



**İLETKEN METAL OKSİT KAPLI
CAM YÜZEYLERDE ELEKTROMANYETİK
KALKANLAMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Muhammet Ali AKSOY

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL**

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İLETKEN METAL OKSİT KAPLI CAM YÜZEYLERDE
ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ETKİNLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammet Ali AKSOY

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı**

ERZURUM

2019

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**İLETKEN METALOKSİT KAPLI CAM YÜZEYLERDE
ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL danışmanlığında, Muhammet Ali AKSOY tarafından hazırlanan bu çalışma 11/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı – Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza:

Üye: Doç. Dr. Ahmet DURLU

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu. 05/07/2019 tarih ve 27/64 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İLETKEN METAL OKSİT KAPLI CAM YÜZEYLERDE ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Ali AKSOY

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Kalkanlama etkisi (*shielding effectiveness*, SE) bir materyali elektromanyetik olarak bir bölgeden başka bir bölgeye ayırmak amacıyla yayılma alanını azaltma yeteneği ile alakalı olan çok önemli yöntemlerden birisidir. Karışık bir materyalin ekranlama kabiliyetini tahmin etmek zor olduğu için genellikle bir takım teknikler kullanılarak ölçülür. Uzak alandaki kaynakları simüle etmek için koaksiyel transmisyon hat tutucuları ve zaman kümesi sistemlerinin de aralarında bulunduğu birkaç yaklaşım vardır. Bu çalışmada, kalkanlama etkisini ölçmek için transmisyon tekniği kullanıldı. İletken ve saydam bir tabaka elde etmek için ise farklı metal oksitler ve metal oksitli karışımlar, sprej ve döndürmeli kaplama teknikleri ile cam üzerine püskürtülerek yerleştirildi. Saçılım parametrelerini ölçmek için de deneysel bir düzenek tasarlandı. Optik şeffaf ölçümler spektrometre kullanılarak yapılmıştır. VNA (network analizör) kullanılarak ölçülen saçılım parametreleri yardımıyla kalkanlama etkisi değerleri elde edilmiştir.

2019, 55 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kalkanlama Etkisi, Metal Oksit, Elektromanyetik

ABSTRACT

Master Thesis

ANALYSING OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFFECTIVENESS ON GLASS SURFACES COVERED WITH CONDUCTIVE METAL OXIDE

Muhammet Ali AKSOY

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
Department of Electromagnetic Fields and Microwave Technology

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Shielding effectiveness is one of the very important phoneme that reduces the transmission of propagating fields for electromagnetically isolating one region from the other. Since it is very difficult to predict the shielding capability of a complex material, it usually measured using several different techniques. There are several approaches for simulating far-field source such as coaxial transmission-line holders and a time-domain system. In this work, I have used Transmission technique for measuring shielding effectiveness. Different metal oxides and also metal oxide mixtures with metal oxides to get conductive transparent layer were deposited on glass by spray and spin coating techniques. An experimental set-up was designed to measure scattering parameters. Optical transparency measurements were performed by using a spectrometer. Shielding effectiveness values obtained by using measured scattering parameters.

2019, 55 pages

Keywords: Shielding Effectiveness, Metal Oxide, Electromagnetic

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans döneminde danışmanlığımı yapan, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tezi çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK, Sayın Öğr. Gör. Ahmet ÖZMEN ve Sayın Öğr. Gör. Aykut COŐKUN'a çok teşekkür ederim.

Tez yazımında her zaman desteğini esirgemeyen ve İngilizce çevirileriyle bana büyük destek olan hayat arkadaşım, nişanlım olan Erzurum Teknik Üniveristesesi Öğr. Gör. Büşra ÇİFTÇİ'ye minnettarım.

İngilizce kaynak araştırmalarında çeviriler yaparak bana destek olan Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği öğrencisi olan Talha ÇİFTÇİ'ye desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Anneme, babama, abime ve kız kardeşime desteklerinden dolayı minnettarım.

Muhammet Ali AKSOY

Mayıs, 2019

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|----------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Antenler | 1 |
| 1.1.1. Horn antenler | 2 |
| 1.1.1.a. Temel horn anteni konsepti | 3 |
| 1.1.1.b. Mikrodalga horn anten | 3 |
| 1.1.1.c. Sektörel horn..... | 5 |
| 1.1.1.d. Piramidal horn | 5 |
| 1.1.1.e. Konik horn..... | 5 |
| 1.1.1.f. Kombinasyonlar | 6 |
| 1.1.1.g. Radyasyon deseni | 7 |
| 1.1.1.h. Horn Antenin Avantajları | 8 |
| 1.1.1.i. Horn Antenin Dezavantajları | 8 |
| 1.1.1.i. Horn Antenin Uygulama Alanları | 8 |
| 1.2. Saçılma Parametreleri..... | 8 |
| 1.2.1. Genişletilmiş saçılma matrisi | 9 |
| 1.2.2. Saçılma matrisinin özellikleri..... | 11 |
| 1.2.2.a. Resiprok devreler..... | 12 |
| 1.2.2.b. Yansımatsız devreler | 12 |
| 1.2.2.c. Kayıpsız devreler | 12 |
| 1.2.3. Referans düzlemlerinin ötelenmesi | 13 |
| 1.2.4. İletim hattı modeli ve jonksiyon saçılma matrisi | 15 |
| 1.2.5. Kaskat devrelerin saçılma matrisi | 16 |
| 1.3. Kalkanlama Etkisi | 19 |
| 1.3.1. Teorik kalkanlama etkisi | 19 |

| | |
|---|-----------|
| 1.3.1.a. Kalkanlama teorisi | 22 |
| 1.3.1.b. Yansıma kaybı | 28 |
| 1.3.1.c. Soğurma kaybı | 28 |
| 1.3.1.d. Çoklu yansımalar | 29 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ | 30 |
| 2.1. Mikrodalga Soğurucu Malzemeler | 31 |
| 2.1.1. Rezonant soğurucular | 32 |
| 2.1.2. Kademeli dielektrik soğurucu | 34 |
| 2.1.3. Boşluk sönümlenme soğurucuları | 36 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM | 37 |
| 3.1. Cam Filmlerin ve Cam Tutucuların Hazırlanması | 37 |
| 3.2. Ölçüm Düzeneklerinin Hazırlanması | 38 |
| 3.3. Çözeltilerin Hazırlanması | 39 |
| 3.4. Kimyasal Püskürtme Yöntemi İle Cam Yüzeyle İnce Film Tabakası Yerleştirilmesi | 40 |
| 3.5. Ölçümün Yapılması | 43 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI | 45 |
| 4.1. SEM Görüntüleri | 45 |
| 4.2. Kalkanlama Etkisi Ölçüm Sonuçları | 49 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ | 52 |
| 5.1. Ultrasonik spreyle kimyasal püskürtme yöntemi sonuçları | 52 |
| 5.2. Kalkanlama etkisi ölçüm sonuçları | 52 |
| KAYNAKLAR | 54 |
| ÖZGEÇMİŞ | 56 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|------------|---|
| dB | : Desibel |
| E | : Elektrik Alan |
| H | : Manyetik Alan |
| S | : Saçılım Parametreleri |
| S_{11} | : Yansıma Saçılım Parametresi |
| S_{12} | : İletim Saçılım Parametresi |
| RD_i | : Referans Düzlemi |
| Z_{0i} | : Karakteristik Empedans |
| V | : Gerilim |
| I | : Akım |
| P_i | : Manyetik Alan Yoğunluğu Gücü |
| λ | : Dalga Boyu |
| μ | : Permeabilite (Manyetik Geçirgenlik) |
| ϵ | : Permittivite (Dielektrik Sabiti, Elektriksel Geçirgenlik) |
| ω | : Açısal Frekans |
| f | : Frekans |
| η | : Dalga Empedansı |
| σ | : Malzemenin S/m Cinsinden İletkenliği |
| α | : Faz Sabiti |
| β | : Faz Sabiti |
| γ | : Yayılma Sabiti |
| t | : Zaman |
| p | : İletim Katsayısı |
| δ | : Kalkan Kalınlığı |
| Ω | : Ohm |
| cm | : Santimetre |
| $SbCl_3$ | : Antimon Triklorür |
| SnO_2 | : Tin |

M : Molarite

Kisaltmalar

AC : Alternatif Gerilim

EMI : Elektromanyetik Girişim

EM : Elektromanyetik

RF : Radyo Frekansı

SE : Shielding Effectiveness (Kalkanlama Etkisi)



ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Çubuklar üzerine uygulanan bir alternatif gerilim (AC) sonucunda yaptığı ışıma | 2 |
| Şekil 1.2. Bir dalga kılavuzu geçişine koaksiyel beslemeyi gösteren tipik mikrodalga horn anten..... | 3 |
| Şekil 1.3. Horn anten örneği | 4 |
| Şekil 1.4. Horn anten modeli | 4 |
| Şekil 1.5. Horn anten tipleri..... | 6 |
| Şekil 1.6. Horn antenin radyasyon modeli..... | 7 |
| Şekil 1.7. N kapılı bir mikrodalga devresi | 10 |
| Şekil 1.8. Kapılarına iletim hattı bağlanmış N kapılı bir mikrodalga devresi..... | 14 |
| Şekil 1.9. Bir jonksiyonla bağlanmış iki farklı iletim hattı..... | 15 |
| Şekil 1.10. İletim hattıyla bağlı iki kapılı iki devreli bir system | 17 |
| Şekil 1.11. EMI kalkanlama mekanizmasının şematik gösterimi..... | 20 |
| Şekil 1.12. Dalga empedansının normalize edilmiş $\lambda/2\pi$ mesafe aralığındaki bağımlılığı | 21 |
| Şekil 1.13. Elektromanyetik dalgaların yayılımı ve kalkan materyali ile etkileşimi | 22 |
| Şekil 2.1. Rezonans soğurucular (soldan sağa): Dallenbach katmanı, Salisbury ekranı, Jaumann katmanları..... | 33 |
| Şekil 2.2. Empedans uyumu ile kademeli dielektrik soğurucular..... | 34 |
| Şekil 3.1. Cam tutucu tasarımı | 37 |
| Şekil 3.2. Horn anten modeli | 38 |
| Şekil 3.3. Ölçüm düzeneği | 38 |
| Şekil 3.4. Mikrodalga vektör network analizör | 39 |
| Şekil 3.5. Karıştırıcı düzenek..... | 40 |
| Şekil 3.6. Ultrasonik sprej ve kontrol ünitesi..... | 42 |
| Şekil 3.7. Kimyasal püskürtme sistemi kontrol cihazı..... | 43 |
| Şekil 4.1. Cama püskürtülen %0 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-1 | 45 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.2. Cama püskürtülen %0 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-2 | 46 |
| Şekil 4.3. Cama püskürtülen %2 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-1 | 46 |
| Şekil 4.4. Cama püskürtülen %2 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-2 | 47 |
| Şekil 4.5. Cama püskürtülen %4 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-1 | 47 |
| Şekil 4.6. Cama püskürtülen %4 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-2 | 48 |
| Şekil 4.7. Cama püskürtülen %8 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-1 | 48 |
| Şekil 4.8. Cama püskürtülen %8 oranında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) filmlerinin SEM görüntüsü-2 | 49 |
| Şekil 4.9. Farklı katkı oranlarında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin kalkanlama etkisi değerleri-1 | 50 |
| Şekil 4.10. Farklı katkı oranlarında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin kalkanlama etkisi değerleri-2 | 50 |
| Şekil 5.1. Farklı katkı oranlarında SbCl ₃ katkılı Tin (SnO ₂) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin 13 GHz – 15 GHz aralığındaki kalkanlama etkisi değerleri..... | 53 |

1. GİRİŞ

Elektronik endüstrisinin hızla büyümesiyle birlikte, birçok teknolojik araç daha yüksek frekans aralığına sahip hale gelmiştir. Çok sayıda elektrikli elektronik araç için Elektromanyetik Girişim (EMI), uygun empedans (direnç) uyumu açısından teknik bir görev olmuştur. Elektromanyetik Girişim, ekipman performansına karşı tepkiyi azaltma eğilimindedir. Mobil sinyallerden ve elektromanyetik girişimden çeşitli elektronik araçların kalkanlanması önemlidir ve bu yüzden mikrodalga kalkanlama materyalleri ile gerçekleştirilir.

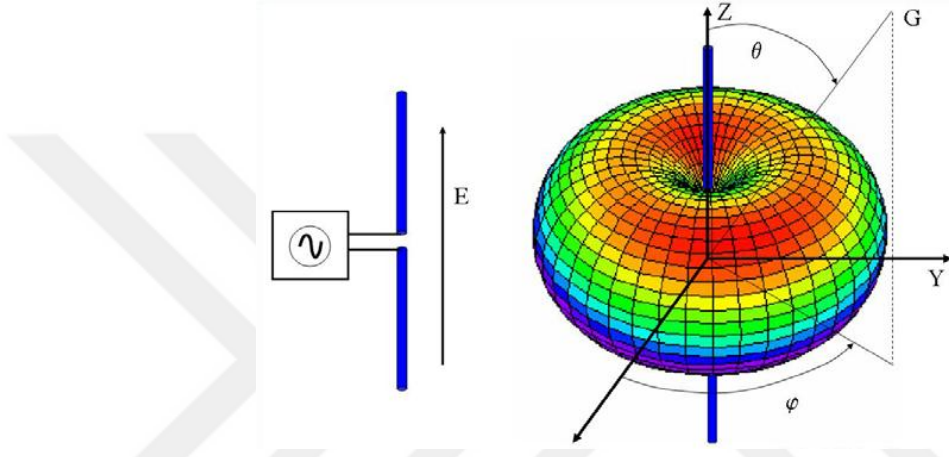
1.1. Antenler

Antenler günlük hayatımızda uzaktan bilgi alışverişi için kullandığımız pasif elektronik elemanlardır. Aslında her elektronik eleman, az da olsa bir anten gibi davranır. Çünkü elektriğin olduğu her yerde aslında bir elektromanyetik dalga da vardır. Bu yüzden anten olarak kullandığımız malzemenin yanındaki diğer nesnelere antenin iletimini yahut verimini etkilerler.

Genellikle bir anten, elektriksel olarak birbirine bağlanan alıcı ve vericiden oluşur. Verici antenler, elektronları sınırlandırarak bir elektrik alan oluştururlar ve tabii ki aynı zamanda bir de manyetik alan oluştururlar. Bu, zamanla beraber değişmekte olan dalgalar uzaya ya da boşluğa enine elektromanyetik dalga olarak yayılır. Ters durumda, antene gelen elektromanyetik dalga anten üzerinde bulunan elektronları ileri geri hareket etmesine sebep olarak, giderek hızlanan bir titreşim meydana getirir. Bu da antenin içinde elektronların hareketinden dolayı akım oluşmasını sağlar.

Antenler verici ya da alıcı olarak kullanılırlar. Antenler verici olarak kullanıldığında üzerine uygulanan voltajı elektrik alanı cinsinden etrafına yayarlar. Bu elektrik alanı zamanla değişirse, buna paralel olarak çevresinde oluşan elektrik alanı da zamanla değişirse, bu elektrik alanı etrafında çevresel olarak bir manyetik alan oluşur ve bunlar

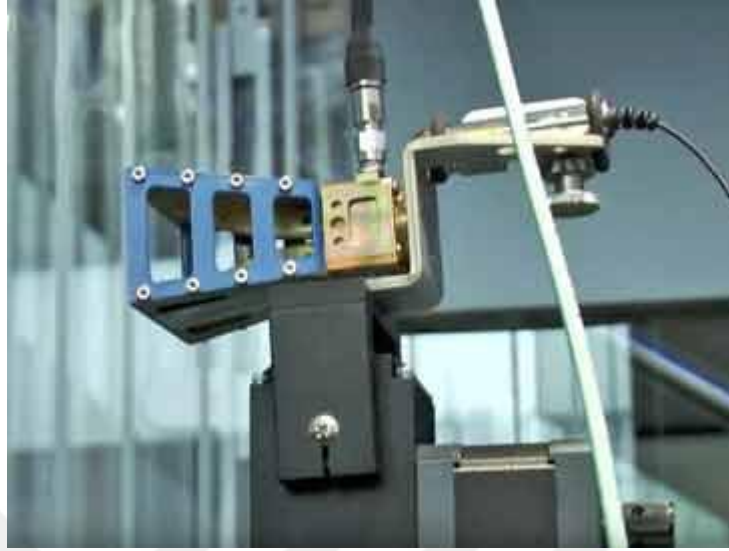
birbirini oluşturma oluşturma uzak mesafelere yayılırlar. Bu elektromanyetik dalganın yayılma şeklidir yani dalganın ışınmasıdır. Alıcı antenlerde ise bu yayılan elektromanyetik dalgalar iletken yüzeylere çarptığında değişen elektrik ve manyetik alanlardan ötürü iletken üzerinde salınım yapan bir voltaj oluşumu sağlar bu voltaj da iletilen bilgilerin elektrikselsel taşıyıcısıdır.



Şekil 1.1. Çubuklar üzerine uygulanan bir alternatif gerilim (AC) sonucunda yaptığı ışınma

1.1.1. Horn antenler

Horn anteni belirgin bir şekle sahiptir. Diğer birçok antenden farklıdır ve mikrodalga frekanslarında kullanılır. Horn anteni, korna şeklinde genişletilmiş bir dalga kılavuzu olarak kabul edilebilir. Sonuç olarak, dalga kılavuzlarının kullanıldığı alanlarda birçok uygulama alanı bulur. Bir boynuz gibi şekillendirilmiş olan bu anten, dalga kılavuzu ile serbest alan arasında yumuşak bir geçiş yapar ve radyo dalgalarını bir ışın içinde yönlendirir.



Şekil 1.2. Bir dalga kılavuzu geçişine koaksiyel beslemeyi gösteren tipik mikrodalga horn anten

1.1.1.a. Temel horn anteni konsepti

Horn anteni, dalga kılavuzu besleyici ile 377 ohm'luk bir empedansa sahip olan boş alan arasında bir RF transformatörü veya empedans uyumu olarak düşünülebilir. Bir konik konarak veya dalga kılavuzuna alevlenmiş bir uca sahip olarak, boynuz anteni oluşturulur ve bu empedansın eşleşmesini sağlar. Her ne kadar dalga kılavuzu horn anten olmadan yayılacak olsa da, bu çok daha verimli bir eşleşme sağlar.

1.1.1.b. Mikrodalga horn anten

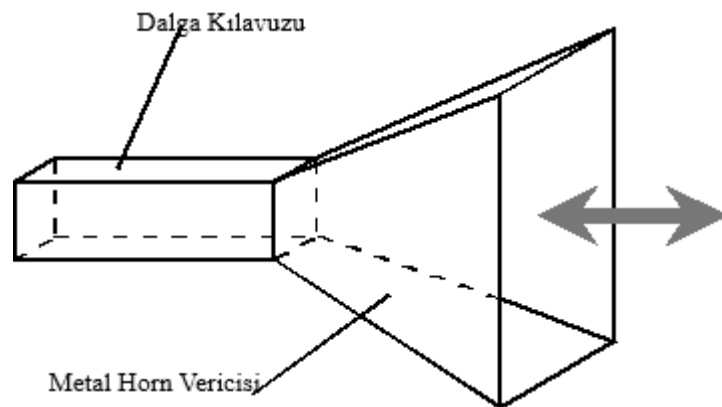
Horn antenin sağladığı iyileştirilmiş eşleşmeye ek olarak, dalga kılavuzunda istenmeyen modlar yoluyla hareket eden sinyallerin yayılmasını engellemeye de yardımcı olur. Bununla birlikte, horn antenin ana avantajı, önemli düzeyde bir yönlendirme ve kazanç sağlamasıdır. Daha fazla kazanç için, horn antenin geniş bir açıklığa sahip olması gerekir. Ayrıca, belirli bir açıklık boyutu ve maksimum kazanç elde etmek için, konik uzun olmalıdır, böylece dalga cephesinin fazı açıklık boyunca mümkün olduğu kadar sabit olacaktır. Dolayısıyla kazanç seviyeleri, açıklık büyüklüğü

ile uzunluk arasındaki dengedir. Bununla birlikte, bir horn anteni için kazanç seviyeleri bazı durumlarda 20 dB'ye kadar çıkabilir.

Işınımın enerjisi yavaşça radyasyona dönüştüğünde, kayıplar azalır ve ışının odaklanması artar. Bir horn anteni, yönlülüğün iyileştirildiği ve kırınımın azaltıldığı, alevlenmiş bir dalga kılavuzu olarak düşünülebilir.



Şekil 1.3. Horn anten örneği



Şekil 1.4. Horn anten modeli

Yukarıdaki resim bir horn anteninin modelini göstermektedir. Horn antenin ışması açıkça gösterilmiştir. En yaygın kullanılan üç yapılandırma olan birkaç horn yapılandırması vardır.

1.1.1.c. Sektörel horn

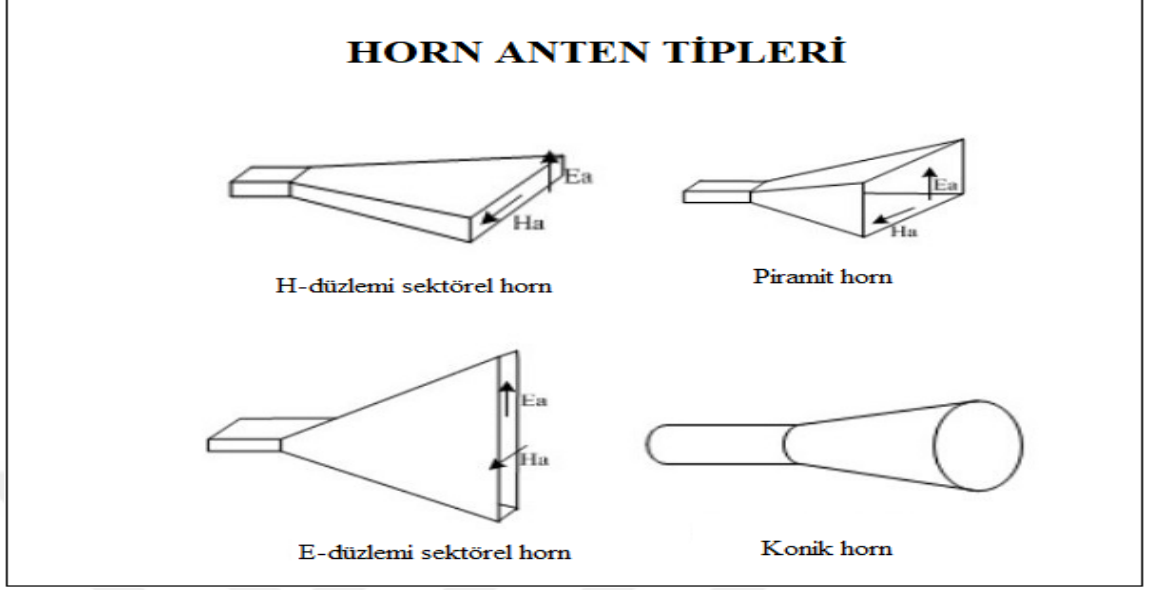
Bu tip bir horn anteni, sadece bir yönde parlar. Elektrik vektörü yönünde ışma, sektörel E-düzlemi horn antenini oluşturur. Benzer şekilde, manyetik vektör yönünde genişleyen, sektörel H düzlemi horn antenini oluşturur.

1.1.1.d. Piramidal horn

Bu tip horn anteninin her iki tarafında da yayılım yapılır. Dikdörtgen bir dalga kılavuzunun her iki E&H duvarında da ışma yapılırsa, piramidal horn anteni oluşturulur. Bu anten kesilmiş bir piramit şeklindedir.

1.1.1.e. Konik horn

Dairesel bir dalga kılavuzunun duvarları alevlendiğinde, konik horn olarak bilinir. Bu, dairesel dalga kılavuzunun mantıksal bir sonlanmasıdır.



Şekil 1.5. Horn anten tipleri

Yukarıdaki şekiller, daha önce tartışılan horn konfigürasyon tiplerini göstermektedir. Genişletme, daha iyi radyasyon için anten empedansını boş alan empedansıyla eşleştirmeye yardımcı olur. Daha fazla yönlendirme ve daha dar ışın genişliği sağlar. Genişletilmiş dalga kılavuzu teknik olarak Elektromanyetik Horn Radyatör olarak adlandırılabilir. Işıma açısı, horn antenin dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Eğer bu çok küçükse, ortaya çıkan dalga düzlem yerine küresel olacaktır ve yayılan ışın yönlendirici olmayacaktır. Bu nedenle, parlama açısı optimum bir değere sahip olmalıdır. Bu da uzunluğu ile yakından ilgilidir.

1.1.1.f. Kombinasyonlar

Horn antenler, ayrıca özel horn antenler oluşturmak için parabolik yansıtıcı antenler ile birleştirilebilir. Bunlar,

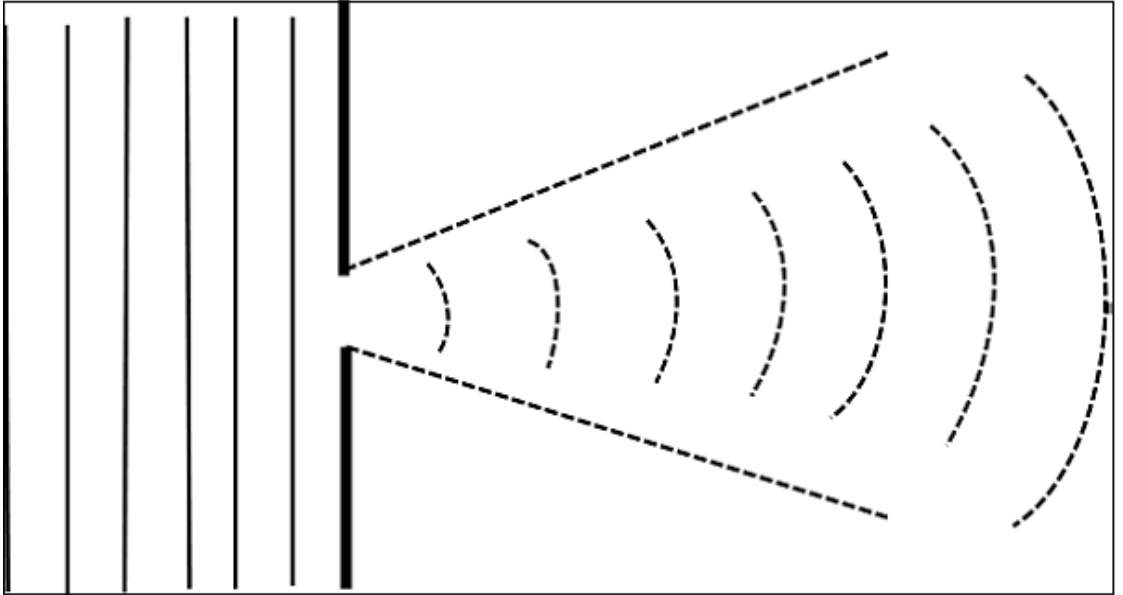
- Cass- horn anteni
- Domuz horn veya üç katlanmış horn reflektörü

Cass- horn anten, radyo dalgaları parabolik eğri ve 45° açı ile yukarı doğru yansıyan büyük taban yüzeyi ile toplanır. Anten alıcı yüzeyine vurulduktan sonra, odak noktasına yansıtılırlar. Bunların kazanç ve ışın genişliği aynı parabolik yansıtıcı gibidir.

Düşük gürültülü bir mikrodalga anteni oluşturur. Domuz horn antenin ana avantajı, anten kendi eksenini etrafında döndürülmüş olmasına rağmen alıcı noktasının hareket etmemesidir.

1.1.1.g. Radyasyon deseni

Horn antenin radyasyon düzeni küresel dalga cephesidir. Aşağıdaki şekilde horn antenin radyasyon modeli gösterilmektedir. Dalga açıklıktan yayılır ve dalgaların kırınımı en aza indirilir. Fişek ışınının odaklanmasını sağlar. Yayılan ışın yüksek yönlendiriciliğe sahiptir.



Şekil 1.6. Horn antenin radyasyon modeli

1.1.1.h. Horn Antenin Avantajları

Horn antenin avantajları maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

- Küçük küçük loblar oluşur.
- Empedans eşleştirme iyidir.
- Daha fazla yönlülüğe sahiptir.
- Dar ışın genişliğine sahiptir.
- Dikey dalgalardan kaçınılır.

1.1.1.i. Horn Antenin Dezavantajları

Horn antenin dezavantajları maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

- Parlama açısının şekli, yönlülüğe karar verir.
- Parlama açısı ve parlama uzunluğu çok küçük olmamalıdır.

1.1.1.i. Horn Antenin Uygulama Alanları

Horn antenin uygulamaları aşağıda belirtilmiştir.

- Astronomik çalışmalar için kullanılır.
- Mikrodalga uygulamalarında kullanılır.

1.2. Saçılma Parametreleri

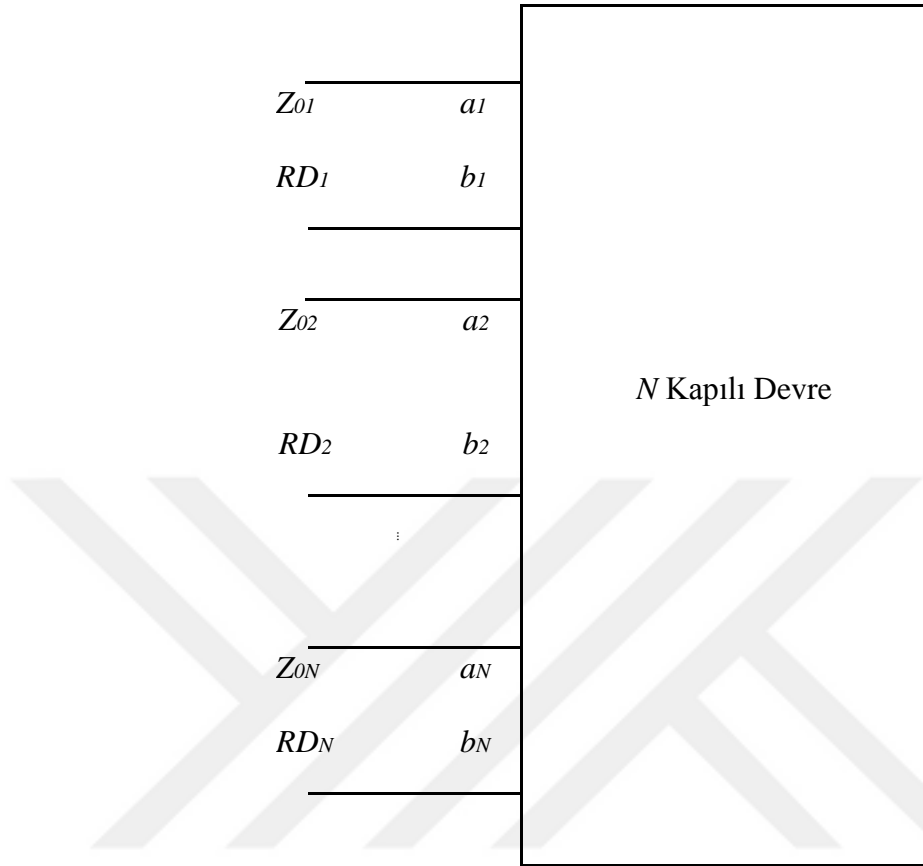
Mikrodalga frekanslarında gerilim ve akım değerlerinin doğrudan ölçülmesinde ortaya çıkan problemler, bunların ifade edilmesindeki zorluklar ve saçılma (S) parametrelerinin doğrudan ölçümünün mümkün olması problemlerin çözümünde S matrisi kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Devre üzerinde bu büyüklüklerin tespiti için bu amaç

doğrultusunda tasarlanmış olan network analizörler kullanılmaktadır. Ayrıca S matrisindeki elemanlar fiziksel bir anlam taşıyan büyüklüklere tekabül etmektedir. Bu durumu iki madde ile özetlemek mümkündür:

- N kapılı bir devrede diğer kapıların yansıma olmayacak şekilde sonlandırılmasıyla elde edilen matrisin köşegeninde yer alan değerler söz konusu o kapıya ait yansıma katsayılarını ifade etmektedir.
- Köşegen haricindeki diğer tüm elemanlar ise kapılar arasındaki iletimin ne ölçüde gerçekleştiğini ortaya koyan katsayıları göstermektedir.

1.2.1. Genişletilmiş saçılma matrisi

Saçılma matrisi en basit şekliyle devre kapılarına gelen ve devre kapılarından yansıyan dalgaların birbirleriyle olan ilişkilerinin ölçüsü olarak tanımlanabilmektedir. Şekil 1.7’de her bir kapısının referans düzlemi RD_i ve karakteristik empedansı Z_{0i} olan N kapılı bir devre yer almaktadır. Karakteristik empedans kavramı iletim hattında aynı yöndeki gerilim dalgasının akım dalgasına oranı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1.7. N kapılı bir mikrodalga devresi

Ayrıca kapılara gelen ve kapılardan yansıyan dalgalar sırasıyla a_i ve b_i ile ifade edilmektedir. a_i ve b_i değerleri, gelen ve yansıyan gerilim (V_{i+} , V_{i-}) veya akım (I_{i+} , I_{i-}) dalgaları ile karakteristik empedanslar cinsinden (1.1) ve (1.2) denklemlerindeki gibi tanımlanabilmektedir.

$$a^i = \frac{V_i^+}{\sqrt{Z_{0i}}} = I_i^+ \sqrt{Z_{0i}} \quad (1.1)$$

$$b^i = \frac{V_i^-}{\sqrt{Z_{0i}}} = I_i^- \sqrt{Z_{0i}} \quad (1.2)$$

Şekil 1.7’de yer alan N kapılı devrenin genelleştirilmiş saçılma matrisini ve matrisin her bir elemanını en genel haliyle (1.3) ve (1.4) denklemlerinde olduğu gibi ifade etmek mümkündür.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$S_{ij} = \frac{b_i}{a_j} \Big|_{a_{k=0, k \neq l}} = \frac{V_i^- / \sqrt{Z_{0i}}}{V_i^+ / \sqrt{Z_{0j}}} \Big|_{V_k^+ = 0, k \neq j} = \frac{I_i^- / \sqrt{Z_{0i}}}{I_i^+ / \sqrt{Z_{0j}}} \Big|_{V_k^+ = 0, k \neq j} \quad (1.4)$$

Benzer şekilde, özel olarak iki kapılı bir mikrodalga devresinin S matrisi ve elemanları (1.5) ve (1.6) denklemlerindeki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}, S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}, S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}, S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (1.6)$$

1.2.2. Saçılma matrisinin özellikleri

S matrisi yardımıyla devrelerin birtakım özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu devre özelliklerinden en mühim olanlarını aşağıdaki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

- Resiprok Devreler
- Yansımasız Devreler
- Kayıpsız Devreler

1.2.2.a. Resiprok devreler

En genel anlamda pasif elemanlardan oluşan devrelere resiprok devreler adı verilmektedir. Zayıflatıcı, kuvvetlendirici, birleştirici, dağıtıcı gibi yapılar resiprok devrelere verilebilecek en yaygın örnekleri teşkil etmektedir. Resiprok devrelerde S matrisi simetriktir bir başka deyişle transpozuna eşittir.

$$[S] = [S]^t \quad (1.7)$$

1.2.2.b. Yansımaz devreler

Devredeki bir kapıya ait öz yansıma katsayısı diğer kapıların uygun şekilde sonlandırılması neticesinde sıfır olduğu takdirde o kapının yansımaz olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durum matematiksel olarak ifade edilmek istenirse söz konusu i . kapıya ait S parametresi sıfır olmaktadır.

$$S_{ii} = 0 \quad (1.8)$$

1.2.2.c. Kayıpsız devreler

Devre üzerinde herhangi bir güç kaybının meydana gelmediği yapılar kayıpsız devreler olarak adlandırılmaktadır. Bir başka ifadeyle tüm kapılardan giren güçlerin toplamı tüm kapılardan yansıyan güçlerin toplamına eşit olmaktadır. Bu ifadeyi matematiksel olarak şu şekilde göstermek mümkündür.

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |a_i|^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |b_i|^2 \quad (1.9)$$

$$[a]^t[a]^* = [a_1]^2 + [a_2]^2 + \dots + [a_N]^2 \quad (1.10)$$

$$[b]^t[b]^* = [b_1]^2 + [b_2]^2 + \dots + [b_N]^2 \quad (1.11)$$

$$[a]^t[a]^* = [b]^t[b]^* \quad (1.12)$$

$$[b] = [S][a] \quad (1.13)$$

$$[a]^t[a]^* = [a]^t[S]^t[S]^*[a]^* \Rightarrow [a]^t\{[I] - [S]^t[S]^*\}[a]^* = 0 \quad (1.14)$$

(1.14) denklemindeki $[I]$ birim matris olmak üzere, kayıpsız olarak vasıflandırılan devrelerin sağlaması gereken en genel ve sade eşitlik şu şekilde yazılabilmektedir.

$$[S]^t[S]^* = [I] \quad (1.15)$$

Pratikte ise bu denklemden çıkartılan (1.16) ve (1.17) denklemlerinde yer alan ifadeler çok daha fazla kullanılmaktadır.

$$\sum_{i=1}^N |S_{ij}|^2 = 1, j = 1, 2 \dots N \quad (1.16)$$

$$\sum_{i=1}^N S_{ji}S_{jk}^* = 0, \forall(i, k), i \neq k \quad (1.17)$$

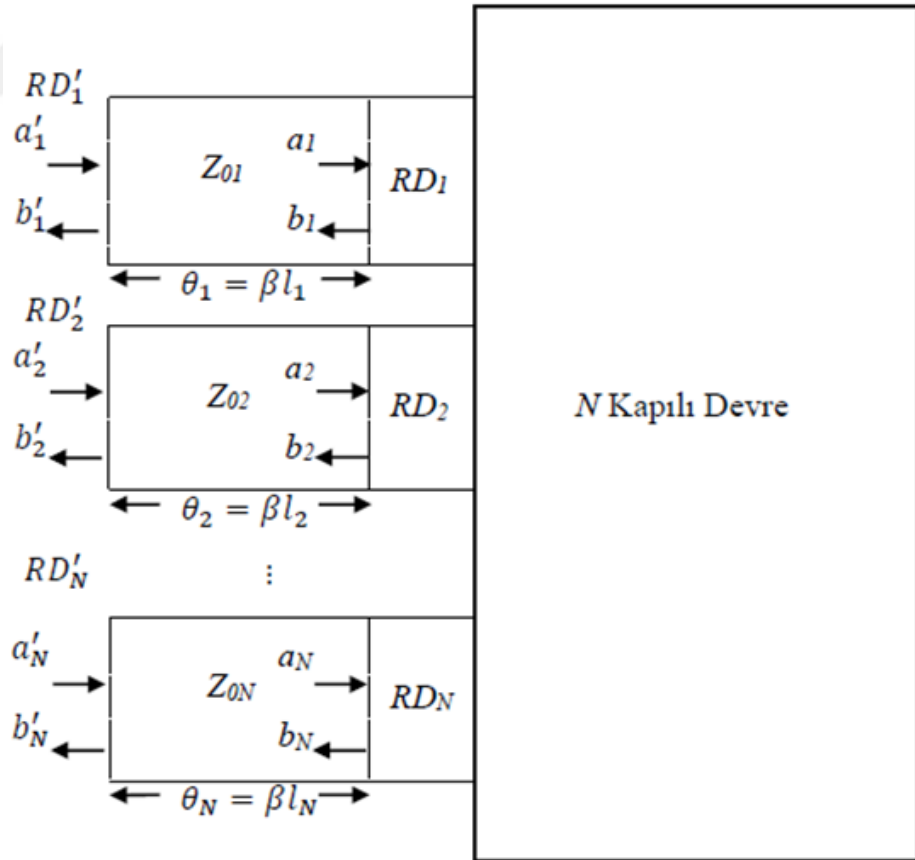
1.2.3. Referans düzlemlerinin ötelenmesi

Referans düzlemi kavramı en basit şekliyle, S parametrelerinin tespit edilebilmesi için yapılan ölçümlerin konumu olarak tanımlanabilmektedir. Bu konumun değişmesiyle birlikte S parametrelerinde de bir değişiklik olmaktadır. Devre kapılarına bağlanan

iletim hatları da böyle bir etkiye neden olmaktadır. Referans düzlemlerinin ötelenmesi prensibi ve asıl devrenin S matrisi yardımıyla yeni oluşan sistemin S matrisi $[S']$ şeklinde elde edilebilmektedir. Şekil 1.13'de kapılarına $\theta_i = \beta l_i$ ($i = 1, 2 \dots N$) uzunluğuna sahip iletim hatları bağlanmış bir mikrodalga devresinin meydana getirdiği sistem bulunmaktadır. Bu sistemin S matrisi $[S']$ ve elemanları (S'_{ij}) olmak üzere (1.18) ve (1.19) denklemlerinde olduğu gibi bulunabilmektedir.

$$[S'] = \begin{bmatrix} e^{-j\theta_1} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e^{-j\theta_2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & e^{-j\theta_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \dots & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\theta_1} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e^{-j\theta_2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & e^{-j\theta_N} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

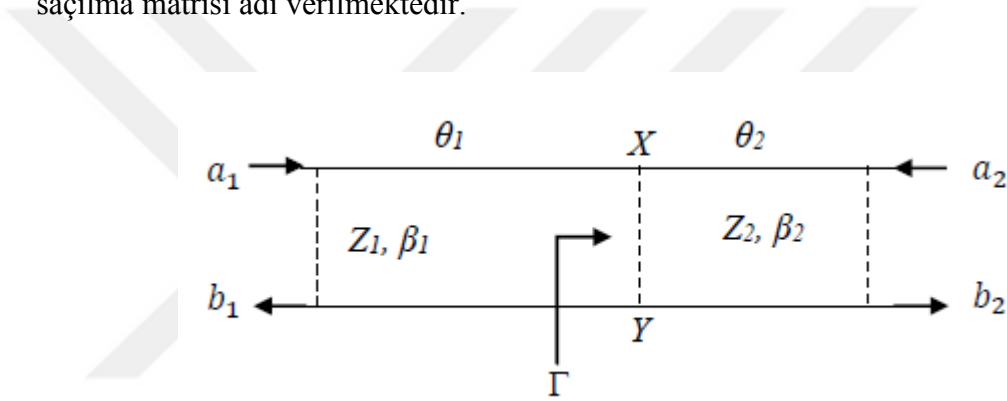
$$S'_{ij} = S_{ij} e^{-j(\theta_i + \theta_j)} \quad (1.19)$$



Şekil 1.8. Kapılarına iletim hattı bağlanmış N kapılı bir mikrodalga devresi

1.2.4. İletim hattı modeli ve jonksiyon saçılma matrisi

İletim hattı modeli, alan analizi ile devre teorisi arasında bir köprü vazifesi görmesi vesilesiyle mikrodalga devrelerinin analizinde önemli bir rol oynamaktadır. İletim hattı modelini iki farklı ortamda propagasyon yapan dalga üzerinde göstermek büyük kolaylık sağlamaktadır. Şekil 1.9’da karakteristik empedansları Z_1 , Z_2 ve elektriksel uzunlukları θ_1 , θ_2 olan iki farklı iletim hattı bir XY jonksiyonuyla birbirlerine bağlanmıştır. Bu sistemde XY jonksiyonu için hesaplanacak S matrisine jonksiyon saçılma matrisi adı verilmektedir.



Şekil 1.9. Bir jonksiyonla bağlanmış iki farklı iletim hattı

Z_1 ve Z_2 'nin ifadeleri (1.20) ve (1.21) denklemlerinde olduğu gibidir.

$$Z_1 = \frac{\omega\mu}{\beta_1} \quad (1.20)$$

$$Z_2 = \frac{\omega\mu}{\beta_2} \quad (1.21)$$

β_1 ve β_2 terimlerini TE₁₀ modu için (1.22) ve (1.23) denklemlerindeki gibi sadeleştirmek mümkündür.

$$\beta_1 = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a_1}\right)^2} \quad (1.22)$$

$$\beta_2 = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a_2}\right)^2} \quad (1.23)$$

Jonksiyon için (1.24) eşitliği yazılabilmektedir.

$$(a_1 + b_1)\sqrt{Z_1} = (a_2 + b_2)\sqrt{Z_2} \quad (1.24)$$

Öz yansıma ve geçiş katsayıları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$S_{11} = -S_{22} = (Z_1 - Z_2)/(Z_2 + Z_1) = \Gamma \quad (1.25)$$

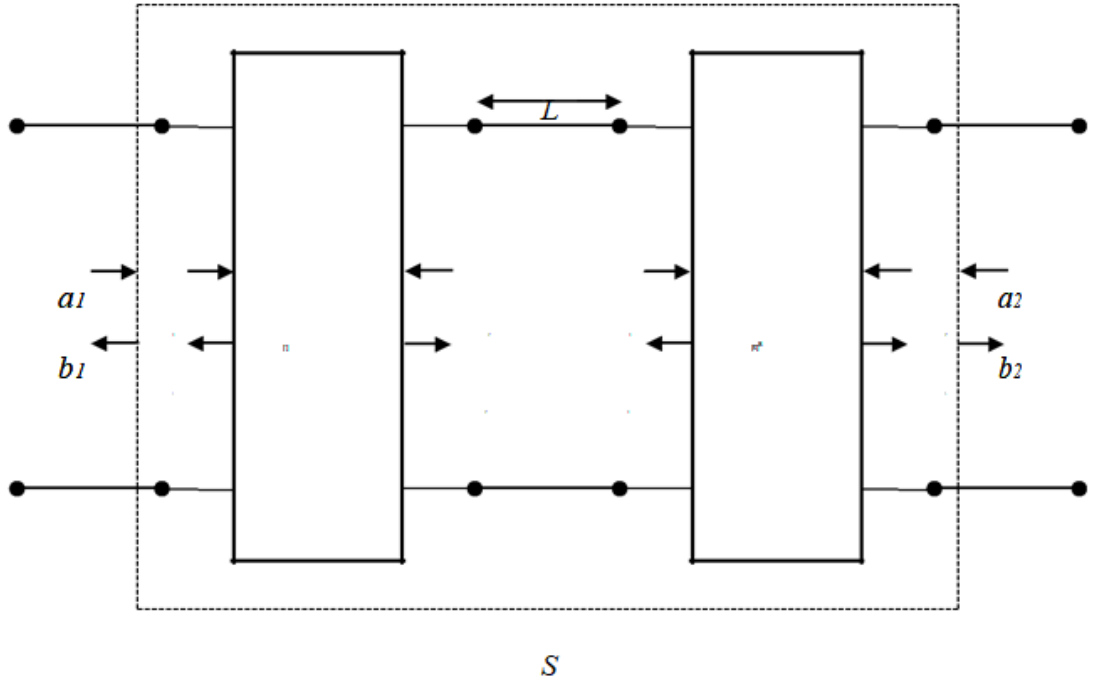
$$S_{12} = (1 + S_{22})\sqrt{Z_2/Z_1} = (2\sqrt{Z_1 Z_2})/(Z_2 + Z_1) = \sqrt{1 - \Gamma^2} \quad (1.26)$$

$$S_{21} = (1 + S_{11})\sqrt{Z_1/Z_2} = (2\sqrt{Z_1 Z_2})/(Z_2 + Z_1) = S_{12} \quad (1.27)$$

Neticede İletim Hattı Modeli literatürde hızlı sonuç verdiği için sıklıkla tercih edilmekte fakat kesitlerde süreksizlik olması durumunda sağlıklı sonuçlar üretmediğinden kısıtlı bir çözüm yöntemi olarak gözükmektedir.

1.2.5. Kaskat devrelerin saçılma matrisi

Şekilde 1.10'te S matrisleri $[S]$ olan iki kapılı iki devrenin L uzunluklu kayıpsız bir iletim hattı ile birbirine bağlanmış hali gösterilmektedir.



Şekil 1.10. İletim hattıyla bağlı iki kapılı iki devreli bir system

Burada $[S]$ matrisleri (1.28) ve (1.29) denklemlerinde olduğu gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} b_1^A \\ b_2^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^A & S_{12}^A \\ S_{21}^A & S_{22}^A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^A \\ a_2^A \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$\begin{bmatrix} b_1^B \\ b_2^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^B & S_{12}^B \\ S_{21}^B & S_{22}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^B \\ a_2^B \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Bu tanımlamalardan sonra ise oluşan yeni devrenin S matrisi (1.30) denklemiyle ifade edilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} b_1^A \\ b_2^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^A \\ a_2^B \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Yukarıda yer alan $[S]$ matrisinin elemanlarını kullanarak aşağıdaki şekilde ifade etmek mümkündür.

$$S_{11} = S_{11}^A + \frac{e^{-j2\beta L} S_{12}^A S_{11}^B S_{21}^A}{1 - e^{-j2\beta L} S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.31)$$

$$S_{12} = \frac{e^{-j2\beta L} S_{12}^A S_{12}^B}{1 - e^{-j2\beta L} S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.32)$$

$$S_{21} = \frac{e^{-j2\beta L} S_{21}^A S_{21}^B}{1 - e^{-j2\beta L} S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.33)$$

$$S_{22} = S_{22}^B + \frac{e^{-j2\beta L} S_{22}^A S_{21}^B S_{12}^B}{1 - e^{-j2\beta L} S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.34)$$

$L = 0$ alınarak oluşturulan kaskat yapının S matrisi ise aşağıdaki gibi daha sade bir

şekilde yazılabilmektedir.

$$S_{11} = S_{11}^A + \frac{S_{12}^A S_{11}^B S_{21}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.35)$$

$$S_{12} = \frac{S_{12}^A S_{12}^B}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.36)$$

$$S_{21} = \frac{S_{21}^B S_{21}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.37)$$

$$S_{22} = S_{22}^B + \frac{S_{12}^B S_{21}^B S_{22}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \quad (1.38)$$

1.3. Kalkanlama Etkisi

Elektromanyetik girişimi kalkanlama, elektromanyetik dalgaların geçişini düzenlemek için gerekli bir bariyerdir. Güç elektroniğinde, kalkanlama terimi genel olarak elektronik bir ürünü tamamen ya da bir kısmını kaplayan ve ürünün elektronik performansına zarar veren bir dış kaynaktan elektromanyetik salınımını önleyen bir kaplama anlamına gelmektedir.

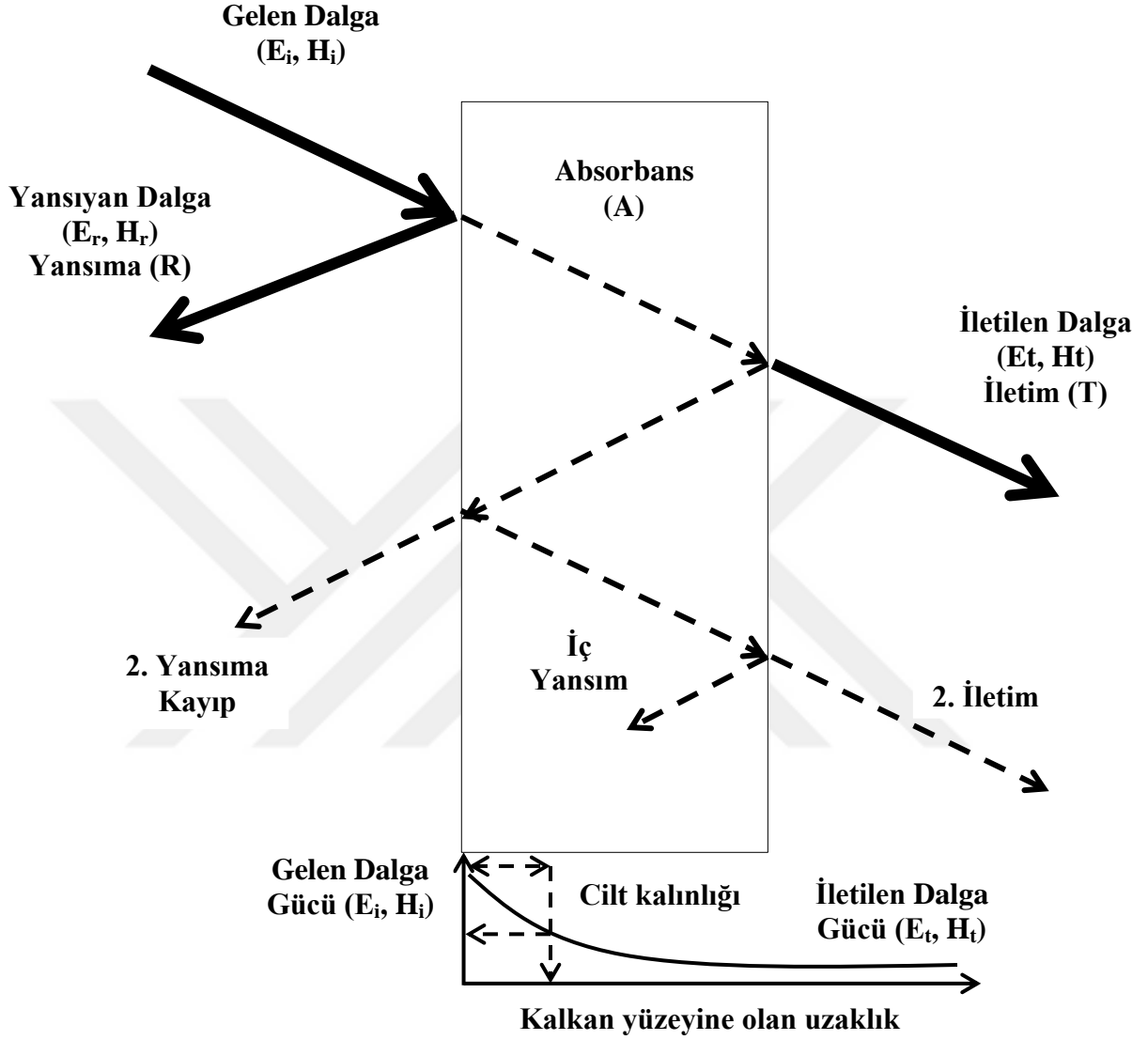
Diğer bir taraftan kalkanlama, canlı organizmaların ya da elektronik maddelerin devre parçalarının iç salınımından kaynaklı dışsal hassasiyetini önlemek için de kullanılabilir. Kalkanlama stratejik olarak tasarlanmış Elektromanyetik kalkanı kullanılarak belirli seviyedeki güç kaybını artırma işlemidir. Kalkanlama etkisi genel olarak kalkan etrafındaki güç geçişinin büyüklüğünü azaltmak amacıyla ölçülür. Matematiksel olarak kalkanlama etkisi logaritmik skalada aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$SE_T(dB) = SE_R + SE_A + SE_M = 10 \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_I} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{E_T}{E_I} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{H_T}{H_I} \right) \quad (1.39)$$

P_I (E_I ya da H_I) ve P_T (E_T ya da H_T) elektrik ya da manyetik alan yoğunluğunun gücüdür ve elektromanyetik dalgalara sırasıyla aktarılır. Denklem 1.39'da gösterildiği gibi yansıma, soğrulma ve çoklu içsel yansıma diye adlandırılan üç farklı mekanizma sırasıyla yansıma, soğrulma ve çoklu yansımadan kaynaklı toplam güç kaybını SE_R , SE_A ve SE_M gibi kalkanlama etkisi bileşenleri ile uyum sağlayarak önlemeye yardımcı olur.

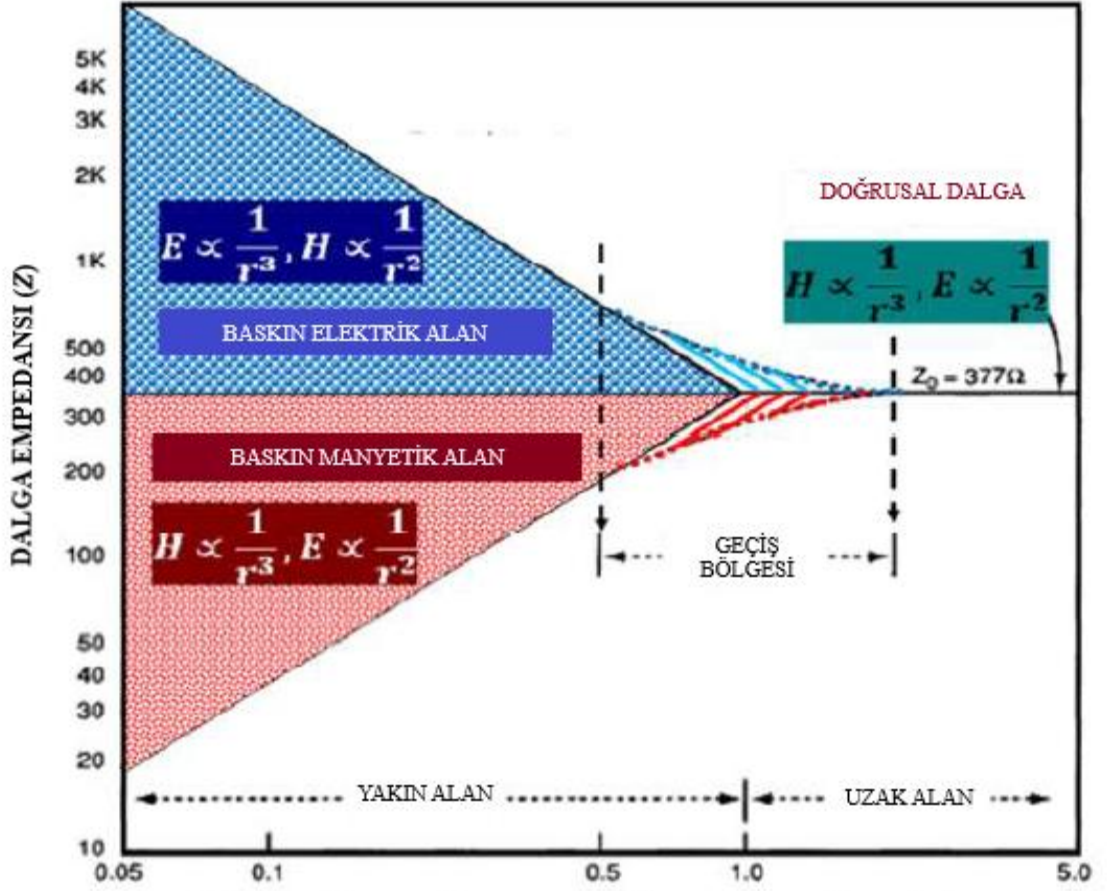
1.3.1. Teorik kalkanlama etkisi

Kalkanlama analizine başlamadan önce, anlamak için gerekli farklı elektromanyetik terimler vardır.



Şekil 1.11. EMI kalkanlama mekanizmasının şematik gösterimi

Şekil 1.11 Elektromanyetik girişimi kalkanlama mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 1.12. Dalga empedansının normalize edilmiş $\lambda/2\pi$ mesafe aralığındaki bağımlılığı

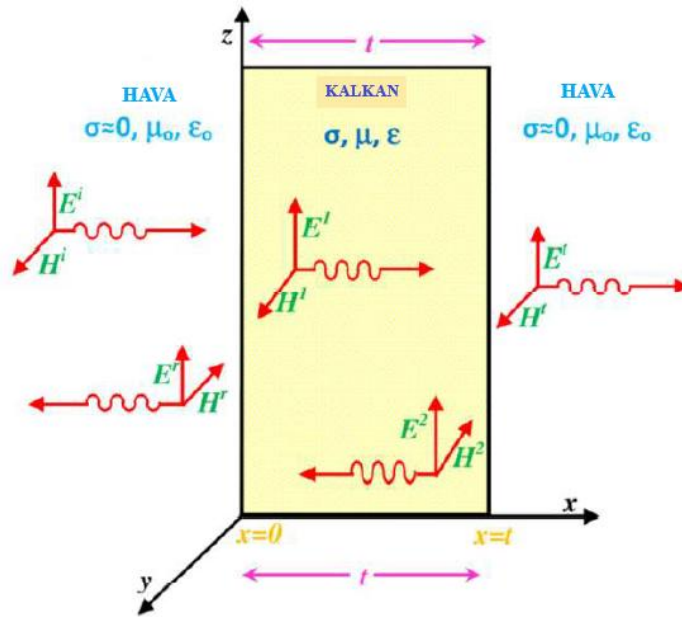
Yayılan kaynak ile gözlem noktası arasındaki r uzaklığına göre bir elektromanyetik ışınımlı bölge, elektromanyetik dalganın toplam dalga boyuna (λ) göre üç kısma ayrılabilir (Şekil 1.12). $r < \lambda/2\pi$ mesafesindeki bölge yakın alan iken $r > \lambda/2\pi$ mesafesindeki bölge uzak alandır. İki bölge arası, uzaklık olarak $r \approx \lambda/2\pi$, geçiş bölgesidir. Özel kalkanlama uygulaması için bir malzeme tasarlamak için, kalkanlama etkisinin, yansıma, soğurma ve çoklu yansıma kaybı bileşenleri ile ilişkilendiren uygun teorik ilişkilere dayandığı hem içsel hem de dışsal parametreler hakkında derinlemesine bilgi sahibi olması şarttır.

1.3.1.a. Kalkanlama teorisi

Bu bölüm, iletim hattı teorisine (Schelkunoff 1943) ve düzlemsel dalga kalkanlama teorisine dayalı kalkanlama temellerini sunmaktadır. Şekil 1.11’de gösterildiği gibi, yalnızca x ekseninde bir düzlem içinde değişen E ve H karakteristik bir düzlem dalgası olduğunu varsayalım. Maxwell’in denklemleri:

$$\frac{dE}{dx} = j\omega\mu H \text{ ve } \frac{dH}{dx} = (\sigma + j\omega\epsilon)E \quad (1.40)$$

Burada μ , maddenin manyetik geçirgenliğidir ve $\mu = \mu_0\mu_r$ ’dir. μ_0 ve μ_r sırasıyla havanın (veya boş alanın) ve kalkan malzemesinin kısmi geçirgenliğidir, σ malzemenin S/m cinsinden iletkenliğini verir. Burada ϵ maddenin elektriksel geçirgenliğidir ve $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ ’dir. ϵ_0 ve ϵ_r sırasıyla havanın (veya boş alanın) ve kalkan malzemenin geçirgenliğidir. $\omega = 2\pi f$ şeklinde ifade edilir ve ω (f) Hz cinsinden açısal frekans (doğrusal frekans)tır.



Şekil 1.13. Elektromanyetik dalgaların yayılımı ve kalkan materyali ile etkileşimi

Tüm homojen malzemeler iç direnç olarak bilinen bir değer (η : dalga empedansı) ile karakterize edilir:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (1.41)$$

Bir elektromanyetik dalga malzemenin içinden yayıldığında, dalga direnci malzemenin iç direncine yaklaşır. Dielektrik malzeme için iletkenlik son derece küçüktür ($\sigma \ll \omega\epsilon$) ve 1.41. eşitliğinin iç direnci şöyle olur:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.42)$$

$\sigma \gg \omega\epsilon$ tarafından tanımlanan optik frekansların altında kullanılan bir iletken için 1.41. eşitliğinin iç direnci şu şekilde yazılabilir:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\pi\mu f}{\sigma}} \quad (1.43)$$

Genelde yayılma sabitinin (γ) tanımlanması aşağıdaki gibidir:

$$\gamma = (a + j\beta) = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (1.44)$$

Burada α zayıflama sabiti ve β faz sabitidir. İyi bir iletken, $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$ olduğu bir ortamdır. Bu şartlar altında denklem şöyle olur:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1 + j) \sqrt{\pi\mu f\sigma} \quad (1.45)$$

Bu yüzden $\alpha = \beta = 1/\delta = \sqrt{(\pi\mu\sigma + 1)}$ yazabiliriz, burada δ 'nın miktarı, dalganın orijinal gücünün %37'sine kadar zayıflatılması için gereken mesafe olarak tanımlanan kalkan derinliğini temsil eder. Dielektrik düzlem levha $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ için eşitlik şöyle olur:

$$\gamma = \sqrt{-\omega^2\mu\epsilon} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.46)$$

t kalınlığındaki homojen bir bariyerin direnci;

$$Z = \eta \frac{Z(t) \cosh(\gamma t) + \eta \sinh(\gamma t)}{\eta \cosh(\gamma t) + Z(t) \sinh(\gamma t)} \quad (1.47)$$

$$H(t) = \frac{\eta}{\eta \cosh(\gamma t) + Z(t) \sinh(\gamma t)} H(0) \quad (1.48)$$

$$E(t) = \frac{Z(t)}{Z(t) \cosh(\gamma t) + \eta \sinh(\gamma t)} E(0) \quad (1.49)$$

Z (0) düzleminde 0 ara yüzeyindeki direnç ve H(t), x=t düzleminin sağına bakan t ara birim direncidir. Z (t) $\neq \eta$ ise, yansıma x = t sınırında gerçekleşir. E^i ve H^i , ortaya çıkan elektrik ve manyetik alanlar, E^r ve H^r yansıyan alanlar, ve Şekil 1.13'de gösterildiği gibi iletilen alanlar E^t ve H^t 'dir. Teğet alan bileşeninin bir sınırdaki sürekliliği ile yazabiliriz:

$$E^i + E^r = E^t \text{ ve } H^i + H^r = H^t \quad (1.50)$$

Bir düzlem dalganın elektrik ve manyetik alanları ortamın iç empedansı ile ilişkilidir.

$$E^i = \eta H^i \text{ ve } E^r = -\eta H^r \text{ ve } E^t = Z(1)H^i \quad (1.51)$$

Yukarıdaki denklemleri çözerek yansıma katsayılarının ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$q_E = \frac{E^r}{E^i} = \frac{Z(t) - \eta}{Z(t) + \eta} \quad (1.52)$$

$$q_H = \frac{H^r}{H^i} = \frac{\eta - Z(t)}{\eta + Z(t)} = -q_E \quad (1.53)$$

İlgili iletim katsayıları şöyle yazılabilir:

$$p_E = \frac{E^t}{E^i} = \frac{2Z(t)}{\eta + Z(t)} = 1 + q_E \quad (1.54)$$

$$p_H = \frac{H^t}{H^i} = \frac{2\eta}{\eta + Z(t)} = 1 + q_H \quad (1.55)$$

İki uyumsuz ara yüz aynı düzlemde göz önüne alındığında, net iletim katsayıları, iki sınır boyunca yani iletim katsayısının sonucudur;

$$p = p_E = p_H = p_E(0)p_E(t) = p_H(0)p_H(t) \quad (1.56)$$

Yeniden yansıtma etkisi göz önüne alındığında, düzlem boyunca iletim katsayıları şunlardır:

$$T_H = \frac{H(t)}{H^i} = \frac{H(t)}{H(0)} \cdot \frac{H(0)}{H^i} \quad (1.57)$$

$$T_E = \frac{E(t)}{E^i} = \frac{Z(t)}{Z_\omega} \cdot \frac{H(t)}{H^i} = \frac{Z(t)}{Z_\omega} T_H \quad (1.58)$$

Burada $E(0)$, $E(t)$ ve $H(t)$, $x=0$ ve $x=t$ 'deki arabirimlerdeki gerçek değerlerdir. Z , olay dalgasının empedansdır. 0 ve t kalınlığının düzlemi için (1.47), (1.48) ve (1.49) denklemlerini kullanarak (1.52) ve (1.53) denklemlerini yazabiliriz:

$$\frac{H(t)}{H(0)} = \frac{\eta}{\eta \cosh(\gamma t) + Z(t) \sinh(\gamma t)} \quad (1.59)$$

$$\frac{E(t)}{E(0)} = \frac{Z(t)}{Z(t) \cosh(\gamma t) + \eta \sinh(\gamma t)} \quad (1.60)$$

$$\frac{H(t)}{H^i} = \frac{2Z_\omega}{Z_\omega + Z(0)} \quad (1.61)$$

$$\frac{E(t)}{E^i} = \frac{2Z(0)}{Z_\omega + Z(0)} \quad (1.62)$$

Buradaki $Z(0)$, $x = 0$ arabirimindeki dirençtir ve düzlem içine bakar. (1.61) ve (1.62) numaralı denklemler (1.57) ve (1.58) numaralı denklemlerin yerine kullanarak:

$$T = T_E = p_H(1 - q_H e^{-2\gamma t})e^{-\gamma t} \quad (1.63)$$

elde edilir. Burada;

$$p_H = \frac{4Z_\omega \eta}{(Z_\omega + \eta)(Z(t) + \eta)} \quad (1.64)$$

$$q_H = \frac{(Z_\omega - \eta)(Z(t) - \eta)}{(Z_\omega + \eta)(Z(t) + \eta)} \quad (1.65)$$

şeklinde ifade edilir. $Z(t)=Z_w$, $k=Z_w/\eta$ aldığımız zaman şöyle yazabiliriz:

$$p = p_H = \frac{4k}{(k+1)^2} \quad (1.66)$$

$$q = q_H = \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} \quad (1.67)$$

$$T_E = T_H = T = p(1 - qe^{-2\gamma t})e^{-\gamma t} \quad (1.68)$$

olarak elde edilir. Tanım olarak, toplam kalkanlama etkinliği;

$$SE_T = 20 \log_{10}|T| = 20 \log_{10}|p(1 - qe^{-2\gamma t})e^{-\gamma t}| \quad (1.69)$$

$$SE_T = \underbrace{20 \log_{10}|p|}_{SE_R} + \underbrace{20 \log_{10}|e^{-\gamma t}|}_{SE_A} + \underbrace{20 \log_{10}|(1 - qe^{-2\gamma t})|}_{SE_M} \quad (1.70)$$

olduğu için, δ 'nın kalkan kalınlığı (t) ile dikkatlice karşılaştırılmasından sonra iki durum ortaya çıkar:

a. ($t \ll \delta$): Düşük frekanslarda veya elektriksel olarak ince bir örnek durumunda, gerçek kalkan kalınlığının cilt derinliğinden çok daha az olduğu durumlarda oluşur. Böyle bir durumda, kütle (veya kalınlık) ile ilgili bir çok emilim ihmal edilebilir ve zayıflama neredeyse sadece yansıma ile gerçekleşir. Toplam kalkanlama frekanstan bağımsız hale gelir ve boş alan direnci ($Z_0 = 377 \Omega$) olarak ifade edilebilir:

$$SE(dB) = -20 \log_{10} \left[1 + \frac{Z_0}{2} t \sigma_T \right] \quad (1.71)$$

b. Bu bizim durumumuzda geçerlidir ve genellikle cilt derinliğinin gerçek kalkan kalınlığına kıyasla, yani elektriksel olarak kalın örneklerde daha az olduğu daha yüksek frekanslarda meydana gelir. Bu tür bir sistemde, yansıma, soğurma ve çoklu iç alt yansılardan kaynaklanan zayıflamalar, iyi iletken yaklaşımı yapıldıktan sonra

dümdüz bir dalga haline gelir diğer bir deyişle $\sigma_T / \omega \epsilon \gg 1$ [veya $k \ll 1$ (yani $Z_w \gg \eta$)] olarak elde edilir.

1.3.1.b. Yansıma kaybı

Yansıma kaybı, kalkanın yüzeyi ile yayılan dalga arasındaki bağıl direncin uyumsuzluğu ile ilgilidir. Düzlem dalga altında yansıma kaybının büyüklüğü (uzak alan koşulları) olarak ifade edilebilir.

$$SE_R(dB) = -10 \log_{10} \left[\frac{\sigma_T}{16\omega \epsilon_0 \mu_r} \right] \quad (1.72)$$

Burada; σ_T toplam iletkenlik olup f, Hz cinsinden frekanstır, μ_r , boş alanı temsil eden bağıl geçirgenliktir; Yukarıdaki ifade, SE_R 'nin, kalkan malzemesinin iletkenlik (σ_T) ve geçirgenlik oranının (μ_r), yani nicelik (σ_T / μ_r) oranının bir işlevi olduğunu gösterir.

1.3.1.c. Soğurma kaybı

Şekil 1.13'de gösterildiği gibi, bir elektromanyetik dalga bir ortamdan geçtiğinde genliği katlanarak azalır. Bu zayıflama veya soğurma kaybı, ortamda indüklenen akımların ohmik kayıplar üretmesi ve malzemenin ısınması nedeniyle oluşur. E_T ve H_T , $E_T = E_i e^{-t/\delta}$ ve $H_T = H_i e^{-t/\delta}$ olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, desibel (dB)'deki emilim teriminin (SE_A) büyüklüğü aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$SE_A(dB) = -20 \frac{t}{\delta} \log_{10} e = -8.68 \left(\frac{t}{\delta} \right) = -8.68t \left(\frac{\sigma_T \omega \mu_r}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.73)$$

Buradaki t, inç cinsinden kalkan kalınlığıdır ve f, Hertz cinsinden frekanstır. Yukarıdaki ifade SE_A 'nın, kalkan malzemesinin geçirgenliğinin ve iletkenliğinin çarpımının kare kökü ile orantılıdır yani bu nicelik $(\sigma_T \cdot \mu_r)^{1/2}$. Ayrıca, belirli bir malzeme için, soğurma

kaybı, frekanstaki artışla artar. Bu nedenle, iyi bir soğurucu malzeme, en düşük eşik frekansında bile gerekli cilt derinliğini elde etmek için yüksek iletkenliğe ve yüksek geçirgenliğe ve yeterli kalınlığa sahip olmalıdır.

1.3.1.d. Çoklu yansımalar

Kalkan ince ise, ikinci sınırdan yansıyan dalga, ilk sınırdan tekrar yansıtılır ve Şekil 1.11'de gösterildiği gibi tekrar tekrar yansıtılmak üzere ikinci sınıra geri döner. Bu çoklu iç yansımalar nedeniyle zayıflama, yani SE_M matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$SE_M(dB) = 20 \log_{10}(1 - e^{-2t/\delta}) = 20 \log_{10} \left| \left(1 - 10^{-\frac{SE_A}{10}} \right) \right| \quad (1.74)$$

Bu nedenle, denklem 1.74 'de SE_M 'in soğurma kaybıyla (SE_A) yakından ilgili olduğu görülebilir. SE_M , gözenekli yapılar ve belirli doldurulmuş kompozitler için veya belirli tasarım geometrileri için de önemlidir. Yüksek bir SE_A değerinden dolayı kalın bir emici kalkan olması durumunda ihmal edilebilir, böylece dalga ikinci sınıra ulaştığında ihmal edilebilir bir genliğe sahip olur. Pratik amaçlar için, $SE_A \geq 10$ dB olduğunda SE_M güvenli bir şekilde ihmal edilebilir. Genellikle SE_M sadece metaller ince olduğunda ve çok düşük frekanslarda kullanıldığında önemlidir. Bununla birlikte, yüksek emici malzemeler için veya çok yüksek frekanslarda, $SE_A \geq 10$ dB koşulu uygun olur ve yeniden yansımalar güvenli bir şekilde göz ardı edilebilir ($SE_M \approx 0$).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Teorik kalkanlama ifadelerinin dikkatli analizi, tasarım gerekliliklerini karşılamak ve verimli kalkanlama eylemini genişletmek için kalkanlamanın dengeli bir kombinasyon iletkenlik (σ), dielektrik geçirgenlik (ϵ), manyetik geçirgenlik (μ) ve fiziksel geometriye sahip olması gerektiğini ortaya çıkarmıştır (Joo and Epstein 1994; Chung 2001; Saini 2009a). Ayrıca, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi, EMI kalkanlamanın birincil mekanizması, elektron ve boşluk gibi mobil şarj taşıyıcılara sahip olması gereken kalkanın ön yüzeyinden yansımadır ve bu sayede kalkanda ısı kaybına neden olan elektromanyetik alanlarla etkileşim sağlayabilir. Sonuç olarak, yalnızca ortalama iletkenlik (10^{-3} S/cm) yeterli olmasına rağmen kalkanın elektriksel olarak iletken olması gerekmektedir (Olmedo *et al.* 1997; Saini *et al.* 2011). İkincil EMI kalkanlama mekanizması, radyasyon altında elektromanyetik alanlarla etkileşime girebilen, kalkanın ya elektrik ya da manyetik çift kutuba sahip olması gereken soğrulmadır.

Metaller, yüksek elektrik iletkenliklerinden dolayı elektromanyetik girişim kalkanlaması için en yaygın materyallerdir (Schulz *et al.* 1988; Paul 2004; Ott 2009). Prensipinde, son derece iletken materyaller oldukları için Cu, Ag ya da Ni gibi metaller kullanılır. Yalnızca iletkenlik (σ) ve manyetik geçirgenlik (μ) önemlidir. Öyle ki, soğrulma kaybı (SE_A) ürünlerinin (yani $\sigma \cdot \mu$) fonksiyonuna bağlı iken yansıma kaybı (SE_R) onların oranına (yani σ/μ) bağlıdır (Joo and Epstein 1994; Chung 2001; Ott 2009; Saini *et al.* 2011). Fakat, ortalama iletken materyal geçirgenliği durumunda (ϵ) (σ ve μ ek olarak) SE_R ve SE_A 'nın tam değerlerine karar vermede ayrıca önemli bir rol oynar. Böyle bileşikler, elektronik dalgalar tarafından gelen çarpmalar üzerindeki dinamik dielektrik ya da manyetik kayıpları sergileme yeteneğine sahiptir (Joo and Epstein 1994; Olmedo *et al.* 1997; Abbas *et al.* 2005, 2006). Yine de, metal temelli bileşikler yüksek yansıma, korozyon hassasiyeti, ağırlık kaybı ve masraflı işlemler gibi problemlere (Paul 2004; Ott 2009; Saini *et al.* 2009a, 2009b) sebep olabilir. Diğer alternatifler arasında, karbon temelli materyaller (grafit, genişletilmiş grafit, karbon siyahı, karbon nanotüpü ve grafin) muhtemel EMI kalkanlama uygulamaları için keşfedilmiştir (Joo *et al.* 1999;

Chung 2000, 2001; Makeiff and Huber 2006; *Huang et al.* 2006; Yang 2005a, 2005b; Saini *et al.* 2007, 2009a, 2009b, 2010, 2011; Pandey *et al.* 2009; Singh *et al.* 2011; Gupta and Choudhary 2011). Fakat grafit düşük dağılılabirlik ve yüksek süzülme eşiği sergilemektedir (Friend 1993; Olmedo 1997; Saini 2009a). Benzer şekilde, CNT ekonomik olarak uygulanabilir değildir, değer skalasında ölçülmesi zordur ve genelde arındırma, yardımcı işlem ve işlevselleştirme adımları gerektirir (Olmedo 1997; Bal 2007; Saini 2009a, 2011). Bu bağlamda, doğal olarak ayarlanabilir elektriksel iletken polimerler (ICPs), basit işlemler ve diğer polimetrik matrisli uyumlu diğer iletken dolgu malzemeleri üzerinde etkilleyici bir çözüm sunabilir (Ellis 1986; Skotheim 1986; Trivedi 1997; Olmedo 1997; Chandrasekhar 1999). İlginç bir şekilde, doğal elektriksel iletkenlik ve dielektrik özelliklerinden dolayı bu elektriksel iletken polimerler çeşitli yalıtım matrisleri için ya iletken dolgu malzemesi olarak ya da iletken matris olarak kullanılabilirler.

2.1. Mikrodalga Soğurucu Malzemeler

Mikrodalga soğurucular, farklı veya geniş bant frekanslarında EMI enerjisinin soğrulmasını sağlamak için şekil, yapı, geçirgenlik ve geçirgenlik ile yansıtmayı en aza indirmeye dayalı olarak tasarlanmıştır. EMI'nin yüzeyden yansımalarını minimize edebilen üç koşul vardır. Yarı sonsuz dielektrik veya manyetik dielektrik Z_M empedansı sınırında gerçekleşen Z_0 empedansı ile serbest bir uzayda yayılan bir E_M dalgası göz önüne alındığında, kısmi bir yansıma meydana gelir. Yansıma katsayısı denklem (2.1) olarak tanımlanabilir. $Z_M = Z_0$ olduğunda yansıma katsayısı sıfıra düşer (tabakadaki malzeme ortamın empedansı ile eşitlenir). Yansıma katsayısını en aza indiren ilk koşul budur. Boş alanın gerçek empedansı 377 ohm civarındadır. Bu, elektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenlik eşit olduğunda, minimum yansıma katsayısına ile sonuçlanan ikinci koşulu verir. Nominal iç empedans,

$$Z_M/Z_0 = (\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \quad (2.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\epsilon_R = (\epsilon_r - i \epsilon_i) / \epsilon_0$ ve $\mu_R = (\mu_r - i \mu_i) / \mu_0$; ϵ_r ve ϵ_i sırasıyla geçirgenliğin gerçek ve hayali parçalarıdır; (μ_r : gerçek ve μ_i : hayali). Ortam serbest alan ise ve hem gerçek hem de hayali geçirgenlik ve geçirgenlik parçaları eşitse, yansıtma katsayısı sıfırdır.

Üçüncü koşul, soğurucu bir ortama yayıldığı zaman dalganın zayıflamasıdır. Dalganın gücü, $e^{-\alpha x}$ faktörü a ile x mesafesine bağlı olarak üssel olarak azalır. Burada α (Gilbert sönümlenme sabiti olarak bilinir), tanımlanabilen malzemenin zayıflama sabitidir (Saville 2005).

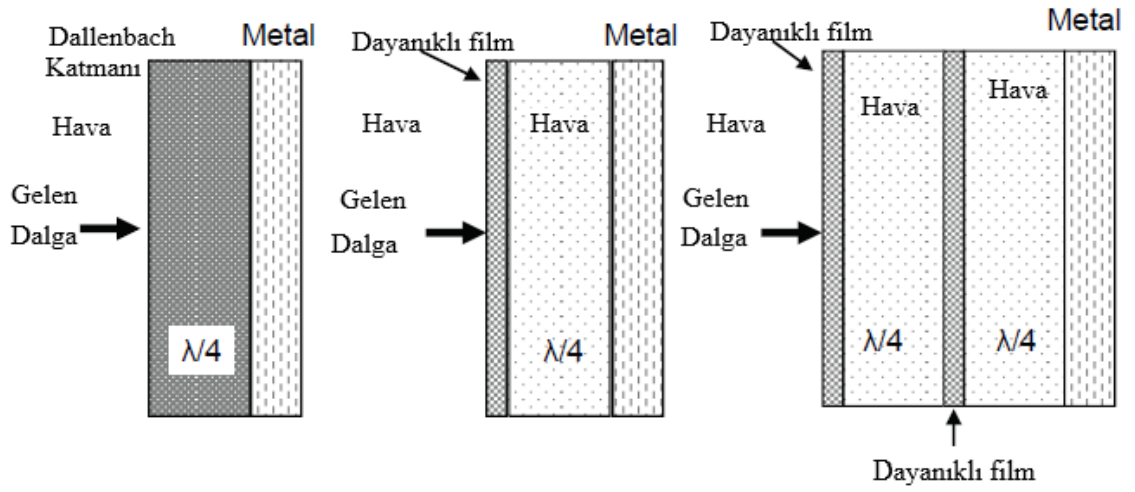
$$a = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} \omega (a^2 + b^2)^{1/4} \sin[1/2 \tan^{-1}(-a/b)] \quad (2.2)$$

Burada $a = (\epsilon_r \mu_r - \epsilon_i \mu_i)$ ve $b = (\epsilon_r \mu_i - \epsilon_i \mu_r)$ dir. İnce kalınlıkta belirgin bir zayıflama elde etmek için, α büyük olmalı ve sonuçta ϵ_r , μ_i , ϵ_i büyük olmalıdır. Ancak bu koşul, büyük geçirgenliğin büyük yansıma oluşturduğu ilk koşulla temperlenmelidir. Daha sonra, soğurucu malzeme, EMI enerjisinin malzemeye yayılması ve geri yansıtılmaması için kaybedilmiş olmalıdır. Dolayısıyla, bir soğurucu için, öne bakan yansıma katsayısı ile birim kalınlık başına kayıp arasında bir uyum vardır.

2.1.1. Rezonant soğurucular

Rezonant soğurucular, farklı frekanslarda EMI enerjisini soğurmak için yapılandırılması için ayarlanmış veya çeyrek dalga boyu soğurucu malzemelerden üretilir. Rezonant malzemeler normal olarak Şekil 2.1'de gösterildiği gibi Dallenbach katmanları, Salisbury ekranları ve Jaumann katmanlarını içerir (Saville 2005).

Rezonant soğurucularda, malzeme incedir ve empedans olay ve soğurucu ortam arasında eşleşmez ve sonuç olarak, tüm EMI enerjileri soğrulmaz. Sonuç olarak, EMI dalgasının yansıması ve iletimi ilk ara yüzde gerçekleşir.



Şekil 2.1. Rezonans soğurucular (soldan sağa): Dallenbach katmanı, Salisbury ekranı, Jaumann katmanları

Dallenbach katmanı iletken bir alt tabaka üzerine yerleştirilir ve homojen kayıplı malzemedir. Asgari yansıtıcılığı elde etmek için (belirli dalga boyları için), Z_M katmanının etkin empedansı, ortam empedansı Z_0 'a eşit olmalıdır. Bu yöntemle, sadece bir katmanla geniş bir banda ulaşmak mümkün değildir. Bu soğurucu silikon kauçuk, silisyum karbür, titanyum oksit ve karbon siyahı gibi ferrit malzemelerle üretilir (Mayer 1999). Bu soğurucu ağırdır ve havacılık uygulamaları için uygun değildir. Bu soğurucu için gerekli kalınlığın oluşturulması, gerçekçi görünmemektedir.

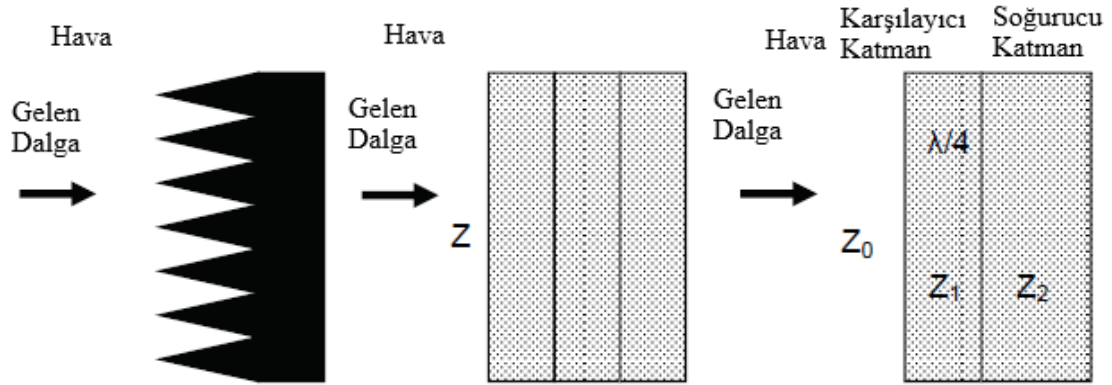
Salisbury ekranı aynı zamanda bir rezonans soğurucu tabakasıdır. Döküm tabakanın geçirgenliğine ve geçirgenliğine bağlı değildir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, metalin önünde, normalde hava boşluklarıyla ayrılmış, çeyrek dalga boyunun tek bir katı üzerinde dirençli bir tabaka vardır. Burada da ağırlık ve kullanılan alan, yöntemin ve bant genişliğinin en önemli sınırlarıdır.

Jaumann katmanları aslında artan bant genişliğine ve metal desteğin tepesindeki ara parçalarla ayrılmış çoklu ince, dirençli katmanlara sahip Salisbury ekranlarının değiştirilmiş versiyonlarıdır. Daha geniş bant genişliğinin değişmesi kalınlığa bağlıdır.

Sonuç olarak, burada soğurucu daha da kalındır, aynı zamanda ortak ağırlık ve kullanım alanı problemi vardır.

2.1.2. Kademeli dielektrik soğurucu

Bir ara yüze neden olan bir EM dalgası, dalga ve verici ortam arasındaki empedans adımının büyüklüğüyle orantılı olan bir yansımaya sahip olacaktır. Dalga ve soğurma ortamı arasındaki empedans adımını azaltmak için üç tip empedans eşleştirme yöntemi (eşleştirme, konik ve piramidal) geliştirilmiştir (Saville 2005). Dalganın tamamen emilmesi için, soğurucuya hacimli ve daha ağır yapan bir veya daha fazla dalga boyunda bir kalınlığa ihtiyaç vardır.



Şekil 2.2. Empedans uyumu ile kademeli dielektrik soğurucular

Piramidal soğurucular, piramit şeklindedir (Şekil 2.2). Bunlar tekrar tekrar aralıklı bir düzende önemli soğurucu malzemenin yüzeyine dikey olarak genişleyen koni yapılarıdır (Emerson 1973). Piramidal soğurucuların soğrulmasına, empedansın serbest alandan soğurucuya kademeli olarak geçişi ile ulaşılır. Piramitlerin yüksekliği ve periyodikliği, bir dalga boyunda olacak şekilde tasarlanmıştır. Daha kısa yapılar veya daha uzun dalga boylarında, dalgalar empedansta daha hızlı bir değişiklik tarafından soğrulacaktır. Piramidal soğurucular, geniş frekanslarda yüksek emilim sağlayan minimum işlem frekansına sahip oldukları için en iyi performansı sağlar. Piramidal

zayıflatıcılar normalde poliüretan köpükte iletken karbondan yapılmış yankısız hamberler için kullanılır. 50 dB'den daha büyük emme seviyelerine birçok dalga boyunda kalın olan piramitler ile ulaşılabilir. Başlıca dezavantajları, özellikle havacılık uygulamaları için, kırılgenlıkları ve kalınlıklarıdır. Bu yöntem, bazı eksikliklerin üstesinden gelmek için petek, köpük ve ağ veya çok katmanlı yapılar gibi diğer malzemelere uygulanabilir, ancak boyut sorunu hala gemide kullanım için hala devam etmektedir (Saville 2005).

Konik yükleme soğurucu normalde düşük kayıplı ve kayıplı malzeme karışımından yapılan bir parçadır. Kayıp kısım, olay yüzeyine paralel olarak eşit olarak dağılır (levhaya yükselme gradyanı ile) (Halpern 1960). Açık hücreli bir köpük veya plastik ağ içeren bir tür konik yükleme materyali, bir taraftan kaygan materyal ile daldırılır veya püskürtülür veya süzülüp kurmasına izin verilir (Jones 1964). Bir başka tür, dalga yayılımı yönünde kayıplı maddenin yükseltilmiş yüklenmesi ile homojen katmanlardan yapılır. Bu malzemeler daha incedir (piramidal soğuruculara göre avantajları) ancak yine de çok kalın sivil uçaklarda kullanılması içindir (Saville 2005).

Katman soğurucunun eşleştirilmesinde, kademeli geçiş materyalleri için gereken kalınlığı azaltmak için olay ve emme ortamı arasında bir geçiş soğurucu katman yerleştirilir. Geçiş katmanının kalınlığı ve empedansı iki empedans arasındadır. Sonuç olarak, birinci ve ikinci katmanlardan gelen kombine empedans, olay ortamının empedansına eşittir. Eşleşen katman, dalga boyunun dörtte biri ise katmandaki EMI'den ($Z_1 = (Z_0 Z_2)/2$) bu eşleşmeye ulaşılır. Optik kalınlığa eşit bir frekansta, empedans eşleşmesi meydana gelir. Sonuç olarak, eşleşen tabaka malzemeleri havacılık uygulamaları için bir dezavantaj olan dar bant soğuruculardır. Frekansları eşleşen katman soğurucu orta empedanslı bir geçiş katmanından ve buzdolabının emilmesi için kontrollü çeyrek dalga boyu kalınlığından yapılabilir (karbon katkılı veya emprenye üretan köpükleri).

2.1.3. Boşluk sönümlenme soğurucuları

Boşluk sönümlenme soğurucuları, geniş frekanslı manyetik kayıp özellikleri sağlayan, yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerle yüklü ince elastomerik tabakalardan yapılmıştır. Rezonant veya ayarlanmış soğurucular, maliyet ve ağırlık açısından daha iyi seçimlerdir. Kalınlık, fiyat ve ağırlık, bu soğurucuların yerleşik kullanımını yavaşlatan ana faktörlerdir.



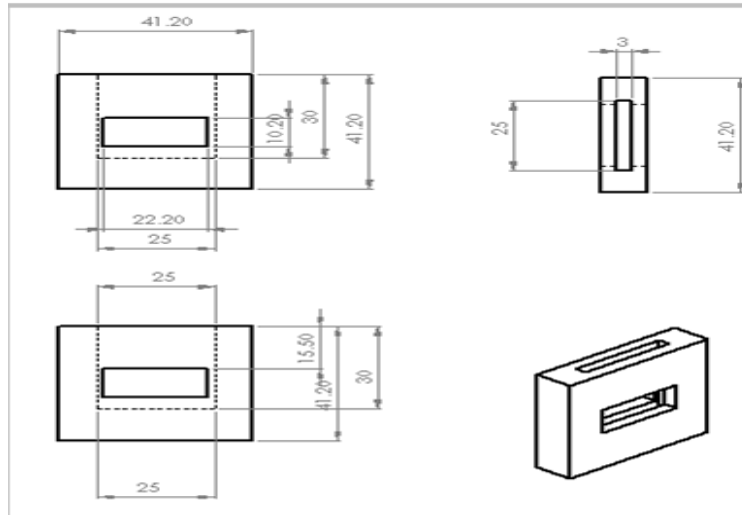
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Kalkanlama etkisinin analizi için şeffaf cam yüzeylere farklı katkı oranlarıyla hazırlanan metal oksitli çözeltiler ultrasonik sprey ile püskürtüldü. Sonrasında network analizör yardımıyla saçılma (S) parametreleri yöntemi kullanılarak sonuçlar gözlemlendi.

3.1. Cam Filmlerin ve Cam Tutucuların Hazırlanması

Kalkanlama etkisinin analizi için hazırlanan metal oksitli çözeltilerin püskürtüleceği cam filmler, şeffaf ve istenilen kalınlıkla olması gerekmektedir. Kullanılacak camın ebatları 25x25 mm ve kalınlığı 3 mm olarak belirlendi. Usta bir camcı da istenilen ölçülerde kestirilip hazırlandı.

Ölçümün yapılması için bir cam tutucuya ihtiyaç olduğu düşünülerek horn anten şeklinde bir cam tutucu; ebatları ve şekli Şekil 3.1'deki tasarım çizildi. Tasarıma uygun olarak cam tutucu üretildi.

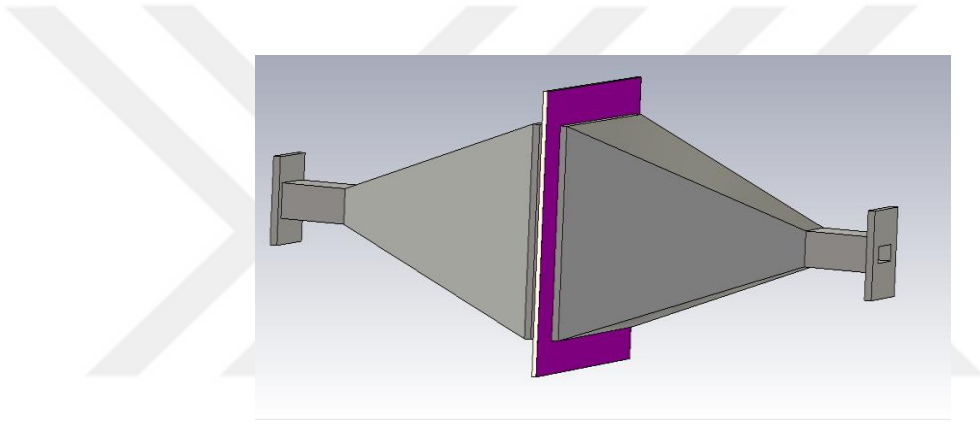


Şekil 3.1. Cam tutucu tasarımı

Şekil 3.1’de deneyde kullanılan cam yüzeylerin tutucu görevini sağlayan alüminyumdan yapılmış cam tutucunun tasarımı gösterilmiştir. Camların yerleştirileceği alanın üzerinde bir kapağı bulunmaktadır.

3.2. Ölçüm Düzeneginin Hazırlanması

Şeffaf cam yüzeylerin kalkanlama etkisini analiz edebilmek için Şekil 3.2’deki horn anten modeli baz alınarak Şekil 3.3’deki ölçüm düzenegi kuruldu.



Şekil 3.2. Horn anten modeli



Şekil 3.3. Ölçüm düzenegi

Şekil 3.3’de iki horn anten arasına yerleştirilen cam tutucu ve bu antenlerin uçlarının network analizörünün iki portuna bağlı düzeneği gösterilmiştir. Horn antenlerden biri alıcı diğeri ise verici anten olarak kullanılmıştır.

Ölçümler Şekil 3.4’deki mikrodalga vektör network analizör ile yapıldı. Vektör network analizörün giriş ve çıkış uçları horn antenin her iki ucuna bağlanarak ölçüm düzeneği tamamlanmış oldu.



Şekil 3.4. Mikrodalga vektör network analizör

3.3. Çözeltilerin Hazırlanması

Kalkanlama analizini yapmak için cam yüzey kaplamalarını kimyasal püskürtme tekniği ile yapıldığı için çözeltiler bu tekniğe uygun olarak hazırlandı. Şekil 3.5’deki karıştırıcı düzenek ile 30°C’de tamamen homojen olarak karıştırılması sağlandı. $SbCl_3$ ’ün

kalkanlama etkisini analiz etmek için aşağıdaki gibi dört farklı derişimdeki çözeltiler hazırlandı.

- 100 ml metanol ile 1,128 gr Tin (SnO_2) 0,05M çözeltilisine 10 ml metanol ve 0,114055gr SbCl_3 'ün 0,05M çözeltilisi %0 oranında katkılandı.
- 100 ml metanol ile 1,128 gr Tin (SnO_2) 0,05M çözeltilisine 10 ml metanol ve 0,114055gr SbCl_3 'ün 0,05M çözeltilisi %2 oranında katkılandı.
- 100 ml metanol ile 1,128 gr Tin (SnO_2) 0,05M çözeltilisine 10 ml metanol ve 0,114055gr SbCl_3 'ün 0,05M çözeltilisi %4 oranında katkılandı.
- 100 ml metanol ile 1,128 gr Tin (SnO_2) 0,05M çözeltilisine 10 ml metanol ve 0,114055gr SbCl_3 'ün 0,05M çözeltilisi %8 oranında katkılandı.



Şekil 3.5. Karıştırıcı düzenek

3.4. Kimyasal Püskürtme Yöntemi İle Cam Yüzeyle İnce Film Tabakası Yerleştirilmesi

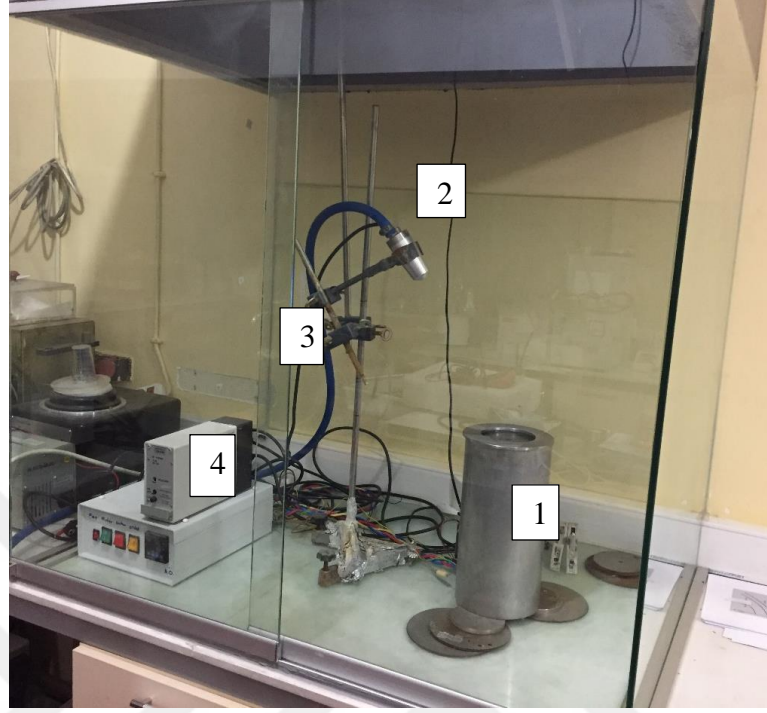
Kimyasal püskürtme ile kaplama sistemi dört temel bölümden oluşmaktadır.

- Isıtma Sistemi
- Döndürme Sistemi

- Püskürtme Sistemi
- Kontrol Sistemi

Kullanımının kolay olması, ekonomik olarak hesaplı olması, çok katmanlı püskürtme imkanı, çalışma sıcaklık bandının geniş olması gibi özelliklerinden dolayı çok tercih edilen bir yöntem olmuştur (Zhao *et al.* 2006; Douayar *et al.* 2011; Ajili *et al.* 2012; Salaken *et al.* 2013; Bedia *et al.* 2014; Garcés *et al.* 2015; Srinivasulu *et al.* 2017; Alkhayatt and Hussian 2017).

Püskürtme yönteminde kullanılacak çözeltilerin çok iyi çözünmüş olması gerekmektedir. Aksi durumda püskürtülen tabakalarda homojenlik azalır ve tortular oluşabilir. Diğer bir dikkat edilmesi gereken nokta ise çözeltiler sisteme gönderilirken çok kontrollü bir şekilde gönderilmelidir. Çözelti akış hızının iyi ayarlanması gerekmektedir. Çözelti ilk olarak atomizöre (nozül) gönderilir. Bu düzenekte atomizerlerin farklı çeşitleri de bulunmaktadır. Bu düzenekte ise, ayrıca taşıyıcı gaz girişi bulunan RF kaynaklı ultrasonik atomizör kullanılmıştır. Atomizöre gelen çözelti atomizör sayesinde çok küçük parçalara ayrılmış olur. Bu ayrıştırma işlemi bazı atomizörlerde gaz yardımıyla da yapılmaktadır (Alkhayatt and Hussian 2017). Ultrasonik atomizörlerde bu işlem RF güç kaynağı sayesinde piezoelektrik yapının titreşimi sayesinde olmaktadır. Ultrasonik atomizörlerde ayrıca gaz girişinin olması sayesinde oluşan parçacıkların taşınması kolaylaşmaktadır ve homojen bir yapının oluşmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.6. Ultrasonik spray ve kontrol ünitesi

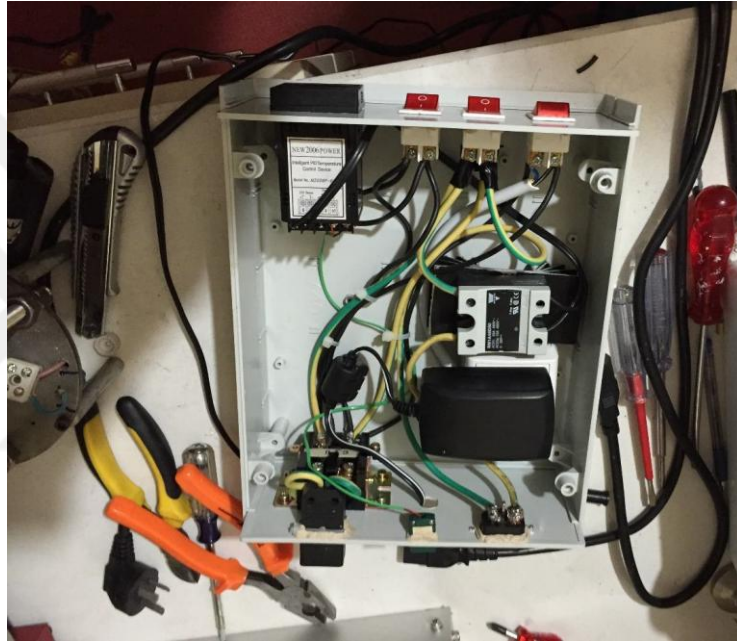
Kimyasal püskürtme sisteminin bölümleri aşağıdaki gibidir.

- Isıtma, döndürme ve numune tutucunun bulunduğu kısım
- Ultrasonik nozul
- Atomizör ya da ortam için gaz girişi kısmı
- Ultrasonik nozulun güç kaynağı ve kontrol kumanda cihazı

Şekil 3.7’de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 bölümleri sırası ile sistemin ısı kontrol birimi, cihaz kontrol ünitesi, ısıtıcı rölesi ve motorun güç kaynağını göstermektedir.

Bu sistemin bir diğer önemli bölümü ise numunelerin yerleştirildiği sıcak yüzeyin (hot plate) bulunduğu Şekil 3.7’deki kısımdır. Bu kısım, çözelti halinde gelen malzemelerden istenmeyen kısmın buharlaştırılıp, püskürtülmesini istediğimiz kısmın ise homojen olarak püskürtüldüğü bölümdür. Bu nedenle numune tutucunun hemen alt kısmında bir ısıtıcı yüzey bulunur. Bu yüzey, ısıtıcı, kontrol paneli ile değişik

sıcaklıklara ayarlanabilmektedir. Isıtıcı kanthal tel ile sarılmış olup 25-700°C aralığında çalışabilmektedir. Numune tutucu bir mil ile bir motora bağlıdır. Bu motor sayesinde istenilen hızda döndürülebilmektedir. Ayrıca, motor ile ısıtıcı arasında sıcaklık kalkanı vardır. Şekil 3.7’de sistemin kontrol sistemi gösterilmiştir. Bu tasarım tornada yapılarak tez çalışmalarının geneldinde kullanılmıştır. Sistemin çalışır hali Şekil 3.6’da gösterilmektedir. Sistemin kontrol sistemi Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Kimyasal püskürtme sistemi kontrol cihazı

Çözeltiler Şekil 3.6’deki ultrasonik sprey ile cam yüzeye püskürtüldü. Bu işlem 400°C deki 25x25 mm cam yüzeye, 100 kHz frekansta 5 ml’lik çözeltilere 30 dk uygulandı. Kalkanlanmış cam yüzeylerin şeffaflığının bozulmamasına özen gösterildi.

3.5. Ölçümün Yapılması

Cam yüzeylere püskürtülen çözeltiler ile oluşan kalkanlanmış malzemelerin S_{11} ve S_{21} parametreleri, Şekil 3.4’deki vektör network analizör yardımı ile ölçüldü. Ölçüm

sonuçları, aşağıdaki formüller kullanılarak Matlab programının yardımı ile hesaplandı ve sonuçlar gözlemlendi.

$$SE_T = SE_A + SE_R \quad (3.1)$$

$$SE_A = -10 \log_{10}[(S_{21})^2 / (1 - (S_{11})^2)] \quad (3.2)$$

$$SE_R = -10 \log_{10}[(1 - (S_{11})^2)] \quad (3.3)$$

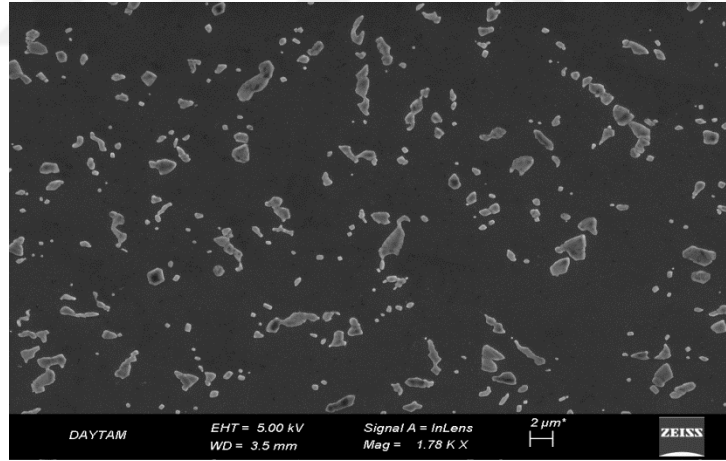


4. ARAŞTIRMA BULGULARI

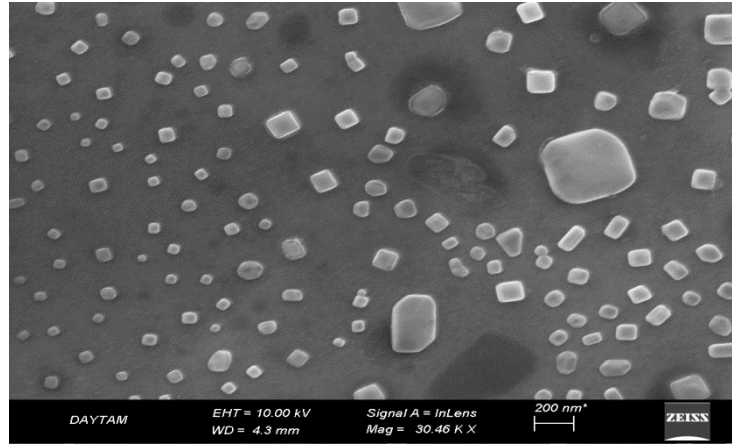
Şeffaf cam yüzeylere ultrasonik sprej kullanılarak $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisi, farklı katkı oranlarında püskürtüldü. Katkı oranlarının değişimi cam yüzeylerin şeffaflık özelliklerinde ve kalkanlama etkisi değerlerinde etkili olduğu gözlemlendi.

4.1. SEM Görüntüleri

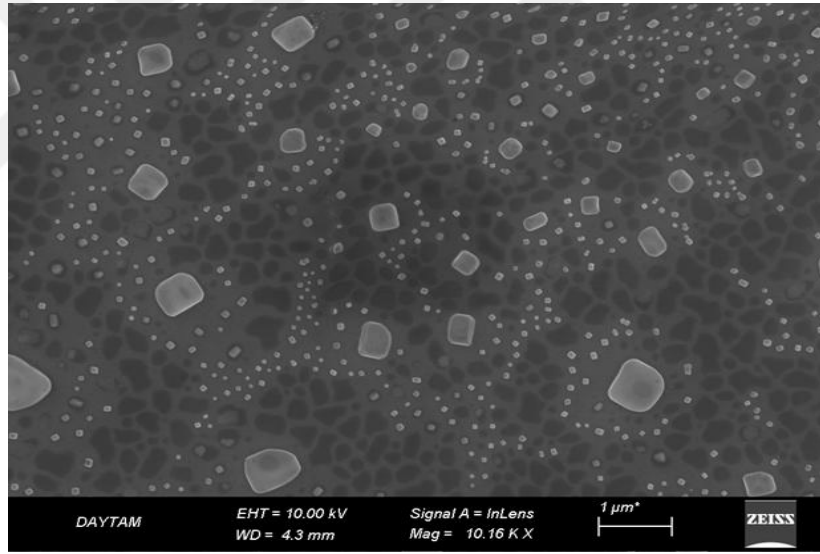
Farklı oranlarda $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8'de verilmiştir.



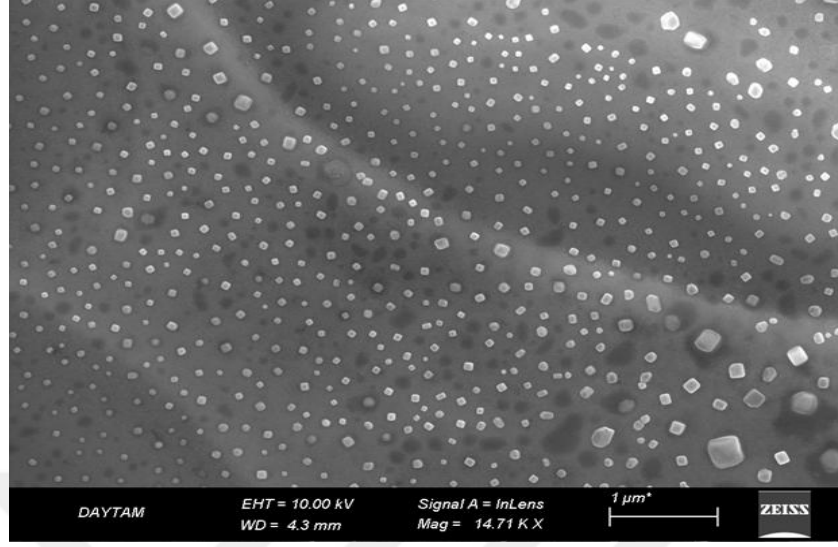
Şekil 4.1. Cama püskürtülen %0 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-1



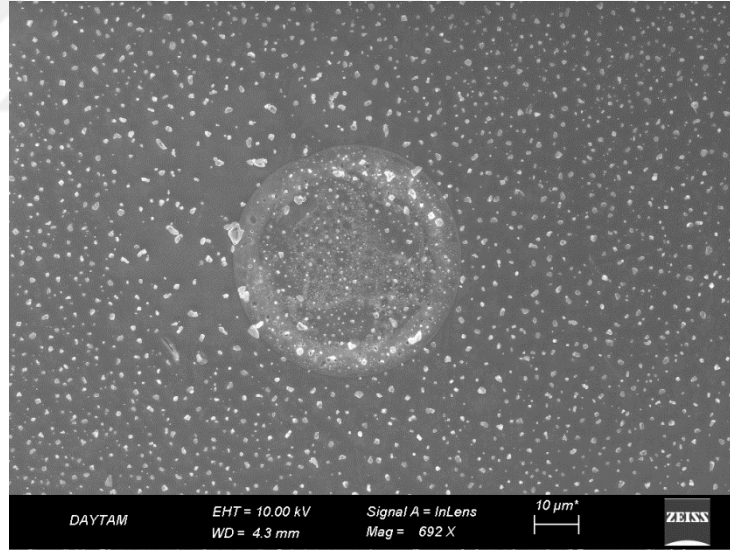
Şekil 4.2. Cama püskürtülen %0 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-2



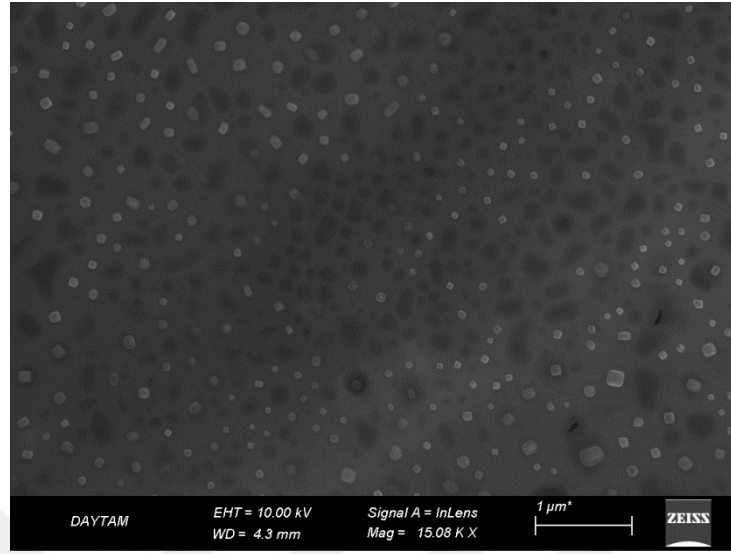
Şekil 4.3. Cama püskürtülen %2 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-1



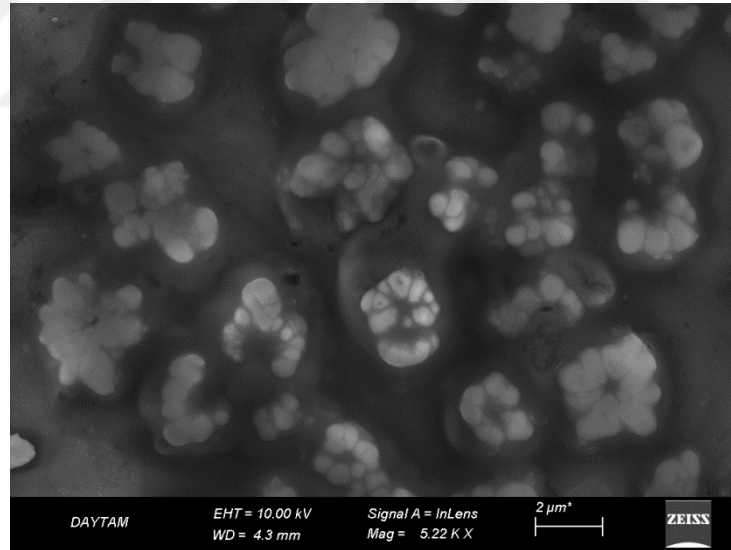
Şekil 4.4. Cama püskürtülen %2 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-2



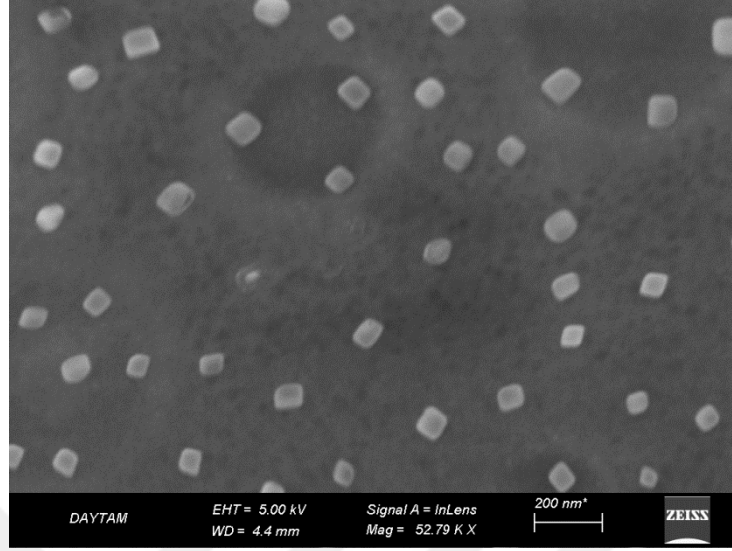
Şekil 4.5. Cama püskürtülen %4 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-1



Şekil 4.6. Cama püskürtülen %4 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-2



Şekil 4.7. Cama püskürtülen %8 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-1

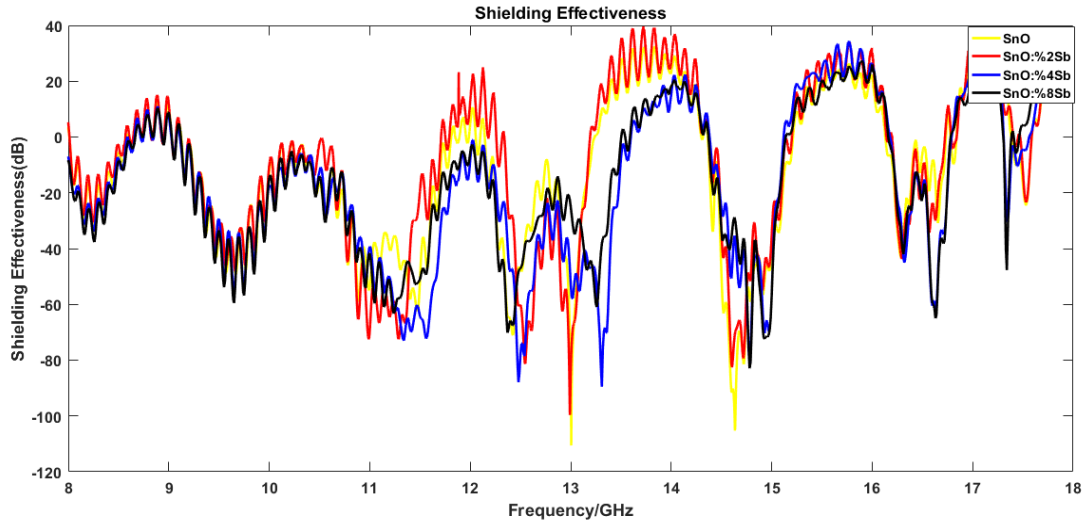


Şekil 4.8. Cama püskürtülen %8 oranında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) filmlerinin SEM görüntüsü-2

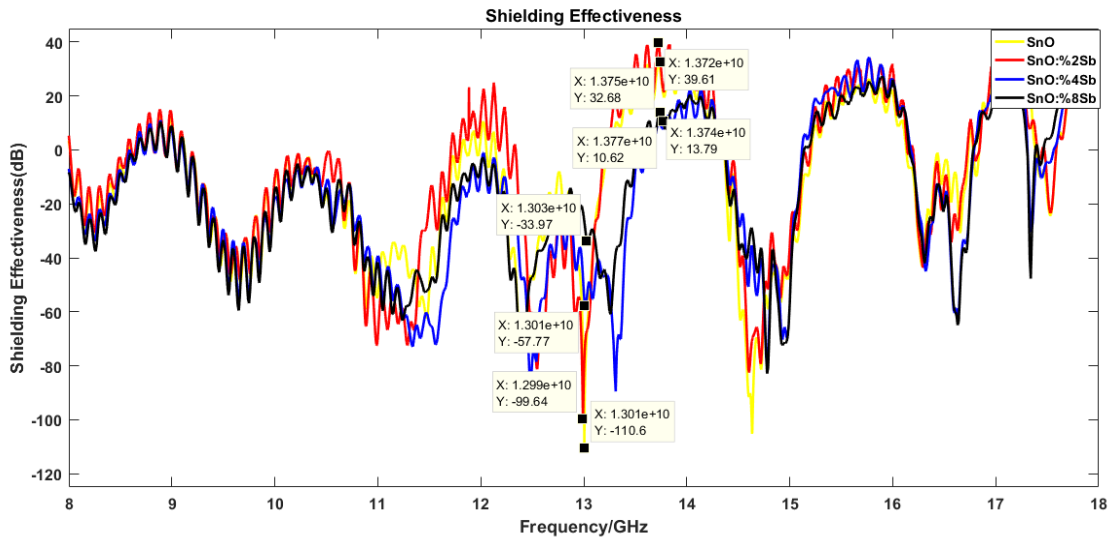
SEM görüntülerine bakıldığında katkı oranı arttıkça cam yüzeylerin şeffaflık ve homojen dağılım özelliklerinin bozulduğu gözlemlenmektedir. Ancak bu şeffaflık ve homojen dağılım özelliklerinin Şekil 4.3 ve 4.4’de gösterilen SEM görüntülerindeki gibi %2 katkı oranına kadar $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisiyle kaplanan cam yüzeylerde bozulmadığı gözlemlendi.

4.2. Kalkanlama Etkisi Ölçüm Sonuçları

Farklı oranlarda $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin network analizör ile S parametreleri ölçüldü. Ölçülen S parametreleri ile hesaplanan kalkanlama etkisi değerleri matlab programı yardımıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilen grafikleri çizdirildi. Grafikler çizdirilirken örnekleme frekansı değerine bağlı olarak yaklaşık 800 adet örnek değer kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Farklı katkı oranlarında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin kalkanlama etkisi değerleri-1



Şekil 4.10. Farklı katkı oranlarında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin kalkanlama etkisi değerleri-2

Simülasyon sonuçlarına baktığımızda Horn antenlerinin 8-18 GHz bandında çalıştığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki grafiklerde görüldüğü gibi frekans genişliği 13 Ghz ile 15 Ghz aralığındaki kalkanlama etkisi değerleri alındığında $SbCl_3$ ile katkılanmayan SnO_2 ile kaplanan cam yüzeylerin kalkanlama etkisi değerinin 32 dB

kadar ölçülmüştür. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki sonuçlara bakıldığında $SbCl_3$ katkılıandığında kalkanlama etkisinin %2 oranına kadar 39 dB'e çıktığı, katkı oranı arttıkça kalkanlama etkisinin azaldığı gözlenmektedir. En iyi kalkanlama etkisi değeri %2 oranında $SbCl_3$ katkılıandığında elde edilmiştir.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Günlük hayatta kullanılan elektronik cihazların artışı ve bu cihazlardan oluşan elektromanyetik girişimler; hayvanlar, bitkiler, cihazlar hatta insanlar üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Bu olumsuz etkilerden korunmak için kullanılan en iyi yöntemlerden biri elektromanyetik kalkanlamadır. Elektromanyetik kalkanlama çeşitli yöntemlerle çeşitli yüzeylere yapılabilmektedir.

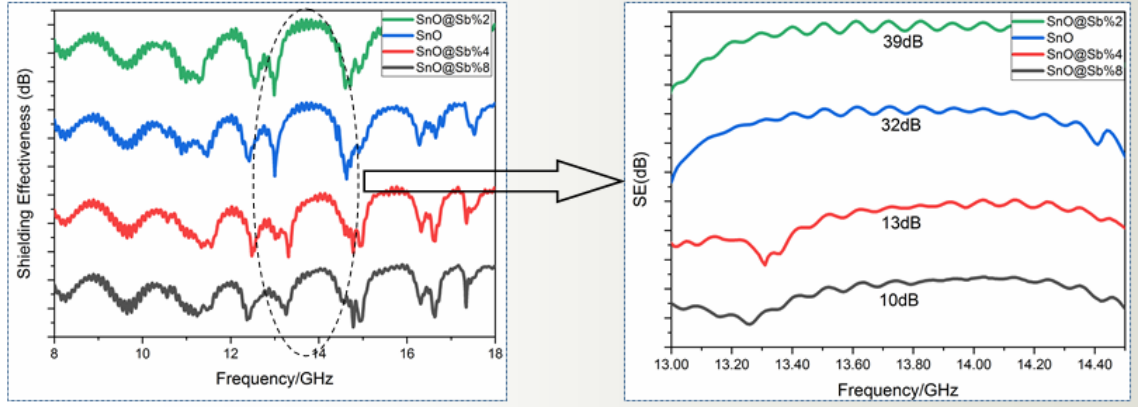
Bu çalışmada cam yüzeylerin katkı metal oksit çözeltileri ile kaplanarak şeffaflığını bozmadan elektromanyetik kalkanlamanın mümkün olabildiği ispatlanmıştır.

5.1. Ultrasonik sprej ile kimyasal püskürtme yöntemi sonuçları

Ultrasonik sprej ile püskürtme yöntemi ile %2 oranına kadar $SbCl_3$ katkı Tin (SnO_2) çözeltisi püskürtülerek kaplanan cam yüzeylerin homojen olarak kaplandığı ve şeffaflığının bozulmadığı gözlemlenmiştir. $SbCl_3$ bileşiğinin Tin (SnO_2) çözeltisinde uygun ortamlarda karıştırıldığında homojen olarak çözünebildiği ve bu sayede de kaplama sırasında yüzeylere homojen olarak püskürtülebildiği gözlemlenmiştir.

5.2. Kalkanlama etkisi ölçüm sonuçları

Bilindiği gibi metal oksitler iyi iletken olduğu için elektromanyetik kalkanlamada çok sık kullanılmaktadır. Ancak metal oksitler bazı bileşikler ile katkılандığında kalkanlama etkisi artırılabilir. Bu çalışmada; Şekil 5.1'de gösterildiği gibi Tin (SnO_2)'e %2 oranına kadar $SbCl_3$ katkılандığında kalkanlama etkisinin 39 dB değerine kadar artırılabilirdiği ispatlanmış ve %4 ve %8'lik katkı oranları, kalkanlama etkinliği verimliliğini düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. Farklı katkı oranlarında $SbCl_3$ katkılı Tin (SnO_2) çözeltisi ile kaplanan cam yüzeylerin 13 GHz – 15 GHz aralığındaki kalkanlama etkisi değerleri

Sonuç olarak; bu çalışmada kullanılan malzemeler ve yöntemler sayesinde elektromanyetik girişimlerin sebep olduğu zararlardan kalkanlama etkisi oluşturularak korunulabileceği ispatlanmıştır. Ayrıca hava savunma sanayinin vazgeçilmezi olan uçak radar sistemlerinde de tercih edilebileceği düşünülmektedir. Özellikle şeffaflığı bozulmadan kaplanılan malzemede kalkanlama etkisinin oluşturulabilmesi günlük hayatta birçok yerde kullanılabilirliği gerçeğini de ortaya çıkarmıştır.

KAYNAKLAR

- Abbas, S.M., Dixit, A.K., Chatterjee, R. and Goel, T.C. 2005. *Mater. Sci. Eng. B*, 123, 167.
- Abbas, S.M., Chandra, M., Verma, A., Chatterjee, R. and Goel, T.C. 2006. *Composites: Part A*, 37, 2148.
- Amari, S., Vahldieck, R., Bornemann, J., 1999. Analysis of propagation in periodically loaded circular waveguides, *Proc Inst Elect Eng-Microw Antennas Propag*, 146, 50-54.
- Anonymous, 2019a. www.antenna-theory.com
- Anonymous, 2019b. www.tutorialspoint.com
- Arndt, F., Bornemann, J., Vahldieck R., 1984. Design of multisection impedance-matched dielectric-slab filled waveguide phase shifters, *IEEE Trans MTT*, 32, 34-39.
- Bal, S., Samal, S.S., 2007. *Bull. Mater. Sci.*, 30, 379.
- Chung, D.D.L., 2001. *Carbon*, 39, 279.
- Collin, R. E., 1992. *Foundations for Microwave Engineering*. McGraw Hill, New York.
- F. Mayer, High frequency broadband absorption structures, US Patent 5,872,534.
- Emerson, W.H., 1973. Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 21(4): 484–490.
- Farukh, M., Singh, A.P., Dhawan, S.K., 2015. Enhanced electromagnetic shielding behaviour of multi-walled carbon nanotube entrenched poly (3,4-ethylenedioxythiophene) nanocomposites, *Compo. Sc. and Tech.* 114, 94–102.
- Foroozesh, A., Shafai, L., 2008. Wave propagation in 1D EBGs: periodic multilayer films consisting of two different materials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50, 175-182.
- Gear, J.T., 2004. Microwave absorbers manage military electronics RF interference. *RF Design*, pp. 6–9, <http://rfdesign.com/mag/08deff1.pdf>
- Goussetis, G., Feresidis, A.P., Kosmas P., 2006. Efficient analysis, design, and filter applications of ebg waveguide with periodic resonant loads, *IEEE Trans MTT*, 54, 3885-3892.
- Gupta, A., Choudhary, V. 2011. *Comp. Sci. Technol.*, 71, 1563.
- Halpern, O., Johnson, M.H.J., Wright, R.W., 1960. Isotropic absorbing layers. US Patent 2,951,247.
- Jones, A.K., Wooding E. R., 1964. A multilayer microwave absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Joo, J. and Epstein, A.J. 1994, *Appl. Phys. Lett.*, 65, 2278.
- Jose, S., 2000. Effects of periodic structures on transmission lines, *Lsi Logic*.
- Joseph, N., Singh, S.K., Sirugudu, R.K., Murthy, V.R.K., Ananthakumara, S., Sebastian M.T., 2013. Effect of silver incorporation into PVDF-barium titanate composites for EMI shielding applications, *Mater. Research Bull.* 48, 1681–1687.
- Joseph, N., Janardhanan, C., Sebastian, M.T., 2014. Electromagnetic interference

- shielding properties of butyl rubber-single walled carbon nanotube composites, *Compo. Sc. And Tech.*, 101, 139–144.
- Kumari, P., Tripathii P., Parkash, O., Kumar, D., 2005. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramic. Department of Ceramic Engineering, Indian Institute of Technology (Banaras Hindu University), Varanasi-221 005, India.
- Makeiff, D.A. , Huber, T. 2006. *Synth. Met.*, 156, No. 7-8, 497.
- Mishra, M., Singh, A.P., Singh, B.P., Dhawan, S.K., 2014. Performance of a nanoarchitected tin oxide@reduced graphene oxide composite as a shield against electromagnetic polluting radiation. *This journal is The Royal Society of Chemistry. RSC Adv.*, 2014, 4, 25904–25911.
- Navarro, M.S., Rozzi, T.E., Lo, Y.T., 1980. Propagation in a rectangular waveguide periodically loaded with resonant irises, *IEEE Trans MTT*, 28, 857-865.
- Olmedo L., Hourquebie, P. and Jousse, F. 1997. *Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers*, vol. 2; John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- Ott, H.W. 2009. *Electromagnetic Compatibility Engineering*, New Jersey, John Wiley & Sons.
- Pozar, D. M., 2011. *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Saini, P., Choudhary, V., Singh, B.P., Mathur, R.B. and Dhawan, S.K. 2009a. *Mater. Chem. Phys.*, 113, 919.
- Saini, P., Choudhary, V., Sood, K.N. and Dhawan, S.K. 2009b. *J. Appl. Poly. Sci.*, 113, 3146.
- Saini, P., Choudhary, V., Singh, B.P., Mathur, R.B. and Dhawan, S.K. 2011. *Synth. Met.*, 161, 1522.
- Saville, P., 2005. A review of optimization techniques for layered radar absorbing materials (Technical memorandum 2005-003). Defence R&D Canada. <http://pubs.drdc.gc.ca/PDFS/unc57/p523186.pdf>
- Saville, P., 2005. A review of optimization techniques for layered radar absorbing materials (Technical memorandum 2005-003). Defence R&D Canada.
- Schelkunoff, S.A. 1943. *Electromagnetic Waves*, Van Nostrand, New Jersey.
- Schulz, R.B., Plantz, V.C. and Brush, D.R. 1988. *IEEE Trans.*, 30, 187.
- Şimşek, S., Topuz, E., 2007. Some properties of generalized scattering matrix representations for metallic waveguides with periodic dielectric loading. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55, 2336-2344.
- Sony., 2008. Sony's electromagnetic wave absorber reduces EMC and SAR problem. http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx_news/vol25/pdf/emcstw.pdf
- Thirios, E.C., Kaklamani, D.I., Uzunoğlu N.K., 2006. Microwave pulse compression using a periodically dielectric loaded dispersive waveguide section, *Electromagnetics*, 26, 345-358.
- Yang, Y., Gupta, M.C., Dudley, K.L. and Lawrence, R.W. 2005. *Nano Lett.*, 5, 2131.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Erzurum'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Atatürk Üniversitesinde Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2014 yılında Erzurum Büyükşehir Belediyesi ESKİ Genel Müdürlüğü'nde Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevi yürütmektedir.

