelimi [28].....	42
Şekil 4.5 TEM Hücresi Kesit Alanı - Elektrik Alan Dağılımı [21].....	43
Şekil 4.6 Boş ve Ekran Malzemesi Yüklü TEM-t Hücresi [31].....	44
Şekil 4.7 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi.....	49
Şekil 4.8 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresinin Üstten Görünümü	50
Şekil 4.9 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S ₁₁ ...	50
Şekil 4.10 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S ₂₂ .	51
Şekil 4.11 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S ₂₁ .	51
Şekil 4.12 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S ₁₂ .	51
Şekil 4.13 Ekran Malzemesi İle Yüklü TEM-t Hücresi	52
Şekil 4.14 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Gümüş Katkılı Kumaş Malzeme	52
Şekil 4.15 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Çelik Katkılı Kumaş Malzeme	53
Şekil 4.16 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Alüminyum Folyo	53
Şekil 4.17 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Nikel Katkılı Kumaş Malzeme	53
Şekil 4.18 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi	54
Şekil 4.19 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi, S ₁₁ ...	54
Şekil 4.20 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi, S ₂₁ ...	55
Şekil 4.21 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi	56
Şekil 4.22 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi, S ₁₁	56

Şekil 4.23 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Odası, S_{21}	57
Şekil 4.24 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Odası	57
Şekil 4.25 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S_{11}	58
Şekil 4.26 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S_{21}	58
Şekil 4.27 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi	59
Şekil 4.28 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği($\theta=30^0$) - Gümüş Katkılı Kumaş Malzeme	59
Şekil 4.29 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=30^0$) - Çelik Katkılı Kumaş Malzeme	60
Şekil 4.30 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=30^0$) - Alüminyum Folyo	60
Şekil 4.31 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=30^0$) - Nikel Katkılı Kumaş Malzeme	60
Şekil 4.32 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=45^0$) – S_{11}	61
Şekil 4.33 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=45^0$) – S_{21}	61
Şekil 4.34 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=45^0$) – S_{11}	62
Şekil 4.35 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=45^0$) – S_{21}	62
Şekil 4.36 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=30^0$) – S_{11}	62
Şekil 4.37 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=30^0$) – S_{21}	63
Şekil 4.38 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=30^0$) – S_{11}	63
Şekil 4.39 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=30^0$) – S_{21}	63
Şekil 4.40 Çelik Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	64
Şekil 4.41 Gümüş Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	65
Şekil 4.42 Nikel Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	66
Şekil 4.43 Alüminyum Folyonun Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	66

Şekil 4.44 Montena Model TEM 1000 Hücresi [29].....	67
Şekil 4.45 TEM 1000, S_{11}	67
Şekil 4.46 TEM 1000, S_{21}	68

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 IEEE Std-299 Ölçüm Yöntemleri ve Frekans Aralıkları.....	31
Çizelge 3.2 Anten Mesafeleri	34
Çizelge 4.1 Kesim Frekansına Karşılık Kare Kesit Alanlı TEM Hücresi Boyutları [8]	46
Çizelge 4.2 Kesim Frekansına Karşılık Dikdörtgen Kesit Alanlı TEM Hücresi Boyutları [8]	46
Çizelge 4.3 Üretilen Kare Kesit Alanlı TEM-t Hücresi Özellikleri	48
Çizelge 4.4 Kullanılan Malzeme Çeşitleri.....	49
Çizelge 4.5 Üretilen Dikdörtgen Kesit Alanlı TEM-t Hücresi Özellikleri.....	55

1. GİRİŞ

Son dönemde radyo iletişimi ve elektronik alanında hızla gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan elektromanyetik çevre, elektromanyetik uyum problemlerini beraberinde getirmektedir. Elektromanyetik çevre, çalıştıklarında elektromanyetik enerji yayan radyo ve TV yayın istasyonları, radar ve seyrüsefer donanımları gibi çeşitli aygıtlardan oluşur. Her elektronik aygıt elektromanyetik alan kaynağı olduğu gibi elektromanyetik girişime karşı duyarlıdır. Elektromanyetik girişim (EMG), elektromanyetik çevreyi oluşturan alanlar, istenmeyen voltajlar veya akımlar nedeni ile bir cihazın performansını etkileyen bir problemdir. Elektromanyetik uyumluluk (EMU) ise bu problemin çözümüdür [1]. Bir sistemin veya cihazın elektromanyetik uyumlu olabilmesi için; kendi içinde girişime neden olmaması, diğer cihazlarda veya sistemlerde girişime neden olmaması ve diğer cihazlardan veya sistemlerden gelen yayınlara karşı duyarlı olmaması gerekmektedir [2]. Bu doğrultuda, elektromanyetik uyumluluğu sağlayabilmek adına çeşitli çalışmalar yapılmaktadır ve bu çalışmaların etkinliğini değerlendirebilmek için farklı ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir.

1.1. Ekranlama

Elektromanyetik çevre ile olan elektromanyetik uyumun sağlanmasına yönelik yöntemlerden bir tanesi “ekranlama” yöntemidir. Ekranlama, elektronik donanımları, sistemleri veya canlıları elektromanyetik çevreden izole ederek elektromanyetik girişime karşı koruyan ve elektromanyetik uyumluluğun sağlanmasına yardımcı olan oldukça popüler bir yöntemdir. Bir diğer ifade ile, elektromanyetik girişim kaynağı ile izole edilmek istenilen ortam arasına iletken bir engel yerleştirilerek, elektromanyetik kaynağın etkisi azaltılabilir. Elektromanyetik ekranlama, yakın alan ekranlama bölgesi ve uzak alan ekranlama bölgesi olmak üzere iki bölgeden oluşur. Elektromanyetik düzlem dalga teorisi genellikle uzak alanda elektromanyetik ekranlama için uygulanır [3].

1.1.1. Ekranlama Etkinliği

Elektromanyetik girişime neden olan alanlar, girişim kaynağının türüne ve bulunduğu bölgeye bağlıdır. Elektromanyetik bağışıklık gereksinimleri genellikle iletişim hatları, radyo vericileri ve yıldırım gibi uzak alan kaynaklarının neden olduğu elektromanyetik girişimleri kapsamaktadır. Dolayısıyla, girişim kaynağı olan alanlar düzlem dalgalar olup uzak alan ekranlama etkinliği verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elektromanyetik yayılım problemleri ise genellikle, ekranlama malzemesine yakın iç kaynaklı problemlerdir. Yakın alan ölçümlerinde hem yüksek empedans hem de düşük empedans dalgaları dikkate

alınmaktadır [4]. Ekranlama etkinliği, ekran üzerine gelen elektrik veya manyetik alan büyüklüğünün, ekrandan geçen elektrik veya manyetik alan büyüklüğüne oranı olarak adlandırılır [2]. Bir diğer ifade ile ekranlama etkinliği, elektromanyetik girişim kaynağı ile izole edilmek istenen ortam arasında ekranlama malzemesi var iken ölçülen alan şiddetinin, yok iken ölçülen alan şiddetine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda çeşitli ekranlama etkinliği ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir.

1.1.2. Ekranlama Etkinliği Ölçme Çalışmaları ve Yöntemler

Ekranlama etkinliği ölçme yöntemleri, “İletim Yolu ile Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri” ve “Işıma Yolu ile Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri” olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. 1956 yılında ışımaya yoluyla yayılımı metodu kullanılarak MIL-STD-285 standardı yayınlanmıştır [5]. Daha sonra bu standart 1997 yılında yerini IEEE STD-299 standardına bırakmıştır [6]. Işıma yolu ile ekranlama etkinliği yöntemleri, ekranlı oda ve boş uzay ekranlama tekniklerini kapsamaktadır. Bu yöntemler, sinyal kaynağına, alıcı ve yayıcı antenlere, ölçüm almaçlarına, ekranlı kutuya ve yansımaz test odasına gereksinim duymaktadır. Ekranlı oda yönteminde, iç bölgesini dış bölgeden izole eden yeterli büyüklükte bir oda kullanılmaktadır. Bu oda üzerinde ekran malzemesinin yerleştirildiği bir açıklık bulunmaktadır. Yayıcı anten ve sinyal kaynağı ekranlı odanın içerisine yerleştirilirken ölçüm almaç ve alıcı anten ekranlı odanın dışında yer almaktadır. Boş uzay yönteminde ise alıcı ve yayıcı antenler arasına bir ekran malzemesi yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilir. Antenler ve ekran malzemesi yansımaz test odasının içerisine yerleştirilirken ölçüm almaç ve sinyal kaynağı test odasının dışında yer almaktadır. Yakın alan ve uzak alan dinamiklerine bağlı olarak ilgili frekans aralıklarında manyetik, elektrik ve düzlem dalga ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmektedir.

Küçük ve orta boyutlardaki malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümleri özelinde tasarım uygunluğu, kullanım kolaylığı ve maliyet odaklılık göz önünde bulundurularak iletim yolu ile yayılım prensibine dayanan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin avantajları ve sınırlamaları, frekans aralığı, tekrarlanabilirlik, dinamik aralık, test edilecek ekran örneği hazırlama ve ölçüm için gerekli süre ile büyük ölçüde ilişkilidir [7].

1974 yılında Prof. Myron L. Crawford, iletim yolu ile uzak alan ekranlama etkinliği ölçümünü benimseyen yeni bir teknik olarak eş dağılımlı elektromanyetik alanları ekranlı bir ortamda tanımlamıştır. Bu yöntemde enine elektromanyetik dalgalar, minimum duran dalga oranını sağlamak amacı ile kullanılan 50 ohm empedans uyumlu hatta iletilmektedir. TEM hücresi, standart eş eksenli konektörlere uyum sağlamak üzere iki uca doğru sivrilen

dikdörtgen eş eksenli iletim hattından meydana gelir [7]. TEM hücresi ile ekranlama etkinliği ölçümlerinin yanı sıra elektromanyetik uyumluluk testi ve elektrik alan ölçüm probu kalibrasyonu da gerçekleştirilebilmektedir. TEM hücresi ile ekranlama etkinliği ölçüm tekniklerinden bir tanesi ikili TEM hücresi yöntemidir. İkili TEM hücresi yapısal olarak birbirine bir açıklık ile bağlantı sağlayan iki adet TEM hücresinden meydana gelmektedir [9]. Bir sinyal girişine karşılık iki sinyal çıkışı bulunmaktadır. Aradaki açıklık, sinyal gücünü sürücü TEM hücresinden alıcı TEM hücresindeki sinyal çıkışlarına doğru asimetrik olarak iletir. Bu özellik, normal elektrik ve teğet manyetik alan bileşenlerinin ayrı ayrı olarak incelenmesini sağlar. Böylece ikili TEM hücresi ile aynı anda hem düşük hem yüksek empedans yakın alan ekranlama etkinliği ölçümü gerçekleştirilmektedir [10].

1983 yılında, dairesel eş eksenli iletim hattında iletim yolu ile yayılımı metodu ile düzlemsel malzemelerin, elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümlerinde kullanılan standart test yöntemlerini içeren ASTM ES7-83 standardı yayınlanmıştır [11]. Daha sonra bu standart 1989 yılında yerini ASTM D4935 standardına bırakmıştır. ASTM D4935 standardında 1999 yılında çeşitli düzenlemeler yapılmıştır ve en son 2010 yılında güncellenerek ASTM D4935-10 adı ile yayınlanmıştır [12]. ASTM ES7-83 standardına göre test edilen ekran malzemesi 50 Ω 'luk iletim hattından meydana gelen sürekli iletken bir dairesel eş eksenli tutucu içine yerleştirilir. ASTM D4935 standardında ise test edilen ekran malzemesi 50 Ω 'luk iletim hattından meydana gelen kesintili bir iletken yapıya sahip dairesel eş eksenli tutucu içine yerleştirilir. ASTM D4935 standardında kullanılan ayrık iletken yapı, temas problemini önlemek ve tekrarlanabilirlik sağlamak açısından tercih edilmiştir [7]. Öncelikle, test edilen ekran malzemesi ile yalnızca iç ve dış iletkenlerin kaplandığı şekilde referans ölçüm alınır. Daha sonra, kesit alanı tamamen malzeme ile kaplanarak ölçüm alınır ve iki ölçüm arasındaki fark hesaplanarak ekranlama etkinliği ölçümü tamamlanır. Ölçümler bir sinyal kaynağı ve bir ölçüm alması ile veya bir vektör ağ analizörü ile gerçekleştirilir.

ASTM ES7-83 ve ASTM D4935 standartlarında belirtilen yöntemler, dairesel eş eksenli iletim hattının yanı sıra TEM hücresi gibi dikdörtgen eş eksenli iletim hattı yapısında da uygulanabilir. TEM hücresi, ASTM ES7-83 yönteminde sürekli bir eş eksenli iletim hattına sahiptir. Test edilecek ekran malzemeleri iç ve dış iletken ile iyi temas edebilmesi için özenle hazırlanmalıdır. Aksi takdirde, bu temas empedansının etkisi ekranlama etkinliği ölçümlerinde baskın bir rol oynayarak yanılığa neden olabilir [10]. ASTM D4935 yönteminde ise, TEM hücresi iki eşit parçadan oluşan kesintili bir dikdörtgen eş

eksenli iletim hattına sahiptir. Bu yapı TEM-t hücresi olarak adlandırılmaktadır. Her iki parça da bir tane düz iç iletken ve uçlara doğru sivrilerle konnektörlerde birleşen ve kapasitif girişimi sağlamak için yeterli büyüklükte bağlantı yüzeyinden oluşan iki tane dış iletken meydana gelmektedir. Test edilen ekran malzemesi, dış iletkenlerin bağlantı yüzeylerini birbirlerine temas etmeyecek şekilde tamamen kapatmalıdır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, hesaplanan kesim frekansına ve fiziksel değişkenlere uygun TEM-t hücrelerini mekanik olarak üretmek ve TEM-t hücresinde çeşitli düzlem malzemelerin ekranlama etkinlikleri ölçümlerini gerçekleştirmektir.

Bu çalışmada, 2 GHz kesim frekansında ve bu frekansın sınırlandırdığı boyutlarda açık TEM ve TEM-t hücreleri mekanik olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen TEM ve TEM-t hücrelerinin S parametreleri vektör ağ analizörü yardımı ile ölçülerek CST simülasyon programında oluşturulan TEM hücrelerinin S parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra, üretilen TEM-t hücreleri ile çeşitli ekran malzemelerinin ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ekranlama etkinliği sonuçları üretici verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca TEM-t hücresi ile ekranlama etkinliği ölçümlerinde kullanılan çelik ve gümüş katkılı düzlem malzemelerin, IEEE-STD 299 standardı referans alınarak ekranlı oda yöntemi ile de ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin ikinci bölümünde, ekranlama etkinliği teorisi detaylı olarak anlatılmıştır. Ekranlama etkinliği formülleri üzerinde durularak matematiksel hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Ekranlama etkinliği, hem uzak alan hem de yakın alan yaklaşımı ile detaylandırılmıştır.

Bu tezin üçüncü bölümünde, ekranlama etkinliği ölçüm yöntemleri anlatılmıştır. Ekranlama etkinliği ölçme yöntemleri, “İletim Yolu ile Ekranlama Etkinliği Yöntemleri” ve “Işıma Yolu ile Ekranlama Etkinliği Yöntemleri” olmak üzere iki başlık altında verilmiştir.

Bu tezin dördüncü bölümünde, küçük boyutlu TEM hücresi tasarımı anlatılmıştır. Öncelikle, üçüncü bölümde anlatılan TEM hücresi tasarımı detaylı anlatılmıştır. Daha sonra, kesim frekansı ve hat empedansına bağlı olarak yapılan hesaplamalara, 2 GHz kesim frekansına sahip farklı TEM ve TEM-t hücrelerine ve vektör ağ analizörü ile yapılan ölçüm sonuçlarına yer verilmiştir. Son olarak alınan ölçümler birlikte incelenip ekranlama etkinliği ve S parametreleri ölçüm sonuçları analiz edilmiştir.

“Sonuçlar ve Tartışma” başlığı altında çalışma ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır ve sonraki çalışmalarda yapılabilecek iyileştirmeler tartışılmıştır.

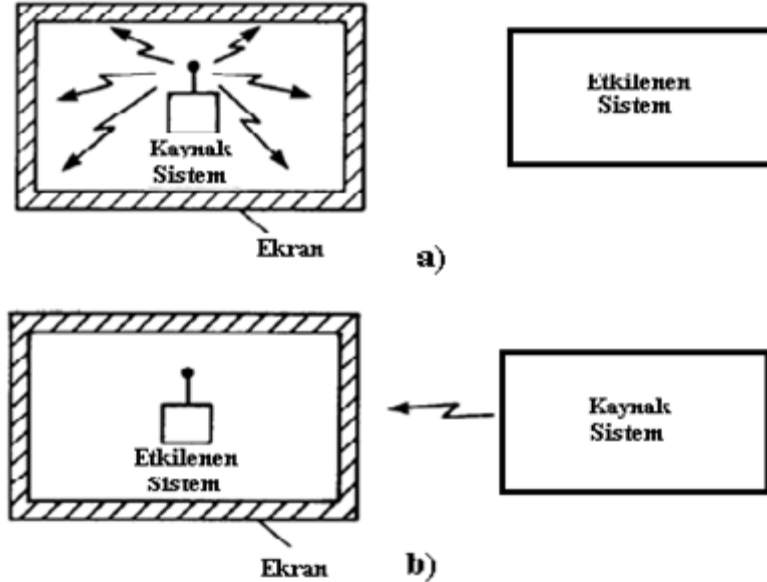
2. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ TEORİSİ

Elektromanyetik girişim problemi Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kaynak sistem, girişim yolu ve etkilenen sistem olmak üzere üç ana unsur ile tanımlanır. Ekranlama yöntemi ile girişim yolunun ortadan kaldırılması veya etkisinin azaltılması amaçlanmaktadır.



Şekil 2.1. EMI Problemi

Ekran terimi genellikle, bir elektronik sistemi veya bu sistemin bir parçası olan bir cihazı tamamen çevreleyen metal yapı bir muhafaza anlamına gelmektedir. Ekranlamanın iki temel amacı vardır. Birincisi, sistemin bir kısım veya bütün elektronik bileşenlerinden dışarıya emisyon yayılmasını engellemektir. Böylece sistemin, yayılan emisyon sınırlarına uyarak diğer elektronik sistem veya cihazlarla etkileşime girmesinin engellenmesi amaçlanmaktadır. İkincisi ise, sistemin dışarısında bulunan çevreden kaynaklanan ve sistemin veya bu sistemin parçası olan bir cihazın elektronik bileşenlerine girişimde bulunarak çalışmasını etkileyen emisyon yayılmasını engellemektir. Her iki durum Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Ekran Muhafazasının Kullanım Şekilleri a) Emisyonu Tutan Ekran, b) Emisyondan Koruyan Ekran

Bir diğerk ifade ile, elektromanyetik girişim kaynağı ile izole edilmek istenilen ortam arasına iletken bir engel yerleştirilerek, elektromanyetik kaynağın etkisi azaltılabilir. Böylece ekran, elektromanyetik alanın iletilmesine bir engel olarak adlandırılır.

2.1. Yakın Alan ve Uzak Alan

Bir elektromanyetik dalganın karakteristiğı;

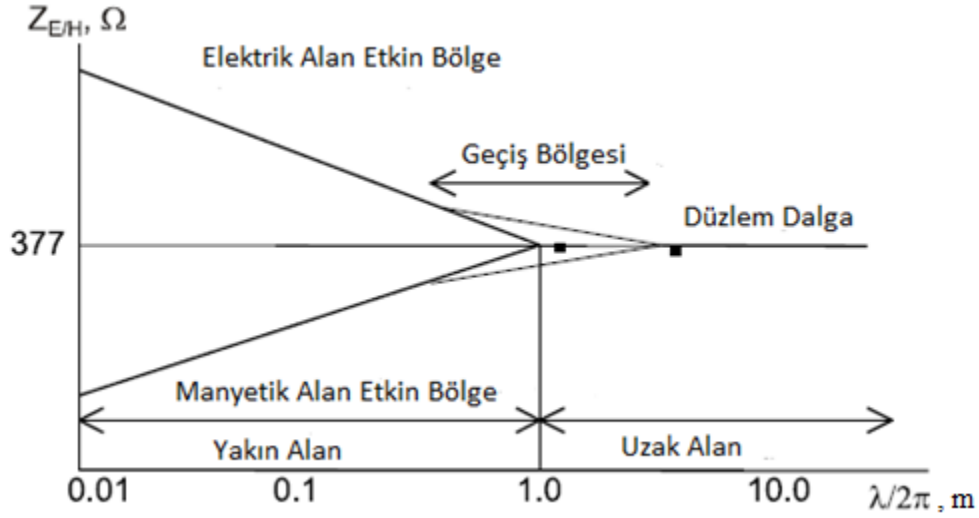
- Kaynağın cinsine,
- Kaynağın bulunduğu ve elektromanyetik dalganın ilerlediğı ortama,
- Ölçüm noktasının kaynağına olan uzaklığına

bağlıdır. Kaynağına yakın bölgelerde elektromanyetik alan karakteristiğı daha çok kaynağın cinsine bağlıdır. Kaynağına uzak bölgelerde ise, elektromanyetik alan karakteristiğı içinde ilerlediğı ortamın karakteristiğı ile ilişkilidir. Bu nedenle, kaynağı çevreleyen ortam yakın alan bölgesi ve uzak alan bölgesi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [14]. Şekil 2.3'te elektromanyetik girişim kaynağına olan uzaklığın bir fonksiyonu olarak dalga empedansı değışimi grafiğı gösterilmektedir. Burada kaynağın bir elektrik dipol anten olduğunu ve kaynağına olan gözlem mesafesinin r olduğunu varsayarsak, anten dalga denklemlerinden gelen $1/r^2$ ve $1/r^3$ ile bağlantılı terimler kaynağına yakın bölgelerde etkin olur. Ancak, kaynağına yeterince uzak olan bölgelerde $1/r$ ile bağlantılı terimler baskın olduğu için $1/r^2$ ve $1/r^3$ ile bağlantılı olan terimler ihmal edilebilir. Bu terimlerin ihmal edilebilir olduğu nokta uzak alan ve yakın alan bölgeleri arasındaki geçiş noktası olarak kabul edilir.

Bu durum, $1/(\beta r)^2 = 1/\beta r$ olduğunda gerçekleşir. Burada faz sabiti $\beta = 2\pi/\lambda$ 'dır. Bu iki formülü birleştirdiğimizde yakın alan ile uzak alan arasındaki geçiş,

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \cong \frac{\lambda}{6} \quad (2.1)$$

olarak kabul edilir. Bu formül, elektromanyetik girişim kaynağının bir elektrik dipol anten olduğu durumlarda geçerlidir. Bu formül, yakın alandan uzak alana geçişin başladığını ifade etmek adına genel bir ifade olarak kabul görmektedir. Tel tipi antenler için $r = 3\lambda$ ve parabolik veya boynuz antenler için $r = 2D^2/\lambda$ formülleri kullanılmaktadır. Burada D antenin sahip olduğu en büyük uzunluktur [2].



Şekil 2.3. Elektromanyetik Girişim Kaynağına Olan Uzaklık ile Dalga Empedansının Değişimi [24]

Herhangi bir elektromanyetik dalganın elektrik alan enine bileşeninin büyüklüğünün manyetik alan enine bileşenine büyüklüğüne oranı, örneğin r yönünde yayılan ve θ yönünde elektrik alanı, ϕ yönünde manyetik alanı olan bir dalga için

$$Z_w = E_\theta / H_\phi \quad (2.2)$$

dalga empedansı olarak tanımlanmaktadır. Düzlem dalganın kayıplı bir ortamda yayılması durumunda dalga empedansı,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Burada μ ortamın manyetik geçirgenliği, ϵ ortamın elektrik geçirgenliği ve σ ortamın iletkenliği olarak adlandırılır. Uzak alan yaklaşımında elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine diktir ve dalganın ilerleme yönüne paraleldir. Bu bileşenler, dalga empedansının ortamın öz empedansına eşit olduğu enine elektromanyetik (TEM) dalga formu oluştururlar. Yalıtkan ortamlar için ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) dalga empedansı frekandan bağımsız olur ve $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ olarak ifade edilir. Boş uzayın ve havanın öz empedansı $Z_0 = 377 \Omega$ 'a eşittir. İletken ortamlar için ($\sigma \gg j\omega\epsilon$) dalga empedansı ekran empedansı olarak adlandırılır ve ekran empedansı Z_s ,

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (2.4)$$

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \quad (2.5)$$

olarak da ifade edilir. Herhangi bir iletken için ekran empedansı,

$$|Z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f} \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir. μ_r , bağıl manyetik geçirgenlik ve σ_r ise bağıl iletkenlik olarak adlandırılır [15].

Yakın alan bölgesinde ise dalga empedansı elektromanyetik girişim kaynağının karakteristiğine ve bu kaynağın gözlem noktasına olan mesafesine bağlıdır. Yüksek akım ve düşük voltaj kaynağı var ise manyetik alan etkindir ve dalga empedansı $Z_0 < 377 \Omega$ olur. Yüksek voltaj ve düşük akım kaynağı var ise elektrik alan etkindir ve dalga empedansı $Z_0 > 377 \Omega$ olarak ifade edilir [14].

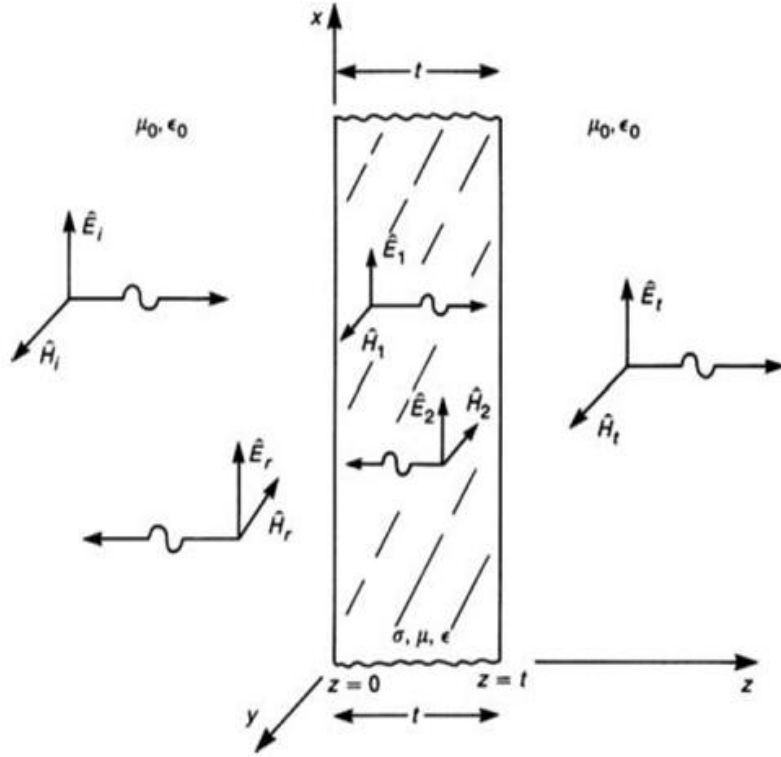
Çubuk veya düz tel antenlerde kaynak empedansları yüksektir ve elektrik alan etkin olan yakın alanda dalga empedansları da büyüktür. Kaynağa olan mesafe arttıkça, elektrik alan tamamlayıcı bir manyetik alan oluşturduğundan yoğunluğunun bir kısmını kaybeder. Yakın alandan uzaklaştıkça elektrik alan $1/r^3$ ile orantılı azalırken manyetik alan ise $1/r^2$ ile orantılı olarak azalır. Böylece, düz tel antenlerin dalga empedansları mesafe arttıkça azalır ve asimptotik olarak boş uzayın öz empedansına ulaşır.

Halka anten tarafından üretilen manyetik alan etkin bölgelerde yakın alan dalga empedansı küçüktür. Yakın alandan uzaklaştıkça manyetik alan $1/r^3$ ile orantılı azalırken elektrik alan ise $1/r^2$ ile orantılı olarak azalır. Dalga empedansı mesafe arttıkça artar ve $\lambda/2\pi$ mesafesinde boş uzayın öz empedansına ulaşır. Uzak alanda, hem elektrik hem de manyetik alan bileşenleri $1/r$ oranında azalır [15].

2.2. Ekranlama Etkinliği

Ekranlama teorisi Maxwell denklemlerini temel alır. Ekranlamamın bir ölçüsü olarak Ekranlama Etkinliği kullanılmaktadır. Ekranlama etkinliği, ekran üzerine gelen elektrik veya manyetik alan büyüklüğünün, ekrandan geçip diğer bölgeye ulaşan elektrik veya manyetik alan büyüklüğüne oranı olarak adlandırılır [2]. Bir diğer ifade ile ekranlama etkinliği, elektromanyetik girişim kaynağı ile izole edilmek istenen ortam arasında ekranlama malzemesi yok iken ölçülen alan şiddetinin var iken ölçülen alan şiddetine oranı olarak tanımlanmaktadır. Ekranlama etkinliğinin ideal ve çok büyük değerlerini gerçekleştirebilmek için, ekranın ürünü tamamen kaplaması ve delikler, çatlaklar, yuvalar veya kablolar gibi hiçbir geçişe sahip olmaması gerekir. Bir ekrandaki herhangi bir girişim, düzgün bir şekilde ele alınmadığı takdirde ekranın etkinliğini önemli ölçüde azaltabilir.

Şekil 2.4'te kalınlığı t , iletkenliği σ , bağıl elektriksel geçirgenliği ϵ_r , ve bağıl manyetiksel geçirgenliği μ_r olan iletken bir ekrana dik gelen düzlem dalganın yansıyan ve iletilen bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4 İletken Bir Ekran Malzemesinin Ekranlama Etkinliğinin, Yüzeyle Dik Gelen Düzlem Dalga Bileşenleri İle Gösterimi [2]

Bu durumda elektrik alan için ekranlama etkinliği,

$$SE_{dB}^E = 20 \log \left| \frac{\hat{E}_i}{\hat{E}_t} \right| \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir. Burada ekranlama etkinliği, gelen dalganın iletilen dalgaya oranı olarak ifade edildiği için pozitif bir değerde olması beklenmektedir. Manyetik alan ekranlama etkinliği ise,

$$SE_{dB}^H = 20 \log \left| \frac{\hat{H}_i}{\hat{H}_t} \right| \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir. Eğer gelen dalga düzlem dalga ise ve ekranın her iki tarafındaki ortam özdeş ise, elektrik ve manyetik alan için tanımlanan formüller birbirlerine eşittir. Bu durumda elektrik ve manyetik alan bileşenleri uzak alan dalga empedansı ile ilişkilendirilir. Yakın alan yaklaşımında veya ekranın her iki tarafındaki ortamların farklı olduğu durumda her iki eşitlik birbirine benzer değildir. Bu durumda, eşitlik (2.7)'deki elektrik alan ekranlama etkinliği ifadesi temel formül olarak kabul edilir.

Frekans, ekranın şekli, ekranlama etkinliğinin ölçüldüğü nokta, elektromanyetik dalganın çeşiti ve gelen dalganın yönü ve polarizasyonu ekranlama etkinliğini etkileyen faktörlerdir.

2.2.1. Uzak Alan Ekranlama Etkinliği

Şekil 2.4'teki elektromanyetik çevrede yeteri kadar uzak mesafedeki bir elektromanyetik girişim kaynağından $+z$ yönünde yayılan bir düzlem elektromanyetik dalga gösterilmektedir. Bu düzlem dalga, kalınlığı t , iletkenliği σ , bağıl elektriksel geçirgenliği ϵ_r , ve bağıl manyetiksel geçirgenliği μ_r olan iyi iletken bir ekrana geldikten sonra çeşitli yansımalara ve soğrulmaya uğrayarak iletimine devam etmektedir. Ekran malzemesinin her iki tarafının boş uzay olduğu varsayılmaktadır. Gelen, yansıyan ve iletilen dalgaların ifadeleri aşağıdaki eşitliklerde belirtildiği gibidir.

$$\bar{E}_i = E_i e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_x \quad , \quad \bar{H}_i = \frac{E_i}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_y \quad (2.9)$$

$$\bar{E}_r = E_r e^{j\beta_0 z} \hat{a}_x \quad , \quad \bar{H}_r = -\frac{E_r}{\eta_0} e^{j\beta_0 z} \hat{a}_y \quad (2.10)$$

$$\bar{E}_1 = E_1 e^{-\gamma z} \hat{a}_x \quad , \quad \bar{H}_1 = \frac{E_1}{\hat{\eta}} e^{-\gamma z} \hat{a}_y \quad (2.11)$$

$$\bar{E}_2 = E_2 e^{\gamma z} \hat{a}_x \quad , \quad \bar{H}_2 = -\frac{E_2}{\hat{\eta}} e^{\gamma z} \hat{a}_y \quad (2.12)$$

$$\bar{E}_t = E_t e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_x \quad , \quad \bar{H}_t = \frac{E_t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 z} \hat{a}_y \quad (2.13)$$

Burada γ yayılım sabiti ve η ortamın karakteristik empedansdır.

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2.14)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} = \eta_0 e^{j\theta} \quad (2.15)$$

Burada α sönümlenme sabiti ve β faz sabitidir. Boş uzay koşullarında ($\sigma = 0, \alpha = 0$) yayılım sabiti,

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} = j\beta \quad (2.16)$$

eşitliğine dönüşür. Faz sabiti ve ortamın öz empedansı,

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \quad (2.17)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.18)$$

olarak ifade edilir. Ekranı gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeninin genliği olan \bar{E}_i 'nin bilindiği varsayıldığında, diğer alan bileşenlerinin genlikleri $z=0$ ve $z=t$ konumlarındaki sınır koşulları denklemlerinden çıkarılabilir. Her iki konumda elektrik ve manyetik alanların teğet bileşenlerinin sürekliliği denklemleri oluşturmamıza yardımcı olur [2].

$$\bar{E}_i|_{z=0} + \bar{E}_r|_{z=0} = \bar{E}_1|_{z=0} + \bar{E}_2|_{z=0} \quad (2.19)$$

$$\bar{E}_1|_{z=t} + \bar{E}_2|_{z=t} = \bar{E}_t|_{z=t} \quad (2.20)$$

$$\bar{H}_i|_{z=0} + \bar{H}_r|_{z=0} = \bar{H}_1|_{z=0} + \bar{H}_2|_{z=0} \quad (2.21)$$

$$\bar{H}_1|_{z=t} + \bar{H}_2|_{z=t} = \bar{H}_t|_{z=t} \quad (2.22)$$

(2.9) - (2.13) arasındaki denklemleri bu eşitlikler için yerlerine koyarsak,

$$\bar{E}_i + \bar{E}_r = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 \quad (2.23)$$

$$\bar{E}_1 e^{-\gamma t} + \bar{E}_2 e^{\gamma t} = \bar{E}_t e^{-j\beta_0 t} \quad (2.24)$$

$$\frac{\bar{E}_i}{\eta_0} - \frac{\bar{E}_r}{\eta_0} = \frac{\bar{E}_1}{\eta} - \frac{\bar{E}_2}{\eta} \quad (2.25)$$

$$\frac{\bar{E}_1}{\eta} e^{-\gamma t} + \frac{\bar{E}_2}{\eta} e^{\gamma t} = \frac{\bar{E}_t}{\eta_0} e^{-j\beta_0 t} \quad (2.26)$$

eşitliklerini elde ederiz. Yukarıdaki denklemlerden ekrana gelen elektrik alanının ekrandan iletilen elektrik alana oranı bulunduğunda, uzak alan yaklaşımı için genel ekranlama etkinliği ifadesine ulaşılr.

$$\frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_t} = \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0\eta} \left[1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta} \right)^2 e^{-\frac{2t}{\delta}} e^{-2j\beta t} \right] e^{\frac{t}{\delta}} e^{j\beta t} e^{-j\beta_0 t} \quad (2.27)$$

Eşitlik (2.27)'deki δ ifadesi deri kalınlığı olarak ifade edilir. Ekran malzemesine giren bir elektromanyetik dalganın genliğinin %37'sine düşmesi için gereken mesafeye o ekranın deri kalınlığı denir [15]. Deri kalınlığı,

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.28)$$

eşitliği ile tanımlanır. İyi bir iletken ekran malzemesinde deri kalınlığı malzemenin kalınlığından oldukça küçüktür ($\delta \ll t$). Ayrıca ekran malzemesinin öz empedansı boş uzayın empedansından oldukça küçüktür ($\eta \ll \eta_0$). Ekran malzemesinin iyi iletken

olduğu koşulda ve $z=0$ konumunda sınır koşulları denklemlerini ele aldığımızda, yansıyan elektrik alanın gelen elektrik alana oranı, Γ yansıma katsayısını verir.

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} = \Gamma_0 e^{j\theta_\Gamma} \quad (2.29)$$

Ekran malzemesinin iyi iletken olduğu koşulda ($\bar{E}_2 = 0$) ve $z=t$ konumunda sınır koşulları denklemlerini ele aldığımızda, iletilen elektrik alanın gelen elektrik alana oranı, T iletim katsayısını verir [2].

$$T = \frac{E_t}{E_1} = \frac{2\eta_0}{\eta + \eta_0} = T_0 e^{j\theta_T} \quad (2.30)$$

Bir elektromanyetik dalga metal bir ekrana geldiğinde dalganın bir kısmı geri yansır, ilerleyen dalga ekranın içinde ilerlerken sönümlenir, çoğul yansımalara uğrar ve ekrandan iletilir. Toplam ekranlama etkinliği,

$$S_{dB} = A + R + B \quad (2.31)$$

olarak ifade edilir. Burada A zayıflama kaybı, R yansıma kaybı ve B çoğul yansımaları ifade eden düzeltme faktörüdür.

2.2.1.1. Yansıma Kaybı

İki ortam arasındaki yansıma kaybı her iki ortamın karakteristik empedansları ile ilişkilidir. Şekil 2.4'te ekranın sol tarafına gelen dalganın alan şiddetinin iletilen dalganın alan şiddetine oranı ekranın $z=0$ konumundaki iletim katsayısına eşittir. Ekranın sol tarafındaki iletim katsayıları elektrik ve manyetik alan şiddetleri için sırası ile,

$$\frac{E_1}{E_i} = \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} \quad (2.32)$$

$$\frac{H_1}{H_i} = \frac{2\eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (2.33)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda E_1 ve H_1 , gelen dalga şiddetlerinin iletim katsayıları ile çarpımına eşit olur.

$$E_1 = \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} E_i \quad (2.34)$$

$$H_1 = \frac{2\eta_0}{\eta + \eta_0} H_i \quad (2.35)$$

Ekranın sağ tarafı için iletilen alan şiddetleri E_t ve H_t ise, $z=t$ konumuna gelen E_1 ve H_1 alan şiddetlerinin o konumdaki iletim katsayıları ile çarpımına eşit olur.

$$E_t = \frac{2\eta_0}{\eta + \eta_0} E_1 \quad (2.36)$$

$$H_t = \frac{2\eta}{\eta + \eta_0} H_1 \quad (2.37)$$

Ekran malzemesinin kalınlığının deri kalınlığından yeterince büyük olduğu koşullarda ikincil yansımalar ihmal edilebilir. Zayıflama kaybının da ihmal edilmesi ile ekranın sol tarafından geçip ekranın içinde ilerledikten sonra ekranın sağ tarafına gelen dalganın şiddetinin değişmediği varsayıldığında ($\bar{E}_1|_{z=0} = \bar{E}_1|_{z=t}$), ekrana gelen dalga şiddetlerinin ekrandan iletilen dalga şiddetleri ile ifadeleri,

$$E_t = \frac{4\eta_0\eta}{(\eta + \eta_0)^2} E_i \quad (2.38)$$

$$H_t = \frac{4\eta_0\eta}{(\eta + \eta_0)^2} H_i \quad (2.39)$$

eşitlikleri ile gösterilir. Bu eşitliklerden görülebileceği üzere elektrik ve manyetik alan bileşenleri ekranın sağ ve sol tarafından farklı oranda yansımaya rağmen toplam etki birbirine eşittir. Eğer ekran malzemesi metal ve çevreleyen ortam yalıtkan ise $\eta_0 \gg \eta$ olur. Bu durumda elektrik alan bileşeni ekranın sol tarafında maksimum yansımaya uğrarken manyetik alan bileşeni ise ekranın sağ tarafında maksimum yansımaya uğrar. Elektrik alan için ilk ve büyük yansıma ekranın sol tarafında gerçekleştiği için ince ekran malzemeleri de iyi ekranlama etkinliği değerlerine ulaşabilir. Manyetik alan için ise önemli ölçüde yansıma ekranın sağ tarafında gerçekleştiği için ikincil yansımalar ekranlama etkinliği değerini düşürür [15]. $\eta_0 \gg \eta$ olduğu durumda,

$$E_t = \frac{4\eta}{\eta_0} E_i \quad (2.40)$$

$$H_t = \frac{4\eta}{\eta_0} H_i \quad (2.41)$$

olur. Burada, η_0 yerine Z_w ve η yerine Z_s yazarsak ikincil yansımaların ve zayıflama kaybının ihmal edildiği durumda yansıma kaybı ifadesi,

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \frac{|Z_w|}{4|Z_s|} \quad (2.42)$$

olur. Burada Z_w , ekrana gelen dalganın empedansdır ve Z_s ekran empedansdır. Bu sonuç ekrana dik gelen düzlem bir dalganın yansıma kaybıdır. Eğer düzlem dalga ekrana açılı gelir ise yansıma kaybı açı ile değişir. Eğer ekran malzemesi kavisli ise kavis derecesi deri kalınlığından yeterince büyük olduğu sürece yukarıdaki yansıma kaybı denklemi geçerlidir

[15]. Düzlem dalgalar için dalga empedansı boş uzayın öz empedansı olan 377Ω değerine eşittir. Bu durumda yansıma kaybı,

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \frac{94.25}{|Z_s|} \quad (2.43)$$

ile ifade edilir. Bu formüle göre ekran empedansı ne kadar küçükse yansıma kaybı ve dolayısıyla ekranlama etkinliği o kadar yüksek olur. Eşitlik (2.6)'daki ekran empedansı ifadesini eşitlik (2.42)'de yerine koyarsak yansıma kaybı ifadesine ulaşılır.

$$R_{dB} = 168 + 10 \log_{10} \frac{\sigma_r}{\mu_r f} \quad (2.44)$$

2.2.1.2. Zayıflama Kaybı

Bir elektromanyetik dalga bir ekranın içinden geçerken dalganın şiddeti üstel olarak azalır. Bu azalma, ortamda indüklenen akımın omik ve ısı kayıplara neden olmasından meydana gelir [15]. Ekranın sol tarafından giren dalga şiddetleri E_1 ve H_1 ekranın sağ tarafına doğru $e^{-\frac{t}{\delta}}$ faktörü ile azalarak ilerler. Bu durumda,

$$E_1 = e^{-\frac{t}{\delta}} E_i \quad (2.45)$$

$$H_1 = e^{-\frac{t}{\delta}} H_i \quad (2.46)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda zayıflama faktörü A ,

$$A = e^{\frac{t}{\delta}} \quad (2.47)$$

ile ifade edilir. Bu durumda bir ekranın zayıflama kaybı,

$$A_{dB} = 20 \log_{10} e^{\frac{t}{\delta}} = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log_{10} e \quad (2.48)$$

$$A_{dB} = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (2.49)$$

formülleri ile tanımlanır. Eşitlik (2.28)'deki deri kalınlığı ifadesini zayıflama kaybı formülünde yerine koyduğumuzda,

$$A_{dB} = 131.4 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (2.50)$$

eşitliğini elde ederiz. Burada ekranın kalınlığı t metre cinsindedir [15].

2.2.1.3. Çoklu Yansıma Kaybı

Ekran malzemesinin kalınlığının deri kalınlığından yeterince büyük olduğu durumlarda zayıflama kaybının fazla olmasından dolayı çoklu yansıma kaybı ihmal edilebilir. Ancak,

ekran malzemesinin ince olduğu durumlarda ekranın sağ tarafından yansıyan dalga \bar{E}_2 , ekranın sol tarafına ulaşarak tekrar yansımaya uğrayacaktır. Eğer dalganın şiddeti yeterince büyük ise ardışık yansımalar dalga yok oluncaya kadar devam eder. $\eta_0 \gg \eta$ olduğu durumda, bir manyetik dalga ekranın sol tarafından ilk yansımaya uğradıktan sonra genliğin çok büyük bir kısmı ekranın içinde sağ tarafa doğru devam eder. Bu durumda ekranın içindeki çoklu yansımalar dikkate alınmalıdır. Kalınlığı t , deri kalınlığı δ olan bir ekranın düzeltme faktörü,

$$B_{dB} = 20 \log_{10}(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}}) \quad (2.51)$$

olarak ifade edilir [15].

2.2.2. Yakın Alan Ekranlama Etkinliği

Yakın alanda ekranlama etkinliği, girişim kaynağının cinsine göre değişmektedir. Girişim kaynağı elektrik alan veya manyetik alan kaynağı olabilir. Bu durumda, ekranlama etkinliği ortamın öz empedansından farklı olur. Ekranlama etkinliği, girişim kaynağının öz empedansı ile ilişkilidir. Eğer girişim kaynağı yüksek voltaj ve düşük akım sağlayan bir elektrik dipol ise dalga empedansı 377Ω değerinden büyük olur. Eğer girişim kaynağı düşük voltaj ve yüksek akım sağlayan bir manyetik dipol ise dalga empedansı 377Ω değerinden küçük olur. Eğer girişim kaynağı bir elektrik dipol ise dalga empedansı,

$$|Z_w|_e = \frac{1}{2\pi f \epsilon_0 r} = 60 \frac{\lambda_0}{r} \quad (2.52)$$

olarak ifade edilir. Eğer girişim kaynağı bir manyetik dipol ise dalga empedansı,

$$|Z_w|_m = 2\pi f \mu_0 r = 2369 \frac{r}{\lambda_0} \quad (2.53)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlikleri eşitlik (2.42)'de yerine koyarsak elektrik kaynak için yansıma kaybı,

$$R_{e,dB} = 20 \log_{10} \frac{1}{8\pi f \epsilon_0 r |Z_s|} \quad (2.54)$$

olur. Eşitlik (2.6)'daki ekran empedansı Z_s ve ϵ_0 değerlerini yerine koyarsak,

$$R_{e,dB} = 322 + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right) \quad (2.55)$$

eşitliği elde edilir. Aynı şekilde manyetik bir kaynak için yansıma kaybını ele aldığımızda,

$$R_{m,dB} = 14.6 + 10 \log_{10} \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \quad (2.56)$$

eşitliği elde edilir. Zayıflama kaybı ve çoklu yansıma kaybı ifadeleri yakın alan ve uzak alan yaklaşımları için değişmemektedir [15].

3. EKLANLAMA ETKİNLİĞİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Yapılan ekranlama çalışmalarının neticesinde bu çalışmaların etkisini ölçebilmek adına çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Ekranlama etkinliği yöntemleri, “İletim Yolu ile Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri” ve “Işıma Yolu ile Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri” olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. İletim yolu ile ekranlama etkinliği ölçüm yöntemleri, iletim hattı üzerinden iletilen sinyalin, doğrudan ve seri bir şekilde iletim hattına bağlanan özelleşmiş düzenekler yardımı ile ölçüldüğü yöntemleri kapsamaktadır. Işıma yolu ile ekranlama etkinliği ölçüm yöntemleri ise verici kaynaktan ışımaya yolu ile iletilen elektromanyetik dalganın alıcı kaynak ve ölçüm almaçları yardımı ile ölçüldüğü sistemleri kapsamaktadır [16]-[18].

3.1. İletim Yolu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri

Küçük ve orta boyutlardaki malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümleri özelinde tasarım uygunluğu, kullanım kolaylığı ve maliyet odaklılık göz önünde bulundurulduğunda iletim yolu ile yayılım prensibine dayanan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin avantajları ve sınırlamaları, frekans aralığı, tekrarlanabilirlik, dinamik aralık, test edilecek ekran örneği hazırlama ve ölçüm için gerekli süre ile büyük ölçüde ilişkilidir [7].

Düzlem ekran malzemelerinin dik gelen düzlem elektromanyetik dalgalara karşı en çok bilinen ve en önemli ekranlama etkinliği ölçüm teknikleri eş eksenli enine elektromanyetik dalga hücresi yöntemleridir. Bu yöntemler, ASTM ES7-83 ve ASTM D4935 standartlarının tanımladığı yöntemlerdir. 1983 yılında ASTM ES7-83 yayınlanmıştır. Daha sonra bu standart 1989 yılında yerini ASTM D4935 standardına bırakmıştır. ASTM D4935 standardında 1999 yılında çeşitli düzenlemeler yapılmıştır ve en son 2010 yılında güncellenerek ASTM D4935-10 adı ile yayınlanmıştır [12].

ASTM ES7 ve ASTM D4935 standartlarında belirtilen yöntemler, dairesel eş eksenli iletim hattının yanı sıra TEM hücresi gibi dikdörtgen eş eksenli iletim hattı yapısında da uygulanarak TEM-t hücresi yöntemi geliştirilmiştir.

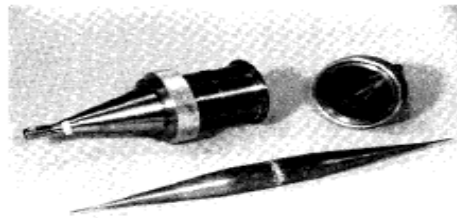
Düzlem dalga yaklaşımından farklı olarak yakın alan ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirebilmek adına ikili TEM hücresi yöntemi geliştirilmiştir. İkili TEM hücresi yapısı ile malzemenin yüksek empedanslı ve düşük empedanslı ekranlama özelliklerinin bir ölçüsü olan elektrik ve manyetik alan ölçümü yapılabilmektedir.

3.1.1. Dairesel Eş Eksenli İletim Hattı Yöntemleri

Yeni geliştirilen malzemeler için geniş bir frekans aralığında ve güvenilir şekilde elektromanyetik ekranlama etkinliği verilerini ölçmek, özelliklerini ve potansiyel uygulamalarını belirlemek için çok önemlidir. Enine elektromanyetik modda (TEM) ekranlama etkinliği, uzak bir kaynaktan kaynaklanan düzlem dalgalara benzer olan elektromanyetik dalgalar için tanımlanır. Bir eş eksenli iletim hattında enine bir elektromanyetik mod vardır, dolayısıyla manyetik ve elektrik alan vektörlerinin her ikisi de akım yayılım yönüne diktir. Yeni nano mühendislik ve nano güçlendirici malzemeler nispeten pahalıdır. Bu nedenle, ekranlama etkinliği özelliklerini test etmek için gerekli numune boyutu mümkün olduğunca küçük olmalıdır ve küçük malzemelerin ölçümü için eş eksenli iletim hattı yöntemi uygulanabilir yöntemlerden birisidir [19].

3.1.1.1. Sürekli İletken Dairesel Koaksiyel Tutucu

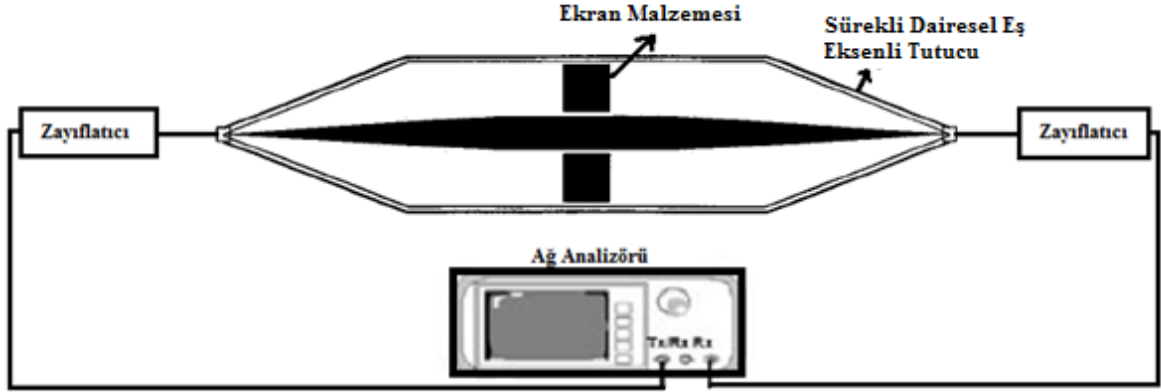
Ekranlama malzemesinin dikkate alınması gereken önemli özelliklerinden birisi düzlem dalgaları ekranlama kapasitesidir. Düzlem dalgalar, uzak alanda bulunan kaynaklar tarafından oluşturulur. Sonsuz uzunlukta bir levha kullanarak uzak alan testi gerçekleştirmek mümkün değildir. Dalga kılavuzu kullanarak TEM modunda elektromanyetik dalga üretmek ve almak kullanılabilir yöntemlerden birisidir. Bu yaklaşım iki iletkenli ve TEM dalga oluşturabilen yapıların kullanılmasını gerektirir. Bütün bu düşüncelerden yola çıkarak uzak alan testi gerçekleştirebilmek için eş eksenli iletim hattı yapısında daireysel tutucu yapılar geliştirilmiştir [4].



Şekil 3.1 Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [4]

ASTM-ES7 hücresi olarak da bilinen bu yapı sürekli bir iç iletken ile genişletilmiş eş eksenli hattın meydana gelir. Ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği Şekil 3.2'de

gösterilmiştir. Sürekli iletken eş eksenli iletim hattı iki uç noktasına doğru sivrilerek 50 Ω 'luk iletim hattı oluşturulacak şekilde bağlanır. Giriş ve çıkış portlarına 50 Ω 'luk empedans uyumunu güçlendirmek için 10 dB zayıflatma değerlerinde zayıflatıcılar bağlanır. Koaksiyel tutucu, yuvarlak ekran malzemesi yerleştirmek için demonte edecek şekilde tasarlanmıştır.

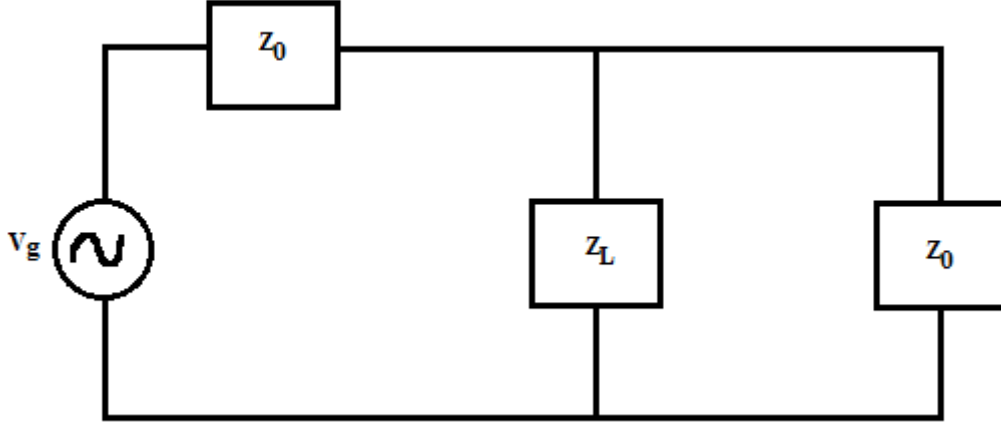


Şekil 3.2 Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzenegi

Ekran malzemesi dikkatli bir biçimde hazırlanmalıdır. Ekran malzemesinin hem dış hem de iç iletken ile iyi bir temas kurması gerekmektedir. Aksi takdirde bu temas empedansının etkisi ölçümleri etkileyecek şekilde baskın bir faktör oluşturabilir. Tekrar monte edildiğinde ise sürekli iletken özelliği gösterir. Referans ölçümler için herhangi bir ek hazırlığa ihtiyaç yoktur. Ağ analizörü ile, referans ölçüm ve ekran malzemesi ile birlikte gerçekleştirilen ölçüm karşılaştırılır ve ekranın etkinliği belirlenir. Ekranlama etkinliğinin bir diğer ifadesi ise araya girme kaybıdır.

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{V_0}{V_L} \right| \quad (3.1)$$

Bu sistemde araya girme kaybı, referans ölçümün ekran malzemesi ile yapılan ölçüme oranı olarak ifade edilir.



Şekil 3.3 İdeal Bir Sürekli İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu Devre Modeli

Şekil 3.3'te ideal durumda eş eksenli tutucu iletim hattı devre modeli gösterilmektedir. Bu devre modeli için araya girme kaybı;

$$IL = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_0}{2Z_L} \right| \quad (3.2)$$

eşitliği ile hesaplanır [21]. Ancak pratikte ihmal edilemeyecek kadar büyük olan, eş eksenli tutucu ile ekran örneği arasında bir temas empedansı (Z_C) oluşur. Bu durumda araya girme kaybı;

$$IL = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_0}{2(Z_L + Z_C)} \right| \quad (3.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikten de görüleceği gibi, temas empedansı araya girme kaybını azaltıcı etki gösterir. Bu durumda ekran örneği bekleneceği üzere iyi bir iletken ise (Z_L değeri küçük) ve ekran malzemesi iyi bir şekilde yerleştirilmeyip temas empedansı çok yüksek olduğunda, ekranlama etkinliği değerini yanıltıcı bir şekilde değiştirecektir.

Bir diğer parametre ise sistemin frekans bandının ölçüm aralığını belirleyen kesim frekansı değeridir. Maksimum kesim frekansı,

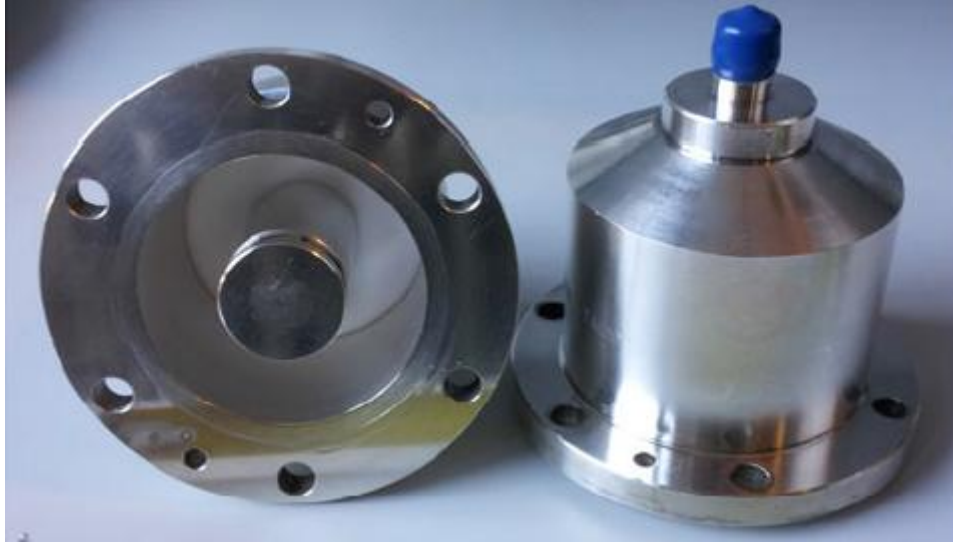
$$f_{max} < \frac{c}{\frac{\pi}{2}(D+d)} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir. Burada c ışık hızı, D dış iletkenin iç çapı ve d ise iç iletkenin çapıdır. Kesim frekansı değeri, yüksek dereceli modların iletmeye başladığı frekans değeridir. İletilen TEM modundaki dalganın düşük kesim frekansı yoktur ve testte kullanılan cihazlara göre değişir. Tipik bir sürekli iletken eş eksenli tutucuda yaklaşık 1.5 GHz frekans değerine kadar ölçüm sağlanabilir.

3.1.1.2. Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu

Bir diğer dairesel eş eksenli tutucu yöntemi de ASTM D4935 hücresi olarak da adlandırılan ayrık iletken dairesel eş eksenli tutucudur. Bu yöntem ASTM-ES7 yönteminin

temas problemini ortadan kaldırmak üzere yapılan çalışmaların sonucunda geliştirilmiştir. ASTM-ES7 yönteminin en kritik noktası test edilen ekran malzemesinin sürekli iletken dairesel eş eksenli tutucu ile elektriksel olarak temas halinde olmasıdır. ASTM D4935 hücresinin temel amacı ayırık iletken bir yapıda elektriksel temas oluşturmadan doğru bir ekranlama etkinliği ölçümü sağlamaktır. Bu yapı temel olarak, kesintili bir iç iletken ve bağlantı noktaları bulunan bir dış yapıdan oluşmaktadır. Test hücresi iki parçalı ayırık eş eksenli dalga kılavuzu yapısındadır.

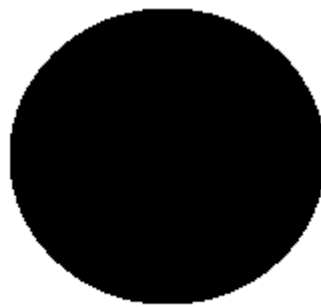


Şekil 3.4 Ayırık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu [7]

Yüzey iletken malzemeler (metal levhalar, folyolar, boyalı plastikler) için yöntem, eski ASTM-ES7 yöntemine benzemektedir. İletken plastikler için yöntem, kapasitif bir girişime dayanmaktadır. Şekil 3.5'te ASTM-D4935 hücresinin kesit alanı gösterilmektedir. Test altındaki düzlem malzeme, eş eksenli tutucunun dış çapı ile aynı boyuta sahip bir disk şeklinde şekillendirilir. Referans malzeme ise, test altındaki malzeme ile aynı olmakla birlikte yalnızca dış iletkenlerin bağlantı noktalarını ve iç iletkeni kapsayacak çaplarda iki parçadan oluşur. Böylece, referans ölçümlerde hücrenin iki parçası arasında aynı kalınlıkta ve aynı özelliklerde malzeme kullanılarak eşit kapasitif girişim oluşması sağlanır.



a)

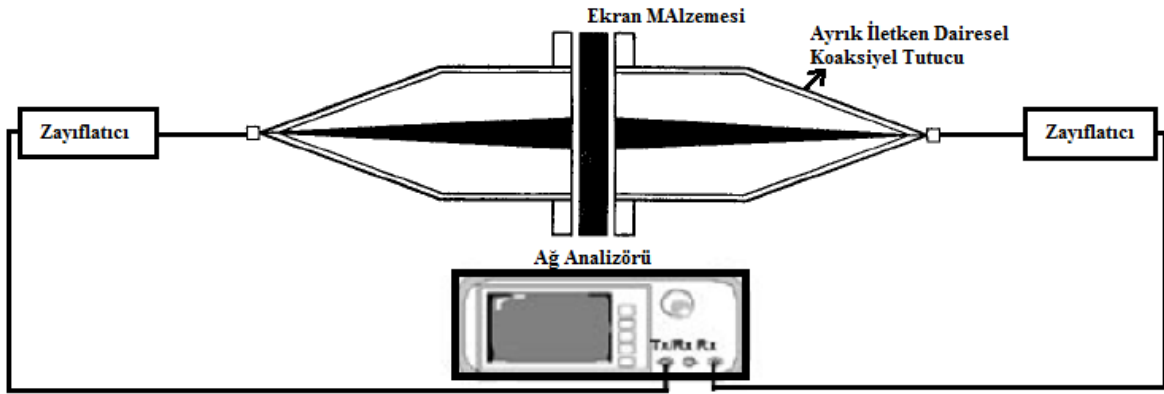


b)

Şekil 3.5 Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu Kesit Alanı

a) Referans Malzeme İle, b) Ekran Malzemesi İle

Ekran malzemeleri tamamen dış iletkenlerin bağlantı noktalarını kapsamalı ve hücrenin her iki yarısı arasında bir temas olmasına izin verilmemelidir. Teması önlemek için plastik vidalar kullanılmalıdır [4]. Metal vidalar, sürekli iletken tutucuda olduğu gibi temas empedansını ekran malzemesi ile seri olarak yerleştirme eğilimindedir.



Şekil 3.6 Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzeneği

Ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Ayrık iletken eş eksenli tutucu, sürekli iletken eş eksenli tutucu gibi 50 Ω 'luk hattan meydana gelir. İki uç noktasına doğru sivrilerek 50 Ω 'luk iletim hattı oluşturulacak şekilde konektörlere bağlanır. Giriş ve çıkış portlarına 50 Ω 'luk empedans uyumunu güçlendirmek için 10 dB zayıflatma değerlerinde zayıflatıcılar bağlanır. Ayrık bağlantı noktaları ekran malzemesinin tutturulmasını sağlar. Ağ analizörü ile, referans ölçüm ve ekran malzemesi ile birlikte gerçekleştirilen ölçüm karşılaştırılır ve ekranın etkinliği belirlenir.

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{21,R}}{S_{21,L}} \right| \quad (3.5)$$

Burada, $S_{21,R}$ ve $S_{21,L}$ sırasıyla referans ve ekran malzemesi bulunduğu durumlarda, vektör ağ analizöründen yapılan ölçümler sonucunda bulunan saçılma parametreleridir.

Uzunluğu boyunca 50 Ω 'luk hattan meydana gelen ayrık iletken dairesel eş eksenli tutucu, Şekil 3.6'da gösterilen test düzeneğindeki ağ analizörü, kablolar, konektörler ve zayıflatıcılarla empedans olarak uyumludur. Bu empedans değeri, eş eksenli hattın karakteristik empedansı olan Z_0 'ın ,

$$Z_0 = \left(\frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \right) \ln \left(\frac{D}{d} \right) \quad (3.6)$$

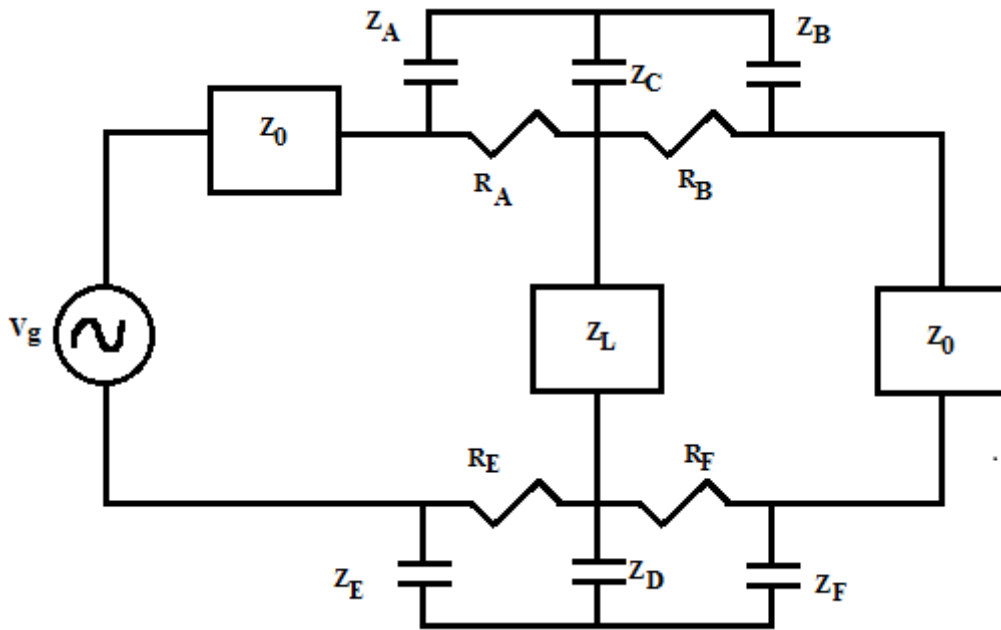
formülü yardımıyla hesaplanması ile bulunur [19]. Burada η_0 boş uzay dalga empedansı (377Ω), D dış iletkenin iç çapı ve d ise iç iletkenin çapıdır. ϵ_r , iletkenler arasındaki dielektrik malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliğinin gerçel kısmı olup hava için (malzeme yok iken) değeri 1'dir. Bu değerleri yukarıdaki formülde yerine koyduğumuzda,

$$Z_0 = 60 \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (3.7)$$

formülüne indirgenir. Bu durumda dielektrik malzemenin hava olduğu kabul edilirse, eş eksenli tutucunun empedansı yalnızca D ve d uzunluklarının bir fonksiyonudur. TEM modunun ölçüm frekansının üst limiti olan ve ilk yüksek mertbe modunun olduğu kesim frekansı f_c ise,

$$f_c = \left(\frac{n}{\pi}\right) \left(\frac{2c}{D+d}\right) \quad (3.8)$$

formülü ile hesaplanır. Burada n pozitif tam sayıdır ve temel mod için değeri 1'dir. c ise değeri 3×10^8 m/s olan ışık hızıdır.



Şekil 3.7 İdeal Bir Ayrık İletken Dairesel Eş Eksenli Tutucu Devre Modeli [4]

Şekil 3.7'de ayrık iletken eş eksenli tutucu devre modeli gösterilmektedir. R_A , R_B , R_E ve R_F , ayrık parçalar ile test edilen ekran malzemesi arasındaki temas dirençleri olarak adlandırılır. Bu devrede ortaya çıkan Z_C ve Z_D kapasitans değerleri, bağlantı noktaları ile test edilen ekran malzemesi arasındaki kapasitif girişim etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Ayrıca Z_A , Z_B , Z_E ve Z_F kapasitans değerleri ise, bağlantı noktalarının kendi içinde oluşturduğu kapasitif girişimle meydana gelmektedir.

Kirchhoff voltaj yasası kullanılarak ve çeşitli yaklaşımlarda bulunarak devre çözümlemesi yapıldığında, ekranlama etkinliği ölçümü hesaplamalarında kullanılan araya girme kaybı (IL),

$$IL = 20 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_0}{2(Z_L + Z_C + Z_D)} \right| \quad (3.9)$$

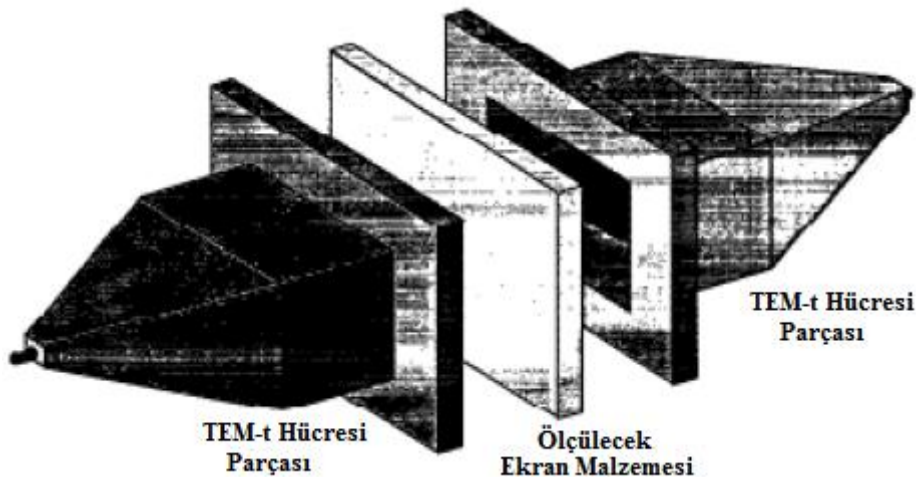
formülü ile hesaplanır [20]. Ekranlama etkinliği ölçümlerinde, özellikle iyi iletken yapıdaki malzemelerin ölçümleri dikkate alındığında, $Z_L \ll Z_C + Z_D$ eşitsizliği ortaya çıkacağı için istenmeyen kapasitif girişim nedeniyle meydana gelen Z_C ve Z_D empedansları araya girme kaybı ölçümüne doğrudan etki edeceklerdir. Bu nedenle, iyi bir ayırık iletken dairesel eş eksenli tutucu tasarımında bağlantı noktaları ile ekran malzemesi arasındaki kapasitans değerlerinin küçük olması beklenmektedir.

3.1.2. Dikdörtgen Eş Eksenli İletim Hattı Yöntemleri

Dikdörtgen eş eksenli iletim hatları enine elektromanyetik (TEM) hücresi olarak adlandırılır. TEM hücresi, bir diğer adı ile Crawford hücresi kullanım alanları açısından çok yönlü olması ile oldukça popüler bir yöntemdir. DC (0 Hz) frekans değerinden kesim frekans değerine kadar kesin bir elektromanyetik dalga üretmek için kullanılır [21]. Bu bölümde ise ekranlama etkinliği ölçümleri için özelleştirilen TEM hücreleri incelenecektir. TEM hücreleri, bahsedilen bu testlerin gerçekleştirildiği diğer yapılar olan yansımaz ve ekranlı odalarla karşılaştırıldığında tasarım ve üretim maliyetleri açısından oldukça avantajlıdır.

3.1.2.1. TEM-t Hücresi

İletim yolu ile ekranlama etkinliği yöntemlerinden bir diğeri TEM-t hücresidir. Bu hücre, ASTM-D4935 yönteminde olduğu gibi ayırık iki parçadan meydana gelmektedir. Ayırık iletken eş eksenli tutucu metodundan farklı olarak dikdörtgen bir iletim hattına sahiptir.

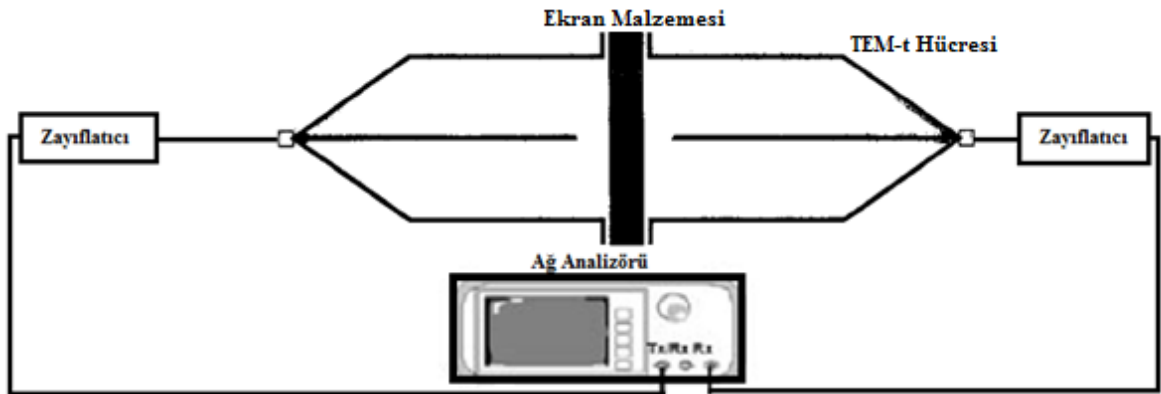


Şekil 3.8 TEM-t Hücresi [22]

Ekranlama malzemelerini belirlemek karmaşık bir karardır. Delikler, açıklıklar, bağlantı noktaları gibi farklı değişkenler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, bir ekran malzemesinin seçimi, mekanik tasarım için de olduğu gibi bir dizi ihtiyaca bağlı olacaktır. Dikdörtgen kesitinden dolayı TEM-t hücresi, dairesel hücrelerin yetersiz kaldığı alanlarda kullanılabilir [23].

Şekil 3.8’de ayrı TEM hücresi olan TEM-t hücresi gösterilmektedir. Test hücresi, iki eşit parçadan oluşmakla birlikte kesintili bir iç iletkene sahip dikdörtgen bir iletim hattından meydana gelmektedir. Her bir parça, konektörlerin olduğu uçlara doğru sivrilmiş konik bir yapıdan ve ayrı parçaların birleştiği noktaya doğru uzanan düz bir iletken oluşmaktadır. Tüm ölçümler, her türlü malzeme için temassız, kapasitif bir girişime dayanacak şekilde yapılır. Ekran malzemeleri tamamen dış bağlantı noktalarını kapsmalıdır ancak daha küçük malzemeler için özel malzeme tutucular kullanılarak ölçümler gerçekleştirilebilir [23].

TEM-t hücresi genel olarak 1-1,5 GHz kesim frekansına kadar kullanılmaktadır. Referans ölçümler, ASTM-D4935 yönteminde olduğu gibi örnek malzeme hazırlanarak veya örnek malzemeye gerek olmadan kalın malzemeler için düşük frekanslarda düzeltme faktörü kullanılarak iki türlü gerçekleştirilebilir.



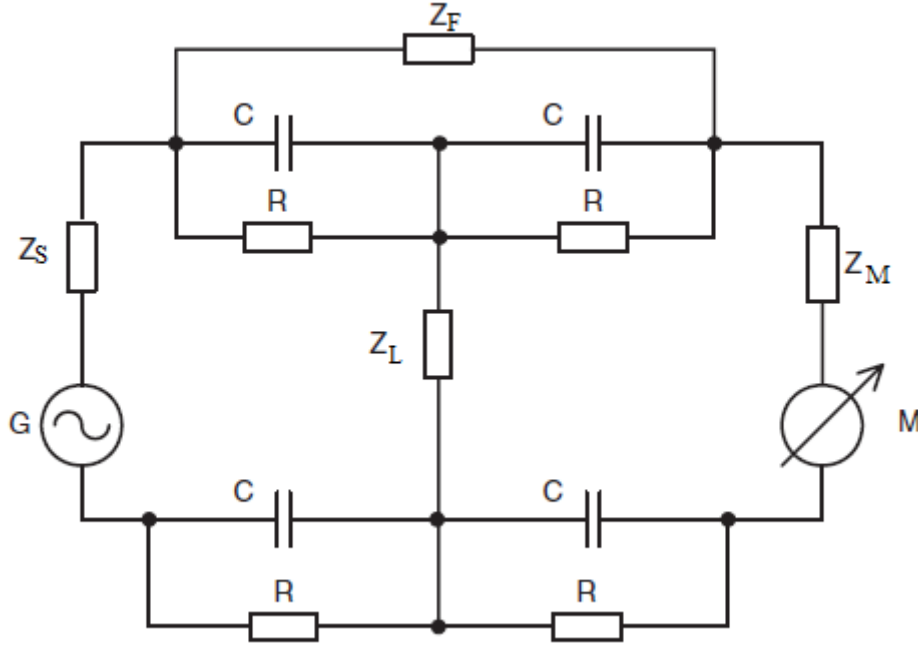
Şekil 3.9 TEM-t Hücresi Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzeneği

Ekranlama etkinliği ölçüm düzeni Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Ayrı TEM hücresi, dairesel eş eksenli tutucular gibi 50 Ω ’luk hattan meydana gelir. İki uç noktasına doğru sivrilerek 50 Ω ’luk iletim hattı oluşturulacak şekilde konektörlere bağlanır. Giriş ve çıkış portlarına 50 Ω ’luk empedans uyumunu güçlendirmek için 10 dB zayıflatma değerlerinde zayıflatıcılar bağlanır. Ayrı bağlantı noktaları ekran malzemesinin tutturulmasını sağlar.

Referans ölçümler ASTM-D4935 yönteminden farklı olarak malzeme olmadan doğrudan bağlantı ile gerçekleştirilebilir. Ağ analizörü ile, referans ölçüm ve ekran malzemesi ile birlikte gerçekleştirilen ölçüm karşılaştırılır ve ekranın etkinliği belirlenir.

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{21,R}}{S_{21,L}} \right| \quad (3.10)$$

Burada, $S_{21,R}$ ve $S_{21,L}$ sırasıyla referans ve ekran malzemesi bulunduğu durumlarda, vektör ağ analizöründen yapılan ölçümler sonucunda bulunan saçılma parametreleridir.



Şekil 3.10 TEM-t Hücresi Devre Modeli [32]

TEM hücreleri, ekran malzemelerinin uzak alan ekranlama etkinliği değerlerini elde etmek için kullanılan bir çeşit simülasyon devreleridir. Şekil 3.10'da gösterilen genel devre şeması ile modellenebilir. Özellikleri belirli bir test hücresine bağlı olarak, empedansların tipi ve değerleri ayarlanmalıdır. Analiz, devre teorisinden veya bilgisayar simülasyonlarından uygun yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir.

ASTM-ES7 yönteminde olduğu gibi $Z_F = 0$ olduğunda, ekran malzemesi ile test hücresi arasındaki temas empedansı ekran malzemesinin empedansı Z_L ile seri olarak ele alınır. Dolayısıyla ekranlama etkinliği değeri bu empedanslardan etkilenir ve olması gerekenden daha düşük bir ekranlama etkinliği değeri elde edilir.

Hem ASTM-D4935 yöntemi hem de TEM-t hücresi için referans ölçüm ve ekran malzemesi ile ölçüm, bir birinci mertebeden RC devresi ve bir ikinci mertebeden iki basamaklı RC devresi meydana getirmektedir. Frekans aralığına ve ekran malzemesinin

kalınlığına bağılı olarak, tam ekranlama etkinliği değerini elde etmek için bir düzeltme faktörü gerekmektedir.

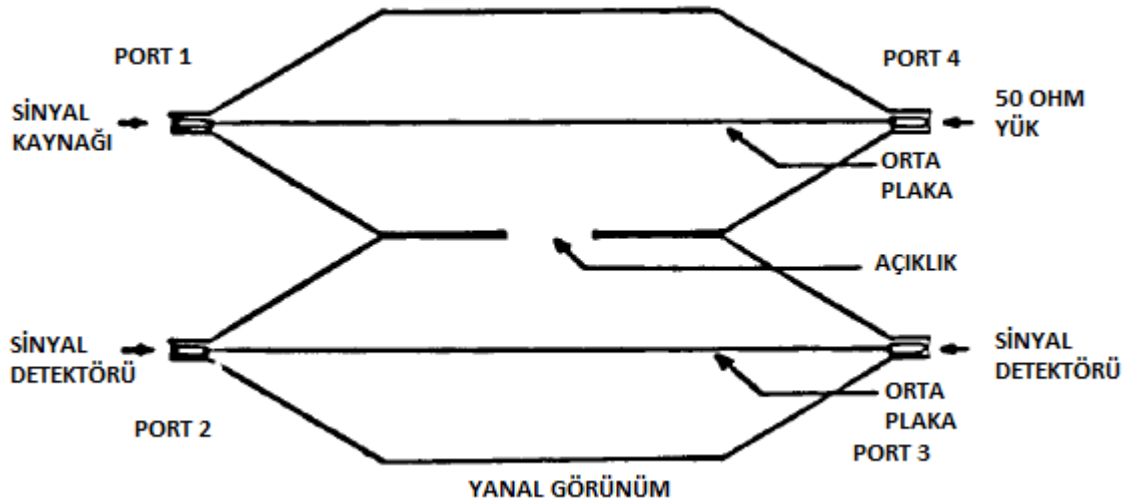
Hem ASTM-D4935 yöntemi hem de TEM-t hücresi için, her iki bağlantı noktası arasındaki parazitik bir girişimi önlemek için ekran malzemelerinin en azından bağlantı yüzeyleri ile aynı boyutlarda olması gerekir. Böylece $Z_F = \infty$ değerini alır [23].

3.1.2.2. İkili TEM Hücresi

Ekran malzemesi elektromanyetik alan kaynağının yakın alanına getirilirse, ekranlama etkinliği özellikleri değişiklik gösterecektir. Daha çok emisyon problemleri yakın alan ekranlama özelliklerini gösterir. Yakın alan ölçümlerinde hem düşük empedans (manyetik alan etkin) hem de yüksek empedans (elektrik alan etkin) dalgaları dikkate alınmalıdır.

İkili TEM hücresi yapısı ile eş zamanlı olarak, malzemenin yüksek empedanslı ve düşük empedanslı ekranlama özelliklerinin bir ölçüsü olan elektrik ve manyetik alan ölçümü yapılabilmektedir. İkili TEM hücresi yapısında, bir TEM hücresi diğer bir TEM hücresini ortak bir açıklıkla birleştirir. Her bir TEM hücresinin, malzemenin yerleştirilebilmesi ve hücrelerin düzgün bir şekilde birleştirilebilmesi için yeterince büyük olması gerekir [10].

Her bir TEM hücresi, 50 Ω 'luk dikdörtgen eş eksenli iletim hattından oluşur ve iki uç noktasına doğru sivrilererek 50 Ω 'luk eş eksenli hat ile eşleşir. Bu yapıda, paylaşılan bir duvardaki bir açıklık vasıtasıyla birleştirilen iki TEM hücresi kullanılır. İkili TEM hücresi yapısı Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 İkili TEM Hücresi Yanal Görünümü [10]

İkili TEM hücresi diğer yöntemlerden farklı olarak bir giriş sinyaline karşılık iki çıkış sinyaline sahiptir. Açıklık, hatta iletilen gücü port 1'den beslenen üst TEM hücresinden port 3'ten ve port 4'ten ölçüm alınan alt TEM hücresine iletir. Açıklık, enerjiyi çıkış portlarına asimetrik olarak iletir. Bu özellik, normal elektrik ve teğet manyetik alan bileşenlerinin etkisini tek tek incelememizi sağlar. Böylece, ikili TEM hücresi hem yüksek hem de düşük empedanslı yakın alan ekranlama etkinliğini simule eder [10].

Ağ analizörü ile, referans ölçüm ve ekran malzemesi ile birlikte gerçekleştirilen ölçümler karşılaştırılır ve ekranın etkinliği belirlenir. Ekranlama etkinliğinin bir diğer ifadesi araya girme kaybıdır. Bu sistemde araya girme kaybı, referans ölçümün ekran malzemesi ile yapılan ölçüme oranı olarak ifade edilir. Bir açıklıkta bulunan ekran malzemesinin ekranlama etkinliği ifadesi, bir eş eksenli dipolün yakın alan ekranlama etkinliği ifadeleri ile ilişkilidir [10]. Bir eş eksenli dipolün elektrik ve manyetik alan araya girme kayıpları ifadeleri sırası ile,

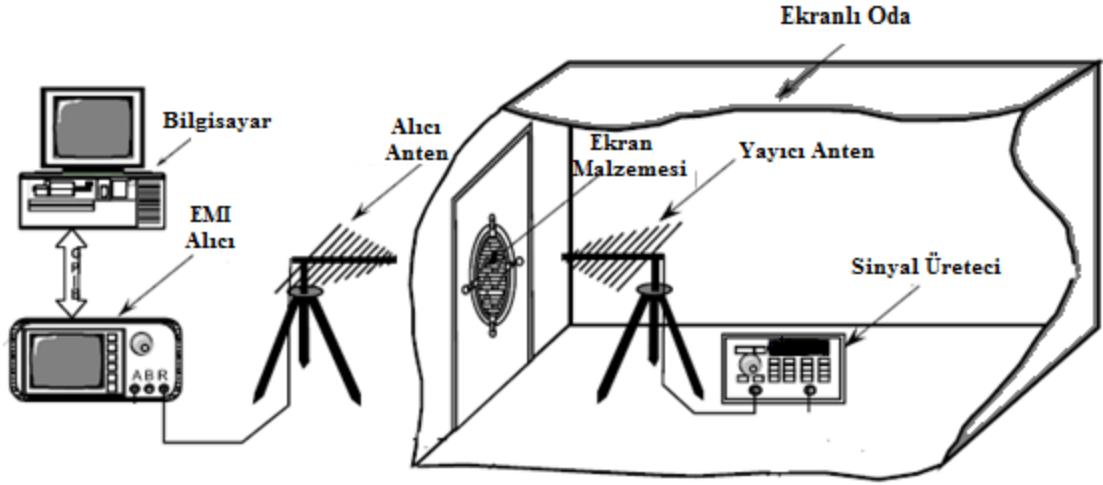
$$IL_E = 20 \log \left| \frac{8}{3\pi} \frac{Z_0}{r} \right| \quad (3.11)$$

$$IL_H = 20 \log \left| \frac{8}{3\pi} \frac{3r}{Z_0} \right| \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir [10]. Burada r açıklığın çapı ve Z_0 ise alıcı ve verici dipoller arasındaki mesafedir.

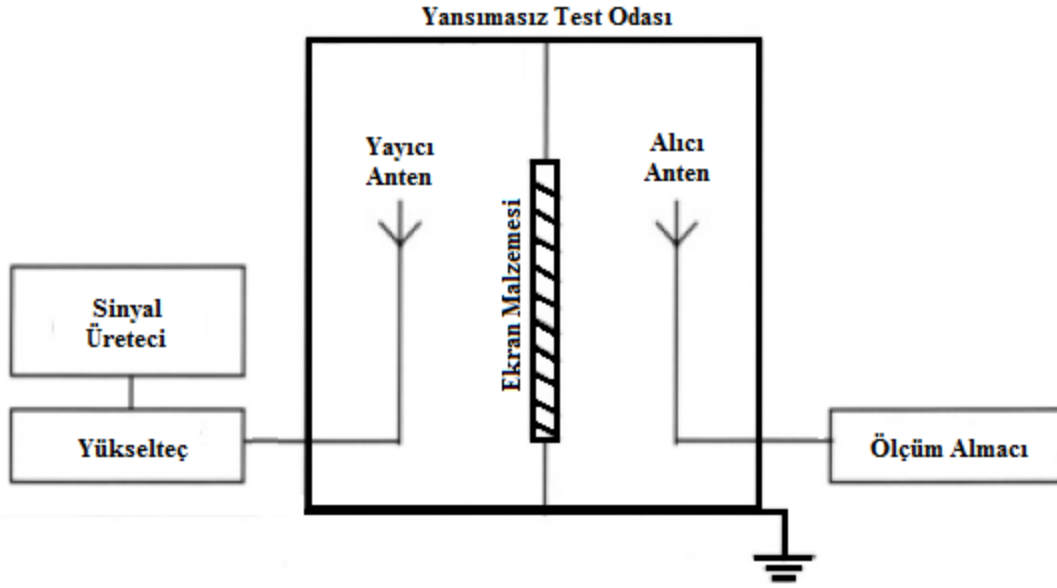
3.2. Işıma Yolu İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Yöntemleri

1956 yılında ışına yoluyla yayılım metodunu tanımlayan MIL-STD-285 standardı yayınlanmıştır. MIL-STD-285 yöntemi daha çok askeri amaçlar için geliştirilmiş olup 100 kHz – 18 GHz frekans bandı ölçümleri için kullanılmaktadır. Bu standart, teste tabi olan frekansları ve elektromanyetik alan bileşenlerini tanımlar ve gerekli ekipman ve anten konfigürasyonlarını belirtir. Daha sonra bu standart 1997 yılında yerini, çeşitli düzenlemeler sonucunda IEEE STD-299 standardına bırakmıştır [24].



Şekil 3.12 Ekranlı Oda Yöntemi Ekranlama Etkinliği Ölçümü Düzenegi [24]

Işıma yolu ile ekranlama etkinliği ölçüm yöntemleri, ekranlı oda ve boş uzay ekranlama tekniklerini kapsamaktadır. Şekil 3.12’de ekranlı oda yöntemi ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği gösterilmektedir. Ekranlı oda yöntemi sinyal kaynağına, alıcı ve yayıcı antenlere, ölçüm almaçlarına ve üzerinde açıklık bulunan ekranlı bir kapalı alana gereksinim duymaktadır. Bu yöntemde, iç bölgesini dış bölgeden izole eden yeterli büyüklükte bir oda kullanılmaktadır. Bu oda üzerinde ekran malzemesinin yerleştirildiği bir açıklık bulunmaktadır. Yayıcı anten ve sinyal kaynağı ekranlı odanın içerisine yerleştirilirken ölçüm almaç ve alıcı anten ise dışında yer almaktadır. Ekran malzemesi yok iken alınan ölçüm ile ekran malzemesinin açıklığa yerleştirilmesi ile alınan ölçümlerin oranı ekranlama etkinliğini vermektedir. Ekran malzemesi yok iken alınan ölçüme referans ölçüm adı verilmektedir. Ekranlı oda yöntemi daha çok küçük boyutlardaki ekran malzemesi örnekleri için uygun bir yöntemdir.



Şekil 3.13 Boş Uzay Yöntemi Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzeneği

Şekil 3.13'te boş uzay yöntemi ekranlama etkinliği ölçüm düzeneği gösterilmektedir. Boş uzay yönteminde ise sinyal kaynağına, alıcı ve yayıcı antenlere, ölçüm almaçlarına ve yansımaz test odasına gereksinim duyulmaktadır. Bu yöntemde, ekranlı ve yansımaz bir oda içerisinde alıcı ve yayıcı antenler arasına bir ekran malzemesi yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilir. Antenler ve ekran malzemesi yansımaz test odasının içerisine yerleştirilirken ölçüm almaç ve sinyal kaynağı test odasının dışında yer almaktadır. Ekranlı kutu yönteminde olduğu gibi ekran malzemesi yok iken alınan ölçüm ile ekran malzemesi ile alınan ölçümlerin oranı ekranlama etkinliğini vermektedir. Boş uzay yönteminde antenlerin boyutları ve iletim özellikleri, ekran malzemesinin büyük boyutlarda seçilmesine neden olmaktadır.

Çizelge 3.1 IEEE Std-299 Ölçüm Yöntemleri ve Frekans Aralıkları

Ölçüm Yöntemi	Frekans Aralığı	EM Alan Çeşidi
Düşük Frekans	9 kHz – 20 MHz	Manyetik
Rezonans Frekansı	20 MHz- 30 MHz	Manyetik ve Elektrik
	30 MHz – 300 MHz	Düzlem Dalga
Yüksek Frekans	300 MHz – 18 GHz	Düzlem Dalga

IEEE Std-299 Standardında ekranlama etkinliği ölçümleri frekans bandına göre üç gruba ayrılmaktadır [6]. Yakın alan ve uzak alan dinamiklerine bağlı olarak ilgili frekans aralıklarında manyetik, elektrik ve düzlem dalga ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıntılı prosedür düşük frekans, rezonans frekansı ve yüksek frekans olarak adlandırılan üç yöntemle ayrılmıştır. Bu yöntemlere karşılık gelen frekans aralıkları ve elektromanyetik alan çeşitleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

3.2.1. Işıma Yolu İle Ekranlama Etkinliği Deneysel Çalışmaları

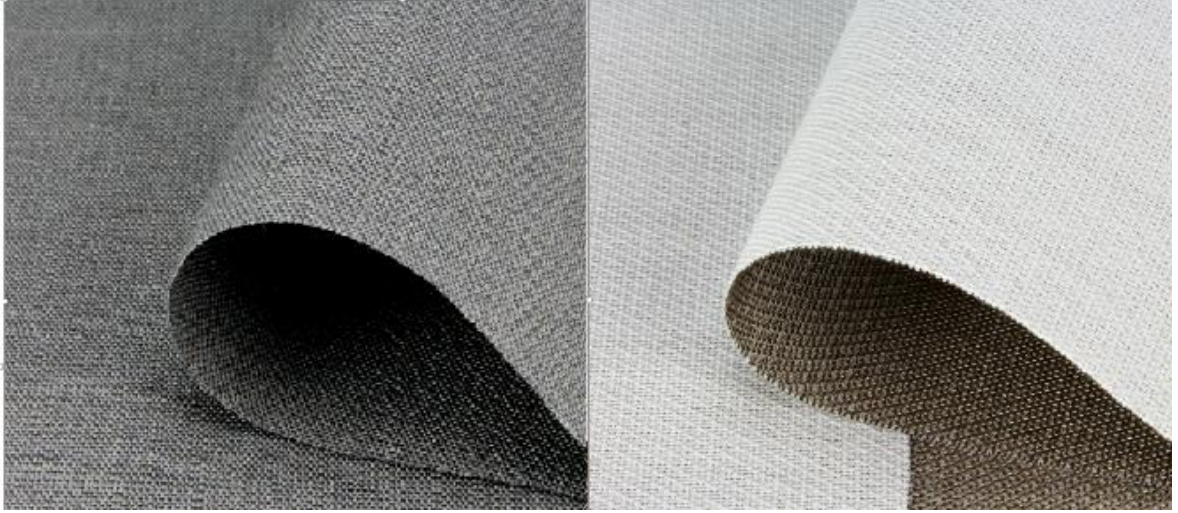
3.2.1.1. Amaç

Bu bölümde, Labortatuvar ortamında gerçekleştirilen ekranlama etkinliği ölçümleri ele alınmıştır. Ekranlama etkinliği ölçümleri IEEE Std-299 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Ekranlama etkinliği ölçüm yöntemi olarak ekranlı oda tekniği kullanılmıştır. Ölçümlerde ekran malzemesi olarak Y-Shield firmasının ürettiği, ekranlama özellikleri EK-1’de ve EK-2’de gösterilen gümüş ve çelik katkılı kumaş malzemeler kullanılmıştır. Her iki kumaş için alınan ölçümlerin sonuçları üretici firma ekranlama etkinliği rapor sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.2.1.2. Kapsam ve Uygulama

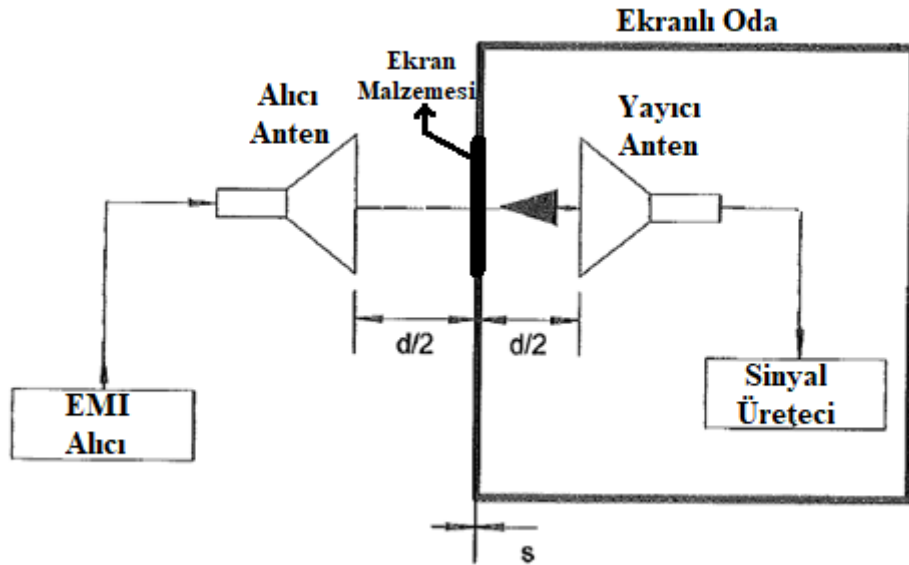
Ekranlama etkinliği ölçümleri, IEE Std-299 standardına uygun olarak 30 MHz – 18 GHz frekans bandında gerçekleştirilmiştir. Test donanımları, kullanılan antenlerin frekans aralıklarına göre Şekil 3.12’de gösterilen test düzeneğine uygun şekilde kullanılmıştır.

220 mm x 220 mm boyutlarında kare bir açıklığa sahip olan panel 1.5 mm kalınlığındadır. İletken plaka veya düzlem ekran malzemesi tutturabilmek için 8 adet vida deliği mevcuttur. Elektromanyetik uyumluluk testlerinde test edilen cihazların yardımcı donanımlarına erişimi için kullanılan ve geçiş sırasında ekranların sonlandırılmasını sağlayan bu panel, ekranlama etkinliği ölçümlerinde ekranlı oda açıklığı olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Çelik (sol taraf) ve Gümüş (sağ taraf) Katkılı Kumaş Malzemeler

Ekran malzemesi olarak Y-Shield firmasına ait 2 adet kumaş düzlem malzeme kullanılmıştır. Şekil 3.14’te gösterilen bu malzemeler çelik ve gümüş katkı malzemelerdir.



Şekil 3.15 Test Düzeneği

Şekil 3.15’te IEEE Std-299 standardına göre kurulan ekranlı oda yöntemi ile ekranlama etkinliği test düzeneği gösterilmektedir. Ekranlama etkinliği değeri, ekran malzemesi yok iken alınan referans ölçümlerin ekran malzemesi var iken alınan ölçümlere oranı ile bulunur.

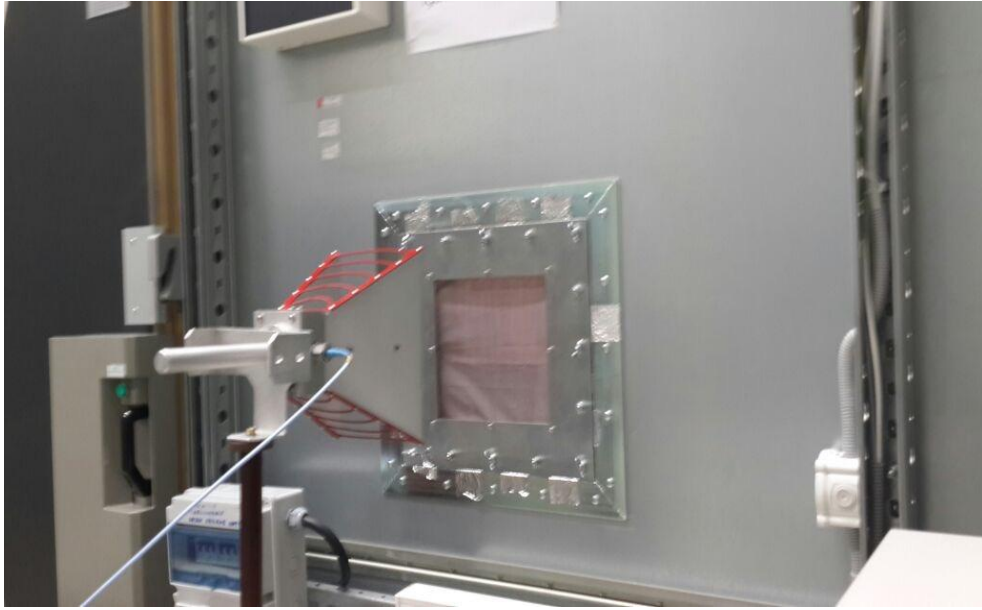
Çizelge 3.2 Anten Mesafeleri

Frekans Aralığı	Antenler Arası Mesafe (d+s)
30 MHz-1GHz	200 cm
1 GHz-18 GHz	60 cm

Çizelge 3.2’de frekans bantlarına göre alıcı ve yayıcı antenler arasındaki mesafeler belirtilmektedir. Buradaki s değeri ekran malzemesinin kalınlığıdır. d/2 değeri ise alıcı veya yayıcı antenin ekran malzemesine olan uzaklığıdır. Antenler arası mesafeler IEEE Std-299 standardından alınmıştır.

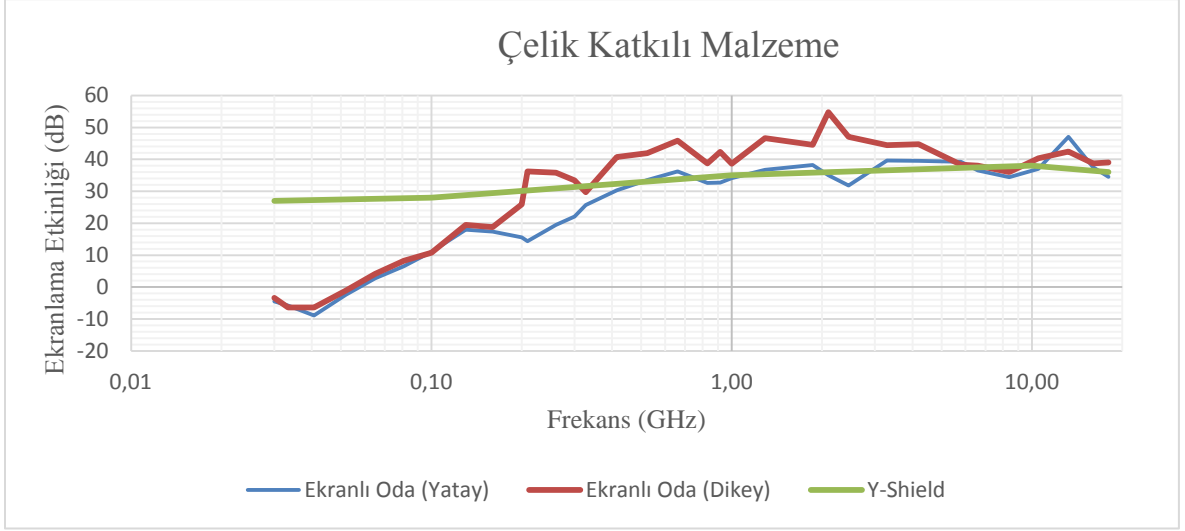
3.2.1.3. Test Sonuçları

Bu bölümde gümüş ve çelik katkı malzemelerin ekranlama etkinliği test sonuçları, antenlerin hem yatay hem de dikey polarizasyonları için gösterilmektedir. Test düzeneği fotoğrafı Şekil 3.16’da gösterilmektedir.

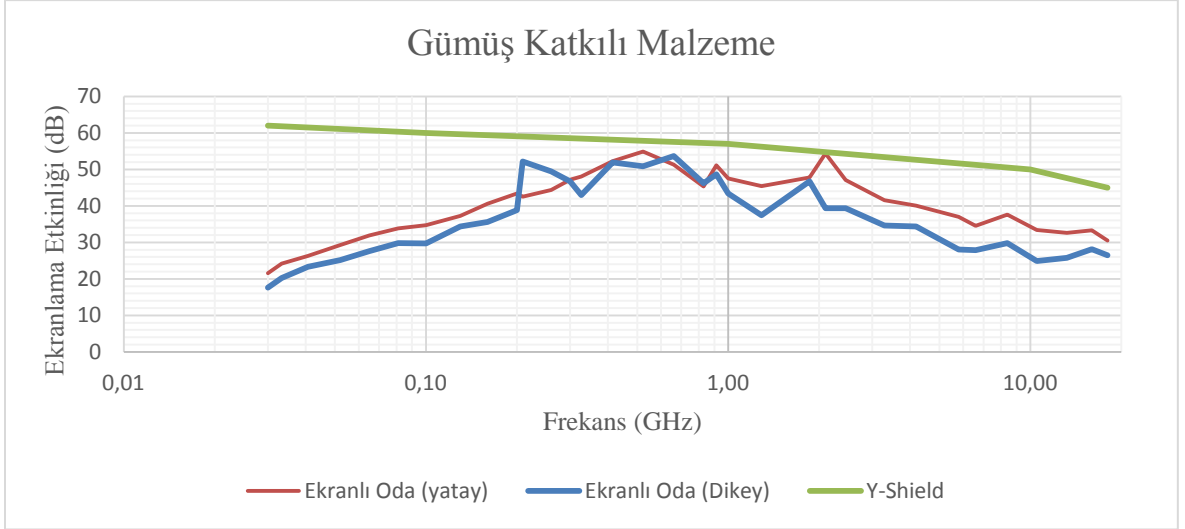


Şekil 3.16 Ekranlı Oda Yöntemi İle Ekranlama Etkinliği Ölçüm Düzeneği

Gümüş ve çelik katkı malzemelerin frekansa karşılık ekranlama etkinlikleri grafikleri Şekil 3.17’de ve Şekil 3.18’de gösterilmektedir. Her iki kumaş malzeme için ekranlı oda yönteminde yatay ve dikey polarizasyonlarda alınan ölçümler ile üretici firmanın ekranlama etkinliği raporundaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ölçüm alınan frekans değerleri IEEE Std-299 standardına göre seçilmiştir.



Şekil 3.17 Çelik Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 3.18 Gümüş Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Laboratuvar koşullarında ekranlı oda yöntemi ile gerçekleştirilen ölçümler yatay ve dikey olmak üzere iki polarizasyonda gerçekleştirilmiştir. Üretici firmanın belirtmiş olduğu EK-1'de ve EK-2'de gösterilen ekranlama etkinliği sonuçları ise ASTM D4935-10 yöntemi ile dairesel polarizasyonda gerçekleştirilmiştir. Çelik katkılı kumaş malzemenin ekranlama etkinliği sonuçlarına göre, yatay polarizasyon ile yapılan ekranlı oda ölçüm sonucu ile üretici firmanın ekranlama etkinliği ölçüm sonucu yaklaşık olarak 300 MHz frekans değerinden 18 GHz frekans değerine kadar oldukça benzerlik göstermektedir. Gümüş katkılı malzemenin ölçüm sonuçlarına göre ise, üretici firmanın ölçüm sonucu belirli bir oranda daha iyi olmak ile birlikte yatay polarizasyon ile yapılan ekranlı oda ölçüm sonucu

ile yaklaşık olarak 300 MHz frekans değerinden 18 GHz frekans değerine kadar benzer eğilim göstermektedir. 30 MHz - 300 MHz frekans aralığında ölçüm sonuçları benzerlik göstermemektedir. İlgili frekans aralığının dalga boyu, antenlerin yönlülüğü ve 3 dB huzme genişliği gibi özelliklerin test odasının panelinin büyüklüğü ve antenler arası mesafe ile uyuşmaması bu durumun nedenleri olarak gösterilebilir.

4. KÜÇÜK BOYUTLARDA TEM HÜCRESİ TASARIMI, HESAPLAMALAR VE ÖLÇÜMLER

4.1. TEM Hücresi Tasarımı

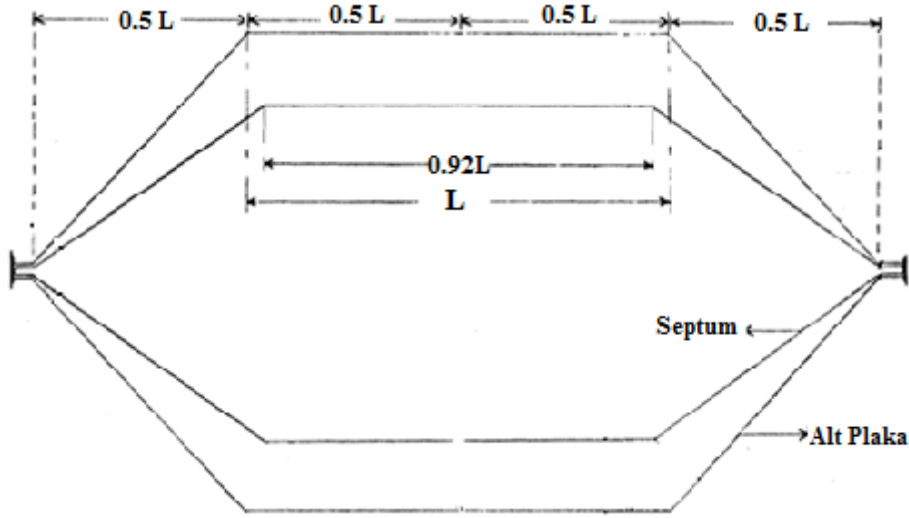
TEM hücresi, TEM modunda elektromanyetik dalgaların ilerlediği genişletilmiş bir iletim hattı kavramı üzerine tasarlanmıştır. TEM hücresinin içerisinde üretilen elektromanyetik dalgalar enine dalgalardır ve düzlem dalga özelliği gösterirler [25]. TEM hücresinde elektromanyetik uyumluluk testleri olan ışınım ile bağışıklık ve ışınım ile yayılım testlerinin, TEM-t hücresinde ve ikili TEM hücresinde ise ekranlama etkinliği testlerinin özellikle küçük ve orta büyüklükteki cihazlar veya ekipmanlar için gerçekleştirilebilmesi, yeterlilik testleri öncesi tasarım doğrulama testlerinin şirket bünyelerinde uygun maliyetlerde uygulanabilmesi açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, elektrik alan sensörleri gibi özel kalibrasyon işlemleri için de kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 Üretilen TEM Hücresi

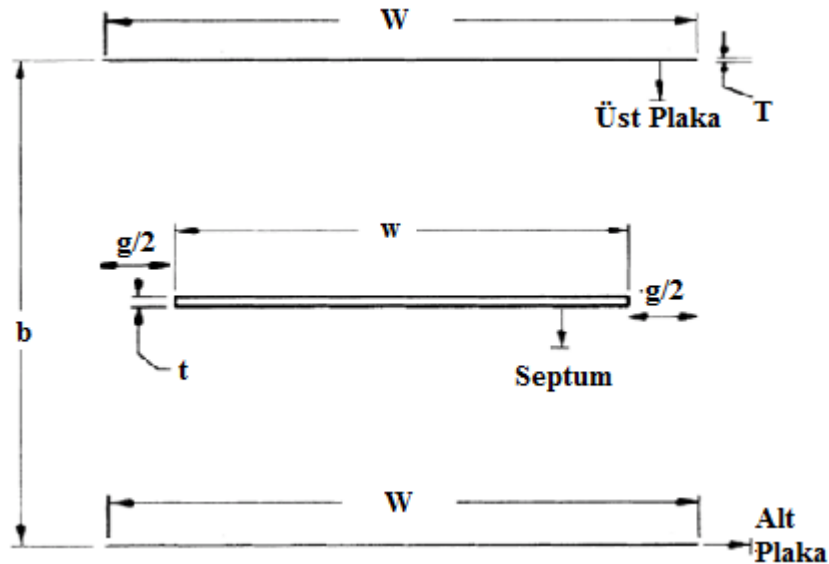
Şekil 4.1’de verilen TEM hücresi, dikdörtgen şeklinde bir iletim hattından oluşur ve bu iletim hattı, standart koaksiyel konektörlere uyum sağlayacak şekilde her iki tarafa doğru sivrileşerek konik bir yapı oluşturur. Bu iletim hattı ve devamındaki sivrileşen konik yapı, uzunluğu boyunca minimum gerilim duran dalga oranı (VSWR) sağlayabilmek adına, 50 Ω değerinde nominal karakteristik empedansa sahiptir [8]. Konik yapı, hücrenin iletim hattı ile eş eksenli konektörler arasında 50 Ω karakteristik empedansa uyumluluk sağlanabilmesi için geçişi sağlamaktadır. Konik kısımlar kademeli olarak iki uca doğru sivrilmeli ve TEM modundaki düzensizliği engellemek için yeterli uzunlukta olmalıdır. Genel olarak konik kısımların toplam uzunluğunun, TEM hücresinin uzunluğunun yarısı olması önerilmektedir [26]. İletim hattı girişine bağlanan bir sinyal kaynağı yardımı ile

TEM hücresi içinde bir elektromanyetik alan oluşturulur. Çıkış portu, hatta uyumlu bir 50Ω empedans ile sonlandırılır.



Şekil 4.2 TEM Hücresi Üstten Görünümü

Bir TEM hücresinin üstten görünümü Şekil 4.2'de, kesiti ise Şekil 4.3'te gösterilmektedir. TEM modunu desteklemek için, test hücresi mutlaka test bölgesi olarak kullanılan iç ve dış iletkenler arasındaki bölgeye sahip iki iletkenli bir sistemden oluşmalıdır. Merkez iletken septum (iç iletken) normalde üst ve alt dış iletkenler arasında ortada olacak şekilde tasarlanır. Elektromanyetik uyumluluk testleri için konumu, daha büyük bir test bölgesine izin verecek şekilde düzenlenebilir [26].



Şekil 4.3 TEM Hücresi Kesit Alanı

Bu bölümde daha sonra ekranlama etkinliği testleri için özelleştirilmiş TEM hücresi tasarımı incelendiği için sadece simetrik olarak yerleştirilmiş iç iletkenlere sahip hücreler anlatılmaktadır. Şekil 4.3'te,

b : üst ve alt paralel plakalar arasındaki mesafe,

W : üst ve alt paralel plakaların genişliği,

w : orta plaka (septum) genişliği,

T : üst ve alt paralel plakaların kalınlığı,

t : septum kalınlığı ve

g : W ile w arasındaki fark

olarak gösterilmiştir.

4.1.1. Tasarım Parametreleri

Yapılan çalışmalar yalnızca TEM modu dalgaların iletildiği frekanslarda eş dağılımlı elektrik alan üretilebildiğini göstermektedir. Bu eş dağılımlı elektrik alanın üretilebildiği TEM modu dalgaların frekans aralığını belirleyen en önemli faktörlerden birisi de TEM hücrenin boyutlarıdır. Bütün bu yaklaşımları dikkate aldığımızda bir TEM hücresi tasarımında,

- kullanılabilir test kesit alanını en üst düzeye çıkarmak,
- üst frekans sınırını en üst düzeye çıkarmak,
- iletim hattı empedans uyumsuzluğunu ve gerilim duran dalga oranı değerini en aza indirmek ve
- elektromanyetik model karakteristiğinin eş dağılım özelliğini en üst düzeye çıkarmak

dikkat edilmesi gereken temel tasarım faktörleridir [8].

4.1.1.1. İletim Hattı Empedansı

Bir dikdörtgen eş eksenli iletim hattının karakteristik empedansı olan Z_0 , iletim hattının birim uzunluğu başına dağıtılmış kapasitans cinsinden ifade edilebilir [26].

$$Z_0 = \frac{\eta_0 \epsilon_0}{C_0} \quad (4.1)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi$, ohm cinsinden boş uzayın ve havanın öz empedansıdır. $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$, metre başına farad cinsinden havanın elektriksel geçirgenliğidir. C_0 'ın belirlenmesinde konformal dönüşüm yardımı ile, Şekil 4.3'teki yapının kapasitansı bilinen daha basit bir konfigürasyona dönüştürülmesi yöntemi kullanılabilir. Septum ile alt ve üst iletken arasındaki simetriden dolayı birim uzunluk başına düşen kapasitans değeri iki katına çıkar. Bu değer, $\frac{b}{W} \leq 1$ olduğu durumda [26],

$$\frac{C_0}{\epsilon_0} = 4 \left(\frac{w}{b} \right) + \frac{8}{\pi} \ln \left(1 + \coth \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right) - \frac{\Delta C}{\epsilon_0} \quad (4.2)$$

olarak ifade edilir. Burada W , b , g ve w metre cinsinden hesaba katılır. İlk terim olan $4 \left(\frac{w}{b} \right)$ septum ile paralel plakalar arasındaki plaka kapasitansdır. Açıklık parametresini (g) içeren ikinci terim, septumun uçlarından kaynaklanan saçılma kapasitansdır. Üçüncü terim olan $\frac{\Delta C}{\epsilon_0}$ ise, uçların birbiri ile etkileşiminden kaynaklanan düzeltme terimidir. Bu terim, $\frac{w}{b} \geq \frac{1}{2}$ olduğu durumda ihmal edilebilmektedir. Bütün bu ifadeler ile birlikte, bir TEM hücrenin hat empedansı deneysel modelleme yaklaşımı ile birlikte,

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b \left(1 - \frac{t}{b} \right)} + 0,0885 \epsilon_r \right]} \quad (4.3)$$

formülü ile ifade edilir [8]. Burada ϵ_r , paralel iletkenler arasında kalan ortamın bağlı dielektrik sabitidir. $C^{f'}$, birim uzunlukta saçılma kapasitansdır (pF/cm). w , b ve t değerleri ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Matematiksel olarak dikdörtgen eş eksenli iletim hattı karakteristik empedansını belirlemek için öncelikle deneysel olarak $C^{f'}$ değerini belirlemek gerekir. $C^{f'}$ değeri zaman bölgesinde reflektometre (TDR) ile ölçülerek belirlenebilir. Bu değer, kare kesit alanı için yaklaşık olarak 0,087 pF/cm ve dikdörtgen kesit alanı için ise yaklaşık olarak 0,053 pF/cm olarak [8] no'lu referansta ölçülmüştür. Bu tezde bu değerler kullanılacaktır. Test edilen malzemenin iletim hattına yerleştirilmesinden kaynaklanan empedans etkisi, VSWR'ı ve elektromanyetik alan homojenliğini bozmayacak miktarda olmalıdır. Bu tasarım kriterine göre test edilen malzeme, elektromanyetik uyumluluk testleri için septum ile dış plakalar arasındaki mesafenin en fazla 1/3'lik kısmını kaplayabilir. Dolayısıyla b boyutu, bu bölümün başında belirtilen tasarım kriterlerine uygun olarak belirlenmelidir. b boyutu ve $C^{f'}$ değeri belirlendikten sonra uygun bir septum kalınlığı (t) değeri seçildiğinde, 52 Ω hat empedansı olduğu varsayılarak w iletim hattı genişliği karakteristik empedans formülünden bulunabilir [8].

4.1.1.2. Yüksek Mertebe Modları, Kesim Frekansı ve Rezonans Frekansı

Bir TEM hücrede TEM moduna ek olarak, yüksek mertebeden TE ve TM modları yayılabilir. Sadece TEM modunun iletilmesi istenildiği için, yüksek mertebe modlar TEM hücrenin frekans aralığını kısıtlar. Yüksek mertebe modları, TEM modunun yayılabildiği üst frekans limitini belirledikleri için önemlidirler. Bu nedenle bu modların bilgisi, TEM

hücrenin yararlı frekans aralığının arttırılmasını sağlayabilir. Yararlı frekans aralığının en üst değeri olan kesim frekansını arttırmanın yöntemlerinden birisi olan TEM hücrenin boyutlarının değiştirilmesinin yanı sıra TEM modunun yayılmasında etkinin en az olduğu yerlere yutucu malzeme yerleştirilerek kesim frekansı değerinin arttırılması sağlanabilir [27]. Genel olarak, herhangi bir yüksek mertebeye için kesim frekansı eşitlik (4.4) ile ifade edilir.

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \quad (4.4)$$

Böylece, bir TEM hücrede ilk yüksek mertebeye olan TE₁₀'ın kesim frekansı,

$$(f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} \quad (4.5)$$

formülüne indirgenir. Bir TEM hücrede düşük frekanslarda yalnızca TEM modunda dalgalar iletilir. Frekans yükseldikçe yüksek mertebeden rezonans modları ortaya çıkar. Belirli bir yüksek mertebeye için kesim frekansı ile ilişkili olan rezonans frekansı,

$$(f_{res})_{TE_{mnp}} = \sqrt{f_{c_{mn}}^2 + \left(\frac{c}{2l_{mn}}\right)^2} \quad (4.6)$$

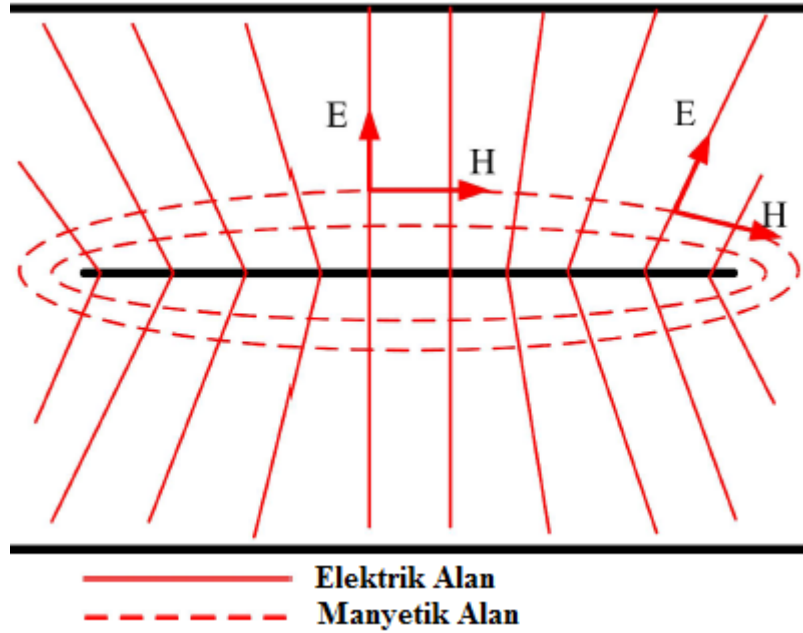
formülü ile gösterilir. Burada c ışık hızı, p rezonans sayısını belirten tam sayı ve l metre cinsinden TEM hücrenin rezonans uzunluğudur. Uçlara doğru sivrileşen konik yapıdan dolayı rezonans uzunluğu tam olarak hesaplanamaz. Deneysel çalışmalarla uyumlu yaklaşık bir değer kullanılabilir. Ayrıca rezonans uzunluğu her mod için ayrı ayrı belirlenmelidir. Teorik olarak kesin bir rezonans frekansı sonucuna varılamaz. Kesin olarak belirlenebilmesi için mutlaka deneysel çalışmalar yapılmalıdır [27].

Yüksek mertebeli TE modunun etkisi rezonans frekansına ulaşmaya kadar önemli olmayabilir. Böylece üst frekans frekans limiti, birinci yüksek mertebeye modun kesme frekansını aşabilir. Ancak, üst frekans limiti bu modun ilişkili rezonans frekansından daha az olmalıdır. Bir diğer durum ise, septum simetrik olarak merkeze yerleştirildiği takdirde boş bir TEM hücrede tek mertebeye modları ortaya çıkmaz. Bu modlar ancak hücrenin içine malzeme yerleştirildiğinde ortaya çıkar [27].

4.1.1.3. Elektrik Alan Dağılımı

Elektrik alan, TEM hücrenin merkezine yakın bölgede dikey olarak polarize edilir ve yatay düzlemde sağ ve sol tarafa doğru ilerledikçe yatay olarak polarize olur. Toplam elektrik alanı belirlemek için her bir noktadaki yatay ve dikey bileşenler hesaba katılır,

$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ formülü ile hesaplanır. Açık bir TEM hücresinin kesit alanından bakıldığında, elektrik ve manyetik alan yönelimleri Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Test bölgesinde elektrik alan büyük çoğunlukta dikey olarak polarize edilir, $E_{dikey} \gg E_{yatay}$ [8].



Şekil 4.4 TEM Hücresi Kesit Alanı - Elektrik Ve Manyetik Alan Yönelimi [28]

TEM hücresinin girişine bağlı bir sinyal jeneratöründen RF gücü hatta gönderildiğinde, paralel plakalar ile merkezi iletken plaka olan septum arasında eş dağılımlı bir elektromanyetik alan oluşturulur [21]. Şekil 4.3'te kesit alanı verilen boş bir TEM hücresinin orta noktasındaki gerilim değeri,

$$V = \sqrt{P_n Z_0} \quad (4.7)$$

olarak tanımlanır. Volt birimindeki bu ifadede P_n , test hücresinin içerisinde akan watt cinsinden net güç değeridir. Z_0 ise, iletim hattının ohm cinsinden karakteristik empedansıdır [26].

Bu durumda, TEM hücresinin orta noktasındaki elektrik alan şiddeti (V/m),

$$E = \frac{V}{d} = \frac{2\sqrt{P_n Z_0}}{b} \quad (4.8)$$

Formülü ile hesaplanır. Burada,

V : septum üzerindeki rms voltaj değeri (V),

d : septum ile paralel üst/alt iletken arasındaki mesafe (m),

b : paralel üst ve alt iletkenler arasındaki mesafe (m),

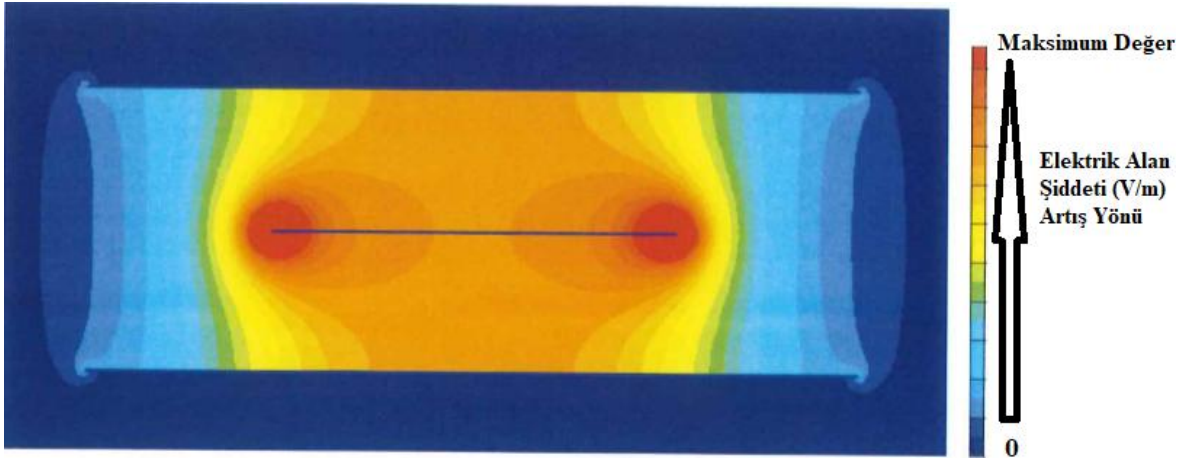
Z_0 : TEM hücresinin karakteristik empedansı (= 50 Ω),

P_n : septum iletkeni üzerinden akan güç değeridir (W).

Pratikte bu formül,

$$E = \frac{2\sqrt{P_n Z_0}}{b} C_E \quad (4.9)$$

olarak ifade edilir. Burada C_E , TEM hücresinin alan dağılımı üzerinden analiz edilen, test edilen cihaza uygulanan ortalama elektrik alan şiddeti için düzeltme faktörü olarak tanımlanır. Bu durumda septum üzerinden akan güç değeri ölçüldüğü takdirde, bilinen b ve C_E değerleri ile elektrik alan şiddeti hesaplanabilir [21].



Şekil 4.5 TEM Hücresi Kesit Alanı - Elektrik Alan Dağılımı [21]

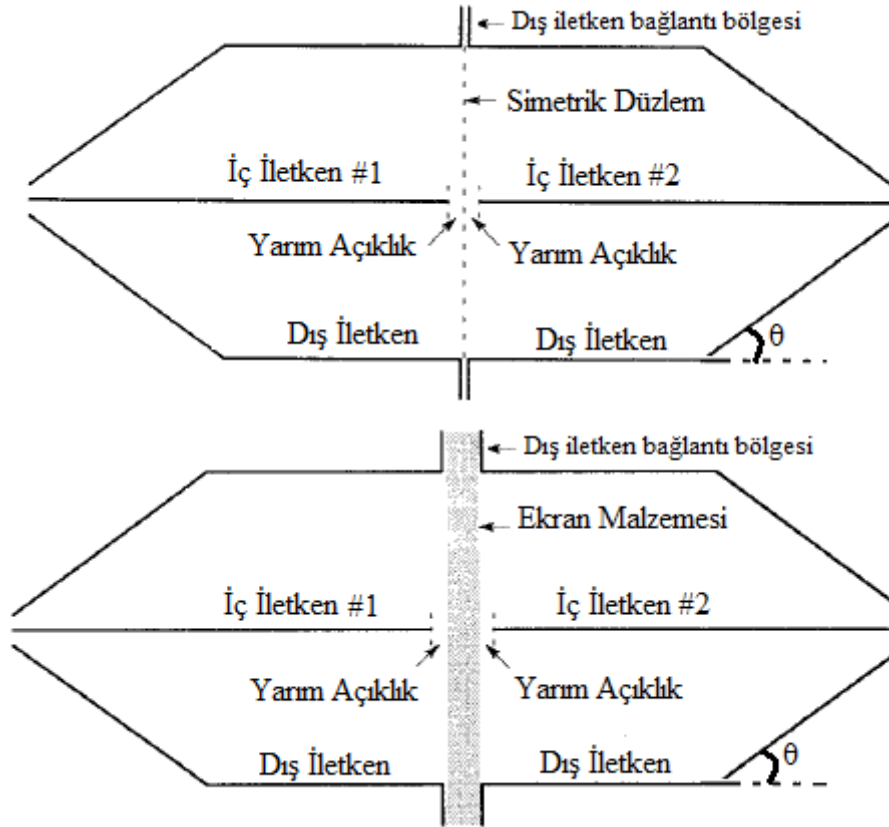
Şekil 4.5'te kesit alanı verilen açık bir TEM hücresinin elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Şeklin sağındaki derecelendirmeye göre, en yüksek elektrik alan şiddetlerine septum boyunca ulaşılır. Alanın TEM hücresi boyunca dağılımı homojendir. TEM hücresinin düz olduğu kısımlarda elektrik alan değişimi oldukça azdır. TEM hücresinin dışına doğru gidildikçe elektrik alan şiddetinde hızla azalma görülmektedir.

4.1.2. TEM-t Hücresi Tasarımı

Bir TEM-t hücresi tasarlanırken, TEM hücresi tasarımı için anlatılan bütün koşullar dikkate alınmalıdır. TEM hücresi tasarımı üzerinde durulan konulara ilave olarak bu bölümde, TEM-t hücresi tasarımı detayları üzerinde durulacaktır. TEM-t hücresinin amacı, boş ve ekran malzemesi ile yüklü olan hücrenin iletim katsayısını ölçerek yaklaşık 1 GHz'e kadar düzlem malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir. Her iki iletim katsayısı arasındaki dB cinsinden farktan, malzemenin araya girme kaybını veya ekranlama kapasitesini belirlemek mümkündür [30]. İletken ekran malzemeleri, iç elektroniğin yaydığı emisyonu sınırlamak ve dışarıdan gelen radyasyona karşı yeterli bağımsızlık sağlamak için ekranlı alanlarda kullanılır. Bu alanların ekranlama etkinliği, malzemesinin iletkenliğine bağlıdır. TEM-t hücresi, iletken malzeme katkılı sentetik malzemeler gibi

düşük ve orta seviye ekranlama etkinliğine sahip ince malzemelerin ölçümleri için oldukça uygundur. Bu tür malzemeler düşük ağırlıkları, tasarım özgürlükleri ve karmaşık şekilli yerlere düşük maliyetle ve kolay montajla adapte edilebilmeleri nedeniyle caziptir [31].

Düzlem malzemelerin ekranlama etkinliğinin karakterizasyonu, bir TEM-t hücreesindeki iletim kaybını ölçerek, tahribatsız bir şekilde geniş bir frekans aralığında belirlenebilir. Boyutları nedeniyle, frekans aralığı sınırlandırılmıştır. Şekil 4.6'da boş ve ekran malzemesi yüklü TEM-t hücrelerinin yandan görünümü gösterilmektedir. Burada θ , sivrilme açısı olarak adlandırılır.



Şekil 4.6 Boş ve Ekran Malzemesi Yüklü TEM-t Hücreleri [31]

TEM-t hücreleri iki eş yarıdan oluşur. Kayıpsız ve tutarlı bir ekranlama etkinliği ölçümü yapılabilmesi için her bir yarı TEM hücreleri,

- Eş eksenli hattan, iç iletken ile birlikte dikdörtgen iletim hattına geçişi sağlayan konik bir yapıya,
- paralel dış iletkenler ve iç iletken ile birlikte dikdörtgen bir kesit alanına,
- dış iletkenlerin bağlantı bölgesinin hizasına gelmeden sonlanan iç iletkene ($< 1\text{mm}$),

- yüksek kapasitif girişim sağlanması için yeterli büyüklükteki dış iletkenlerinin bağlantı yüzeylerine,
- dış iletken bağlantı yüzeyini kapsayan ve iç iletkene temas etmeyen ekran malzemesine,

sahip olmalıdır [22]. İç iletken, ekran malzemesiyle doğrudan temastan kaçınmak için biraz daha kısa bir uzunluğa sahiptir. Bu şekilde temas kapasitif ve malzemenin yüzey iletkenliğinin mevcudiyetine veya yokluğuna bağlı değildir. Dış iletkenlerin bağlantı yüzeyleri hücrenin boş olduğu durumda birbiriyle veya hücrenin ekran malzemesi ile yüklü olduğu durumda malzeme ile temas eder [31].

Bir TEM-t hücresi içerisine ekran malzemesi yüklü olduğu durumda hücrenin her iki parçası arasında herhangi bir temas kurulmamalıdır. Şekil 3.10'daki devre modelini göz önünde bulundurursak, her iki taraf arasında temas olmaması $Z_F = \infty$ olduğu anlamına gelir. Aksi takdirde, kapasitif temas empedansı ekran malzemesinin empedansı olan Z_L ile seri olur ve bu durum araya girme kaybını olumsuz olarak etkiler. Bu etkiyi önlemek için, ekran malzemesini TEM-t hücrene monte ederken plastik vidalar kullanılmalı veya hücrenin her iki parçası için iletken olmayan bir destek kullanılmalıdır. Ayrıca, ekran malzemesinin içinden vida delikleri açıldığında hücrenin her iki bölümü arasında bir temasın oluşabileceği de unutulmamalıdır [32].

Basit devre teorisi kullanılarak, boş ve yüklü hücre koşulları için ölçülen değerlerin basit hesaplamalarının, boş hücrenin iletim karakteristiğinin frekansın bir fonksiyonu olarak düz olduğu zaman doğru olduğu kanıtlanabilir. Boş hücre koşullarında 20 dB /decade bir eğim elde edilen düşük frekanslarda, doğru ekranlama etkinliği değerlerini elde etmek için bir düzeltme uygulanmalıdır [32]. Dolayısıyla, nispeten kalın malzemeler için referans ölçümler alındıktan sonra bir düzeltme faktörü uygulanarak ölçümler gerçekleştirilir.

İletken plastik ekran malzemeler yüzey seviyelerinde iletkenliğe sahip olursa, bu durum malzemenin mükemmel bir yalıtıcı olmadığı aynı zamanda oldukça iletken bir yüzeye sahip olmadığı anlamına da gelir. Normal olarak, TEM-t hücrenin bir tarafındaki iç iletken diğer tarafındaki iç iletkene bir kapasitif bağlantı mekanizması meydana gelmesi beklenmelidir. Yüzeyde iletkenliğin meydana geldiği durum devreye Z_L 'ye paralel iki direnç olan R_1 ve R_2 eklenerek modellenebilir. Yüzeyden hücrenin gövdesine olan kapasitif bağlantı neredeyse değişmeden kalır [32]. Belirtilen bu temas probleminden kaçınmak için, iç iletken ile ekran malzemesi herhangi bir temasta bulunmamalıdır. Dış iletkenlerin bağlantı bölgesinin hizasına gelmeden sonlanan iç iletkenler ile temas problemini ortadan kaldırmak mümkündür [32].

4.2. Hesaplamalar ve Vektör Ağ Analizörü ile Ölçümler

Bu çalışmada, TEM hücresi tasarım parametreleri belirlenirken daha önce yapılan çalışmalarda belirlenen boyutlardan yola çıkılmıştır. Çizelge 4.1’de ve Çizelge 4.2’de kare ve dikdörtgen kesit alanları için üst frekans limitlerine karşılık gelen TEM hücresi boyutları verilmiştir. Bu boyutlardan yola çıkarak yüksek kesim frekansları için hesaplamaların yanı sıra tasarım parametreleri de dikkate alınarak üretilen TEM hücrelerinin ve TEM-t hücrelerinin parametreleri ortaya çıkarılmıştır.

Çizelge 4.1 Kesim Frekansına Karşılık Kare Kesit Alanlı TEM Hücresi Boyutları [8]

KARE KESİT ALANLI TEM HÜCRESİ				
	Boyutlar			
Kesim Frekansı (MHz)	b (cm)	w (cm)	t (cm)	$C^{f'}$ (Pf/cm)
100	150	123.83	0.157	0.087
300	50	41.28	0.157	0.087
500	30	24.77	0.157	0.087

Çizelge 4.2 Kesim Frekansına Karşılık Dikdörtgen Kesit Alanlı TEM Hücresi Boyutları [8]

DİKDÖRTGEN KESİT ALANLI TEM HÜCRESİ				
	Boyutlar			
Kesim Frekansı (MHz)	b (cm)	w (cm)	t (cm)	$C^{f'}$ (Pf/cm)
100	150	123.83	0.157	0.053
300	50	41.28	0.157	0.053
500	30	24.77	0.157	0.053

Bu çizelgelerdeki boyutlar Şekil 4.3’te gösterilmektedir. $C^{f'}$ değeri ise deneysel olarak ölçülerek belirlenmiş bir değerdir. Çizelge 4.1’deki kare kesit alanlı TEM hücresi boyutları için iletim hattı hesaplaması ve kesim frekansı sağlaması yaptığımızda,

- $(f_c)_{1,0} = 100 \text{ MHz}$ için:

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b \left(1 - \frac{t}{b}\right)} + \frac{C^{f'}}{0,0885 \epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{123,83}{150 \left(1 - \frac{0,157}{150}\right)} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 52,04 \Omega \quad (4.10)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c \sqrt{(b^2 m^2 + W^2 n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 100 \text{ MHz} \quad (4.11)$$

- $(f_c)_{1,0} = 300 \text{ MHz}$ için:

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b \left(1 - \frac{t}{b}\right)} + \frac{C^{f'}}{0,0885 \epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{41,28}{50 \left(1 - \frac{0,157}{50}\right)} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 51,98 \Omega \quad (4.12)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 300 \text{ MHz} \quad (4.13)$$

- $(f_c)_{1,0} = 500 \text{ MHz}$ için:

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{Cf'}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{24,77}{30(1-\frac{0,157}{30})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 51,93 \Omega \quad (4.14)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 500 \text{ MHz} \quad (4.15)$$

sonuçlarına ulaşılır. Bu hesaplamalar, 1 GHz, 2 GHz, 3 GHz, 5 GHz ve 10 GHz yüksek kesim frekansları için genişletildiğinde,

- $b = W = 15 \text{ cm}$, $w = 12,38 \text{ cm}$, $t = 0,157 \text{ cm}$, $Cf' = 0.087 \text{ pF/cm}$

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{Cf'}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{12,38}{15(1-\frac{0,157}{15})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 51,81 \Omega \quad (4.16)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 1 \text{ GHz} \quad (4.17)$$

- $b = W = 7,5 \text{ cm}$, $w = 6,19 \text{ cm}$, $t = 0,157 \text{ cm}$, $Cf' = 0.087 \text{ pF/cm}$

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{Cf'}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{6,19}{7,5(1-\frac{0,157}{7,5})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 51,56 \Omega \quad (4.18)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 2 \text{ GHz} \quad (4.19)$$

- $b = W = 5 \text{ cm}$, $w = 4,127 \text{ cm}$, $t = 0,157 \text{ cm}$, $Cf' = 0.087 \text{ pF/cm}$

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{Cf'}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{4,127}{5(1-\frac{0,157}{5})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 51,30 \Omega \quad (4.20)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 3 \text{ GHz} \quad (4.21)$$

- $b = W = 3 \text{ cm}$, $w = 2,48 \text{ cm}$, $t = 0,157 \text{ cm}$, $C^{f'} = 0.087 \text{ pF/cm}$

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{C^{f'}}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{2,48}{3(1-\frac{0,157}{3})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 50,75 \Omega \quad (4.22)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 5 \text{ GHz} \quad (4.23)$$

- $b = W = 1,5 \text{ cm}$, $w = 1,24 \text{ cm}$, $t = 0,157 \text{ cm}$, $C^{f'} = 0.087 \text{ pF/cm}$

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{C^{f'}}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{1,24}{1,5(1-\frac{0,157}{1,5})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 49,39 \Omega \quad (4.24)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 10 \text{ GHz} \quad (4.25)$$

sonuçlarına ulaşılır. Sonuçlar incelendiğinde, beklendiği gibi yüksek kesim frekanslarına çıktıkça TEM hücresi boyutlarının küçüldüğü görülmektedir. Boyutlar ve kolay üretilebilirlik dikkate alındığında optimum çözüm olarak, boyutları ve özellikleri Çizelge 4.3'te verilen 2 GHz kesim frekansına sahip TEM ve TEM-t hücrelerinin üretilmesine karar verilmiştir.

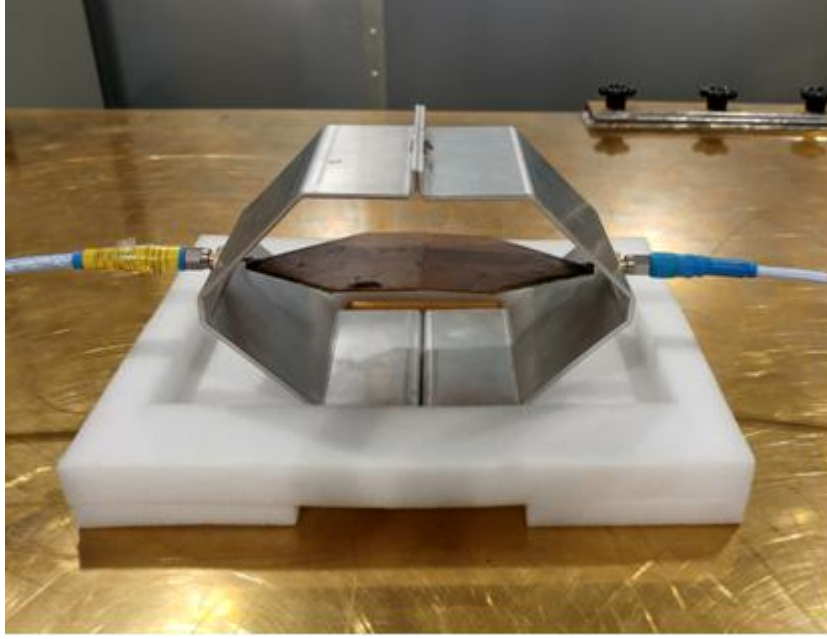
Çizelge 4.3 Üretilen Kare Kesit Alanlı TEM-t Hücresi Özellikleri

ÜRETİLEN KARE KESİT ALANLI TEM-t HÜCRESİ					
Kesim Frekansı (GHz)	Boyutlar				
	b (cm)	w (cm)	t (cm)	$C^{f'}$ (Pf/cm)	Sivrilme Açısı (derece)
2	7.5	6.19	0.100	0.087	45

- $b = W = 7,5 \text{ cm}$, $w = 6,19 \text{ cm}$, $t = 0,100 \text{ cm}$, $C^{f'} = 0.087 \text{ pF/cm}$

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{C^{f'}}{0,0885\epsilon_r} \right]} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1} \left[\frac{6,19}{7,5(1-\frac{0,100}{7,5})} + \frac{0,087}{0,0885} \right]} = 51,74 \Omega \quad (4.26)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 2 \text{ GHz} \quad (4.27)$$

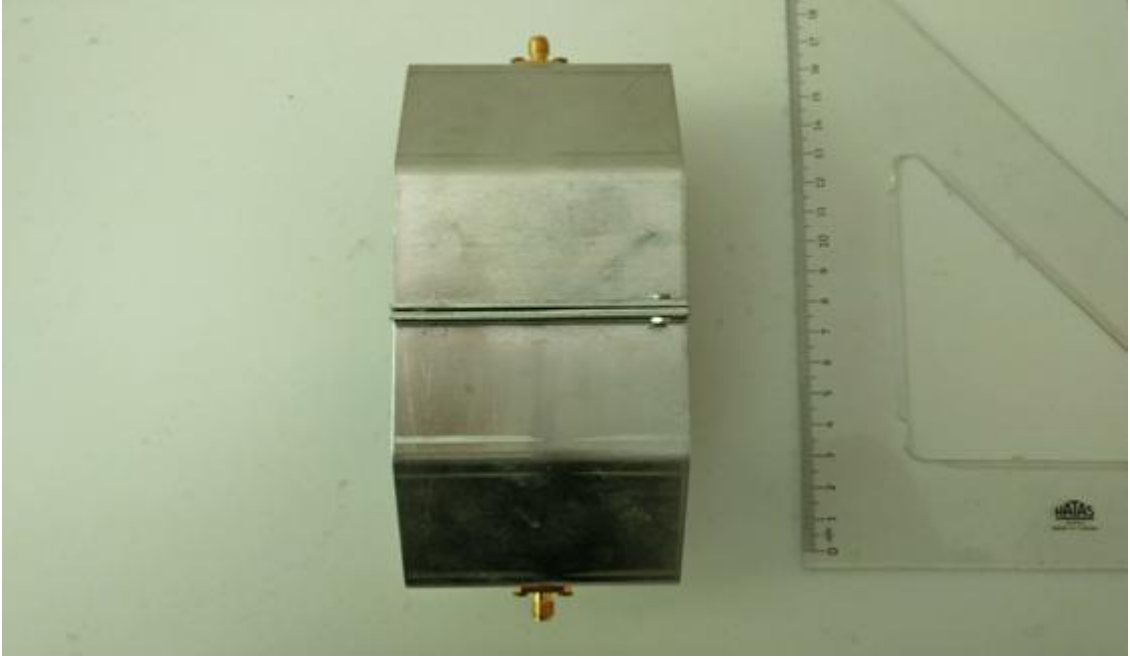


Şekil 4.7 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi

Çizelge 4.4'te kare kesit alanına ve 45 derece sivrilme açısına sahip TEM-t ve TEM hücrelerinin üretiminde kullanılan malzeme çeşitleri gösterilmektedir.

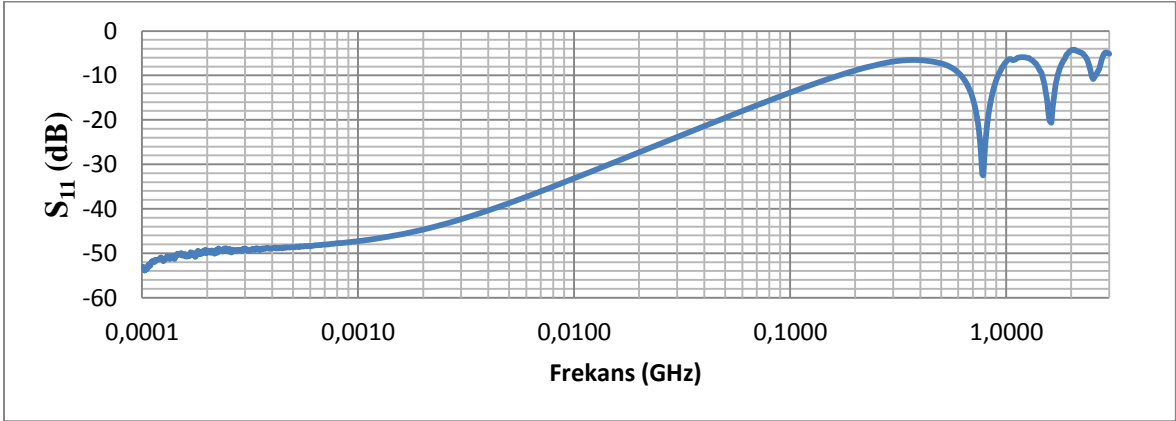
Çizelge 4.4 Kullanılan Malzeme Çeşitleri

Tanım	Malzeme Özelliği
Üst ve Alt Plaka	Alüminyum
Septum (Orta Plaka)	Bakır
Vida	Plastik
Konektör	SMA

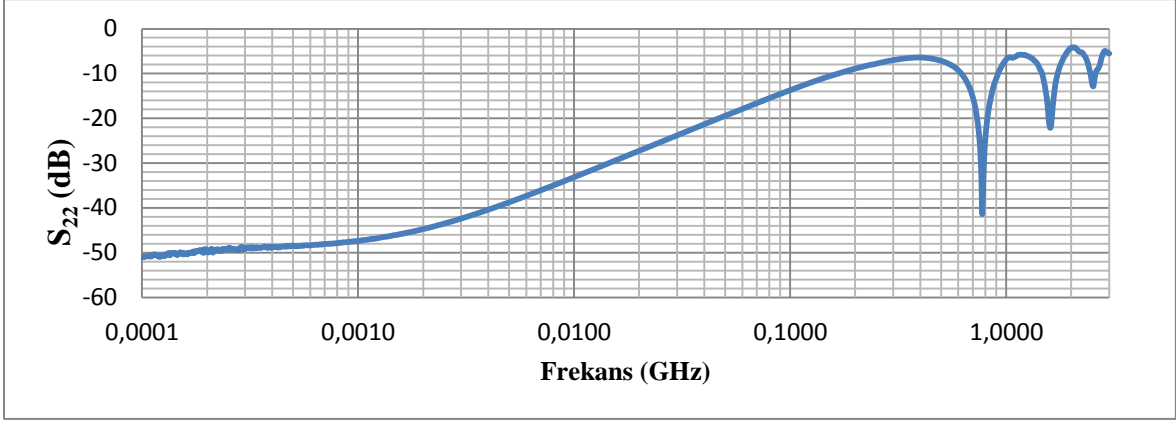


Şekil 4.8 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresinin Üstten Görünümü

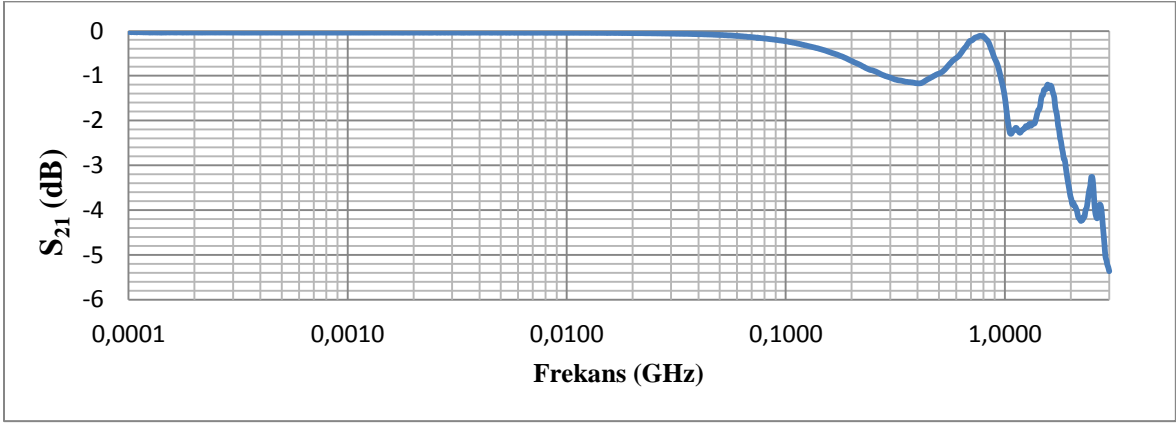
Şekil 4.7’de ve Şekil 4.8’de kare kesit alanına ve 45 derece sivrilme açısına sahip ilk üretilen TEM-t hücresi gösterilmektedir. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümlerde boş TEM-t hücresinin S parametreleri olan iletim ve yansımaya katsayıları ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4.9 ile Şekil 4.12 arasında gösterilmektedir.



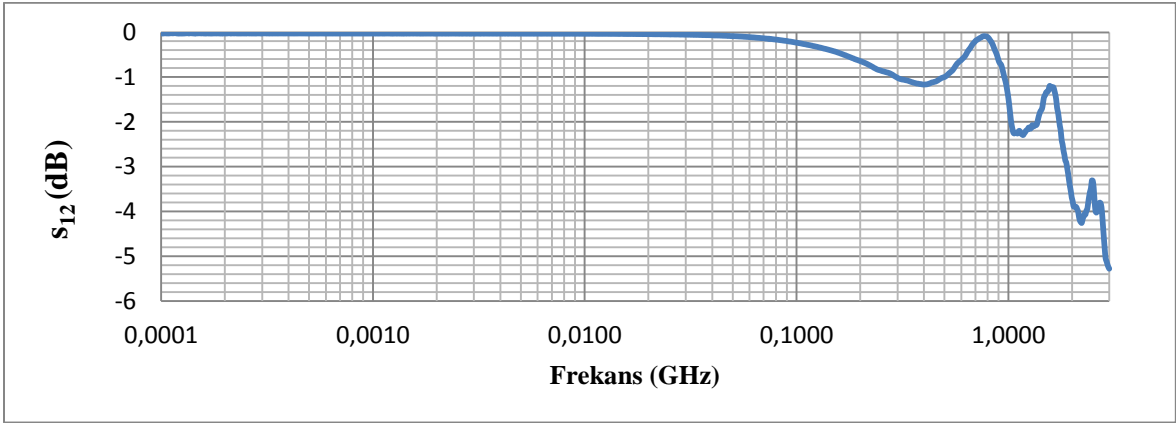
Şekil 4.9 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S₁₁



Şekil 4.10 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S_{22}

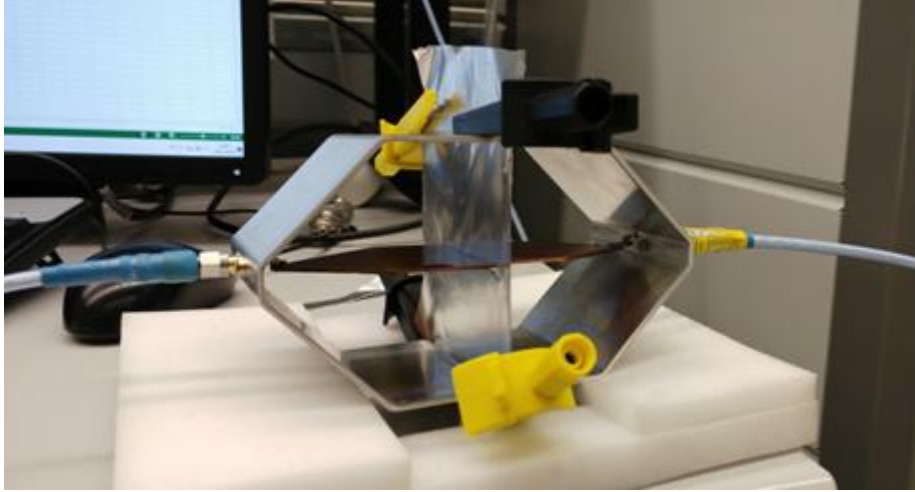


Şekil 4.11 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S_{21}



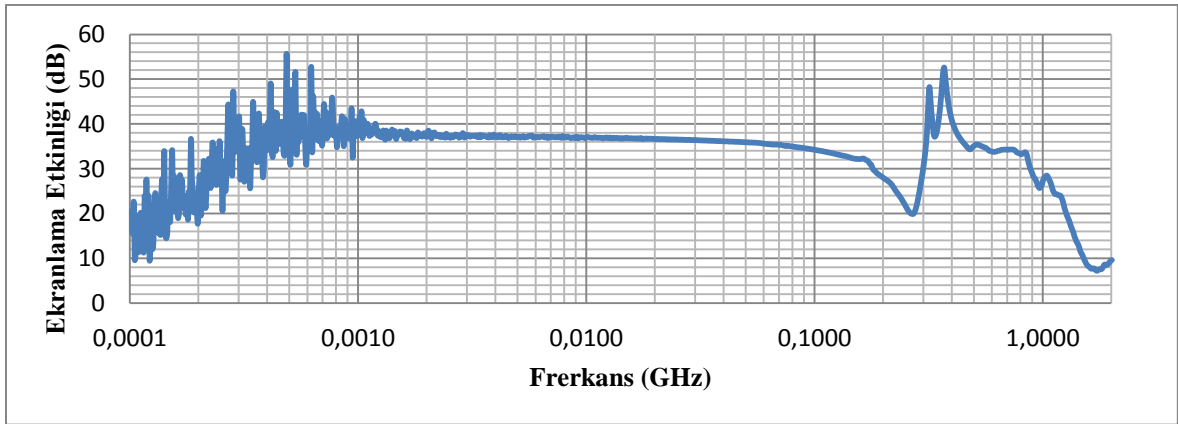
Şekil 4.12 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi, S_{12}

Bu ölçümlerden S_{21} veya S_{12} , TEM-t hücresi ile yapılan ekranlama etkinliği ölçümleri için referans ölçümler olarak düşünülebilir. Bu referans ölçümlerden yola çıkarak çeşitli malzemelerin ekranlama etkinlikleri vektör ağ analizörü yardımı ile ölçülmüştür. Bu ölçümlerin test düzeneğinde kullanılan, ekran malzemesi ile yüklü TEM-t hücresi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

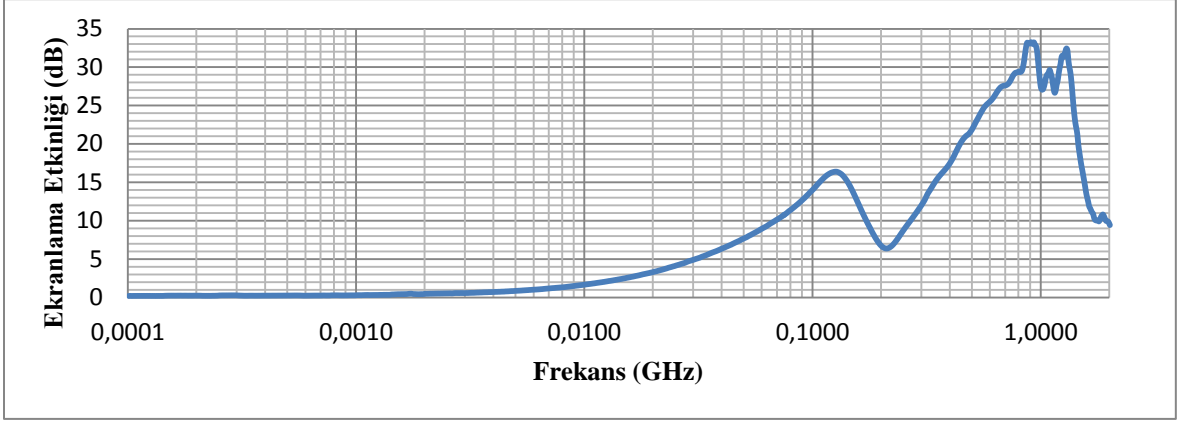


Şekil 4.13 Ekran Malzemesi İle Yüklü TEM-t Hücresi

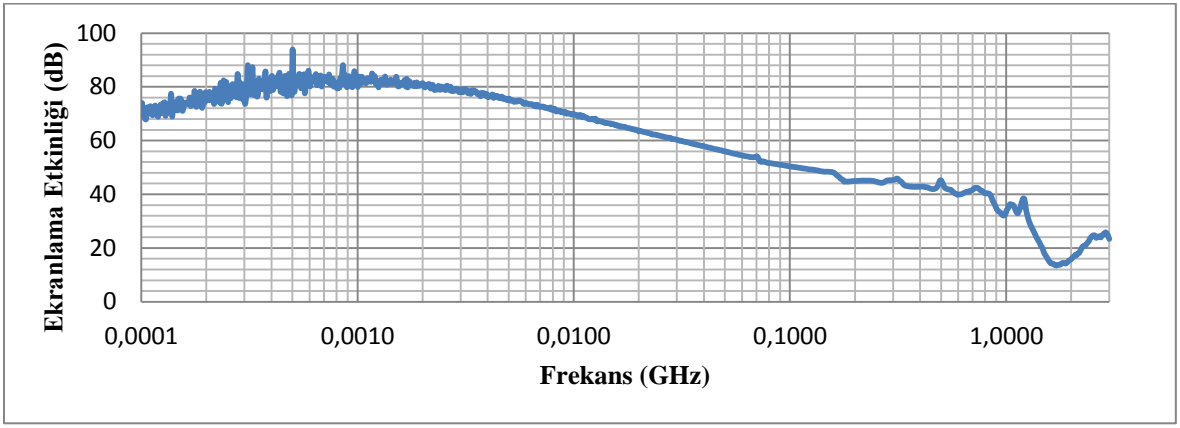
Burada yalıtkan vidalar yerine iletken kısımları elektrik bantları ile kapatılmış timsah kablo uçları TEM-t hücresinin iki yarısını ve ekran malzemesini tutturmak için kullanılmıştır. Bu yöntem ile çeşitli düzlem malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler alüminyum folyo ile gümüş, çelik ve nikel katkılı kumaş malzemelerdir. Bu malzemelerin özellikleri EK-1, EK-2, EK-3 ve [35] numaralı referans kaynakta belirtilmiştir. Ayrıca yapılan araştırmalara göre, alüminyum folyonun 100 MHz frekans değerinden önce 75 dB'den fazla, 100 MHz'den sonra ise 75 dB'den az ekranlama kapasitesi olduğu görülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 4.14 ile Şekil 4.17 arasında gösterilmiştir.



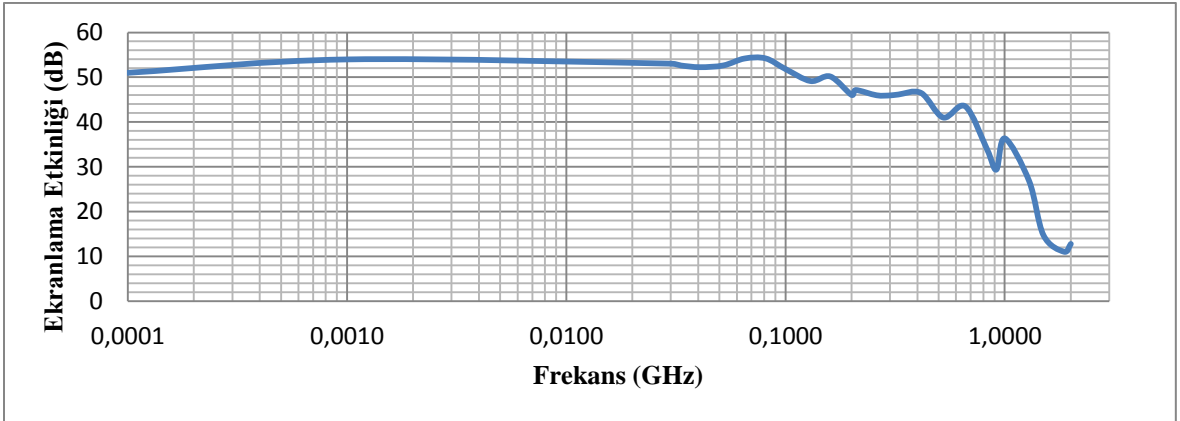
Şekil 4.14 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^\circ$) - Gümüş Katkılı Kumaş Malzeme



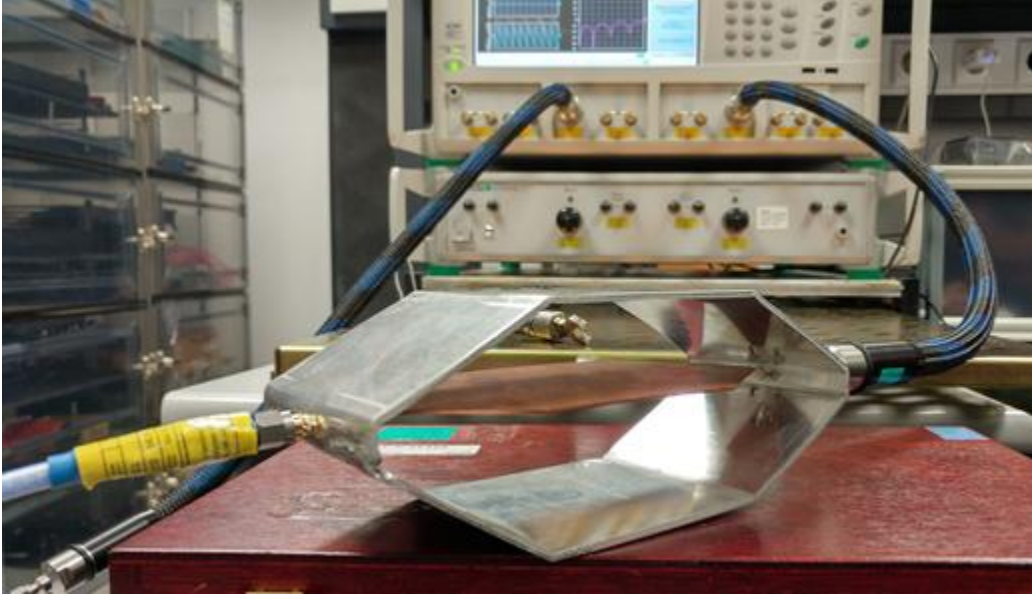
Şekil 4.15 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Çelik Katkılı Kumaş Malzeme



Şekil 4.16 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Alüminyum Folyo

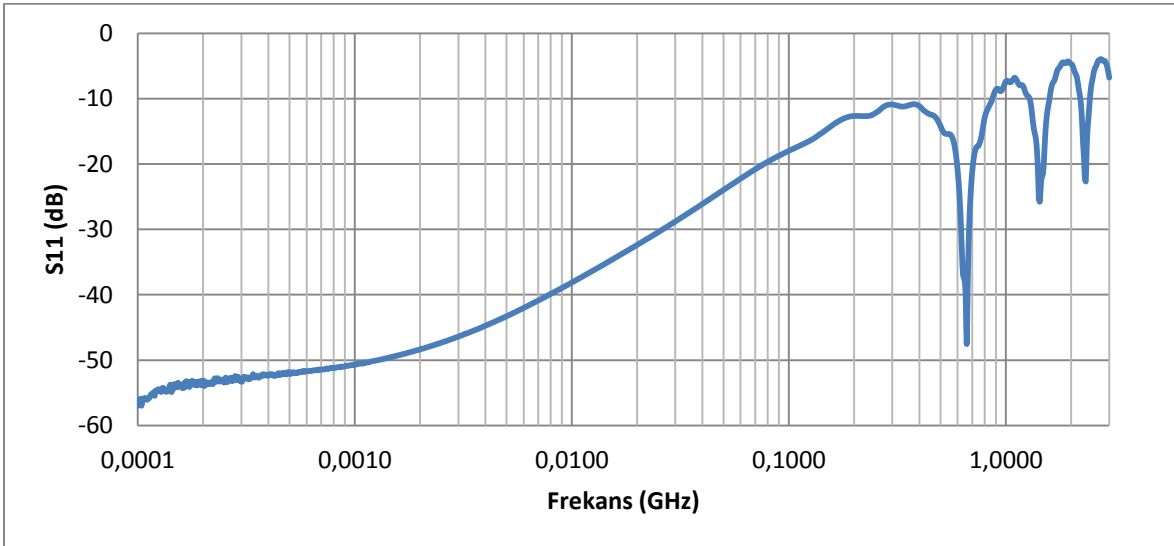


Şekil 4.17 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=45^0$) - Nikel Katkılı Kumaş Malzeme

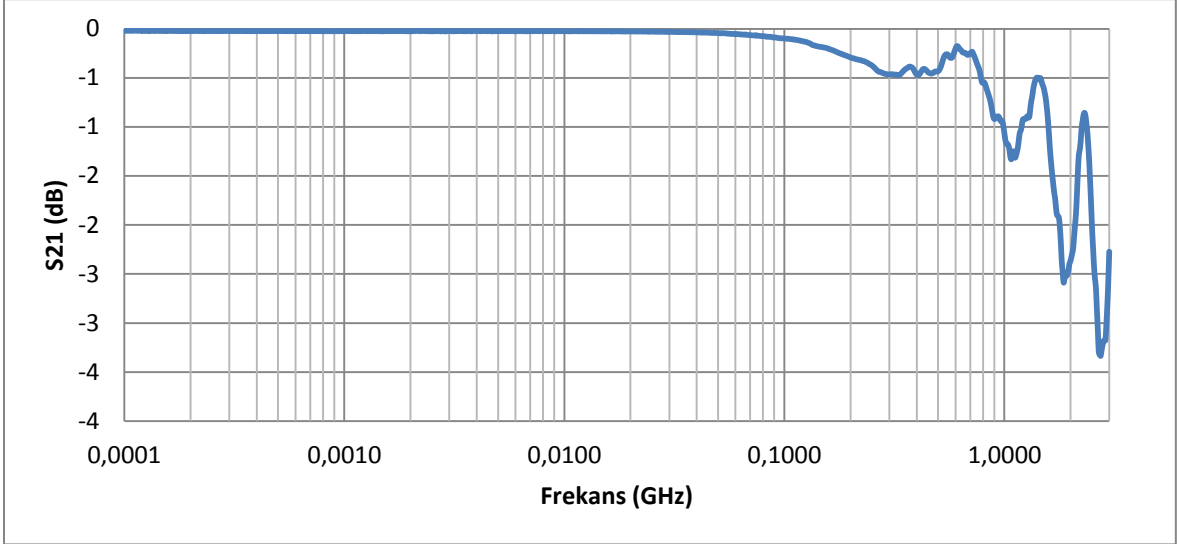


Şekil 4.18 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi

Şekil 4.3'teki kesit alanına uygun şekilde Çizelge 4.3'te boyutları verilen TEM-t hücresi ile aynı özelliklere sahip bir TEM hücresi üretilerek her iki hücrenin S parametreleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.18'de kare kesit alanına ve 45 derece sivrilme açısına sahip TEM hücresi gösterilmektedir. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümlerde boş TEM hücresinin S parametreleri olan iletim ve yansımaya katsayıları ölçülmüştür. S parametrelerini gösteren grafikler Şekil 4.19'da ve Şekil 4.20'de gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi, S₁₁



Şekil 4.20 Kare Kesit Alanına ve 45 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi, S_{21}

Boş TEM ve TEM-t hücrelerinin S parametrelerinin grafikleri incelendiğinde, değerler birbirlerine çok yakın bulunmuştur. Ancak yapılan teorik hesaplamalarla örtüşmediği görülmektedir. Çizelge 4.3'te verilen boyutlara göre yapılan teorik hesaplamalar sonucunda kesim frekansı 2 GHz olması gerekirken ölçülen kesim frekansları 1 GHz frekans değerinin altında kalmıştır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, sivrilme açısının 30 dereceden küçük olduğu durumda ($\theta \leq 30^\circ$), uzak alan yaklaşımı gerçekleşmekte ve çoklu mod etkileri kesim frekansından önce ortaya çıkmamaktadır [33]-[34]. Bütün bu sonuçlardan yola çıkarak dikdörtgen kesit alanına ve 30 derece sivrilme açısına sahip TEM ve TEM-t hücreleri tasarlanmıştır.

Çizelge 4.5 Üretilen Dikdörtgen Kesit Alanlı TEM-t Hücresi Özellikleri

ÜRETİLEN DİKDÖRTGEN KESİT ALANLI TEM-t HÜCRESİ					
			Boyutlar		
Kesim Frekansı (GHz)	b (cm)	w (cm)	t (cm)	Cf' (Pf/cm)	Sivrilme Açısı (derece)
2	5.33	6.19	0.100	0.053	30

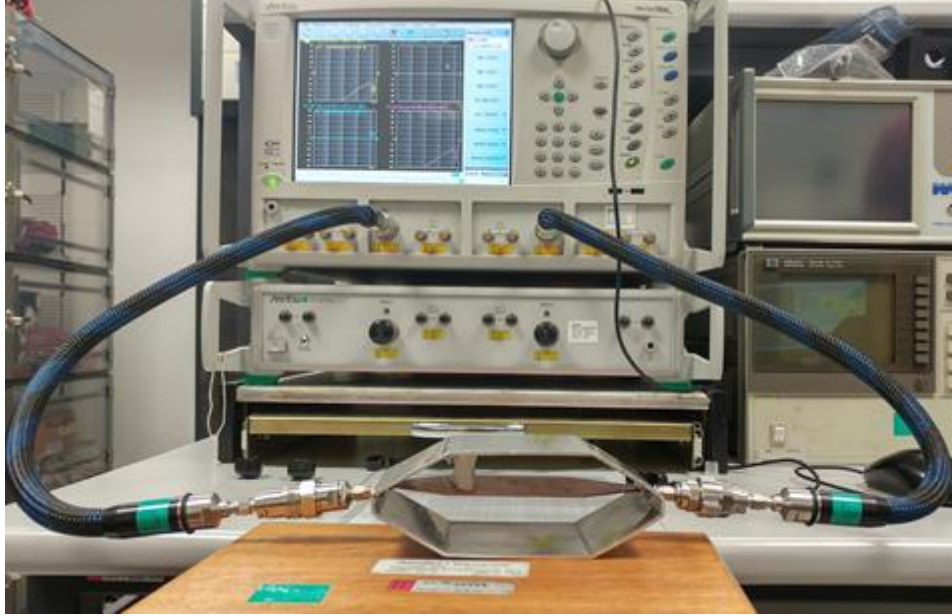
Verilen boyutlara göre iletim hattı empedansı ve kesim frekansı hesaplamaları yapıldığında,

- $b = 5,33 \text{ cm}$, $W = 7,5 \text{ cm}$, $w = 6,19 \text{ cm}$, $t = 0,100 \text{ cm}$, $Cf' = 0,087 \text{ pF/cm}$

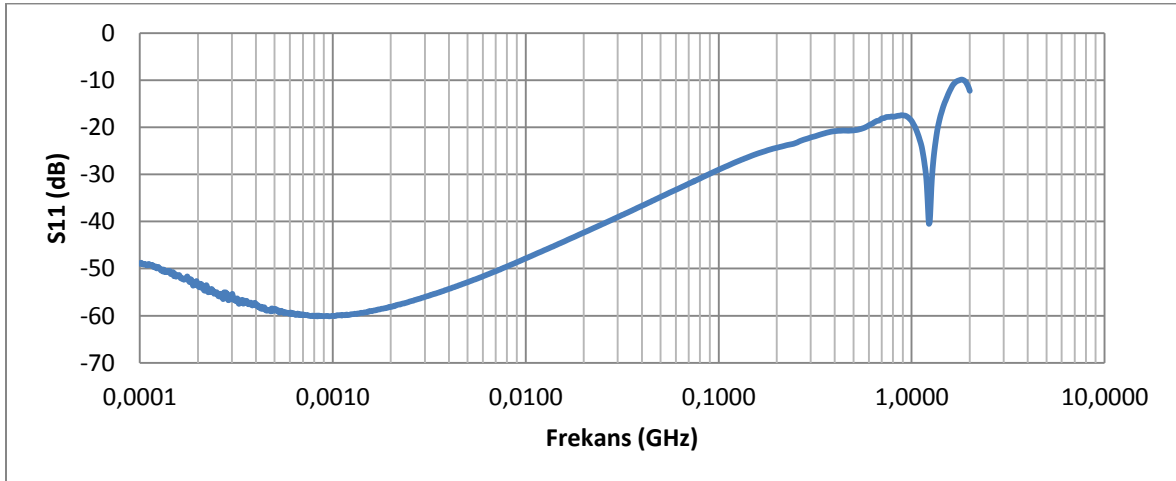
$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_r \left[\frac{w}{b \left(1 - \frac{t}{b}\right)} + 0,0885 \epsilon_r \right]}} \rightarrow Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{1 \left[\frac{12,38}{5,33 \left(1 - \frac{0,100}{5,33}\right)} + 0,0885 \right]}} = 52,82 \Omega \quad (4.28)$$

$$(f_c)_{m,n} = \frac{c\sqrt{(b^2m^2+W^2n^2)}}{2bW} \rightarrow (f_c)_{1,0} = \frac{c}{2W} = 2 \text{ GHz} \quad (4.29)$$

sonuçları elde edilir. Çizelge 4.5'teki boyutlara uygun üretilen TEM hücresinin ölçüm düzeneği Şekil 4.21'de gösterilmektedir.

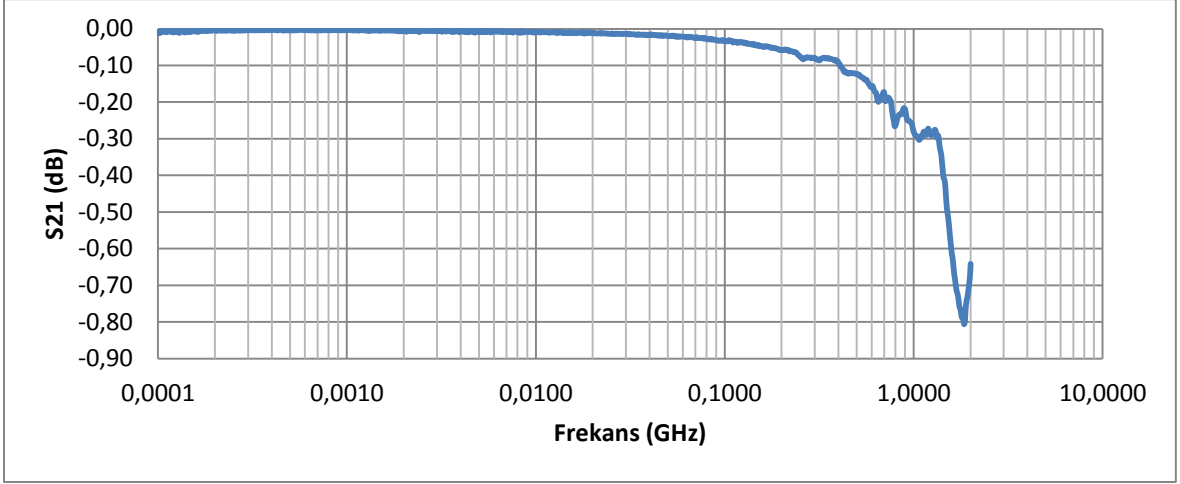


Şekil 4.21 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümlerde boş TEM hücresinin S parametreleri olan iletim ve yansımaya katsayıları ölçülmüştür. S parametrelerini gösteren grafikler Şekil 4.22'de ve Şekil 4.23'te gösterilmektedir.



Şekil 4.22 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi,

S₁₁



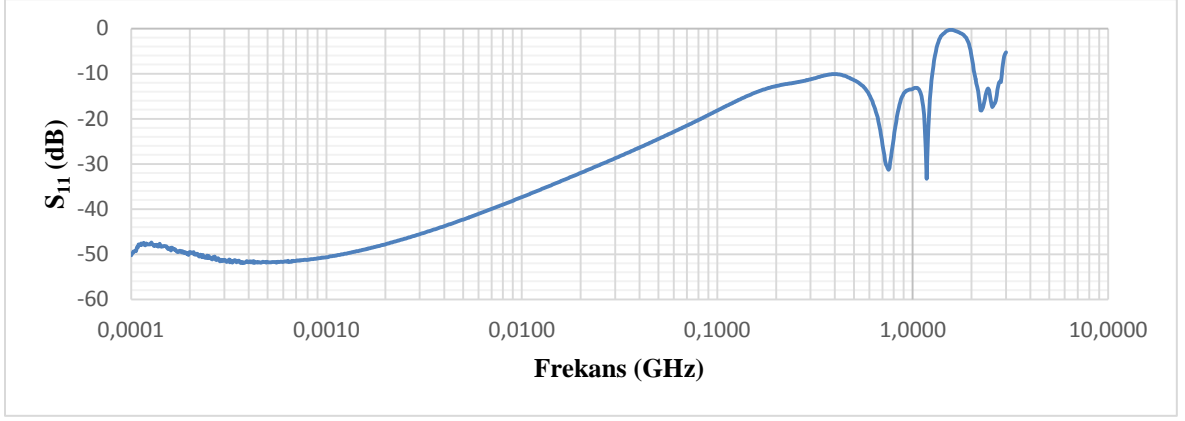
Şekil 4.23 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM Hücresi,
 S_{21}

S parametreleri grafikleri incelendiğinde, yapılan teorik hesaplamalarla örtüştüğü ve 2 GHz kesim frekansı değerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu sonuç ile birlikte, Çizelge 4.5'teki boyutlara uygun TEM-t hücresi tasarlanmıştır.

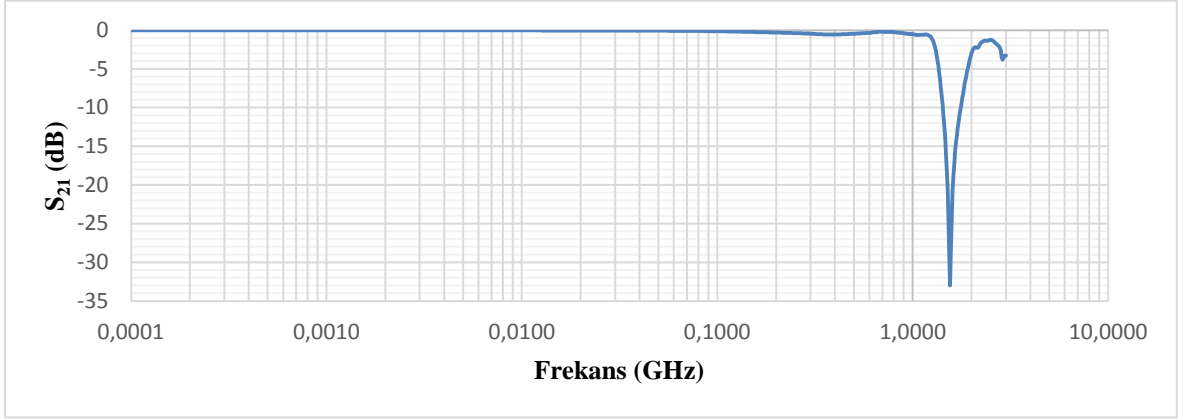


Şekil 4.24 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi

Şekil 4.24'te dikdörtgen kesit alanına ve 30 derece sivrilme açısına sahip TEM-t hücresi gösterilmektedir. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümlerde, boş TEM-t hücresinin iletim ve yansımaya parametreleri olan S_{11} ve S_{21} parametreleri ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4.25'te ve Şekil 4.26'da gösterilmektedir.

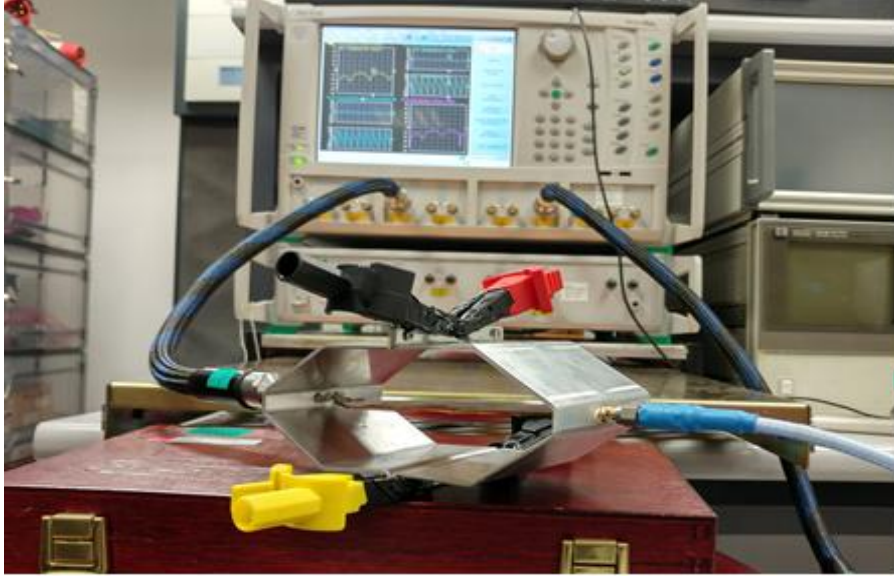


Şekil 4.25 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi,
 S_{11}



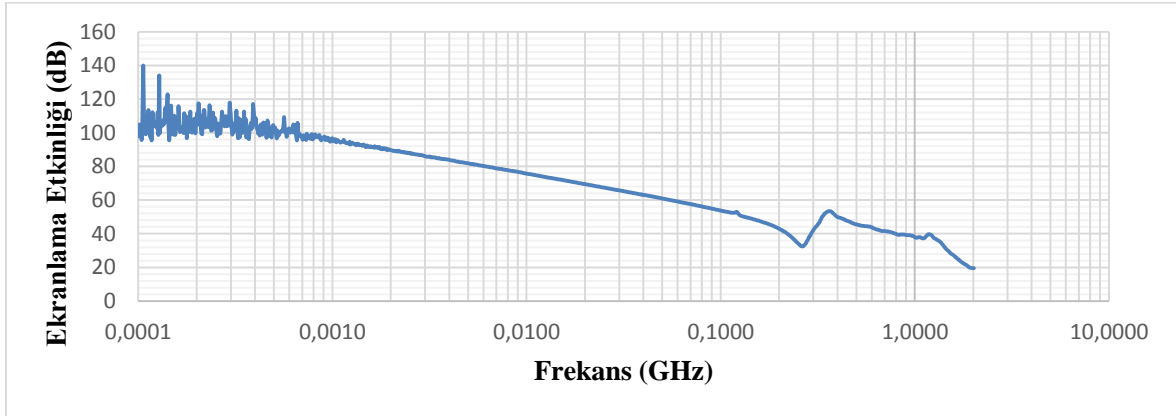
Şekil 4.26 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi,
 S_{21}

Bu referans ölçümlerden yola çıkarak çeşitli malzemelerin ekranlama etkinlikleri vektör ağ analizörü yardımı ile ölçülmüştür. Test düzeneği Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

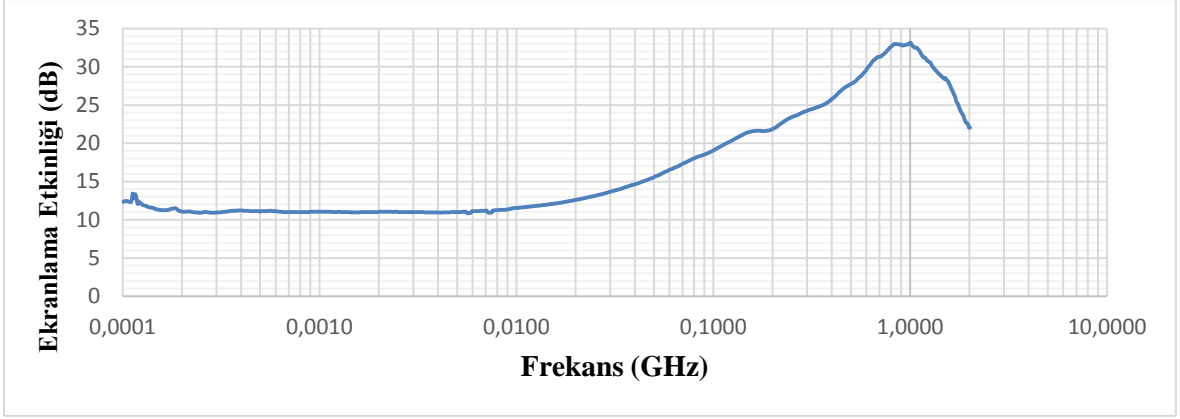


Şekil 4.27 Dikdörtgen Kesit Alanına ve 30 Derece Sivrilme Açısına Sahip TEM-t Hücresi
İle Ekranlama Etkinliği Test Düzeneği

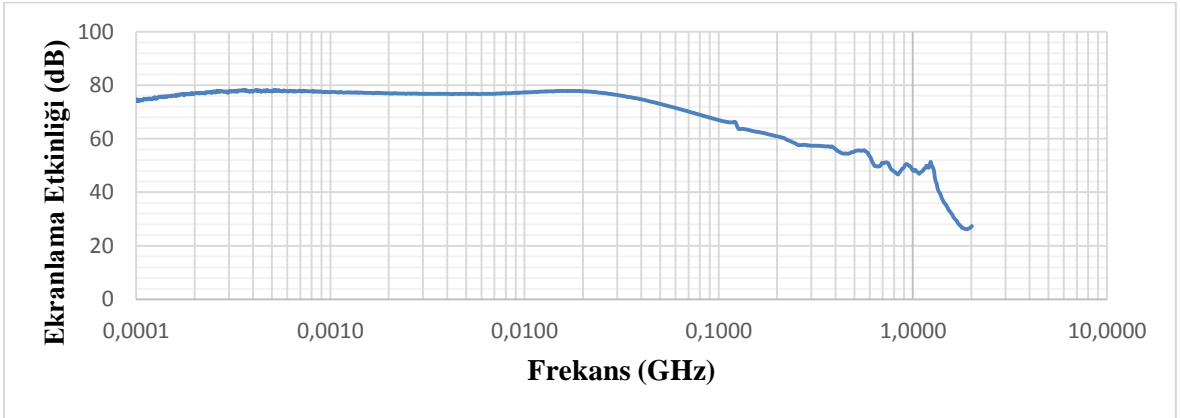
Ekranlama etkinliği ölçümlerinde kullanılan ekran malzemeleri, daha önce yapılan ölçümlerde olduğu gibi alüminyum folyo ile gümüş, çelik ve nikel katkılı kumaş malzemelerdir. Test düzeneğinde, yalıtkan vidalar yerine iletken kısımları elektrik bantları ile kapatılmış timsah kablo uçları TEM-t hücresinin iki yarısını ve ekran malzemesini tutturmak için kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4.28 ile Şekil 4.31 arasında gösterilmiştir.



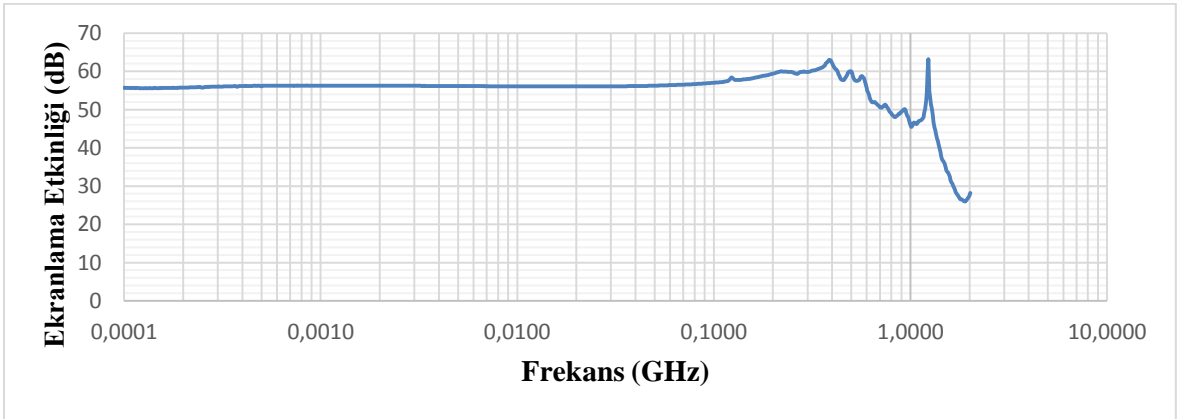
Şekil 4.28 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği($\theta=30^\circ$) - Gümüş Katkılı Kumaş Malzeme



Şekil 4.29 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=30^0$) - Çelik Katkılı Kumaş Malzeme



Şekil 4.30 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=30^0$) - Alüminyum Folyo



Şekil 4.31 Frekansa Karşılık Ekranlama Etkinliği ($\theta=30^0$) - Nikel Katkılı Kumaş Malzeme

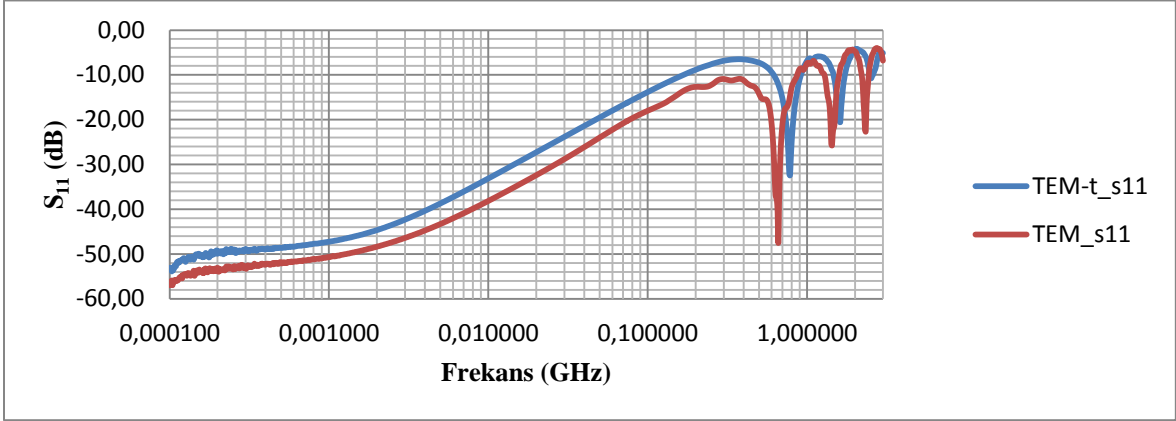
4.3. Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında, kare kesit alanına ve 45 derece sivrilme açısına sahip TEM ve TEM-t hücreleri ile dikdörtgen kesit alanına ve 30 derece sivrilme açısına sahip TEM ve TEM-t hücreleri üretilmiştir. Vektör ağ analizörü yardımı ile TEM hücrelerinin S parametreleri, çeşitli düzlem malzemelerin ise ekranlama etkinlikleri analiz edilmiştir. Bu malzemeler alüminyum folyo ile gümüş, çelik ve nikel katkılı kumaş malzemelerdir.

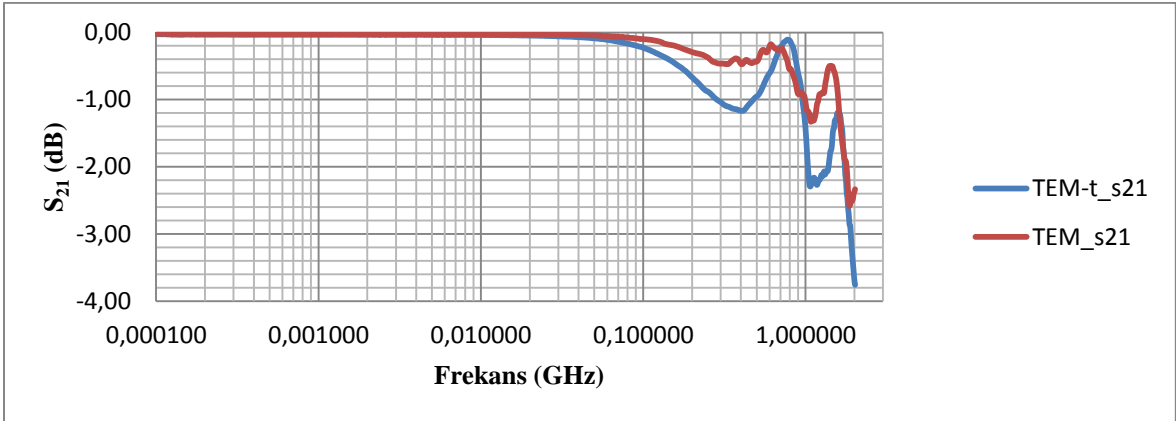
Üretilen TEM ve TEM-t hücreleri ile aynı özelliklere sahip hücrelerin simülasyonu CST simülasyon programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu hücrelerin s parametreleri ölçülmüştür.

Bu başlık altında yapılan çeşitli karşılaştırmalar sonucunda hem ölçümlerin hem de tasarımın doğrulanması amaçlanmıştır.

Şekil 4.32’de ve Şekil 4.33’te kare kesit alanı ve 45 derece sivrilme açısı ile üretilen TEM ve TEM-t hücrelerinin iletim ve yansımaya karakteristikleri karşılaştırılmıştır.



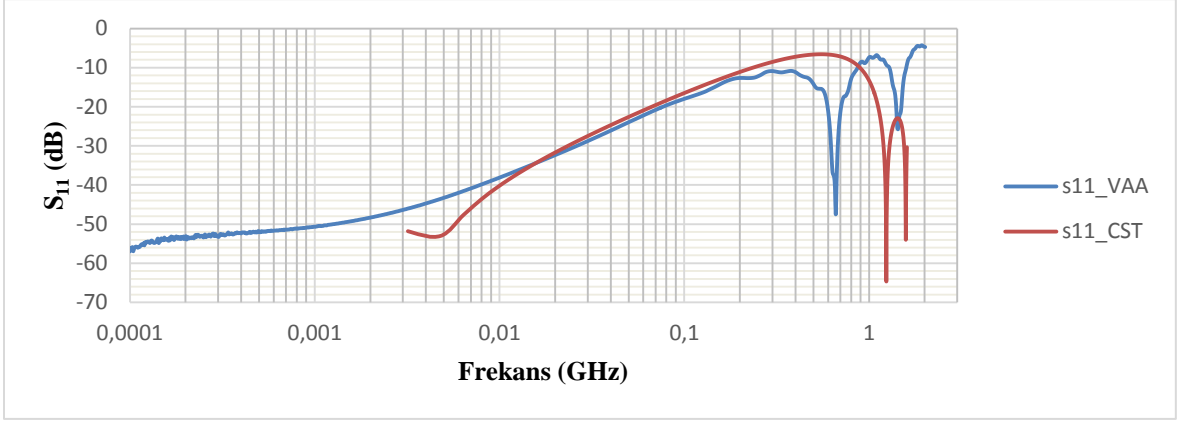
Şekil 4.32 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=45^\circ$) – S_{11}



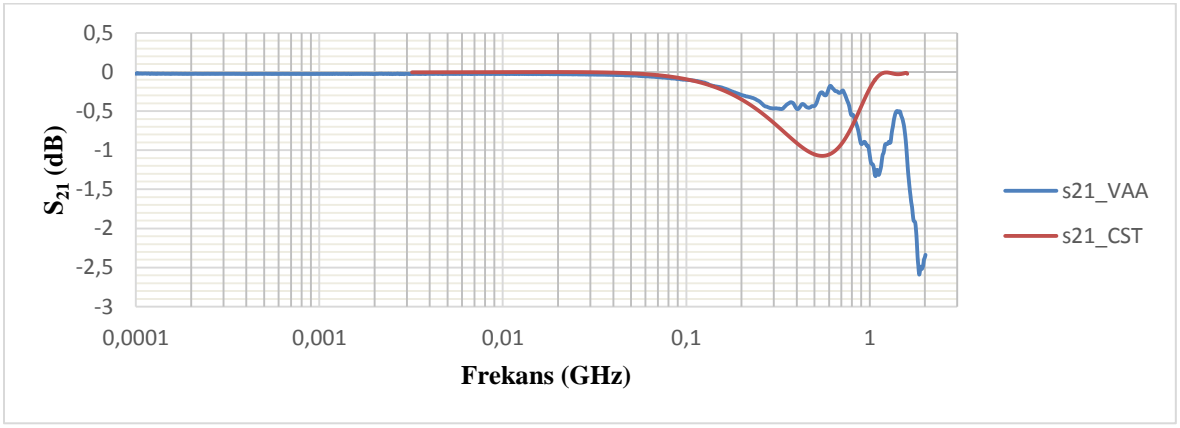
Şekil 4.33 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=45^\circ$) – S_{21}

Her iki grafikte, eğriler birbirleri ile benzer karakteristik göstermelerine rağmen TEM-t hücrelerinin kesim frekansının TEM hücrelerinin kesim frekansından daha düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 4.34’te ve Şekil 4.35’te kare kesit alanı ve 45 derece sivrilme açısı ile üretilen TEM hücrelerinin ve bu hücrenin CST simülasyonunun s parametreleri karşılaştırılmıştır.



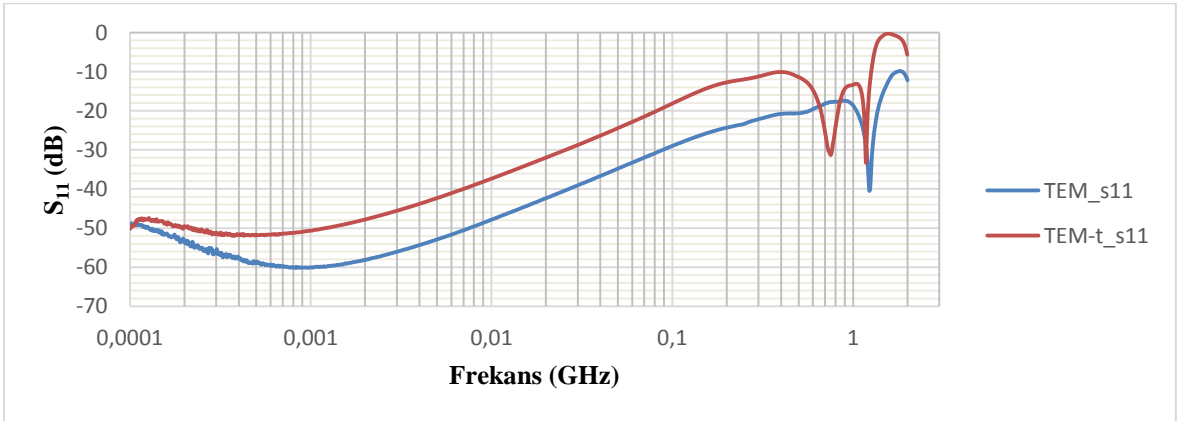
Şekil 4.34 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=45^0$) – S_{11}



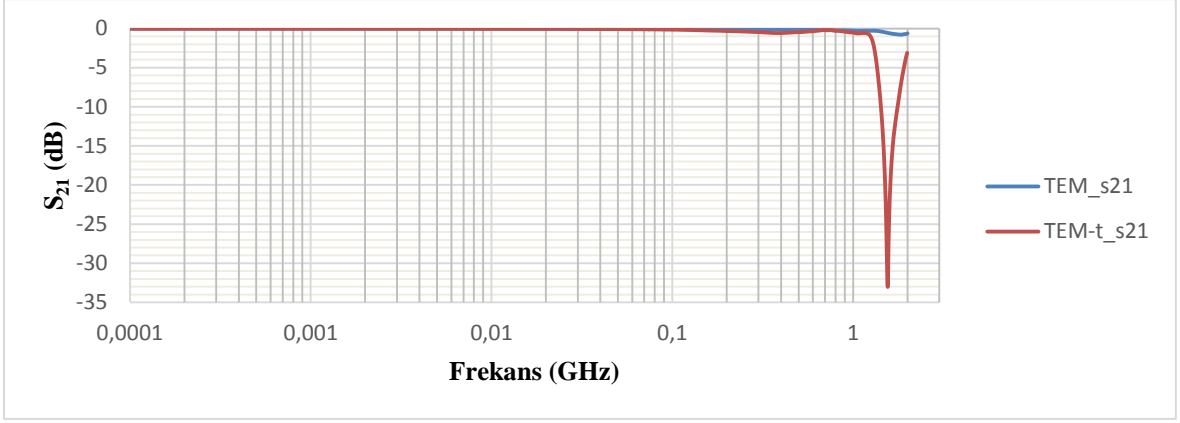
Şekil 4.35 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=45^0$) – S_{21}

Burada “VAA” ile ifade edilen eğriler vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümleri temsil etmektedir. “CST” ise simülasyon sonuçlarını belirtmektedir. 45 derece sivrilmeye açısı ile üretilen ve modellenen TEM hücrelerinin iletim ve yansımaya karakteristiklerinin birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Şekil 4.36’da ve Şekil 4.37’de dikdörtgen kesit alanı ve 30 derece sivrilmeye açısı ile üretilen TEM ve TEM-t hücrelerinin iletim ve yansımaya karakteristikleri karşılaştırılmıştır.



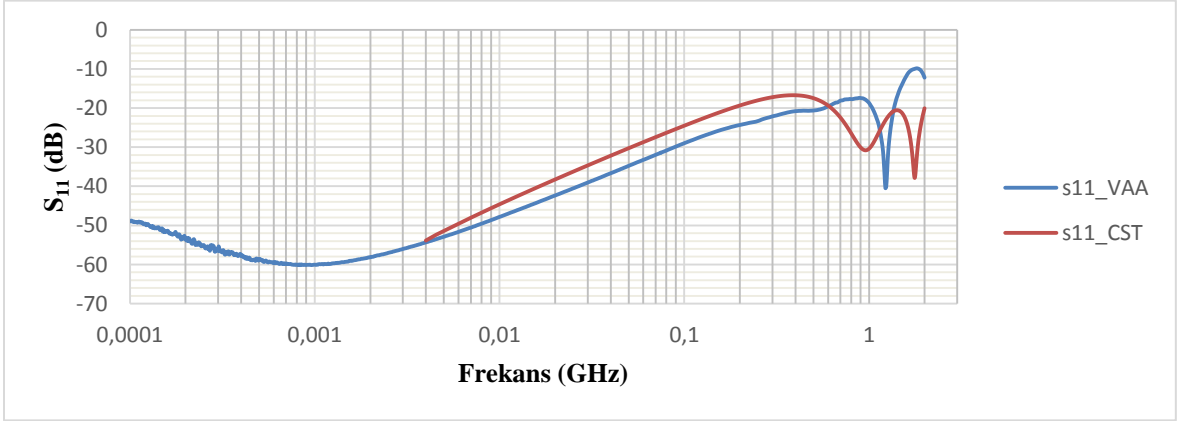
Şekil 4.36 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=30^0$) – S_{11}



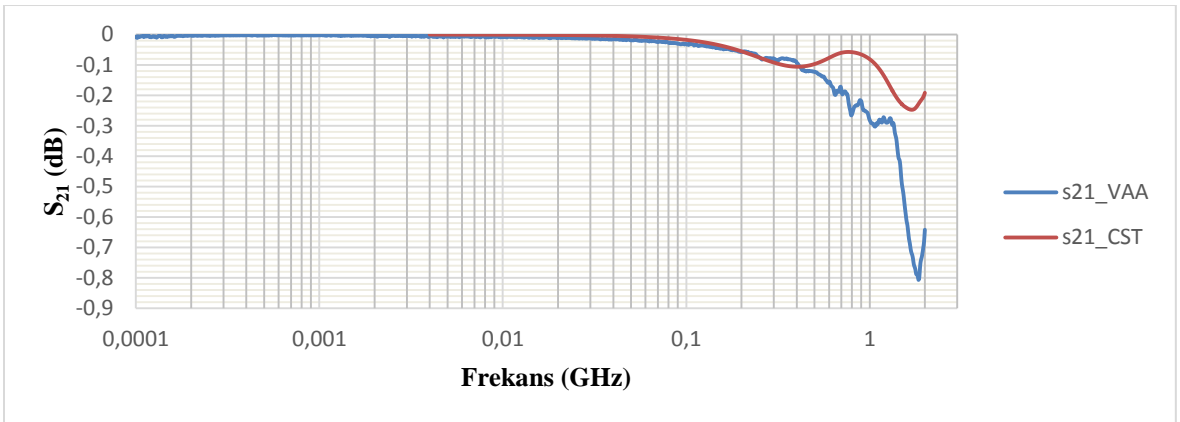
Şekil 4.37 S Parametreleri Karşılaştırması, TEM&TEM-t ($\theta=30^0$) – S_{21}

Her iki grafikte, eğriler birbirleri ile benzer karakteristik göstermelerine rağmen TEM-t hücresinin kesim frekansının TEM hücresinin kesim frekansından daha düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 4.38’de ve Şekil 4.39’da dikdörtgen kesit alanı ve 30 derece sivrilme açısı ile üretilen TEM hücresinin ve bu hücrenin CST simülasyonunun s parametreleri karşılaştırılmıştır.



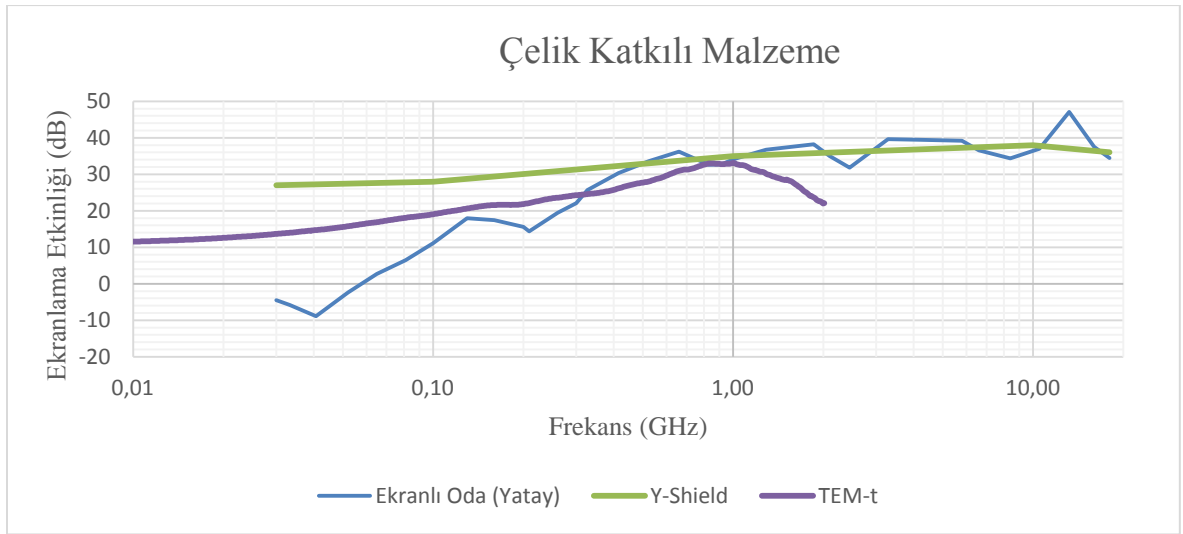
Şekil 4.38 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=30^0$) – S_{11}



Şekil 4.39 S Parametreleri Karşılaştırması, CST&VAA ($\theta=30^0$) – S_{21}

Düşük frekans değerlerinde oldukça benzer iletim karakteristiği olduğu görülmektedir. 500 MHz değerinden itibaren CST simülasyonu ile alınan ölçümlerin iletim karakteristiği daha iyi değerlere ulaşmaktadır. Her iki durumda da teorik olarak hesaplanan 2 GHz kesim frekansına ulaşıldığı görülmektedir.

Çelik katkılu kumaş malzemenin ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada çelik katkılu kumaş malzemenin ekranlı oda yöntemi ile yatay polarizasyon ekranlama etkinliği ölçüm sonucu, dikdörtgen kesit alanına ve 30 derece sivrilmeye açısına sahip TEM-t hücresi ile ekranlama etkinliği ölçüm sonucu ve EK-2'de belirtilen Y-Shield firmasının ekranlama etkinliği raporu karşılaştırılmıştır.

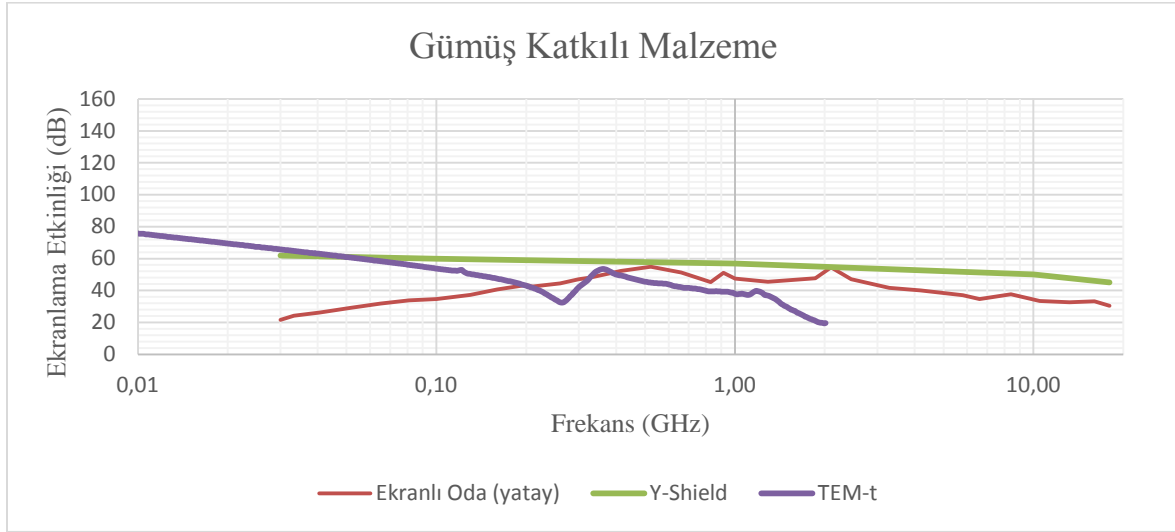


Şekil 4.40 Çelik Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ekranlı oda yöntemi ile ölçülen yatay polarizasyon ekranlama etkinliği ölçüm sonucu ile üretici firmanın vermiş olduğu ekranlama etkinliği ölçüm sonucunun 300 MHz – 18 GHz frekans bandında oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. 30 derece sivrilmeye açısına sahip TEM-t hücresi ile alınan ölçüm sonuçları ise bu iki ölçüm sonucunu belirli bir oran fark ile 300 MHz frekans değerinden hücrenin kesim frekansı olan 1.25 GHz frekans değerine kadar takip etmektedir. 30 MHz -1.25 GHz frekans aralığında TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçları ve üretici firma verileri birbirleri ile benzer karakteristik göstermektedir. TEM-t hücresi yöntemi sonuçları 30 MHz – 300 MHz frekans aralığında ekranlı oda yönteminden daha yüksek ekranlama oranına sahiptir.

Gümüş katkılu kumaş malzemenin ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada gümüş katkılu kumaş malzemenin, ekranlı oda yöntemi ile yatay polarizasyon ekranlama etkinliği ölçüm sonucu, dikdörtgen kesit alanına ve 30

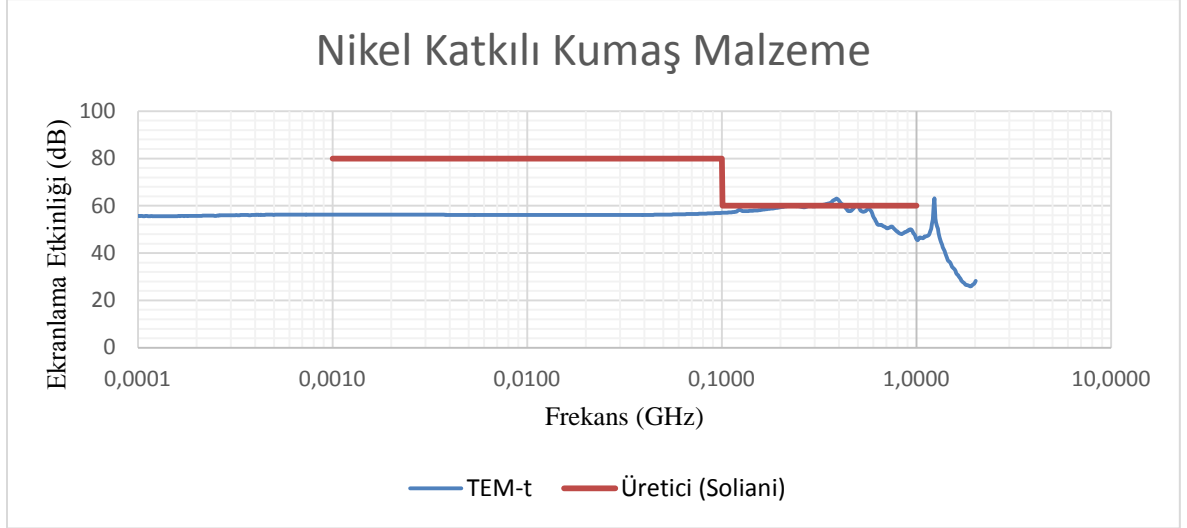
derece sivrilmeye açısına sahip TEM-t hücresi ile ekranlama etkinliği ölçüm sonucu ve EK-1'de belirtilen Y-Shield firmasının ekranlama etkinliği raporu karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.41 Gümüş Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

EK-1'de Y-Shield firmasının vermiş olduğu ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları diğer iki sonuca göre daha yüksek ekranlama oranına sahiptir. Ekranlı oda yöntemi ile ölçülen yatay polarizasyon ekranlama etkinliği ölçüm sonucu ile üretici firmanın vermiş olduğu ekranlama etkinliği ölçüm sonucununun 300 MHz – 18 GHz frekans bandında benzer karakteristik gösterdiği görülmektedir. 30 derece sivrilmeye açısına sahip TEM-t hücresi ile alınan ölçüm sonuçları 100 MHz frekans değerine kadar oldukça iyi ekranlama oranına sahiptir. 30 MHz -1.25 GHz frekans aralığında TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçları ile üretici firma verileri benzer karakteristik göstermektedir. TEM-t hücresi yöntemi ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları, 30 MHz – 200 MHz frekans aralığında ekranlı oda yönteminden daha yüksek ekranlama oranına sahiptir. TEM-t hücresi ile alınan ölçüm sonuçları, diğer iki ölçüm sonucunu belirli bir oran fark ile 300 MHz frekans değerinden hücrenin kesim frekansı olan 1.25 GHz frekans değerine kadar takip etmektedir.

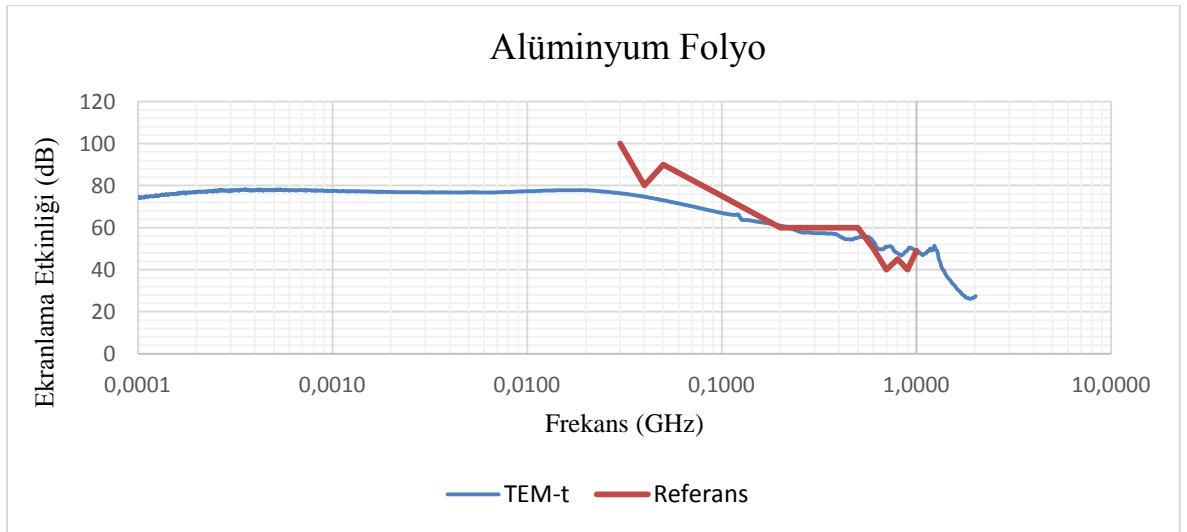
Nikel katkılı kumaş malzemenin ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada nikel katkılı kumaş malzemenin, EK-3'de verilen Soliani firmasının belirtmiş olduğu ekranlama etkinliği değerleri ve 30 derece sivrilmeye açısına sahip dikdörtgen kesit alanlı TEM-t hücresi ile ölçülen ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.42 Nikel Katkılı Kumaş Malzemenin Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Üretici firma ölçüm sonuçlarını 1 MHz – 1 GHz frekans aralığında belirtmiştir. 1 MHz – 100 MHz frekans aralığında üretici firmanın belirtmiş olduğu ekranlama etkinliği sonuçlarının oranı TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçlarına göre daha yüksektir. 100 MHz – 1GHz frekans aralığında ise, her iki ölçüm sonucunun oldukça benzer olduğu görülmektedir.

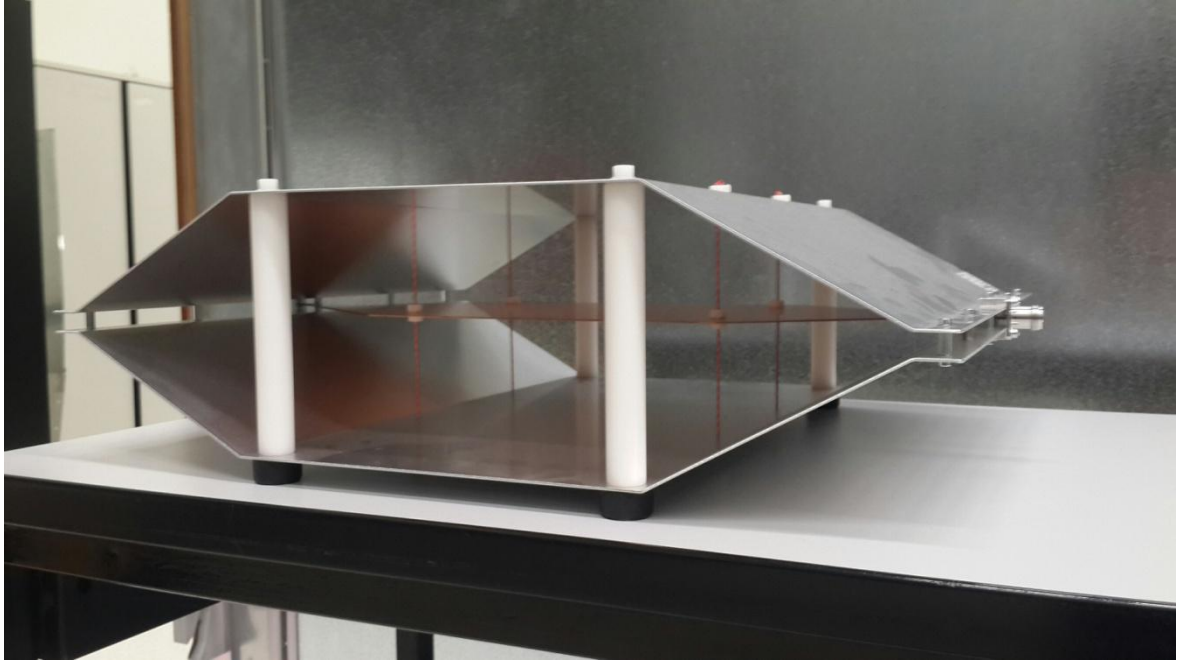
Alüminyum folyonun ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları Şekil 4.43'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada alüminyum folyonun, [35] numaralı referans kaynakta verilen ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları ve 30 derece sivrilme açısına sahip dikdörtgen kesit alanlı TEM-t hücresi ile ölçülen ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.43 Alüminyum Folyonun Ekranlama Etkinliği Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

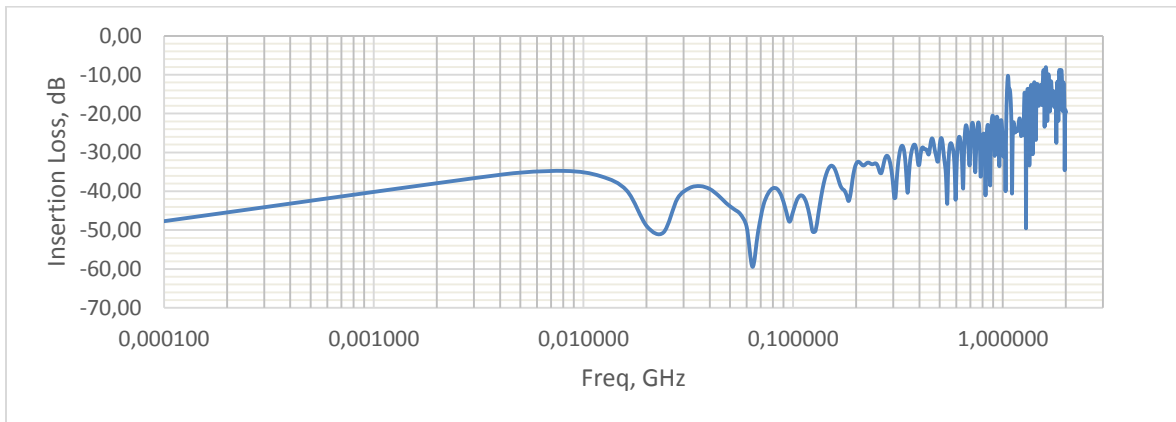
Referans kaynağın ölçüm sonuçları 30 MHz – 1 GHz frekans aralığındadır. 30 MHz – 1 GHz frekans aralığında referans kaynak ölçüm sonuçları ile 30 derece sivrilmeye açısına sahip dikdörtgen kesit alanlı TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçları oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Montena firmasının üretmiş olduğu model TEM 1000 hücresi Şekil 4.44'te gösterilmiştir.

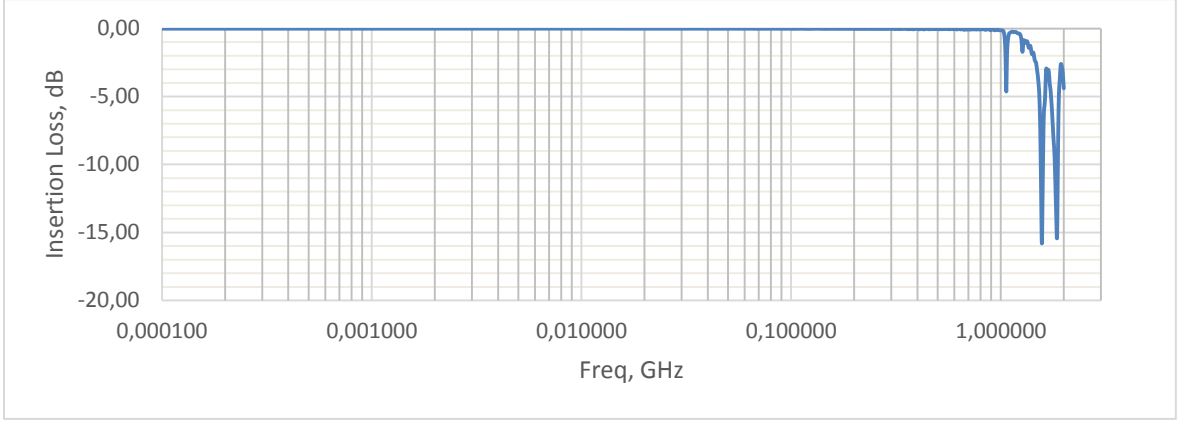


Şekil 4.44 Montena Model TEM 1000 Hücresi [29]

Son olarak, kullanılan ölçüm sistemini doğrulamak amacıyla Montena firmasının ürettiği ve EK-4'te iletim ve yansımaya karakteristiği verilen TEM 1000 modelindeki TEM hücresinin iletim ve yansımaya karakteristikleri ölçülmüştür. Bu ölçümler Şekil 4.45'te ve Şekil 4.46'da gösterilmiştir.



Şekil 4.45 TEM 1000, S_{11}



Şekil 4.46 TEM 1000, S_{21}

Sonuçlar EK-4 ile uyumludur.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, iletim ve ışına yolu ile ekranlama etkinliği teknikleri kullanılarak çeşitli düzlem malzemelerin ekranlama özelliklerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Düzlem malzemelerin ekranlama özelliklerinin ölçümü için TEM hücre tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada, ışına yolu ile ekranlama etkinliği ölçüm yöntemi olarak ekranlı oda tekniği kullanılmıştır. Y-shield firmasının ürettiği gümüş ve çelik katkılı düzlem malzemelerin ekranlama özellikleri incelenmiştir. Ekranlama etkinliği ölçümleri, IEE Std-299 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, sinyal kaynağı, alıcı ve yayıcı antenler, ölçüm alması ve açıklık olarak kullanılmış olan panel geçişine sahip ekranlı test odası kullanılmıştır. Analizler, 30 MHz – 18 GHz frekans bandında logaritmik olarak ifade edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, düşük frekans değerlerinde gümüş katkılı kumaş malzeme daha iyi ekranlama özelliği gösterirken yüksek frekans değerlerine doğru çıkıldıkça çelik katkılı kumaş malzeme daha iyi ekranlama değerlerine ulaşmaktadır. Üretici firma, EK-1'deki ve EK-2'deki ekranlama etkinliği raporlarında da belirtildiği gibi ASTM D4935-10 yöntemi ile ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirmiştir. Ekranlı oda yöntemi ile alınan ölçüm sonuçları yatay ve dikey olmak üzere iki polarizasyonda gerçekleştirilirken, EK-1'de ve EK-2'de gösterilen ekranlama etkinliği sonuçlarının ise üretici firma tarafından dairesel polarizasyonda gerçekleştirildiği ifade edilmektedir.

Çelik katkılı kumaş malzemenin ekranlama etkinliği sonuçlarına göre, yatay polarizasyon ile yapılan ekranlı oda ölçüm sonucu ile üretici firmanın ekranlama etkinliği ölçüm sonucu yaklaşık olarak 300 MHz frekans değerinden 18 GHz frekans değerine kadar oldukça benzerlik göstermektedir. Gümüş katkılı malzemenin ölçüm sonuçlarına göre ise, üretici firmanın ölçüm sonucu belirli bir oranda daha iyi olmak ile birlikte yatay polarizasyon ile yapılan ekranlı oda ölçüm sonucu ile yaklaşık olarak 300 MHz frekans değerinden 18 GHz frekans değerine kadar benzer eğilim göstermektedir. İlgili frekans aralığının dalga boyu, antenlerin yönlülüğü ve 3 dB huzme genişliği gibi özelliklerin test odasının panelinin büyüklüğü ve antenler arası mesafe ile uyuşmaması bu durumun nedenleri olarak gösterilebilir.

İkinci çalışmada, kesim frekansı ve iletim hattı empedansı ile doğrudan ilişkili olan boyutlara uygun açık TEM ve TEM-t hücreleri tasarımı gerçekleştirilip mekanik olarak üretilmiştir. TEM hücresi tasarım parametreleri belirlenirken daha önce yapılan çalışmalarla belirlenen boyutlardan yola çıkılmıştır. Kare ve dikdörtgen kesit alanları için

üst frekans limitlerine karşılık gelen TEM hücresi boyutları referans alınmıştır. Farklı boyutlara ve sivrilme açılara sahip TEM hücrelerinin kesim frekansları ve iletim hattı empedansları için hesaplamalar yapılmıştır ve üretilen TEM ve TEM-t hücrelerinin parametreleri ortaya çıkarılmıştır. Boyutlar ve kolay üretilebilirlik dikkate alındığında optimum çözüm olarak 2 GHz kesim frekansına sahip TEM ve TEM-t hücrelerinin üretilmesine karar verilmiştir.

2 GHz kesim frekansında, 30 derece ve 45 derece sivrilme açıları ile üretilen TEM hücrelerinin S parametreleri vektör ağ analizörü ile analiz edilmiştir. Bu parametrelerin frekans değerleri 100 kHz – 2 GHz frekans aralığında analiz edilerek genlikleri logaritmik olarak dB cinsinden ifade edilmiştir. Üretilen TEM-t hücrelerinde vektör ağ analizörü yardımı ile çeşitli düzlem malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde alüminyum folyo ile gümüş, çelik ve nikel katkılı kumaş malzemeler kullanılmıştır. Aynı şekilde, üretilen TEM-t hücrelerinin S parametreleri ve ekranlama etkinliği ölçümleri 100 kHz – 2 GHz frekans aralığında ve logaritmik skalada analiz edilmiştir.

45 derece sivrilme açılara ve kare kesit alanına sahip TEM ve TEM-t hücrelerinin S parametreleri analizi sonucu olan grafikler incelendiğinde, değerler birbirlerine çok yakın bulunmuştur. Ancak yapılan teorik hesaplamalarla örtüşmediği görülmektedir. Yapılan teorik hesaplamalar sonucunda kesim frekansı 2 GHz olması gerekirken ölçülen kesim frekansları 1 GHz frekans değerinin altında kalmıştır. Aynı yapı için oluşturulan simülasyonun analizleri de benzer karakteristik göstererek bu durumu doğrulamıştır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, sivrilme açısının 30 dereceden küçük olduğu durumda ($\theta \leq 30^\circ$), uzak alan yaklaşımı gerçekleşmekte ve çoklu mod etkilerinin kesim frekansından önce ortaya çıkmadığı tespit edilmiştir. Bütün bu sonuçlardan yola çıkarak dikdörtgen kesit alanına ve 30 derece sivrilme açısına sahip TEM ve TEM-t hücreleri tasarlanmıştır.

30 derece sivrilme açısı ve kare kesit alanı ile üretilen TEM hücrelerinin iletim ve yansıma karakteristikleri analizi sonucu olan grafikler incelendiğinde, teorik hesaplamalarda elde edilen 2 GHz kesim frekansı değerine ulaşıldığı görülmüştür. Aynı özelliklerde üretilen TEM-t hücrelerinin iletim ve yansıma karakteristikleri incelendiğinde ise 1,25 GHz kesim frekansı değerine ulaşılabilirdiği görülmektedir. TEM-t hücrelerinin kesim frekansının ölçüm sonucunu ve ekran malzemesinin ekranlama etkinliği ölçüm sonucunu etkileyen faktörlerden bir tanesi ayrı bölgelemlerin bağlantı yüzeylerinde oluşan empedanstır. Bu empedans ekran malzemesi var iken ve yok iken farklı değerlendirilmelidir. TEM-t

hücresinin iletim ve yansımaya karakteristikleri hücrenin boş olduğu durumda incelendiği için, hücrenin her iki tarafının birleştiği dış iletkenlerin bağlantı yüzeylerinde temas empedansı oluşmamalıdır. Aksi takdirde oluşan empedans uyumsuzluğu sonucunda, gelen sinyalin yansımaya miktarında artış meydana gelir. Dolayısıyla, iletim ve yansımaya özelliklerinin ölçüm sonucu olumsuz etkilenir.

2 GHz kesim frekansında, 30 derece ve 45 derece sivrilme açıları ile üretilen TEM ve TEM-t hücrelerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon programı olarak CST programı kullanılmıştır. Bu hücrelerin S parametreleri analizi gerçekleştirilmiştir.

Bütün bu analizler sonucunda, hem ölçümlerin hem de tasarımın doğrulanması amacı ile çeşitli karşılaştırmalar yapılmıştır. Üretilen TEM ve TEM-t hücrelerinin iletim ve yansımaya karakteristikleri incelendiğinde, birbirleri ile benzer karakteristik göstermelerine rağmen TEM hücrelerinin kesim frekanslarının ilgili TEM-t hücrelerinin kesim frekanslarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Üretilen bu hücreler CST programı ile oluşturulup iletim ve yansımaya karakteristikleri analiz edilmiştir. Simülasyon ve vektör ağ analizörü ile yapılan analizlerin birbirleri ile uyduğu görülmüştür.

Ek-1, Ek-2, Ek-3 ve [35] numaralı referans kaynaktaki ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları belirtilen ekran malzemelerinin, 30 derece sivrilme açısına sahip TEM-t hücresi ve ekranlı oda yöntemi ile gerçekleştirilen ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Çelik katkılı ekran malzemelerinin, ekranlı oda yöntemi ile ölçülen yatay polarizasyon ekranlama etkinliği ölçüm sonucu ile üretici firmanın vermiş olduğu ekranlama etkinliği ölçüm sonucunun 300 MHz – 18 GHz frekans bandında oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. 30 derece sivrilme açısına sahip TEM-t hücresi ile alınan ölçüm sonuçları ise bu iki ölçüm sonucunu belirli bir oran fark ile 300 MHz frekans değerinden hücrenin kesim frekansı olan 1.25 GHz frekans değerine kadar takip etmektedir. 30 MHz -1.25 GHz frekans aralığında TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçları ve üretici firma verileri birbirleri ile benzer karakteristik göstermektedir. TEM-t hücresi yöntemi sonuçları, 30 MHz – 300 MHz frekans aralığında ekranlı oda yönteminden daha yüksek ekranlama oranına sahiptir.

Gümüş katkılı ekran malzemesi ölçüm sonuçları incelendiğinde, ekranlı oda yönteminde yatay polarizasyon ekranlama etkinliği ölçüm sonucu ile üretici firmanın vermiş olduğu ekranlama etkinliği ölçüm sonucunun 300 MHz – 18 GHz frekans bandında benzer karakteristik gösterdiği görülmektedir. 30 derece sivrilme açısına sahip TEM-t hücresi ile alınan ölçüm sonuçları 100 MHz frekans değerine kadar oldukça iyi ekranlama oranına sahiptir. 30 MHz -1.25 GHz frekans aralığında TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçları ile

üretici firma verileri benzer karakteristik göstermektedir. TEM-t hücresi yöntemi ekranlama etkinliği ölçüm sonuçları, 30 MHz – 200 MHz frekans aralığında ekranlı oda yönteminden daha yüksek ekranlama oranına sahiptir. TEM-t hücresi ile alınan ölçüm sonuçları, diğer iki ölçüm sonucunu belirli bir oran fark ile 300 MHz frekans değerinden hücrenin kesim frekansı olan 1.25 GHz frekans değerine kadar takip etmektedir.

EK-3'deki nikel katkılı kumaş malzeme üretici firma ölçüm sonuçları, 1 MHz – 1 GHz frekans aralığında verilmiştir. 1 MHz – 100 MHz frekans aralığında üretici firmanın belirtmiş olduğu ekranlama etkinliği sonuçlarının oranı TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçlarına göre daha yüksektir. 100 MHz – 1GHz frekans aralığında ise, her iki ölçüm sonucunun oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Alüminyum folyonun, [35] numaralı referans kaynakta belirtilen ölçüm sonuçları 30 MHz – 1 GHz frekans aralığındadır. 30 MHz – 1 GHz frekans aralığında referans kaynak ölçüm sonuçları ile 30 derece sivrilme açısına sahip dikdörtgen kesit alanlı TEM-t hücresi yöntemi ölçüm sonuçları oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Bir TEM-t hücresi içerisinde ekran malzemesi yüklü olduğu durumda hücrenin her iki parçası arasında herhangi bir temas kurulmamalıdır. Dolayısıyla, hücrenin her iki tarafının birleştiği dış iletkenlerin bağlantı yüzeylerinde temas empedansı idealde sonsuz olmalıdır. Ayrıca, bir TEM-t hücresi içerisine ekran malzemesi yüklü olduğu durumdaki ölçümler sırasında kapasitif girişimin sağlanabilmesi için dış iletkenlerin bağlantı yüzeyleri yeterli büyüklükte tasarlanmalıdır ve bu yüzeyleri kaplayacak şekilde ekran malzemesi kullanılmalıdır.

İlerleyen çalışmalar, daha yüksek kesim frekansına ulaşabilmek için yapılabilir. Kesim frekansını arttırmak için ilk olarak düşünülecek değişiklik, üretimi engellemeyecek ve zorlaştırmayacak oranda hücrenin boyutlarını küçültmek olmalıdır. Ayrıca, üretilecek olan hücrelerin iç kısmına TEM modundaki iletimi arttırmak için yutucu malzemeler yerleştirilebilir. Yutucu malzemeler, yüksek mertebeli modlarının iletiminin engellenmesini ve kesim frekansının yükselmesini sağlar. Yüksek mertebeli modların etkisi rezonans frekansına ulaşıncaya kadar önemli olmayabilir. Böylece üst frekans limiti, birinci yüksek mertebeli modun kesme frekansını aşabilir, ancak üst frekans limiti bu modun ilişkili rezonans frekansından daha az olmalıdır. Böylece, ilk rezonans frekansı değeri yüksektiyse, iletimin sağlandığı yüksek frekans sınırı genişletilebilir. TEM ve TEM-t hücrelerinin boyutları rezonans frekansını doğrudan etkiler. Ayrıca, septumun boyutları ve sivrilme şekli değiştirilerek farklı rezonans frekansları elde edilebilir [28].

Ayrıca ilerleyen çalışmalar, TEM-t hücrelerinin kesim frekans kayıplarını en aza indirmek için yapılabilir. TEM-t hücrelerinin her iki eş tarafının bağlantı yüzeyi, iletimi sağlayan kapasitif girişimi arttırmak için daha büyük tasarlanabilir. Bu durum, bağlantı yüzeylerinin birbirini ile temas kurmaması için daha büyük boyutlarda ekran malzemeleri kullanılmasına neden olacaktır. Ayrıca, temas problemini en aza indirmek amacıyla basınç kontrollü tutturma mekanizması da kullanılabilir. Bütün bunlara ek olarak, TEM-t hücrelerinin üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri uygun seçilmelidir. Örneğin, kullanılan konektörlerin yansıma karakteristiği düşük olmalıdır. Ayrıca, septumun yapısını korumak amacıyla yüzeyinin oksitlenmemesi ve temiz kalması için önleyici şekilde kaplamalar kullanılabilir. Üretim sırasında lehim yapılırken, sinyal kaybına neden olmayacak şekilde lehim yapılmalı, septumun her iki parçası arasındaki mesafe oldukça dikkatli ayarlanmalı ($\ll 1\text{mm}$) ve eksen simetriği bozulmamalıdır. Septumun iki parçasının yatay ve dikey ekseninde simetrik olabilmesi için yalıtkan destekler kullanılabilir. Bu yalıtkan destekler simetriyi sağlayacağı gibi septumun her iki parçasını sabit tutarak olası kaymaları önler ve ölçüm tekrarlanabilirliğini sağlar.

KAYNAKLAR

- [1] Sadiku, Matthew N. O., *Elements of Electromagnetics*, Chapter 14, **2014**
- [2] Clayton, R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, **2006**
- [3] Geetha S., Satheesh Kumar K. K., R. K. Rao Chepuri, *EMI Shielding: Methods and Materials-A Review*, *Wiley Interscience*, **2009**
- [4] Wilson, P. F., Mark, T. MA., Adams, J. V., *Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials : Part-1 Far Field Source Simulation*, *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, 239-250, **1988**
- [5] Standards Committee of the IEE Electromagnetic Compatibility Society, MIL-STD-285, *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, *IEEE*, **1956**
- [6] Standards Committee of the IEE Electromagnetic Compatibility Society, IEEE Std 299-1997, *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, *IEEE*, **1997**
- [7] Tamburrano A., Desideri D., Maschio A., *Coaxial Waveguide Methods for Shielding Effectiveness Measurement of Planar Materials Up to 18 GHz*, *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, **2014**
- [8] Crawford, M. L., *Generation of standard EM fields using TEM transmission cells*, *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC- 16, no. 4, 189-195, **1974**.
- [9] Manara, A., *Measurement of Material Shielding Effectiveness Using a Dual TEM Cell and Vector Network Analyzer*, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 3, **1996**.
- [10] Wilson, P. F., Mark, T. MA., *Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials : Part-2 Near Field Source Simulation*, *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, 251-259, **1988**.
- [11] ASTM D ES7-83, *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials*, *ASTM International*, **1983**
- [12] ASTM D 4935-10, *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials*, *ASTM International*, **2010**
- [13] Catrysse J., *A New Test-Cell For The Characterisation of Shielding Materials In The Far Field*, *Seventh International Conference on Electromagnetic Compatibility*, **1990**
- [14] Anonim, Michigan State University Goali Program Module 15 : Shielding, <https://www.egr.msu.edu/emrg/electromagnetic-compatibility-emc-course-notes> (Mart **2018**)
- [15] Ott, H. W, *Noise Reduction Techniques In Electronic Systems*, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, **1988**
- [16] Adams, J. W., Ondrejka, A. R., *Shielding Effectiveness (SE) Measurement Techniques*, *IEEE*, **1984**

- [17] Kejik., Z., Drinovsky., J., Electromagnetic Shielding Efficiency Measurement of Composite Materials, *Measurement Science Review*, vol. 9, no. 4, **2009**.
- [18] Catrysse., J., Pissoort., D., Vanhee., F., Shielding Effectiveness of Planar Materials: (semi)-Standardized Measurements from LF to μ W, *ESA Workshop on Aerospace EMC*, **2016**.
- [19] Vasquez, H., Espinoza, L., Lozano K., Foltz H., Yang, S., Simple Device For Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness Measurement, *IEEE*, **2009**
- [20] Wilson, P. F., Ma, M. T., *A study Of Techniques For Measuring The Electromagnetic Shielding Effectiveness Of Materials*, National Bureau of Standards Technical Note 1095, **1986**.
- [21] Agarval, V., Sandeep, M. S., Do It Yourself Fabrication Of An Open TEM Cell For EMC Pre-compliance, *IEEE Transactions*, 66-71, **2008**.
- [22] Catrysse, J., Vanhee, F., Pissoort D., Expanding The Frequency Range Of The TEM-t Cell For The Measurement Of Shielding Materials Up To 12 GHz, *IEEE Transactions*, **2012**.
- [23] Catrysse, J., A New Test Cell For The Characterisation Of Shielding Materials In The Far Field, *KIH-WV Belgium*, **1990**.
- [24] Wieckowski, T. W., Janukiewicz, J. M., Methods For Evaluating The Shielding Effectiveness of Textiles, *Fibres and Textiles In Eastern Europe*, vol. 14, no. 5, **2006**
- [25] Iftode., C., Miclaus., S., Design and Validation of a TEM Cell Used For Radiofrequency Dosimetric Studies, *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 132, **2012**.
- [26] Ma, M. T., Kanda, M., *Electromagnetic Compatibility And Interference Metrology*, National Bureau of Standards Technical Note 1099, **1986**.
- [27] Tippet, J. C., Chang, D. C., Crawford, M. L., *An Analytical And Experimental Determination of The Cut Off Frequencies of Higher Order TE Modes In A TEM Cell*, National Bureau of Standards Technical Note, **1976**.
- [28] Wen., S., Zhang., J., Yinghua., L., The Optimization Design of Septum In TEM Cells for IC EMC Measurement, *CEMM'2015/HangZhou*, **2015**.
- [29] Anonim, Montena Open TEM Cell TEM 1000 User's manual, <https://www.montena.com> (Mart **2017**)
- [30] Smedt, R. D., Catrysse, J., Some Aspects of Shielding Effectiveness Related to Measurements and Simulations, *IEEE Transactions*, **1999**
- [31] Smedt, R. D., Franchois, A., Paurtau, J. C., Cottevieille, D., Mader, T., Numerical Characterization Of A TEM Cell as Evaluation Case Of Field Solvers, *IEEE Transactions*, **1995**
- [32] Catrysse, J., Delesie, M., Steenbakkens, W, The Influence Of The Test Fixture On Shielding Effectiveness Measurements, *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol. 34, No. 3*, **1992**
- [33] Thompson, M., C., Waters, D., M., Characteristic Of A Tapered Anechoic Chamber, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, **1967**

- [34] Fischer, B., Rodriguez, V., Basic Rules For Indoor Anechoic Chamber Design, *IEEE Antennas And Propagation Magazine*, **2016**
- [35] Weston, D., A., Shielding a Room Using Aluminum Foil, *Shielding Effectiveness Report*, **2006**

EK-1 GÜMÜŞ KATKILI MALZEMENİN EKSPANLAMA ETKİNLİĞİ RAPORU



YSHIELD GmbH & Co. KG
Am Schulplatz 2
94099 Ruhstorf
GERMANY

Phone: 0049-8531-31713-0
Fax: 0049-8531-31713-5
Email: info@yshield.com
Internet: www.yshield.com

Messprotokoll Schirmdämpfung

Measurement report screening attenuation

Material

Abschirmstoff / Shielding fabric **SILVER-TWIN**

Konformität

Diese Messung der Schirmdämpfung elektromagnetischer Felder von **30 MHz bis 18 GHz** wurde in Übereinstimmung mit dem Standard **ASTM D4935-10** durchgeführt.

Ort der Messung

Schon seit Jahren lassen wir die Schirmdämpfung nicht mehr von externen Laboren durchführen. **Wir haben ein professionelles EMV-Labor nach gängigen etablierten Standards, wie z.B. ASTM D4935-10, IEEE Std 299-2006, IEEE Std 1128-1998, ASTM A698/A698M-07, etc. direkt bei uns im Haus.**

Das hat für uns viele Vorteile: Unsere Produkte werden nicht nur einmalig getestet, zur Qualitätssicherung vermessen wir jede Charge. Und selbstverständlich brauchen wir das Labor zur Entwicklung unserer eigenen Produkte.

Messaufbau

Als **Messgerät** verwenden wir den professionellen Vektor-Netzwerkanalysator **Rohde & Schwarz ZNB20** mit einer Messdynamik von 140 dB bis zu 20 GHz.

Als **Antenne** für ASTM D4935-10 verwenden wir **modifizierte TEM-Zellen**, die selbst kleine Muster bis hinunter zu 30 MHz im **Fernfeld** messen können. Die Muster werden mit radialer Polarisation gemessen (alle Richtungen, nicht nur horizontal oder vertikal), was der Realität am nächsten kommt. Alle **elektrisch leitfähigen und dünnen Muster** können mit diesen Zellen perfekt vermessen werden.

Conformity

This measurement of the screening attenuation of electromagnetic waves from **30 MHz to 18 GHz** was done in conformity with standard **ASTM D4935-10**.

Location of measurement

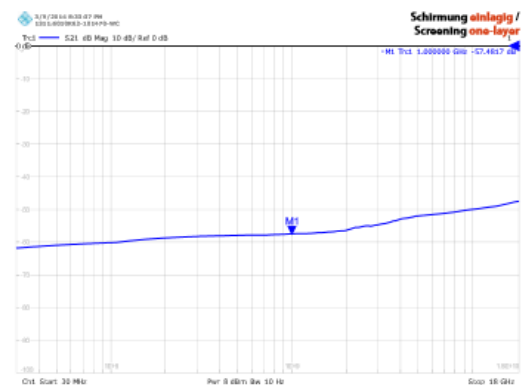
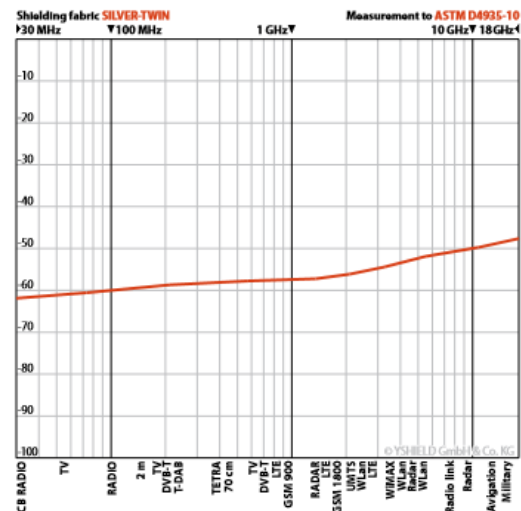
Already since many years, the confirmation of attenuation is no longer carried out through external consultants. **We have a professional EMC-laboratory for any established engineer standards, as ASTM D4935-10, IEEE Std 299-2006, IEEE Std 1128-1998, ASTM A698/A698M-07, etc. at our disposal in-house.**

We take many advantages of this: Our goods are not only tested by a survey once, as for the reason of quality management each charge is measured again. Of course, we do need our laboratory for the development of own products.

Measurement setup

The **instrument of measure** is a professional vector network analyzer **Rohde & Schwarz ZNB20** with 140 dB dynamic range up to 20 GHz.

The **antenna** for ASTM D4935-10 are **modified TEM-cells**, that can measure even small samples down to 30 MHz in the **far field**. The samples are measured with radial polarisation (all directions, not only horizontal or vertical only), what matches the reality most probably. All **electrically conductive and thin samples** can be measured perfectly with these cells.



Schirmung einlagig / Screening one-layer

Schirmung zweilagig / Screening two-layer

EK-2 ÇELİK KATKILI MALZEMENİN EKLANLAMA ETKİNLİĞİ RAPORU



YSHIELD GmbH & Co. KG
Am Schulplatz 2
94099 Ruhstorf
GERMANY

Phone: 0049-8531-31713-0
Fax: 0049-8531-31713-5
Email: info@yshield.com
Internet: www.yshield.com

Messprotokoll Schirmdämpfung

Measurement report screening attenuation

Material

Abschirmstoff / Shielding fabric **STEEL-GRAY**

Konformität

Diese Messung der Schirmdämpfung elektromagnetischer Felder von **30 MHz bis 18 GHz** wurde in Übereinstimmung mit dem Standard **ASTM D4935-10** durchgeführt.

Ort der Messung

Schon seit Jahren lassen wir die Schirmdämpfung nicht mehr von externen Laboren durchführen. **Wir haben ein professionelles EMV-Labor nach gängigen etablierten Standards, wie z.B. ASTM D4935-10, IEEE Std 299-2006, IEEE Std 1128-1998, ASTM A698/A698M-07, etc. direkt bei uns im Haus.**

Das hat für uns viele Vorteile: Unsere Produkte werden nicht nur einmalig getestet, zur Qualitätssicherung vermessen wir jede Charge. Und selbstverständlich brauchen wir das Labor zur Entwicklung unserer eigenen Produkte.

Messaufbau

Als **Messgerät** verwenden wir den professionellen Vektor-Netzwerkanalysator **Rohde & Schwarz ZNB20** mit einer Messdynamik von 140 dB bis zu 20 GHz.

Als **Antenne** für ASTM D4935-10 verwenden wir **modifizierte TEM-Zellen**, die selbst kleine Muster bis hinunter zu 30 MHz im **Fernfeld** messen können. Die Muster werden mit radialer Polarisierung gemessen (alle Richtungen, nicht nur horizontal oder vertikal), was der Realität am nächsten kommt. Alle **elektrisch leitfähigen und dünnen Muster** können mit diesen Zellen perfekt vermessen werden.

Konformität

This measurement of the screening attenuation of electromagnetic waves from **30 MHz to 18 GHz** was done in conformity with standard **ASTM D4935-10**.

Location of measurement

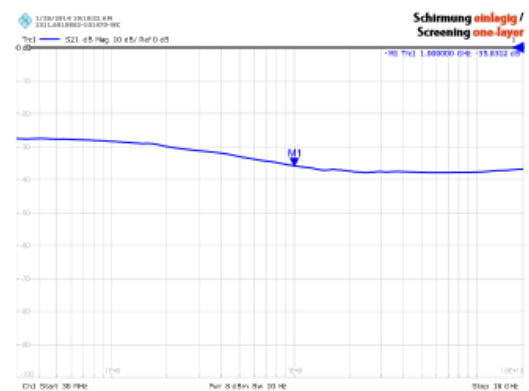
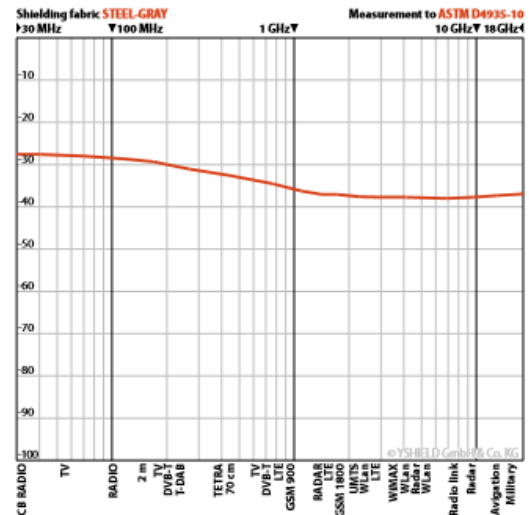
Already since many years, the confirmation of attenuation is no longer carried out through external consultants. **We have a professional EMC-laboratory for any established engineer standards, as ASTM D4935-10, IEEE Std 299-2006, IEEE Std 1128-1998, ASTM A698/A698M-07, etc. at our disposal in-house.**

We take many advantages of this: Our goods are not only tested by a survey once, as for the reason of quality management each charge is measured again. Of course, we do need our laboratory for the development of own products.

Measurement setup

The **Instrument of measure** is a professional vector network analyzer **Rohde & Schwarz ZNB20** with 140 dB dynamic range up to 20 GHz.

The **antenna** for ASTM D4935-10 are **modified TEM-cells**, that can measure even small samples down to 30 MHz in the **far field**. The samples are measured with radial polarisation (all directions, not only horizontal or vertical only), what matches the reality most probably. All **electrically conductive and thin samples** can be measured perfectly with these cells.

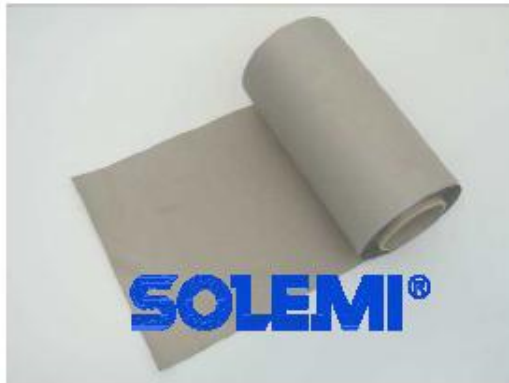


EK-3 NİKEL KATKILI MALZEMENİN TEKNİK ÖZELLİK DOKÜMANI

SOLIANI _{emc s.r.l.} Protezioni Interferenze Elettromagnetiche EMI - RFI - ESD - TEMPEST	SOLEMI [®]	COMPANY WITH QUALITY SYSTEM CERTIFIED BY DNV = AS/EN/JISQ 9100 =	COMPANY WITH QUALITY SYSTEM CERTIFIED BY DNV = ISO 9001 =	CODE: PO.NI Rev. 6 30/10/14 pag.1 / 1
--	----------------------------	---	--	--

Data Sheet Conductive fabric - PO.NI

Name	PO.NI
Description	Nickel coated fabric

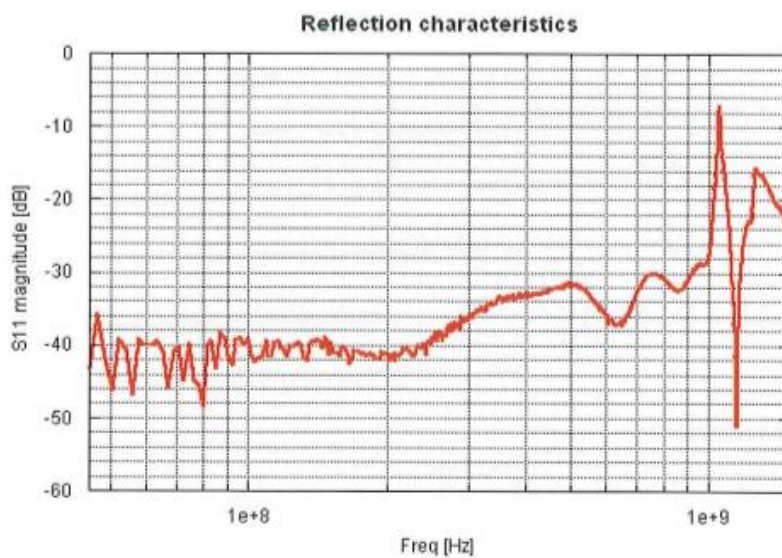
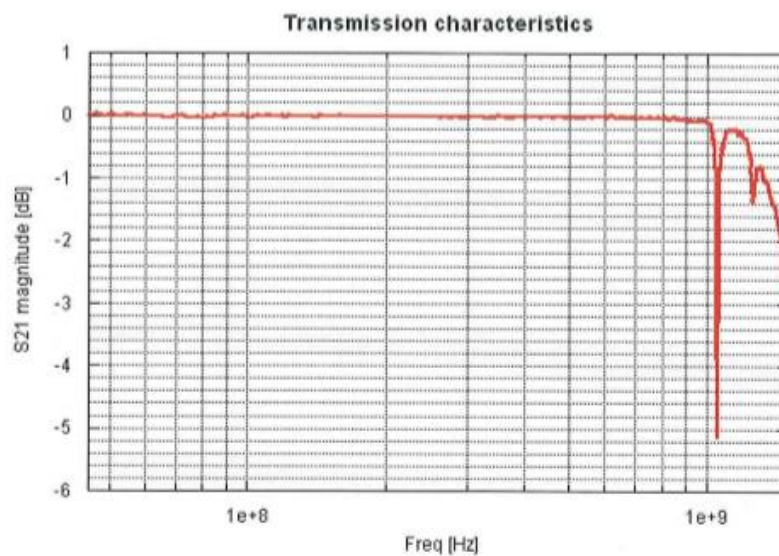


Type of raw material	Polyester fabric
Thickness (mm)	0,15 +/-0,05
Max Surface resistivity (Ohm/sq)	0,4
Temperature range (°C)	-40 to 90
Maximum weight (g/mq)	80
Flammability rating	NA
Typical shielding effectiveness	80 dB from 1 MHz to 100 MHz 60 dB from 100 MHz to 1 GHz
Additional coating	NA
Product applications	Base material for room shielding, base material for EMI/RFI

EK-4 MONTENA MODEL TEM 1000 İLETİM VE YANSIMA KARAKTERİSTİĞİ



8. Typical measurement results



v:\dossiers de constructions emccellules tem\tem 1 ghz_ze15509\mode_emploi\users_manual_tem1000.doc /

montena technology sa

Route de Montena 89 – 1728 Rossens – Switzerland – phone ++ 41 26 411 84 84 – fax ++ 41 26 411 17 79

6/6

www.montena.com

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Serhan KAYIK
Doğum Yeri : Uşak
Medeni Hali : Bekar
E-posta : kayikserhan@gmail.com
Adresi : Emek Mahallesi 15. Sokak Yıllar Apartmanı 19/3
Çankaya/ANKARA

Eğitim

Lise : Uşak Orhan Dengiz Anadolu Lisesi
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Doktora : -

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İleri düzey

İş Deneyimi

TR Medikal : Elektrik ve Elektronik Mühendisi (2012 – 2013)
ASELSAN A.Ş : EMC Mühendisi (2013 - ...)

Deneyim Alanları

EMI/EMC

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 25/06/2018

Tez Başlığı / Konusu: Düzlem Malzemelerin Ekranlama Özelliklerinin Ölçümü İçin TEM Hücre Tasarımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 81 sayfalık kısmına ilişkin, 24/06/2018 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~çalışma~~
- 3- 5 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Serhan KAYIK
Öğrenci No: N11225300
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği – Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

25/06/2018

S. Kayık

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Birsen Saka TANATAR

(Unvan, Ad Soyad, İmza)