

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOKLU BANT MÜKEMMEL MANYETİK İLETKEN
YÜZEYLİ METAL MUHAFAZA TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed AKGÜL

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Dr. Öğr.Üyesi Muhammet Hilmi NİŞANCI

Eylül 2021

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU BANT MÜKEMMEL MANYETİK İLETKEN YÜZEYLİ METAL MUHAFAZA TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed AKGÜL

Enstitü Ana Bilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 01.09.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Üye

Doç. Dr.
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammed AKGÜL

01.09.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca gerek derslerde gereksede içinden geçtiğimiz Korona sürecinde tezi yazarken sürekli destek olan danışman hocam Dr. Öğr Üyesi Muhammet Hilmi Nişancı'ya, bugünlere gelene kadar üzerimde emeği geçen tüm öğretmen ve hocalarıma, tezi yazarken beni sürekli teşvik edip motivasyonumun üst düzeyde kalmasını sağlayan kıymetli anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması kapsamında prototip üretimlerinin gerçekleştirilmesinde 117E807 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Mikrodalga Devreler	1
1.2. Elektromanyetik Girişim ve Elektromanyetik Uyumluluk.....	3
1.2.1. Topraklama.....	5
1.2.2. Ekranlama	6
1.2.3. Filtreleme ve mikrodalga filtreler	7
1.3. İletim Hatları.....	8

BÖLÜM 2.

DALGA KILAVUZLARI	14
2.1. Dalga Kılavuzu Yapıları	14
2.2. Mikroşerit ve Düzlemsel Dalga Kılavuzları.....	16
2.3. Boşluk Dalga Kılavuzları	18
2.3.1. Sırt boşluk dalga kılavuzu.....	22

2.3.2. Oluk boşluk dalga kılavuzu	22
2.3.3. Mikroşerit boşluk dalga kılavuzu.....	23
BÖLÜM 3.	
METAL MUHAFAZA TASARIM TEKNİKLERİ.....	25
3.1. Metal Muhafaza Yapıları	25
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI.....	30
4.1.Üretim.....	37
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	40
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ	48

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Ω	: Ohm
ε	: Elektrik Geçirgenlik
ε_0	: Dielektrik Geçirgenlik
μ	: Manyetik Geçirgenlik
λ	: Dalga Boyu
γ	: Yayılma Sabiti
β	: Faz Sabiti
α	: Zayıflatma Sabiti
BDK	: Boşluk Dalga Kılavuzu
BGA	: Ball Grid Array
dB	: Desibel
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
EBG	: Elektromanyetik Bant Boşluğu
mm	: Milimetre
MCM	: Multi Chip Module
MMIC	: Monolitik Mikrodalga Entegre Devreler
RF	: Radyo Frekans
SMT	: Yüzey Montaj Teknolojisi
TE	: Enine Elektrik Mod
TEM	: Enine Elektrik ve Manyetik Mod
TM	: Enine Manyetik Mod
SMA	: Subminiature Version A

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum.....	2
Şekil 1.2. Elektromanyetik enerji transferinin 4 alt grubu	3
Şekil 1.3. Sistem içi girişim	4
Şekil 1.4. Düşük frekans topraklama uygulamaları	5
Şekil 1.5. Yüksek frekans ve RF devrelerde topraklama	6
Şekil 1.6. Ekranlama Uygulaması	6
Şekil 1.7. Elektromanyetik filtreler.....	8
Şekil 1.8. İletim hatları.....	8
Şekil 1.9. Sinüsoidal kaynak gerilimi	9
Şekil 1.10. Gerilim ve akım tanımları ve iletim hattının diferansiyel uzunluğu eşdeğer devre a) Gerilim ve akım tanımları b) Toplu elemanlı eşdeğer devre	10
Şekil 2.1. Dairesel ve dikdörtgen yapıları dalga kılavuzları	15
Şekil 2.2. İki yönden sınırlanmış alan çizgileri ve tüm yönlerde sınırlandırılmış alan çizgileri	16
Şekil 2.3. Askıda duran mikroşerit dalga kılavuzu	17
Şekil 2.4. Düzlemsel Dalga Kılavuzu	17
Şekil 2.5. Topraklı CPW	18
Şekil 2.6. Elektrik alan E değişimleri (solda) ve Manyetik alan H (sağda) değişimleri	19
Şekil 2.7. Farklı boşluk dalga kılavuzu geometrileri a) Çıkıntılı bdk, b) Oluklu bdk, c) terslenmiş mikroşerit bdk, d) mikroşerit çıkıntılı bdk.....	20
Şekil 2.8. Boşluk dalga kılavuzu yapısının temel düzeni	20

Şekil 2.9. Enine oluklarla gerçekleştirilen yumuşak yüzey (a) Boyuna dielektrik dolgulu oluklarla sert yüzey (b).....	21
Şekil 2.10. Sonsuz z düzlemi boyunca dağılan merkezi sırt olan bir pim dizisi diyagramı.....	22
Şekil 2.11. Pim dizilimi ve elektrik alanı	23
Şekil 3.1. Köpük bazlı EM absorber kılıflarının mikrodalga yapılaraya uyarlanması.....	27
Şekil 3.2. Metal Muhafazanın modülün bir bölümüne veya tamamına uygulanan yapıları.....	27
Şekil 3.3. Tipik bir çok bölmeli mikrodalga modül.....	28
Şekil 3.4. Düşük frekanslar için çözüm ve üretilen prototipi.....	29
Şekil 4.1. Periyodik pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın birim eleman tasarım parametreleri	31
Şekil 4.2. Sadece dairesel kesitli pin dizileri içeren PMC yapı	31
Şekil 4.3. Sadece dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyin frekansa bağlı iletim parametre değerler.....	32
Şekil 4.4. Sadece kare kesitli pin dizileri içeren PMC yapı	33
Şekil 4.5. Sadece kare kesitli pin dizileri içeren PMC yapının frekansa bağlı iletim parametre değerleri	33
Şekil 4.6. Dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yapı (üstte) pin yapıları, (altta) genel görünüş	34
Şekil 4.7. Dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yapının frekansa bağlı iletim parametre değerleri.....	35
Şekil 4.8. İletim hattı içeren dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yapı	36
Şekil 4.9. İletim hattı bulunduran dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren ve içermeyen multi-bant PMC yapının frekansa bağlı iletim parametre değerleri a)S21 ve b)S43.	36
Şekil 4.10. İletim hattı bulunduran dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren ve içermeyen multi-bant PMC yapının 2D elektrik alan dağılımı (a) 12.00 GHz (b) 21.21 GHz, (c) 23.52 GHz ve (d) 23.85 GHz.....	37

Şekil 4.11. Dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren PMC yapının prototip üretim anını gösteren görsel	38
Şekil 4.12. Prototip üretimi tamamlanan dairese ve kare kesitli pin geometrileri içeren multi-bant PMC yapısı	38
Şekil 4.13. Dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren multi-bant PMC yapının (a) elektriksel test düzeneğinin şematik gösterimi, ve (b) elektriksel test anını gösteren görsel.....	39
Şekil 4.14. Prototip üretimleri tamamlanan dairese ve kare kesitli pin dizisi içeren içeren multi bant PEC-PMC yapının iletim parametre değeri.....	39



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Sadece dairesel kesitli pin dizileri içeren PMC yapının tasarım parametre değerleri.....	31
Tablo 4.2. Sadece dairesel kesitli pin dizileri içeren PMC yapının tasarım parametre değerleri	33



ÖZET

Anahtar kelimeler: PMC Yüzeyli Metal Muhafaza, Mikrodalga Modül, Elektromanyetik Uyumluluk, Elektromanyetik Girişim, Ekranlama

Bu tez çalışmasında multi-bant bant durdurucu mükemmel iletken (PMC) yüzeyli metal muhafaza tasarımları hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk olarak farklı çalışma frekans aralığına sahip farklı pin geometrileri içeren PMC yüzeyli metal muhafazalar ayrı ayrı modellenmiş ve nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında farklı pin geometrileri bir arada kullanılarak PMC yüzeyin multi-bant bant durdurucu özellik göstermesi sağlanmıştır. Çalışma kapsamında son olarak önerilen PMC metal muhafazanın prototip üretimi gerçekleştirilerek elektriksel testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları doğrulanmıştır.

MULTI-BAND EXCELLENT MAGNETIC CONDUCTOR SURFACE METAL ENCLOSURE DESIGN

SUMMARY

Keywords: PMC Surfaced Metallic Enclosure, Microwave Module, Electromagnetic Compability, Electromagnetic Interference, Shielding

In this thesis, it is aimed to design the multi-band band stop metallic enclosures with perfect magnetic conductive (PMC) surface. For this purpose, firstly, metallic enclosures with PMC surfaces, which contain different pin geometries with different operating frequency ranges, are separately modeled and numerically analyzed. In the continuation of the study, different pin geometries are used together to ensure that the PMC surface provides multi-band band-stop properties. Finally, within the scope of the study, the prototype production of the proposed PMC metal enclosure is carried out and the electrical tests are performed and the obtained electrical test results are verified by the numerical results.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

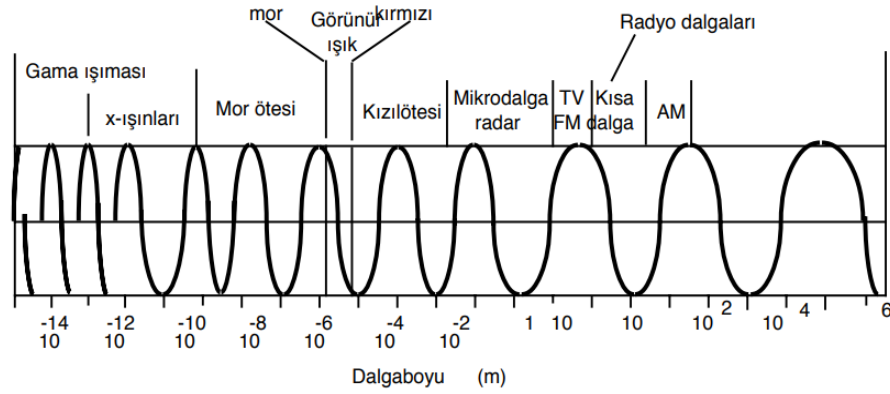
Çağımızda kablosuz veri iletimi için kullanılan radyo frekansları yoğun kullanıma bağlı olarak elektromanyetik tayfta bir sıkışmaya yol açmış neticesinde sistemlerin daha fazla bant genişliğine ve veri iletimine imkân sağlayan mikrodalga frekanslarına yönelimine neden olmuştur. Böylece mikrodalga frekanslar savunma sanayii, havacılık, uzay, telekominikasyon, tıp gibi birçok farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Ancak yüksek frekanslarda çalışmanın faydaları yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Devreler çalışmaları esnasında etraflarına yoğun elektromanyetik alanlar yayarlar, yaydıkları bu alanlar istenmeyen etkilere yol açar ve sonuçta sistemlerin kararlı çalışma düzenlerini bozar. Cihazların bu istenmeyen elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı tasarım süreçleri elektromanyetik uyumluluk (EMC) koşullarının sağlanmasını gerekli kılarak cihazların hem dış etkilerden korunmasını hem de başka cihazların kararlı çalışmalarına olan olumsuz etkilerinin önüne geçilmesini sağlar. Bunun için mikrodalga devreler arasında elektromanyetik (EM) izolasyon çok iyi yapılmalı istenmeyen EM girişimler bastırılmalıdır. Mevcut çalışmalar göz önüne alındığında EMI problemlerin çözümünde yapay manyetik iletken (Artificial Magnetic Conductor, AMC) yapılardan bir tanesi olan PMC yüzeylerin yaygın olarak kullanıldıkları görülmektedir. PMC yüzeyler metal muhafazalar içine iletken pin dizilerinin periyodik olarak konumlandırılmaları ile elde edilirler. Periyodik pin dizileri mikrodalga devrenin çalışma bandında bant durduran filtre karaktersitği sergileyerek metal muhafaza içinde oluşan istenmeyen EM boşluk rezonanslarının bastırılmasına olanak sağlarlar.

Bu tez çalışmasında farklı pin geometrilerine sahip çoklu bant bant durduran PMC yüzey tasarımları üzerinde durulmuştur.

1.1. Mikrodalga Devreler

Radyo frekansı ve mikrodalga işaretler zamanla değişen sinyaller ile üretilen bir yapıya sahiptirler. Elektromanyetik spektrumda RF sinyaller 300 kHz ile 300 MHz; mikrodalga sinyaller ise 300 MHz ile 300 GHz frekanslardaki bölgelerde gösterilirler,

birkaç milimetreden ($\lambda = c/f = 1\text{mm}$) bir metreye kadar değişen dalga boylarına sahip yapılar olarak sınıflandırılırlar [2]. Şekil 1.1.'de EM spektrumdaki dalga boyu aralığı gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum [13]

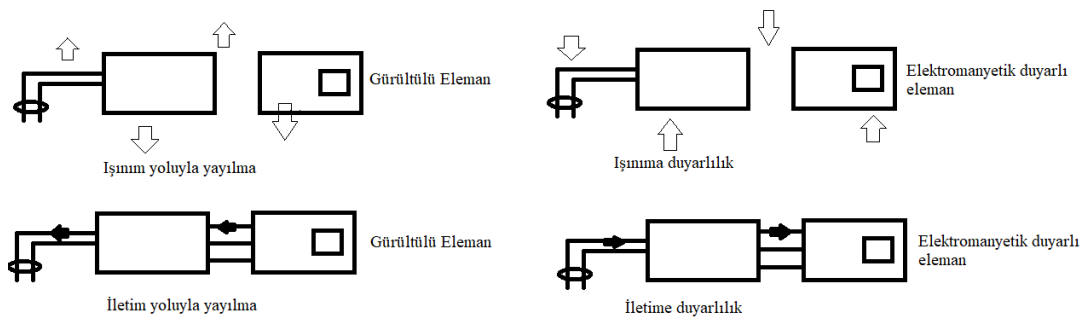
Kısa dalga boyu ve yüksek frekanslar, mikrodalga cihazların ve sistemlerin tasarımlarını ve analizlerini zorlaştırmaktadır. Ancak mikrodalga devreler uygulamada büyük avantajlar sağlamaktadırlar. Buna örnek olarak elektriksel boyutun kazançla orantılı olduğu antenler misal olarak verilebilir. Fiziksel olarak sabit boydaki bir anten için yüksek frekanslarda daha fazla anten kazancı elde edilebilir; yüksek frekans uygulamalarında daha geniş bant aralığı sağlanabilir, 300 MHz'de %1 bant genişliği 1 MHz olup 1Mbps data akış hızı sağlanırken 30 GHz'de %1 bant genişliği 300 MHz olur ve 300 Mbps hızında veri akışı gerçekleşir. Başka bir örnek olarak ise radarlarda hedef nesnenin RCS (radar cross section-radar kesit alanı)'sinin objenin elektriksel boyutuyla orantılı olmasından hareketle, anten kazancının yüksek frekanslara çıkılarak artırılması ve bu sayede radarın tespit ettiği kesit alanının büyümesini sağlaması verilebilir [15].

Mikrodalga enerjisi bir elektromanyetik dalga formunda yayılır. Yayılmanın EM formda olması nedeniyle çeşitli girişimler oluşturabilir. Girişimlerin bastırılması, engellenmesi ve başka cihazlara zarar vermemesi gerekir. Bahsedilen durumlar aşağıda detaylı bir şekilde incelenmiş ve korunma için gerçekleştirilen yapılardan bahsedilmiştir.

1.2. Elektromanyetik Girişim ve Elektromanyetik Uyumluluk

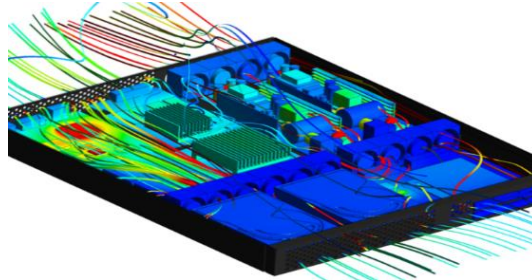
Elektromanyetik dalga'nın yayılımı ışıma ve iletim yoluyla olmaktadır. Cihazlarda elektromanyetik dalga bir noktadan bir noktaya ışıma yoluyla yayılırken dalga-alan formunda, iletkenlik yoluyla yayılırken akım-gerilim formunda yayılır. Bilindiği gibi yüksek frekanslı mikrodalga devrelerinde sinyaller/işaretler elektromanyetik dalga şeklinde iletilmektedir. İşaretlerin iletilmesinde kullanılan elektromanyetik dalgalar, komşu devre elemanları arasında istenmeyen kuplajların oluşmasına ve oluşan bu kuplajlar da cihazların performansının olumsuz etkilenmesine yol açarak, devrelerde veri kaybına sebep olmaktadır. Bu durum elektromanyetik girişim (EMI) olarak adlandırılır. Örnek olarak eski bilgisayarların yanında çalan cep telefonunun ekranı titretmesi, yüksek gerilim hatlarının yanından geçerken araba radyosunun parazit yapması verilebilir. Benzer şekilde DC motorlu ev aletleri çalışırken motordaki karbon yapılı fırçaların bakır yüzeyle temasları sonucu oluşan ark tüplü televizyonlarda görüntülerin bozulmasına sebep olan bir EMI problemidir [2, 4].

EM kaynağın ve bundan etkilenen diğer sistemlerin güçleri, frekans değerleri, birbirleriyle ve çevre elemanları ile aralarındaki mesafeler ve girişimin türü EMI'yi etkileyen en önemli noktalardır [3].



Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi elektromanyetik enerji ışıma ve iletim yoluyla yakınındaki diğer cihazları etkileyebilir. Genelde hava ışıma yoluyla girişimde bu kuplajın yayılma yoludur. Havadaki EM enerjiden etkilenen kısımlar verici devrede de bulunabilen, cihaz kasası, iletim hatları ve antenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Cihazlar arası iletim yoluyla gerçekleşen girişimde ise iletim hatları üzerinden gerçekleşmekte olup yakın alanda oluşan girişimler cihazda ya da sistemde performans düşüklüğüne yol açacaktır dolayısıyla istenmeyen girişimlerin önüne geçilmelidir (bkz. Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Sistem içi girişim [12]

Yukarıda ifade edilen yöntemler EM girişimlerin önlenmesi ve bunların bastırılmasında etkili olan metodlardır. Bir sistemin ya da cihazın hem kendisinin çevresine etkisi hem de çevrenin cihaz üzerindeki etkisi neticesinde sistemin çalışma performansını bozması istenmez. Yani cihazın EM girişimlere karşı bağışıklık göstermesi beklenir. Sonuçta ele alınan cihazın EM olarak uyumlu olup olmadığı sorgulanır. Cihaz istenen düzeyde çalışırken, bu esnada dışarıdan gelen bozucu etkilere karşı çalışmasında bozulma olmuyor ve dışarıya zararlı bir girişim göndermiyorsa cihaz elektromanyetik uyumluluk (EMC) şartlarını sağlıyor dolayısıyla elektromanyetik olarak uyumludur denir. Bu bağlamda gerek EM girişimin bastırılması gerek EM uyumluluğun sağlanması için devrelerde çeşitli önlemler alınır.

Bu yöntemler genel olarak şunlardır. İstenmeyen EM girişimin sönümlenmesini sağlayan topraklama; EM gürültüyü bastırmada kullanılan filtreler; kabloları, baskı devreleri ve cihazları birbirlerinden ve çevrelerinden izole etmek olarak bilinen ekranlama olarak sıralanabilir.

1.2.1. Topraklama

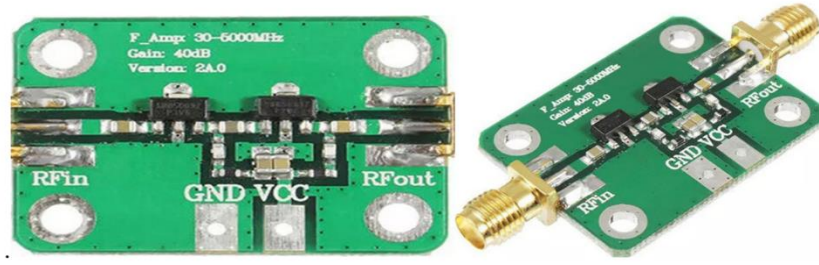
Temel olarak elektrik ve elektronik devrelerde topraklama yapmanın iki amacı vardır. İlk devrede bir kısa devre durumunda veya dış kaynaklı yıldırım darbesinin sistem üzerinde oluşturduğu yüksek gerilimden meydana gelebilecek tehlikeleri önlemektir. Diğer amaç ise devrenin kendisinden veya çevresinden kaynaklanan elektromanyetik girişimlerin sistem üzerinde oluşturacağı parazitlenmeyi azaltmaktır.

Topraklama, sisteme dışarıdan gelen veya kendi içerisinde kaynaklı parazitik ve kuplaj akımlarına karşı düşük bir direnç gösterir ve bu direnç üzerinden istenmeyen akımların devreye zarar vermeden akmasını sağlar. EM uyumluluk açısından toprak akım yolu planlanırken endüklenecek olan gerilimin düşük seviyede olması ancak toprağın kompakt ve yerel yapıya sahip olması ile sağlanır. Bu şekilde bir topraklama ile istenmeyen EMI akımları sistemi etkilememiş olur.

Şekil 1.4. ve Şekil 1.5.'te görüldüğü gibi devrelerde topraklama için çeşitli yapılar kullanılmaktadır. Topraklama düşük frekansta doğrudan toprakla irtibatlı bir iletken vasıtasıyla gerçekleştirilirken; çalışma frekansı yüksek olan devrelerde baskı devre üzerinde bir via veya toprak iletkeni olarak tasarlanan yapılarla sağlanmaktadır.



Şekil 1.4. Düşük frekans topraklama uygulamaları [29, 39, 40]

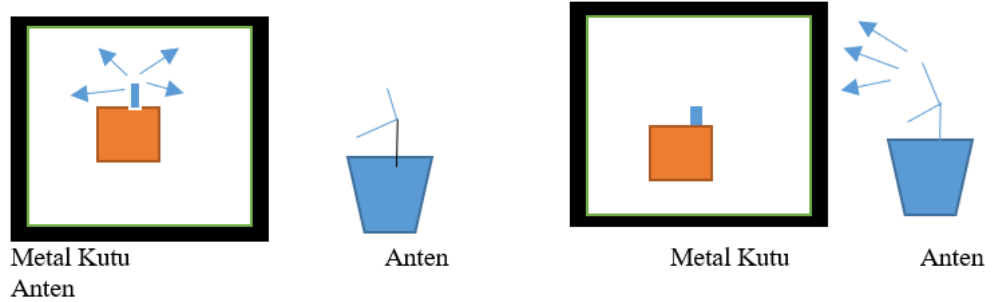


Şekil 1.5. Yüksek frekans ve RF devrelerde topraklama [50, 51]

1.2.2. Ekranlama

Daha önce de detaylandırıldığı gibi EM girişim sistemlerin veya elektronik devrelerin zarar görmelerine sebep olarak geçici veya kalıcı bir süre devre dışı kalmalarına neden olmaktadır. Bu zararların önüne geçmek için sistemlerin veya elektronik devrelerin uygun bir şekilde ekranlanmaları gerekmektedir.

Şekil 1.6.'da şematik olarak gösterildiği gibi ekranlamada temel olarak iki durum gözetilir. İlki dahili elektromanyetik dalganın dışarıya çıkmamasının engellenmesi ikincisi ise harici bir EM dalganın cihaz içerisine girmesinin önlenmesidir.



Şekil 1.6. Ekranlama Uygulaması

Ekranlamada EM alanları engelleme derecesi ekranlama etkinliği (Shielding Effectiveness, SE) olarak ifade edilir. Yüksek frekanslarda çalışan cihazlar için ekranlama, cihaza gelen EM radyasyonun elektriksel alan bileşeni üzerinden yapılır. Ekranlama etkinliği (verimliliği), bu iş için kullanılan malzemeye gelen elektromanyetik dalganın elektriksel alan şiddetinin ekrandan geçen alan şiddetine oranı şeklinde hesaplanır [9].

$$SE = 20 * \log \frac{E_1}{E_2} (\text{dB}) \quad (1.1)$$

Eşitlik 1.1’de E_1 ekrana gelen elektrik alan şiddeti, E_2 ekrandan geçen elektrik alan şiddetidir. SE ekranlama etkinliği değeri, malzemeye gelen ve malzemedan geçen dalganın elektromanyetik güçlerinden faydalanılarak Eşitlik 1.2 yardımıyla bulunabilir [9].

$$SE = 10 * \log \frac{P_1}{P_2} (\text{dB}) \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.2 kullanıldığında 3 dB olarak bulunan değer gelen dalganın enerjisinin yarı yarıya azaldığını, 10 dB değeri ise dalganın enerjisinin %90 nispetinde düşürüldüğünü göstermektedir. En uygun ekranlayıcı yapılarda SE için 100 dB değeri baz alınır. Bu seviyede bir ekranlama etkinliği gelen sinyalin yayılım enerjisinin 1/10000’e düştüğünü göstermektedir ki böyle bir düşürme bakır ve çelik gibi metaller kullanılarak yapıp hiçbir yerinde kaçak bulunmayan uniform yapılı bir metal muhafaza ile sağlanabilir [9].

1.2.3. Filtreleme ve Mikrodalga Filtreler

Çok geniş kullanıma sahip olan filtreler genelde doğru bileşenleri ayırmada, gürültü azaltma ve bastırmada, işareti biçimlendirmede kullanılmalarının yanı sıra çalışılan frekans aralığını geçirip diğer aralıkları bastırarak bant geçiren ya bant durduran amaç için de kullanılırlar.

Filtreler aktif ve pasif olmak üzere 2 sınıfa ayrılırlar. Pasif filtreler direnç, bobin ve kapasite gibi devre elamanları kullanılarak tasarlanır (bkz. Şekil 1.7.). Aktif filtreler ise güç kaynağı, opamp ve/veya mikroişlemci yardımı ile tasarlanırlar [14].



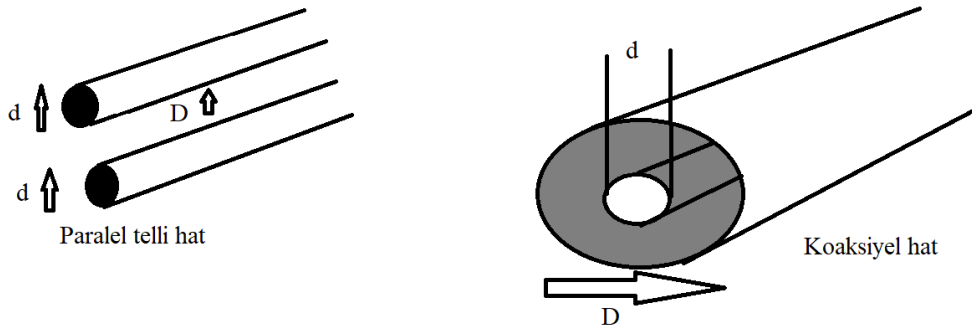
Şekil 1.7. Elektromanyetik Filtreler [41, 42, 43]

1.3. İletim Hatları

İletim hatları EM bir işaretin kaynak ile yük arasında minimum zayıflama ve maksimum verim ile iletmesini sağlayan yapılardır. İletim hatlarından maksimum enerji transferinin sağlanması için iletim hattı kendi karakteristik empedansı ile sonlandırılarak empedans uyumu sağlanmalıdır.

Düşük frekans uygulamalarında devre elemanlarının empedans analizi toplu devre elemanı modeli ile yapılırken yüksek frekansa sahip mikrodalga devrelerde bu analiz dağıtılmış devre elemanı modeli ile yapılmaktadır [1].

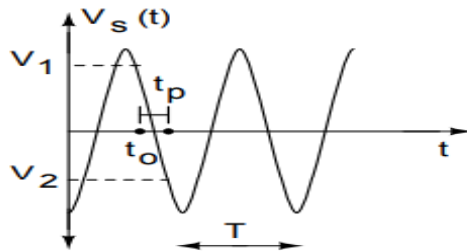
Şekil 1.8.'de dağıtılmış devre elemanı modeli uygulanabilecek bazı yapılar gösterilmektedir.



Şekil 1.8. İletim hatları [1]

Yukarıda bahsedilen durum verilen örnekle açıklanmaya çalışılmıştır. Örnek olarak RL yüklü, $V_s(t)$ sinüsoidal kaynaklı bir devrede: bağlantıyı sağlayan iletkenin omik

direnci göz ardı edilirse, devrede herhangi bir t anında, $V_0(t) = V_s(t)$ olacaktır. Bu tarz uygulamalarda tel uzunluğunun önemi yoktur ve düşük frekans uygulamalarında doğru sonuca götüren çıktılar verir. Ancak yüksek frekanslarda bu yaklaşım doğru sonuç vermez. Örneğin v dalga hızı ve l uzunluğu boyunca hareket eden bir sinüs işareti düşünölsün. Yayılma kaynaktan yüke doğrudur ve yayılmanın zamanı $t_p = l/v$ olarak ifade edilir. Hat boyunca hem t zamanının hem de x pozisyonunun bir fonksiyonu olan bir voltaj tanımlanırsa ($0 \leq x \leq l$) burada $x=0$ kaynak ucunu, $x=l$ 'de yükteki ucunu gösterir. Kaynak gerilimi $t=0$ için $V_s(t = t_0, x = 0) = V_1$ olsun (bkz. Şekil 1.9.). Ardından yük gerilimi V_1 'e yalnızca $t = t_0 + t_p$ anında yani hat yayılma gecikmesi süresinden sonra eşit olur. Fakat sonra $V_s(t = t_0 + t_p, x = 0) = V_2$ olur. V_1 ve V_2 gerilimleri eğer frekans yüksekse yani T zaman aralığı küçükse oldukça farklı değerler alabilir. Yani frekans yükseldikçe veya dalga boyutları devre bileşenlerinin boyutlarıyla karşılaştırılabilir hale geldikçe gerilimin, hattın uzunluğu boyunca değiştiği görölmektedir. Bu nedenle düşük frekanslarda kullanılan devre teoremleri doğrudan uygulanamaz [16].

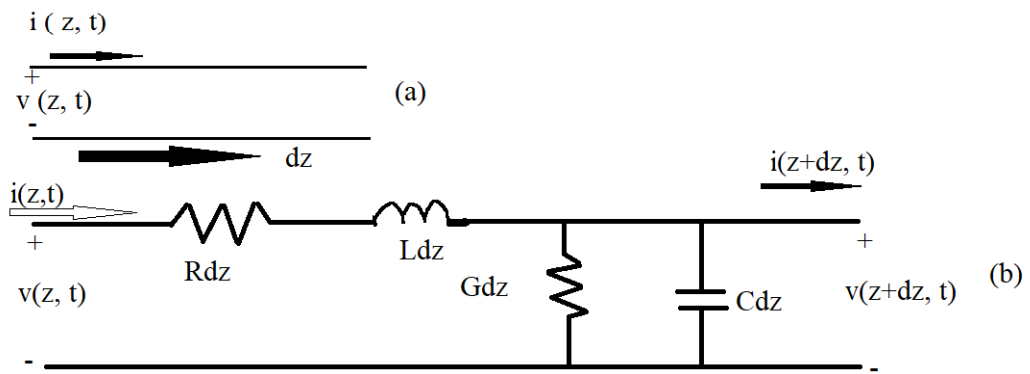


Şekil 1.9. Sinüsoidal kaynak gerilimi [16]

Ele alınan yaklaşımın daha net olarak ifadesinde elektriksel boyut farklılığı ortaya çıkmaktadır. İletim hatları boyut olarak yüksek frekanslı mikrodalga devrelerde dalga boyunun bir kısmı veya birkaç dalga boyu olabilirken, devre analizinde sistemin fiziksel boyutlarının elektriksel dalga boyundan çok küçük olduğu çözümlmeleri yapar. Örneğin evlerde kullanılan şebeke frekansı 50 Hz'dir. Bu frekansta enerjiyi ileten hatlardaki dalga boyu, iletim hatları arasındaki izolatör hava ve $\epsilon \approx \epsilon_0$ varsayılırsa, 50 Hz'de, 6000 km iken, mikrodalga bölgesindeki bir 50 GHz frekansa sahip dalga 6 mm boyunda olur. Bu fark frekans ile dalga boyu arasındaki ters orantılı

bağlantıyı vermektedir [14,17]. Bu örnekten hareketle iletim hattının akım ve gerilimlerinin hat uzunluğu boyunca değişeceği ve dolayısıyla bir dağılmış parametre devresi olduğu ortaya çıkmaktadır.

Şekil 1.10.a'da gösterildiği üzere iletim hatları sıklıkla şematik olarak iki telli hat ile modellenir. Çünkü enine elektromanyetik dalga yayılımı için en az iki tel gereklidir. Şekil 1.10.a'da gösterilen hattın sonsuz küçük bir Δz uzunluğundaki parçası, Şekil 1.10.b'deki toplu eleman devre modeli ile gösterilebilir.



Şekil 1.10. Gerilim ve akım tanımları ve iletim hattının diferansiyel uzunluğu eşdeğer devre a) Gerilim ve akım tanımları b) Toplu elemanlı eşdeğer devre [15]

Şekil 1.10.b'de verilen toplu eleman devre modelinde L endüktansı iki iletkenin öz endüktansını gösterir, paralel koldaki C kapasitansı ise aynı şekilde iki iletkenin yakın bulunmasından oluşur, R seri olarak bağlı iletkenin sonlu iletkenliğinden gelen direnci verir, G iletkenler arasındaki dielektrik malzemeden meydana gelen kaybı temsil eder [15]. Burada ifade edilen iletim hattının sonlu uzunluğu ise Şekil 1.10.'da adı geçen elemanların devre üzerinde konumlandırılmalarıyla gösterilebilir.

Yukarıdaki devreye KGY (Kirchhoff Gerilim Yasası) uygulanarak,

$$v(z, t) - R\Delta z i(z, t) - L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} - v(z + \Delta z, t) = 0 \quad (1.3)$$

çevrimi yazılabilir. Devreye KAY (Kirchhoff Akım Yasası) uygulandığında ise Eşitlik 1.4 elde edilir.

$$i(z, t) - G\Delta z v(z + \Delta z, t) - C\Delta z \frac{\partial v(z+\Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z - t) = 0 \quad (1.4)$$

Eşitlik 1.3 ve Eşitlik 1.4 Δz 'ye bölünüp Δz limit olarak sıfıra giderse aşağıdaki diferansiyel eşitlikler elde edilir.

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -Ri(z, t) - L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial i(z, t)}{\partial t} = -Gv(z, t) - C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (1.6)$$

Yukarıda verilen eşitlikler iletim hatlarının zaman alanındaki biçimidir ve telgrafçı denklemleri olarak da tanınırlar [53]. Sinüzoidal işaretlerin durgun durum koşuluna ait değerleri fazörler yardımıyla aşağıdaki şekilde ifade edilebilirler [15].

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (1.7)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (1.8)$$

Yukarıda verilen Eşitlik 1.7 ve Eşitlik 1.8 dalga denklemlerini elde etmek için çözümlerse sırasıyla Eşitlik 1.9 ve Eşitlik 1.10 elde edilir.

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0 \quad (1.10)$$

Burada γ kompleks yayılma sabiti olup frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1.11)$$

Dalga denklemleri ile ilerleyen dalganın çözülmesi neticesinde Eşitlik 1.12, Eşitlik 1.13 ve Eşitlik 1.14 elde edilir.

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (1.12)$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (1.13)$$

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} (V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}) \quad (1.14)$$

Eşitlik 1.12, Eşitlik 1.13'ün oranlanması ile elde edilecek Z_0 öz empedans değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = Z_0 = \frac{-V_0^-}{I_0^-} \quad (1.15)$$

Z_0 öz empedansı daha açık yazılmak istenirse,

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.16)$$

olarak da ifade edilebilir. Eşitlik 1.14'ten yola çıkarak Eşitlik 1.11 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z} \quad (1.17)$$

Dalga denklemi zaman domeninde yeniden yazılırsa,

$$v(z, t) = |V_0^+| \cos(\omega t - \beta z + \varphi^+) e^{-\alpha z} + |V_0^-| \cos((\omega t + \beta z + \varphi^+) e^{\alpha z} \quad (1.18)$$

şekline dönüşür. Burada φ^+ karmaşık $V_{\pm}$ geriliminin faz açısını ifade eder.

İletim hattında ilerleyen dalganın boyu ve faz hızı sırasıyla Eşitlik 1.19 ve Eşitlik 1.20 yardımı ile hesaplanabilir.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (1.19)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f \quad (1.20)$$



BÖLÜM 2. DALGA KILAVUZLARI

Mikrodalga devrelerde gücün az kayıplı transferi için geliştirilen dalga kılavuzları bu alandaki en önemli gelişmelerden birisini oluşturmaktadır. Daha az enerji ile daha fazla sinyalin taşınması isteği yüksek frekanslarda karşılığını bulmuş ve bu bir ihtiyaç olarak tümleşik devrelerde araştırma ve geliştirme konusu olmuştur.

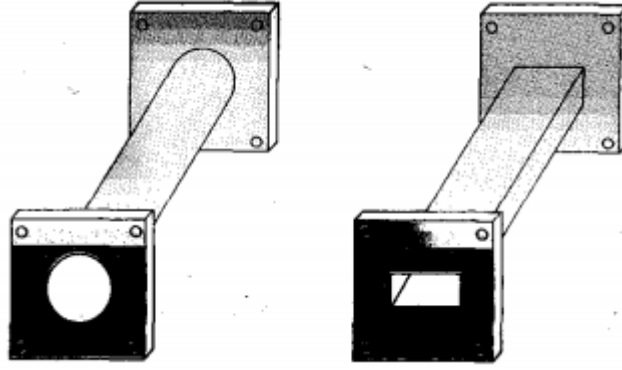
Mikrodalga devrelerin erken örneklerinde iletim hattı olarak dalga kılavuzları ve koaksiyel hatlar yer almaktadır. Koaksiyel hat yapıları yüksek aralıkta bant genişliğine sahiptir ve test uygulamalarında kullanım imkânı bulur fakat kompleks mikrodalga devrelerinde iletim için üretilmesi zordur.

2.1. Dalga Kılavuzu Yapıları

Dalga kılavuzları temel olarak iletim hatları gibi elektromanyetik dalgaları bir bölgeden (kaynak) diğerine (yük) taşımak için kullanılan yapılardır. Bununla birlikte bir dalga kılavuzu bazı yönlerden bir iletim hattından farklıdır.

İlk olarak, bir iletim hattı sadece enine elektromanyetik (TEM) dalgayı desteklerken, bir dalga kılavuzu birçok olası alan dizilimlerini destekleyebilir. İkincisi, mikrodalga frekanslarında, iletim hattı deri etkisi ve dielektrik kayıpları nedeniyle verimsiz hale gelir; dalga kılavuzları ise daha geniş bant aralığı ve daha düşük sinyal zayıflaması elde etmek için bu frekans aralıklarında kullanılır. Ayrıca, bir iletim hattı dc'den ($f = 0$ Hz) çok yüksek bir frekansa kadar çalışabilirken bir dalga kılavuzu ise sadece kesim frekansı adı verilen belirli bir frekansın üzerinde çalışabilir. Bu nedenle dalga kılavuzları yüksek geçiren filtre karakteristiği gösterirler. Kesim frekansının altındaki frekanslarda EM enerjinin çoğu zayıflatılacağı için dalga kılavuzları dc frekans bölgeleri için kullanılmazlar.

Dalga kılavuzları enine kesitte farklı geometrik şekillere sahip olmakla birlikte mikrodalga uygulamalarda genellikle dikdörtgen veya dairesel şekiller tercih edilir [30]. Şekil 2.1.'de enine dairesel ve dikdörtgen kesitli dalga kılavuzları gösterilmiştir.



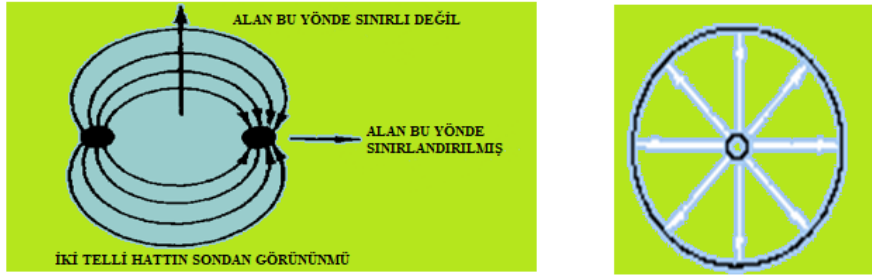
Şekil 2.1. Dairesel ve dikdörtgen yapıları dalga kılavuzları [3]

Dalga kılavuzları geometrilerinin dışında yapıldıkları malzemeye göre; metal dalga kılavuzları veya dielektrik dalga kılavuzları olarak sınıflandırılır. Metal dalga kılavuzları normalde kapalı iletken bir metal boru şeklindedir ve dalga kılavuzunun içinde yayılan dalgalar, iletken duvarlardan yansımalar ile karakterize edilebilir. Metal dalga kılavuzunun yapımında kullanılan alüminyum veya bakır metallerinin maliyetinin düşük olmasının yanında hem direnç kaybını azaltmak için iç kısmının gümüş bir astarla kaplanmasından dolayı hem de dalga kılavuzu parçalarının üretilmesinde yer alan nispeten küçük boyutlu üretim proseslerinden ötürü dalga kılavuzu yapıları pahalıdır [24, 25, 26].

Dielektrik dalga kılavuzu yapıları ise sadece dielektriklerden oluşur ve elektromanyetik dalgayı, dalga kılavuzu boyunca yaymak için dielektrik ara yüzlerden yansımalar kullanır [18, 19, 20].

İletim hattı olarak kullanılmak üzere yapılan bir dalga kılavuzunun işlevselliği ancak taşıyacağı dalganın, dalga boyu λ 'nın yarısına eşit veya daha büyük olması durumunda gerçekleşir. Bu gereklilik yüksek frekanslı devreler ile düşük frekansta çalışan yapılar arasındaki ayrımı gösteren bir durumdur. Düşük frekanslı bir devre uygulamasında kullanılan iki iletkenli iletim hattı mikrodalga frekanslardaki bir enerjinin aktarılması

noktasında verimsizdir. Bunun nedeni Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi yüksek frekanslarda EM dalganın tüm yönlerden değil de sadece iki yönden sınırlandırılmış olmasına bağlı olarak enerjisinin radyasyon yoluyla zayıflaması şeklinde açıklanabilir [22].



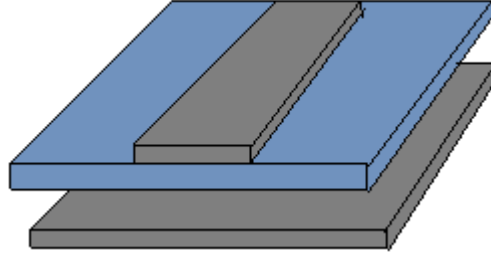
Şekil 2.2. İki yönden sınırlandırılmış alan çizgileri ve tüm yönlerde sınırlandırılmış alan çizgileri [21]

2.2. Mikroşerit ve Düzlemsel Dalga Kılavuzları

Milimetre dalga frekansında ciddi miktarlardaki kayıplar bu formdaki sinyallerin klasik iletim hatları ile taşınmasını engellemektedir. Bundan ötürü çeşitli tipte dalga kılavuzları üretilmiştir. Aşağıda da bu yapılar ve karşılaştıkları problemler incelenmiştir.

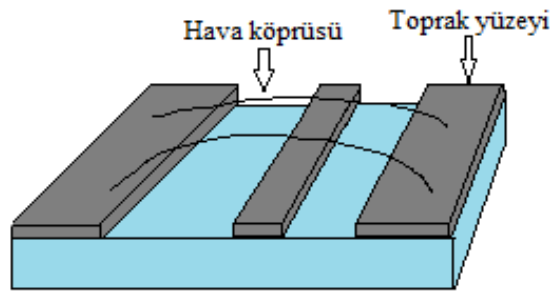
Bir mikroşerit yapıda taban olarak kullanılan malzemeler dielektrik kayıplarının sebebidir. Bunun için alt tabaka olarak bir ince film yerleştirilebilir. Bu durum malzemenin kalınlığını düşürerek iletkenliğe bağlı kaybı arttırma tesirine sahip olan hat empedansını (20 – 120 ohm) sağlamak için daha dar yapıda bir şerit metal kullanımını gerektirir. Daha dar şerit çizgileri yüzey alanı küçüleceğinden direncin artması anlamına gelmektedir $R = \rho L / A$. Bir mikroşerit iletim hattında dalganın yayılması metal şerit ile toprak iletkeni arasındaki dielektrik alttaşıta gerçekleşir. Aynı zamanda yayılım havada olmadığından kayıplar 20 GHz ve üstü frekanslarda ciddi bir şekilde artar [25]. Bununla birlikte alan çizgilerinin bir kısmı Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi havaya doğru da uzanabildiği için istenmeyen parazitler ve sızıntılar meydana gelir. Bahsedilen dielektrik kayıplar mikroşerit hatta ait alt yüzey yükseltilerek düşürülebilir

(bkz. Şekil 2.3.). Bu durumda alan, genellikle toprak yüzeyi ve alt düzlem arası boşlukta oluşur [25].



Şekil 2.3. Askıda duran mikroşerit dalga kılavuzu [25]

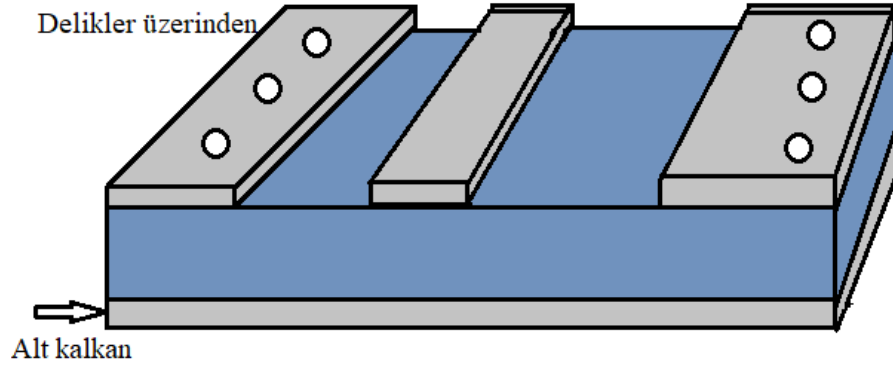
Bir başka yapı olarak Şekil 2.4.'te verilen eş düzlemlı dalga kılavuzları örnek verilebilir. Bu yapı iki yer düzleminden iki boşlukla ayrılmış merkezi bir şerit hattına sahiptir. CPW (CoPlanar Waveguide(s)) boşlukları, sinyal hattı genişliğine göre ayarlanarak tasarımda daha fazla esneklik sağlamakla birlikte devrede kullanılan işaret iletkeni ile toprak iletkenlerinin aynı düzleme yerleştirilmesinden dolayı dielektrik kayıplar engellenememektedir. CPWs'de karşılaşılan bir diğer sorun kıvrımlar veya hat sonu ayrılma noktaları gibi süreksizlikler nedeniyle istenmeyen modların uyarılmasıdır. Bu zorluk, her iki zeminde de eş potansiyeli gerçekleştirmek için merkezdeki iletkeni hava köprüleri sokularak önlenir. Ancak hava köprülerinin dahil edilmesi üretim sürecinde karmaşıklıklara sebep olmaktadır [25].



Şekil 2.4. Düzlemsel Dalga Kılavuzu [25]

Şekil 2.5.'te CPW yapılarıdaki problemlerin çözülmesi adına geliştirilen, topraklanmış koplanar dalga kılavuzu gösterilmiştir. Burada alt katmanlardaki diğer devrelerden izolasyon sağlamak adına altta metal bir kalkan kullanıldığı için CPW'den daha az kayıplara sahiptir. Ayrıca toprak iletkenleri ile alt kalkan arasındaki delikler uygun

topraklama sağlayarak yüksek frekanslarda kayıp problemleri azaltır. Ek olarak, bu devreler, mikrodalga sistemlere entegre edildiğinde genellikle bir metal muhafaza içine konumlandırılırlar [25].



Şekil 2.5. Topraklı CPW [25]

2.3. Boşluk Dalga Kılavuzları

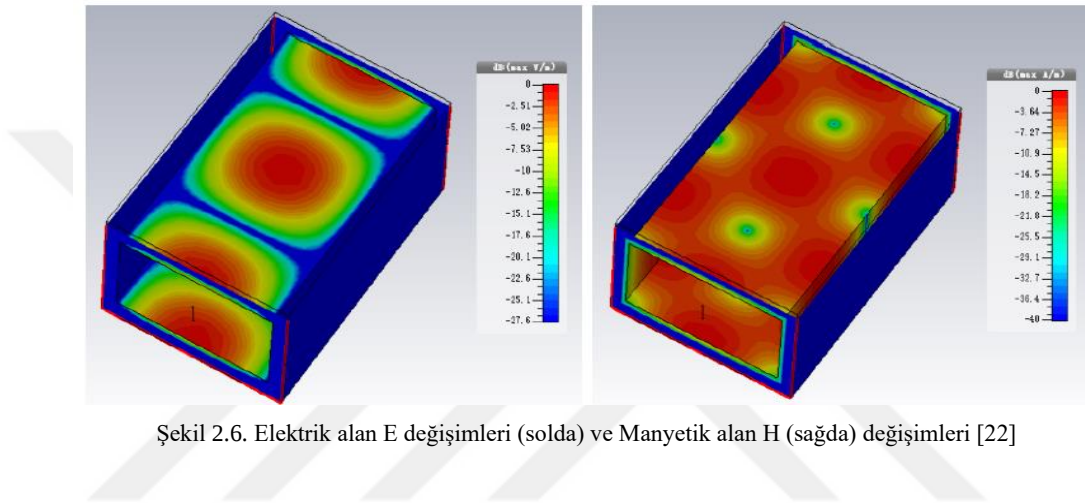
Metal iletkenler veya dielektrik malzemelerle yapılan dalga kılavuzu yapılarını geliştirmek adına literatürde boşluk dalga kılavuzu olarak nitelendirilen yeni yapılar önerilmiştir [22]. Yeni metod modüler montaj anlamında dielektrik kayıpları içermez ve metal dalga kılavuzundan daha esnektir. Dolayısıyla yüksek kazançlı antenler ve dar bant filtreler gibi kritik bileşenler için boşluk dalga kılavuzlarının kullanımı daha uygundur [22].

Mikroşerit ve koplanar (eş düzlemsel) şeritler yaygın olarak kullanılan iki düzlemsel iletim hattıdır. Bunlar sağlam, düşük maliyetli ve aktif mikrodalga bileşenlerini entegre etmek için çok uygundur. Ancak her ikisi de yüksek geçiş kaybı ve yüksek frekansta belirgin güç sızıntısı problemi yaşamaktadırlar. Ayrıca bu şeritlerin yüksek frekanslarda yüksek genişlik-dalga boyu oranına sahip olması, istenmeyen alt yüzey modu ve yüzey akımını getirmesi, devamında beklenmedik gürültü, izolasyon ve packaging sorunlarına neden olmaktadır [22].

Diğer taraftan, metal dalga kılavuzu oldukça düşük kayıplara sahiptir ve düşük kayıp ve yüksek Q bileşenleri gerektiren uygulamalar için çok uygun olmasının yanı sıra

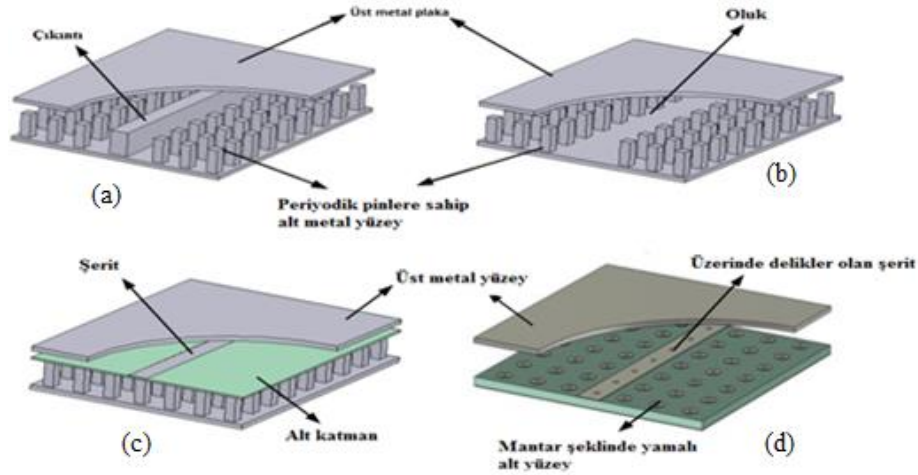
anten tasarımı, yüksek radyasyon verimliliği de sağlar. Bununla birlikte, yüksek frekansta mükemmel yüzey temas gerekliliği, üretimi pahalı ve karmaşık hale getirir.

Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi bir dikdörtgen dalga kılavuzunda, E alan kuvveti düzlemin merkezinde maksimum ve iç duvar yüzeyinde sıfırdır. Buna karşılık, H alan kuvveti iç duvar yüzeyinde maksimuma ulaşır. Ancak, dalga kılavuzunda çok iyi bir yüzey teması sağlanmaması durumunda önemli EM sızıntılar oluşmaktadır.



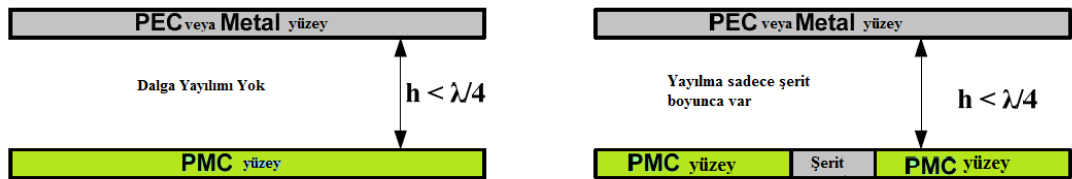
Şekil 2.6. Elektrik alan E değişimleri (solda) ve Manyetik alan H (sağda) değişimleri [22]

Yukarıda belirtilen sorunlar boşluk dalga kılavuzu(bdk) yapıları ile ortadan kaldırılmak istenmiştir. Bu teknoloji nispeten düşük kayıplı, üretimi daha esnek olup düzlemsel iletim hatları ile metal dalga kılavuzu arasındaki performans boşluğunu azaltmak için bir çözüm sunabilmektedir. Şekil 2.7.'de verildiği gibi boşluk dalga kılavuzu yapıları 4 kısma ayrılabilir [22].



Şekil 2.7. Farklı boşluk dalga kılavuzu geometrileri a) Çıkıntılı bdk, b) Oluklu bdk, c) terslenmiş mikroşerit bdk, d) mikroşerit çıkıntılı bdk [22]

Boşluk dalga kılavuzu yapıları iki paralel plaka arasındaki EM dalganın yayılımını kontrol etmek için mükemmel bir elektrik iletken (PEC-Perfect Electric Conductor) ve mükemmel bir manyetik iletken (PMC – Perfect Magnetic Conductor) düzlemleri kullanılarak oluşturulurlar. Ancak PMC'ler doğada mevcut olmadığından, bu yapılar farklı geometrik şekillere sahip periyodik metal pin dizileri ile elde edilirler. Boşluk dalga kılavuzu yapısının çalışması kısaca şu şekildedir: İki plaka arasındaki mesafe $\lambda/4$ 'ten kısa olduğu durumlarda dalga kılavuzu bant durduran filtre karakteristiği göstererek plakalar arasında dalga yayılımını engeller. Ancak PMC yüzeye şerit bir PEC yapısı yerleştirilmesi EM dalganın şerit boyunca yayılmasına olanak sağlar. Bu durum Şekil 2.8.'de şematik olarak gösterilmiştir [23].



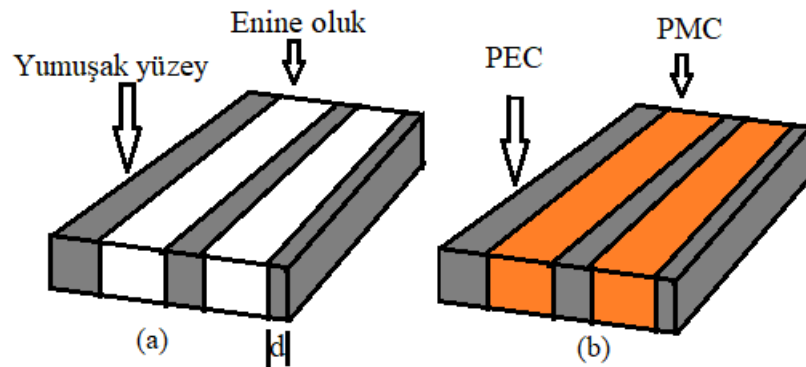
Şekil 2.8. Boşluk dalga kılavuzu yapısının temel düzeni [23]

Boşluk dalga kılavuzları incelendiğinde bu yapıların sert ve yumuşak yüzey araştırmalarının bir uzantısı olduğu görülmektedir. Bu yüzeyler akustik teorisinden sert ve yumuşak olarak adlandırılan ve bu koşulu sağlayan meta malzemelerdir. Genel

olarak yumuşak bir yüzey dalgaların yayılmasını engellerken; sert bir yüzey yayılan dalgaları destekler. Tipik bir yumuşak yüzey Şekil 2.9.'da (sol) verildiği gibi enine oluklarla gerçekleştirilir. İdeal olarak yumuşak-sert bir yüzey, PEC ve PMC şeritlerinden gerçekleştirilebilir, şeritler uzunlamasına olduğunda sert bir yüzeyi temsil eder, dalga yayıldıkça aynı yönde yönlendirilir ve enine olduklarında da yumuşak bir yüzeyi temsil eder yani Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi yayılma yönüne dik olarak konumlandırılır. PEC / PMC şeritleri, enine (yumuşak) veya uzunlamasına (sert) metal şeritlere sahip bir dielektrik substrat ile gerçekleştirilebilir. Oluğun uzunluğu çeyrek dalga boyu olduğunda ($d=\lambda/4$), kısa devre oluk açıklığında, açık bir devreye dönüştürülür ve yüzey empedansı yayılma yönü boyunca sonsuz olur. Dar pürüzsüz oluklar ilerleyen tüm dalgaları durduracaktır. Bu yüzeyler tipik olarak belirli bir süre boyunca istenmeyen radyasyonlardan kaçınmak için kullanılır. Örneğin mikroşerit ve açıklık antenlerinin E düzlemindeki yan loblarını azaltmada, karşılıklı kuplajın azaltılmasında, reflektör antenlerinde odak beslemesi olarak ve horn antenleri için kullanılmaktadır. Diğer taraftan, sert yüzey, Şekil 2.9.'da (sağ) gösterilen dielektrik malzemenin boyuna oluklara derinlikle doldurulmasıyla elde edilebilir. Oluklar arası mesafe Eşitlik 2.1 ile hesaplanır.

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (2.1)$$

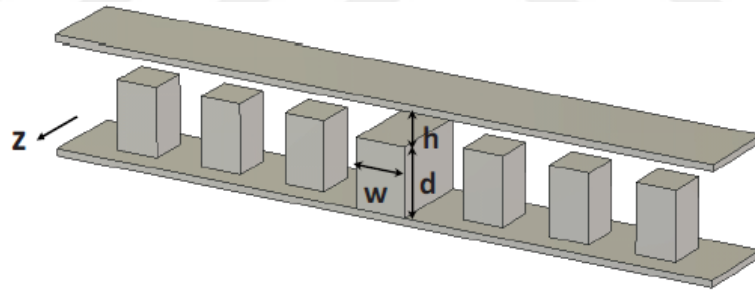
Burada, ϵ_r dielektrik malzemenin bağıl geçirgenliği ve λ boş uzayın dalga boyudur [25].



Şekil 2.9. (a) Enine oluklarla gerçekleştirilen yumuşak yüzey (b) Boyuna dielektrik dolgulu oluklarla sert yüzey [25]

2.3.1. Sırt boşluk dalga kılavuzu

Sırt boşluk dalga kılavuzu, iletken pin dizileri ile çevrelenmiş merkezi bir metal sırttan oluşan iki üst plaka, bir üst metal düz kapak ve bir alt plaka ile gerçekleştirilir. İletken pin dizileri, tüm paralel plaka modlarını durduran ve sadece sırt boyunca yayılmasına izin veren yerel bir yarı TEM modunu sınırlayan yüksek empedanslı yüzeyi gerçekleştirir. Bu yapının herhangi bir dielektriğe ihtiyacı olmamakla birlikte istenirse pin dizileri etrafında başka AMC tipleri de kullanılabilir. Şekil 2.10., üst kapaktan hava boşluğu h ile ayrılmış, z yönü boyunca sonsuz, merkezi sırtlı bir pin dizisinin dağılım diyagramını göstermektedir. Pinlerin boyutları sırtın yüksekliği ile aynıdır. Sırt mevcut olduğunda, durdurma bandı içinde yayılan bir yarı TEM modu oluşturulur. Diğer tüm yüksek düzen modları pin dizileri tarafından bastırılmaya zorlanır. Sırtın düz olması gerekmemekle birlikte alan bükülse veya birkaç dalda bölünmüş olsa bile yolunu takip eder. Bu nedenle, güç bölücüler ve bükülmüş iletim hatları gibi standart pasif bileşenler sırt boşluğu dalga kılavuzunda tasarlanabilir [25].



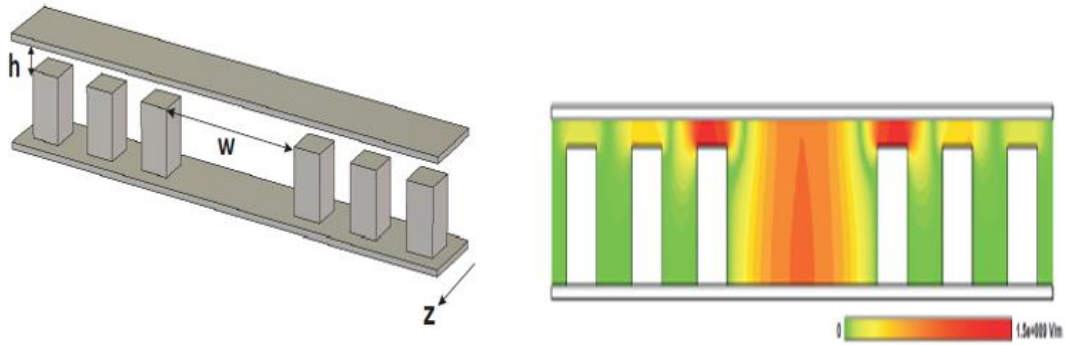
Şekil 2.10. Sonsuz z düzlemi boyunca dağılım merkezi sırt olan bir pim dizisi diyagramı [25]

2.3.2. Oluk boşluk dalga kılavuzu

Oluk boşluk dalga kılavuzunda, sırtın yerini, her iki taraftaki iletken pinler tarafından gömülü bir yiv almıştır. Sırt boşluğu dalga kılavuzu ile olan fark, oluk kasasının TE/TM modlarının yayılmasına izin vermesi ve böylece temassız metal plakalara sahip olmanın yanında dikdörtgen dalga kılavuzlarına benzer şekilde çalışmasıdır. Buna ek olarak, akım yoğunluğu için daha fazla hacime sahip olmasından dolayı oluk boşluk dalga kılavuzu yapıları sırt boşluklu kılavuz yapılarından daha az kayıplıdır.

Bu nedenlerden dolayı, oluk boşluğu dalga kılavuzu yapıları yüksek Q-faktörlü filtre tasarımları için çok uygundur [54].

Düz bir kapağın altında z yönü boyunca sonsuz, merkezi bir oluğa sahip bir pin dizisinin dağılım diyagramı ile E-alanının mutlak değeri Şekil 2.11.'te sunulmaktadır. E-alanı, dikdörtgen bir dalga kılavuzunun TE_{10} 'na benzer bir dağılımla dikey olarak polarize edilir. Aynı davranış, pinler tarafından oluşturulan durdurma bandı içinde ilerleyen oluk boşluğu dalga kılavuzu modu ile dağılım diyagramından da fark edilebilir. E. Rajo-Iglesias ve P.-S. Kildal [32] tarafından yapılan çalışmada, bu modun neredeyse olukla aynı boyutlara sahip sıradan bir dikdörtgen dalga kılavuzundan biriyle çakıştığı gösterilmiştir. Oluk boşluğu dalga kılavuzu ayrıca yatay polarizasyonlar veya horn anten uygulamalarında uygun çift polarizasyonlar için tasarlanabilir [25].



Şekil 2.11. Pim dizilimi ve elektrik alanı [25]

2.3.3. Mikroşerit boşluk dalga kılavuzu

Mikroşerit boşluk dalga kılavuzu geometrisi, alt tabakanın yapay manyetik iletken tarafından destekli olması farkıyla Şekil 2.8.'e benzeyen ters mikroşerit hatlar ile aynı şekilde çalışır. PMC yüzey, baskılı mikroşerit hattı dalgayı üst ve yer düzlemi arasındaki hava boşluğunda ilerlemeye zorlar. Bu yapıyı gerçekleştirmek için kullanılan PMC yüzeyin birim elemanı dairesel veya kare kesitli pinler şeklinde ya da mantar tipinde EBG yapısı olabilir. Bu boşluk dalga kılavuzu versiyonunun avantajı, baskı devrelere kolayca uyarlanabilmesi, havadaki yayılma nedeniyle daha az

dielektrik kayıplara ve daha az iletken kayıplara sahip olmasıdır. Çünkü daha geniş hatlar hava tipi mikroşerit hatlara kıyasla 50Ω hat empedansına uyacak şekilde kullanılabilmesinin yanında yüzey dalgaları ve radyasyon kayıpları ile ilgili bir sorunda yoktur [25]. Böylece, mikroşerit boşluk dalga kılavuzu anten dizileri için besleme ağı olarak uygulanabilir.



BÖLÜM 3. METAL MUHAFAZA TASARIM TEKNİKLERİ

Mikrodalga devreleri, ortamın hem mekanik hem de fiziksel etkilerine karşı korunması için bir metal muhafaza içine konumlandırılırken, devreler ve sistemler arasındaki elektriksel ve termal bağlantıları sağlanmalıdır. Bu bağlantı sağlanırken çeşitli hususlar göz önüne alınmalıdır.

Metal muhafazalar bir devreden veya MMIC (yekpare mikrodalga tümleşik devre) yongasından diğerlerine sinyal yollarını sağlarken devrelerin birbiri ile parazitik elektromanyetik girişimini önlemelidir. İyi bir metal muhafaza tasarımı ile hem devrelerin EM performansı artırılabilen hem de çok kompartmanlı konfigürasyonlar ile muhafazanın fiziksel boyutu azaltılmaktadır. Literatürde farklı metodlar kullanılarak geliştirilen metal muhafaza tasarımları aşağıda sunulmuştur.

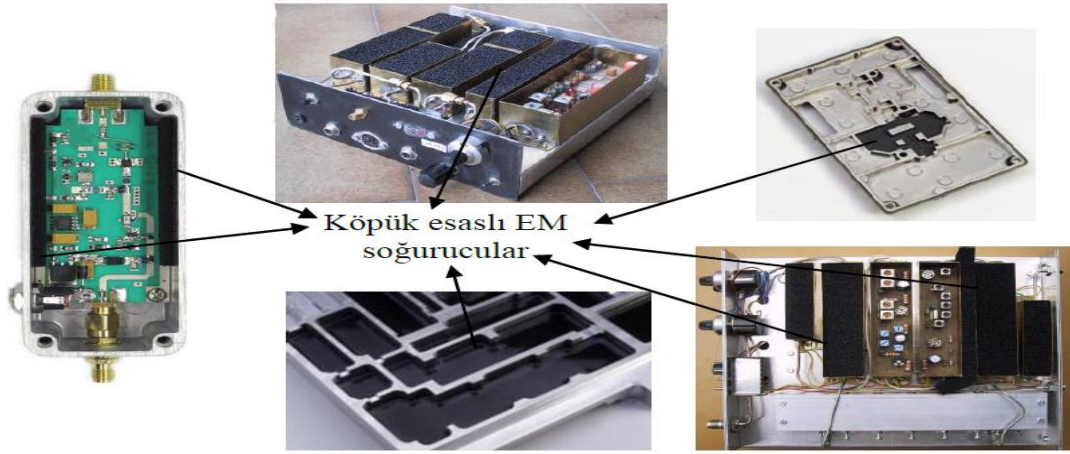
3.2. Metal Muhafaza Yapıları

Günümüzün kablosuz iletişim için ayrılan mevcut radyo frekansı spektrumundaki yoğun tıkanıklık, mm dalga boylarında veya büyük veri hızı iletimi için daha fazla spektrum alanının mevcut olduğu yüksek frekans aralığında araştırma çalışmalarını hızlandıran bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Bahsedilen mikrodalga sistemi araştırma ve geliştirmesinin eğilimi daha küçük boyutlu, güvenilir, yüksek performanslı ve yüksek verimli çok fonksiyonlu ürünlere doğru kaymaktadır. Bu tür bileşenlerin tasarımında, RF / dijital bölümler arasındaki gürültü bağlanması, sinyal bütünlüğü sorunları, komşu devre bileşenlerine istenmeyen EM parazitler yayması ve kuplaj sorunları gibi istenmeyen durumlarla karşılaşmaktadır.

RF sistemlerde yukarıda sayılan sorunların aşılması ve tüm mikrodalga sistemin iyi çalışması için EMC sorununun üç yönü bastırılmalıdır: emisyonlar, duyarlılık ve kendi

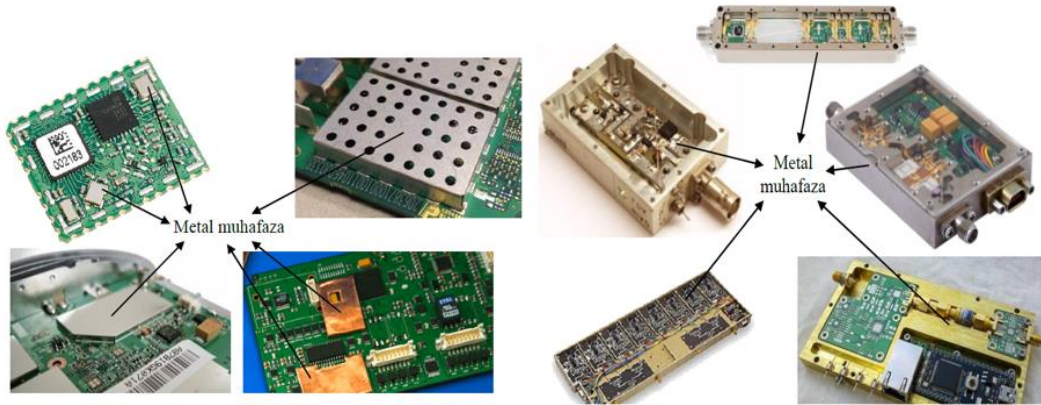
kendine uyumluluk. RF emisyonları belirli bir devre bileşeninden oluşabilir ve yakındaki diğer devreleri bozabilir. Öte yandan, geri bildirim veya gürültü eşleşmesi şeklindeki harici RF enerjisi, bir çalışma devresinin performansını bozabilir ve duyarlılık sorununa (veya bağışıklık eksikliğine) yol açabilir. Son olarak, sistemin içindeki enerji diğer dâhili devrelere müdahale ederek kendi kendine uyum sorununa neden olabilir. Bu nedenle, uygun şekilde kontrol edilmezse, RF paraziti veya kuplaj, her bir mikrodalga sisteminin kötü çalışmasına ve hatta arızalanmasına neden olabilir. Yani, RF metal muhafaza veya ekranlamanın en zorlu tasarım özelliklerinden biri, bitişik mikrodalga devreleri arasındaki yüksek izolasyonu sağlamak, kritik bileşenler arasında istenmeyen EMI'yi baskılamaktır [33].

İstenmeyen girişimlerin bastırılması için metal muhafaza tasarımı, sistemlerin tamamına veya bir bölümüne uygulanabilir. Bir devrenin tümüne uygulandığında muhafaza bölümlenmiş şekilde de yapılabilir. Bölümlenme ile aynı frekansta çalışan modüller aynı muhafaza içerisine alınmak suretiyle farklı frekanslardaki bölümler hem birbirlerinden hem de çevrelerindeki EM ortamdan fiziksel olarak izole edilmiş olurlar. Ancak mikrodalga frekanslarda çalışan devreler yüksek frekanslı oldukları için kablolar ve düzlemsel iletim hatları birer antenmişçesine hem kendilerine hem de çevrelerine yayılım yapıp etkileşime girebilirler [35]. Bu etkileşimlerin sönümlenmesi için kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan ilk yöntem absorber olarak bilinen ve strafor köpük bazlı kılıfların, mikrodalga modüllerin üstlerine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir (bkz. Şekil 3.1.). Yapının köpük bazlı oluşu absorber olarak kullanılan EM kılıfın mekaniksel dayanımını ve servis ömürlerinin kısılmasına sebep olmanın yanında karşılaşılan yüksek maliyette bu yapıların gözden düşmeye başlamasına sebep olmuştur.



Şekil 3.1. Köpük bazlı EM absorber kılıflarının mikrodalga yapılar uyarlanması [35, 37]

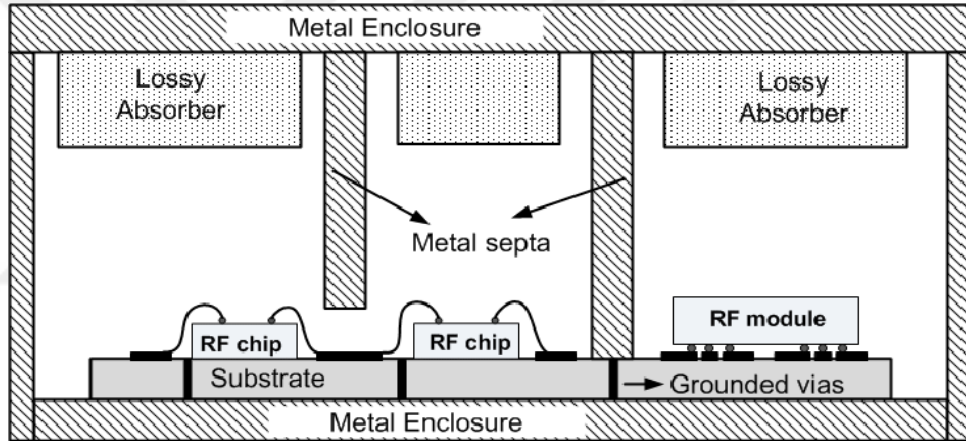
Bu yöntemin dezavantajlarına karşın diğer metod son dönemde boşluk dalga kılavuzu yöntemini baz alan PMC yüzeye sahip metal muhafaza yapılarıdır (bkz. Şekil 3.2.). Bu yapılar günümüzde yeni yeni geliştirilmeye ve uygulamaya başlanmıştır [38].



Şekil 3.2. Metal Muhafazanın modülün bir bölümüne veya tamamına uygulanan yapıları [46]

Yukarıda bahsedilen iki metal muhafaza tasarım tekniğinin yanında; mikrodalga mühendisliğinde devre kartlarında SMT (surface mount technology) yongası veya QFN (quad flat no leads) tarzı MMIC (monolithic microwave integrated circuit) yongasının tek bir taşıyıcı alt tabaka üzerine yerleştirildiği geleneksel çok yongalı modül (MCM) stili kullanılmaktadır. Bu münferit MMIC'ler, basit mikroşerit çizgiler veya koplanar dalga kılavuzu (CPW) hatları yoluyla bağlanırlar. Bu durum Şekil 3.3.'te gösterilmiştir. Önerilen çözüm, her bir kritik bileşen (tipik olarak aktif

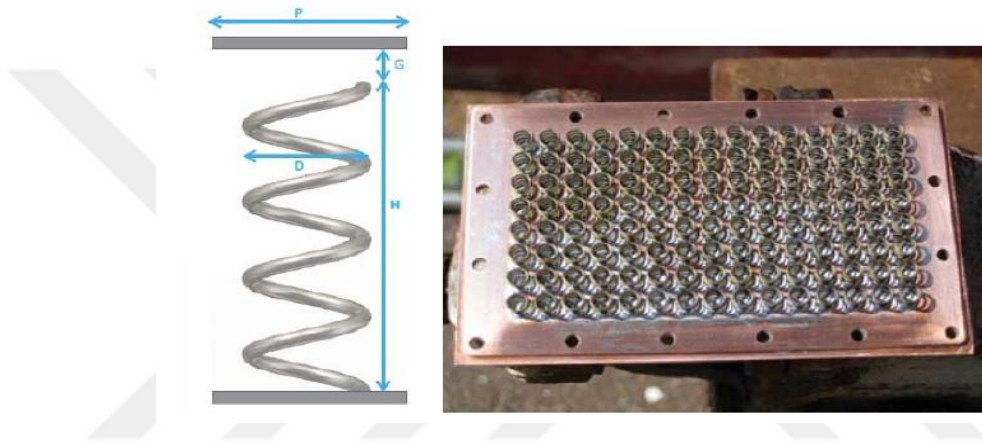
bileşenler) için ayrı bir metalik koruyucu mahfaza kullanılmasından oluşur. Bununla birlikte, bu tür çözümler, alt-tabaka modları yoluyla enerji bağlanmasını durdurmak için alt-tabakada çok sayıda deliğe ihtiyaç duyar ve aynı zamanda yüksek Q boşluk modlarını sönmölemek için kayıplı emiciler gerektirir. Bu iyi bilinen çözümde, yanlış hizalamalar, malzeme çökmeleri, oksidasyon ve kusurlu derzler, bitişik bölümler arasındaki dar yarıklar veya açıklıklar, ekranlama arızasının ana nedenleridir. Ayrıca düzensiz sınır koşulları nedeniyle daha yüksek modların oluşmasına sebep olarak istenen yayılma modunun deforme olmasına ve mikrodalga sistemlerde elektriksel performansın ciddi bir şekilde düşmesine neden olurlar [33]. Uygulamalarda, bu ekranlama tekniğinin etkinliği sıklıkla azalmaktadır; frekans ne kadar yüksek olursa, genellikle burada belirtilen tekniğin etkinliği de o kadar düşük olmaktadır.



Şekil 3.3. Tipik birçok bölmeli mikrodalga modül [33]

Boşluk dalga kılavuzu uygulaması ilk olarak pasif mikroşerit devreleri için E. Rejo-Iglesias, A. Algaba ve arkadaşları [21] tarafından başarılı bir şekilde gösterilmiştir. Bu uygulamalarda, PMC yüzey karakteristiğini elde etmek için periyodik metal pin dizileri kullanılmıştır. Ancak PMC koşulunu gerçekleştirmenin başka yolları da vardır. Şimdiye kadar sunulan çözüm, yüksek frekans aralığı için çok uygun olmakla birlikte düşük mikrodalga frekans aralığı için uygulanmaya çalışıldığında çok hantal hale gelmektedir. Tasarımlarda her ne kadar pinlerin periyodikliği istendiği kadar küçük olabilsede yükseklikleri çok esnek değildir ve düşük frekanslar için çok büyük olan bir $\lambda/4$ boyutuna yakın olmaktadır. Bu sorunun olası bir çözümü pinler yerine yaylar kullanmaktır. Şekil 3.4.'te gösterildiği gibi pinlerin elektriksel uzunluğu

değiştirilmeden toplam fiziksel uzunlukları bükülerek azaltılabilir. E.Rajo- Iglesias ve arkadaşlarından tasarlanan örnekte toplam yükseklik ' h ' sadece 0.068λ 'ya düşürülmüş ve ayrıca dalga boyu açısından periyodikliği çok az olan bir şekilde tasarlanmıştır [33]. Yapı davranışı pinlerle çok benzer olmakla birlikte temel fark burada üst iletken yüzey ile pinler arasındaki boşluğun etkisinin çok küçük olması ve aralarında neredeyse hiçbir kapasitif etkinin oluşmamasıdır [33]. Önerilen yapı, kompaktlık nedeniyle ve aynı zamanda sadece metal ile yapıldığından dolayı düşük frekanslar için çok iyi bir çözümdür. Bununla birlikte, üretimi kolay olmadığı için maliyeti yüksektir.



Şekil 3.4. Düşük frekanslar için çözüm ve üretilen prototipi [33]

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışması kapsamında farklı geometrik şekillere sahip pin yapılarının bir arada kullanıldığı multi-bant filtre karakteristiği gösteren PMC yüzeylerin tasarımı ve elektriksel testleri hedeflenmiştir. Tasarımlarda PMC yüzeylerin parametre değerleri daha önce elde edilen analitik bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır [56-61]. Eşitlik (4.1)- Eşitlik (4.4)'te verilen analitik bağıntılar incelendiğinde PMC yüzeylerin oluşturduğu durdurma bant aralığının alt sınır değerinin (f_{low}) pinlerin boyu (h_{pin}) ve genişliğine (w_{pin}), pinlerin periyoduna (w_{GND}) ve pinler ile metal muhafaza arasındaki boşluğun uzunluğuna ($h_{GAP}+h_{subst}$) bağlı olduğu görülürken bant aralığının üst sınır değerinin (f_{high}) sadece pinlerin periyoduna (w_{GND}) bağlı olduğu görülmektedir.

$$f_{low} = \frac{f_{L_{int}} + f_{L_{ext}}}{2} \quad (4.1)$$

$$f_{L_{int}} = \frac{c_0}{2 \cdot L_{int}} \quad (4.2a)$$

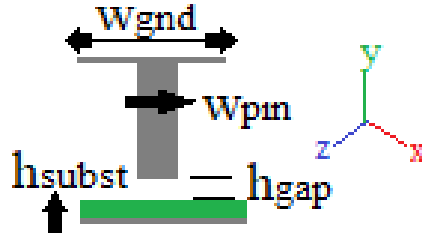
$$f_{L_{ext}} = \frac{c_0}{2 \cdot L_{ext}} \quad (4.2b)$$

$$L_{int} = 2 \cdot h_{PIN} + 2 \cdot d_{PIN} \quad (4.3a)$$

$$L_{int} = 2 \cdot h_{PIN} + 2 \cdot h_{GAP} + 2 \cdot h_{subst} + 2 \cdot w_{GND} \quad (4.3b)$$

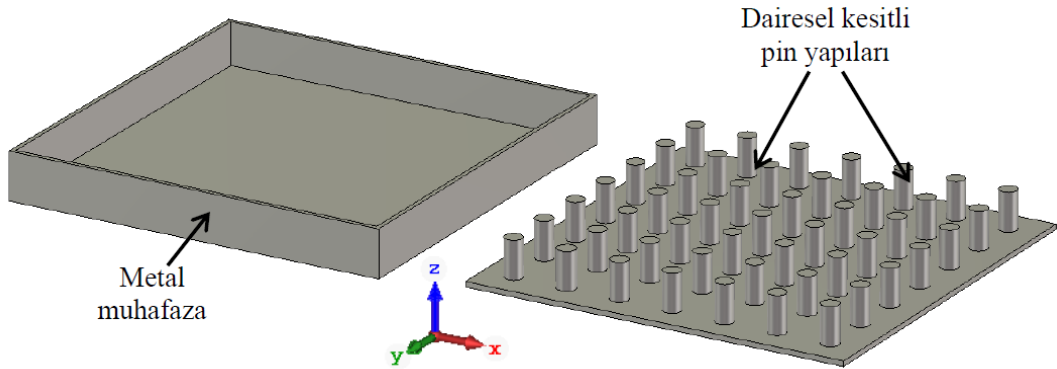
$$f_{high} = f_{10} = \frac{c_0}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_{r0}}} \sqrt{\left(\frac{1}{w_{GND}}\right)^2 + \left(\frac{0}{w_{GND}}\right)^2} = \frac{c_0}{2 \cdot w_{GND}} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.1)- Eşitlik (4.4)'te c_0 ve ϵ_{r0} sırasıyla boş uzayda elektromanyetik dalganın yayılım hızını ve boş uzayın elektriksel geçirgenliğini göstermektedir. Şekil 4.1.'de PMC yüzeyli metal muhafazanın birim eleman modeli ile tasarımında kullanılan parametreler sunulmuştur.



Şekil 4.1. Periyodik pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın birim eleman tasarım parametreleri

Çalışma kapsamında multi-bant filtre karakteristiğinin sağlanması için 6.43-12.50 GHz ve 12.28-25.00 GHz çalışma frekans aralığına sahip sırası ile dairesel ve kare kesitli pin dizilerinin bir arada kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla ilk olarak Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi sadece dairesel kesitli pin dizisine sahip PMC yüzeyin tasarım parametre değerleri Eşitlik (4.1)-Eşitlik (4.4) kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 4.1.'de listelenmiştir.

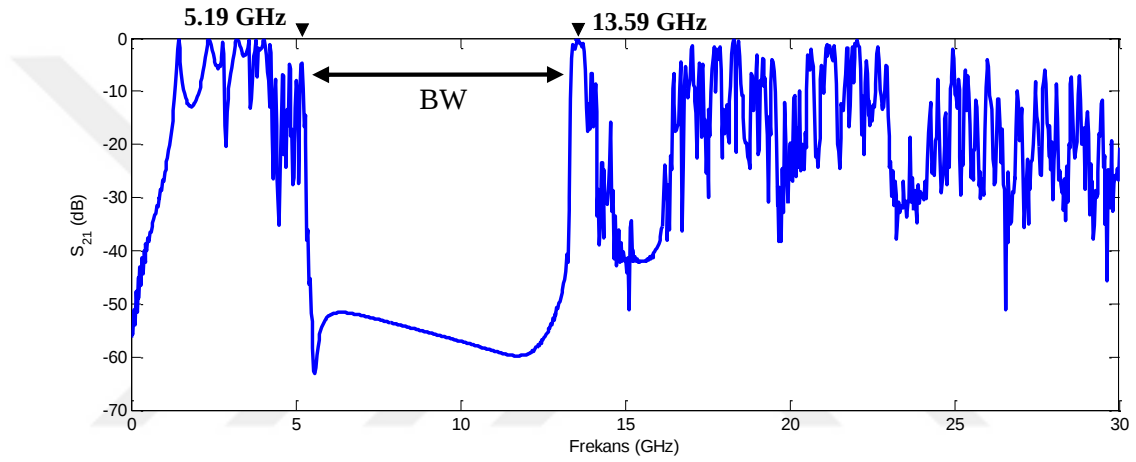


Şekil 4.2. Sadece dairesel kesitli pin dizileri içeren PMC yapı

Tablo 4.1. Sadece dairesel kesitli pin dizileri içeren PMC yapının tasarım parametre değerleri

h_{PIN}	W_{PIN}	W_{GND}	h_{GAP}	t_{subst}	ϵ_r
8 mm	2 mm	12 mm	2 mm	0.5 mm	4.4

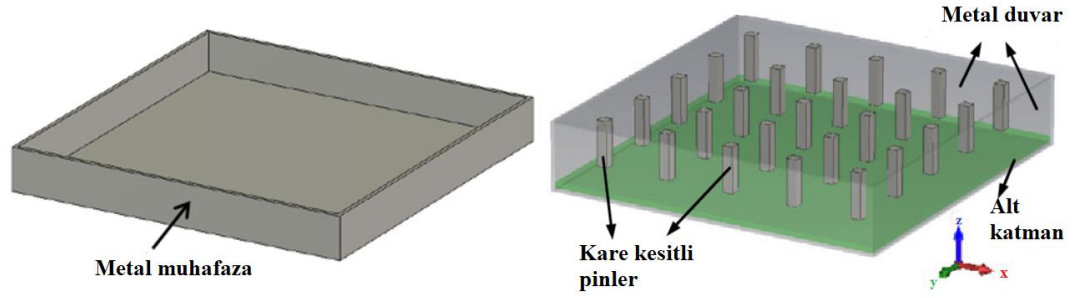
Analitik eşitlikler sonucu elde edilen ve Tablo 4.1.'de listelenen parametre değerlerinin doğruluğunun gösterilmesi için çalışmanın devamında 7x7 pin dizisine sahip PMC yüzeyin Computer Simulation Technology ticari paket programı kullanılarak benzetim modeli oluşturulmuş ve 0-30 GHz aralığında nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir [62]. Nümerik analizlerde benzetim modeli 2x2 ve 6x6 pin konumlarına yerleştirilen 50 Ω ayırık portlar ile uyarılırken sınır koşulları metal muhafaza karakteristiği elde edilmek için $E=0$ seçilmiştir. Nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri (S_{21}) Şekil 4.3.'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Sadece dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyin frekansa bağlı iletim parametre değerleri

Şekil 4.3. incelendiğinde sadece dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyin 5.19-13.59 GHz frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiği gösterdiği ve iletim parametre değerlerinin 50 dB'nin altında olduğu görülmektedir.

Çalışmanın devamında Şekil 4.4.'te gösterildiği gibi sadece kare kesitli 7x7 pin dizisi içeren PMC yüzeyin tasarımlarına geçilmiştir. Eşitlik (4.1)-Eşitlik (4.4) kullanılarak 12.28-25.00 GHz çalışma frekans aralığı için PMC yüzeyin tasarım parametre değerleri elde edilmiş ve Tablo 4.2.'de listelenmiştir.

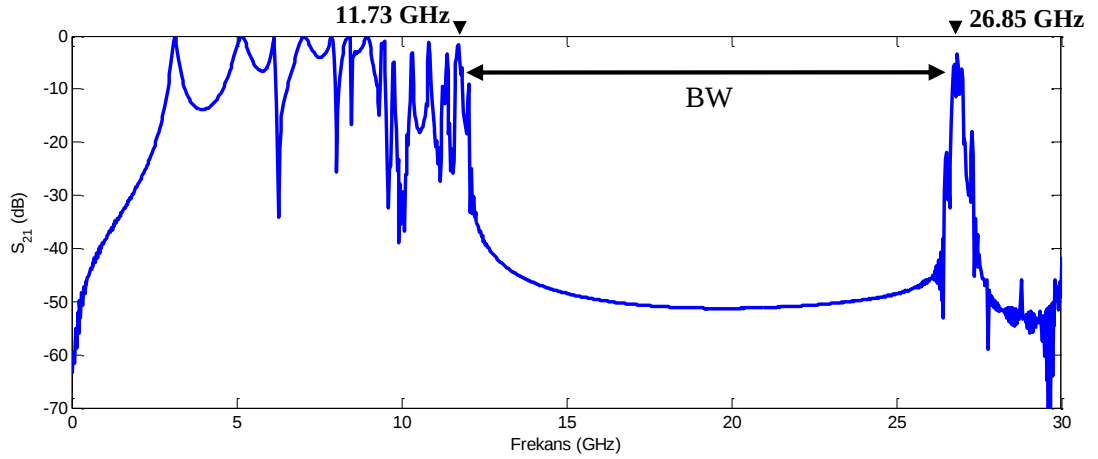


Şekil 4.4. Sadece kare kesitli pin dizileri içeren PMC yapı

Tablo 4.2. Sadece dairesel kesitli pin dizileri içeren PMC yapının tasarım parametre değerleri:

h_{PIN}	w_{PIN}	w_{GND}	h_{GAP}	t_{subst}	ϵ_r
4 mm	1 mm	6 mm	2 mm	0.5 mm	4.4

Analitik eşitliklerin doğruluklarının gösterilmesi için Tablo 4.2.'de listelenen parametre değerlerine sahip kare kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyin benzetim modeli oluşturulmuş ve 0-30 GHz frekans aralığındaki iletim parametre değerleri nümerik olarak elde edilmiştir.

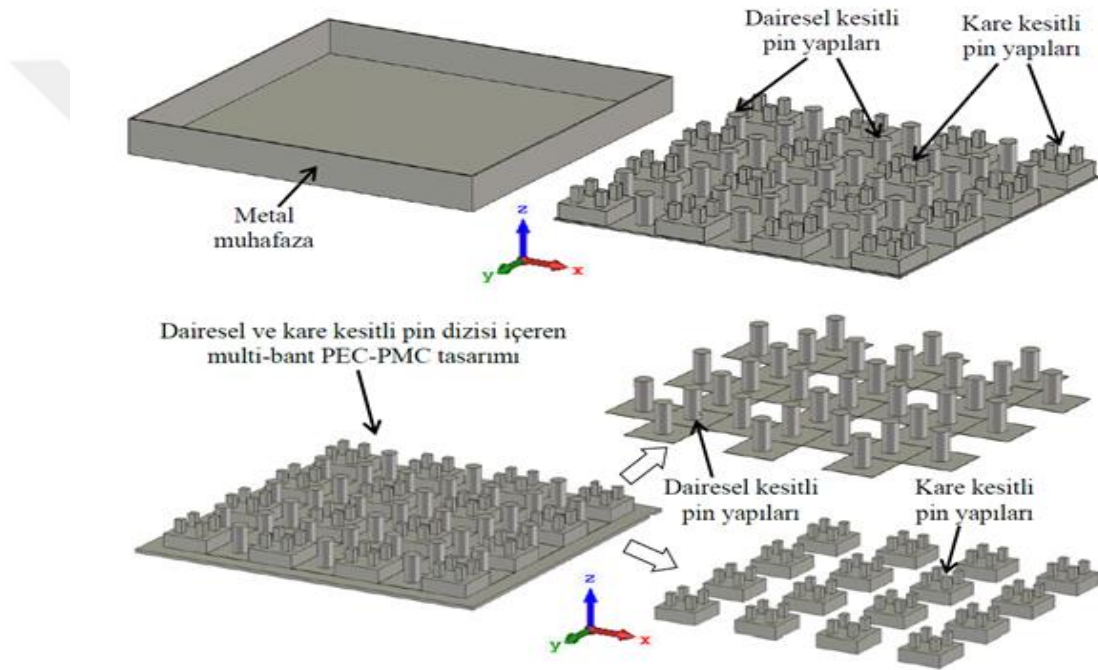


Şekil 4.5. Sadece kare kesitli pin dizileri içeren PMC yapının frekansa bağlı iletim parametre değeri

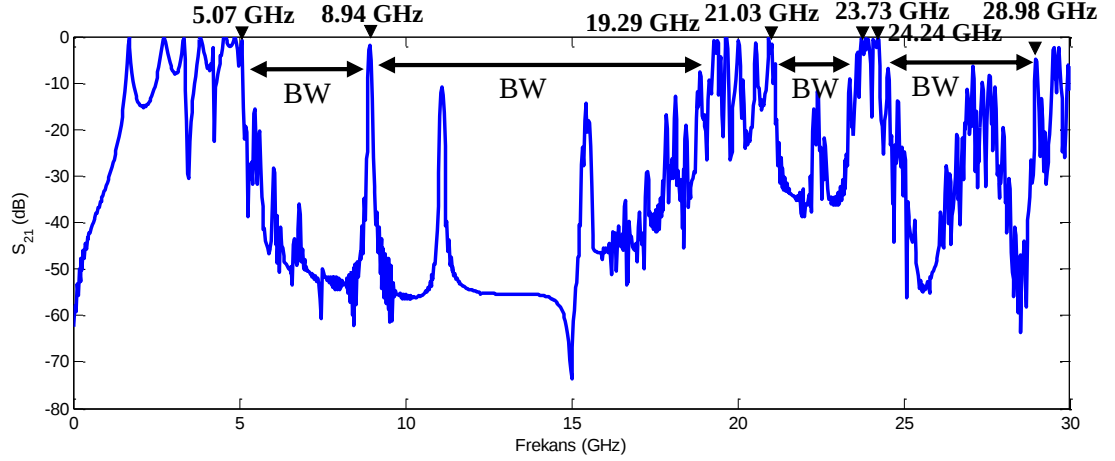
Şekil 4.5.'ten kare kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyin 11.73-26.85 GHz frekans aralığında 40 dB'nin altında bant durdurucu filtre karakteristiği sergilediği görülmektedir.

Sonuç olarak Şekil 4.3. ve Şekil 4.5.’ten nümerik analiz sonuçlarının analitik eşitlik sonuçlarını doğruladıkları görülmektedir.

Çalışmanın devamında multi-bant filtre karakteristiğinin elde edilmesi için tasarımları yapılan dairesel ve kare kesitli pin dizileri Şekil 4.6.’da gösterildiği gibi birbiri ardına konumlandırılmış ve 50Ω ayırık portlar ile uyarılarak frekansa bağlı iletim parametre değerleri elde edilmiştir. Elde edilen nümerik analiz sonuçları Şekil 4.7.’de verilmiştir.



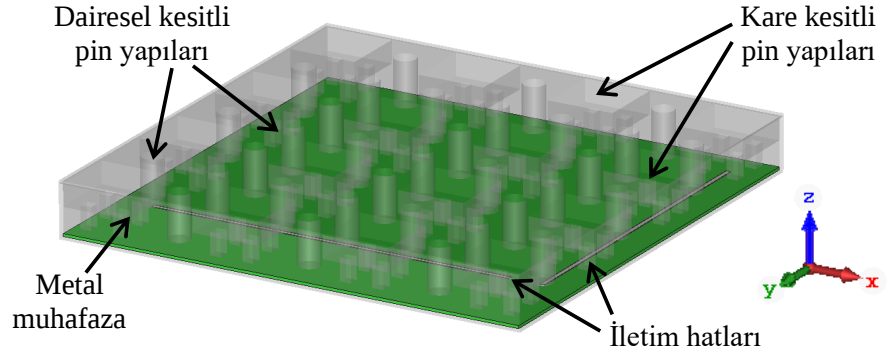
Şekil 4.6. Dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yapı (üstte) pin yapıları, (altta) genel görünüş



Şekil 4.7. Dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yapının frekansa bağlı iletim parametre değerleri

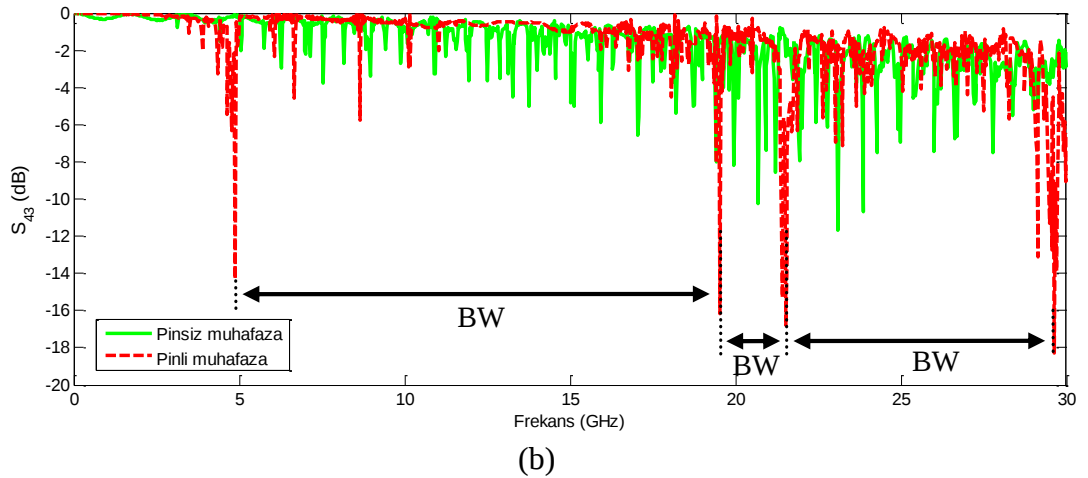
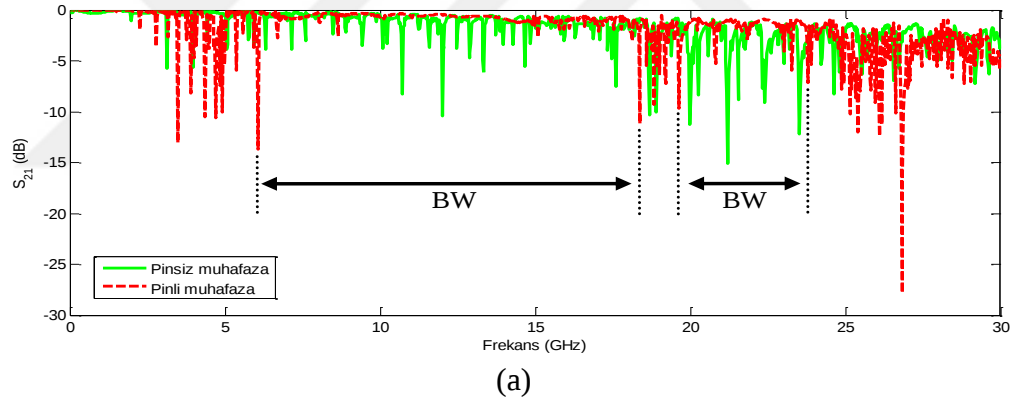
Şekil 4.7.'den dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyin 5.07-8.94 GHz, 8.94-19.29 GHz, 21.03-23.73 GHz ve 24.24-28.98 GHz frekans aralıklarında multi-bant bant durdurucu filtre karakteristiği sergilediği açık bir şekilde görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen nümerik analizlerin elektriksel testler ile doğrulanmasına geçmeden önce önerilen multi-bant PMC yüzeyin metal muhafazalar içinde oluşan istenmeyen elektromanyetik rezonansların bastırılmasındaki performansının daha iyi irdelenmesi için genişliği 0.84 mm ve uzunluğu 60 mm olan 50 Ω karakteristik empedansa sahip iki iletim hattı tasarlanmış ve dielektrik alttaş üzerine Şekil 4.8.'de gösterildiği gibi konumlandırılmışlardır. Daha sonra benzetim modeli iletim hatlarının uç kısımlarındaki 50 Ω 'luk ayırık portlar ile uyarılarak frekansa bağlı iletim parametre değerleri (S_{21} , S_{43}) elde edilmiştir. Nümerik analizler PMC yüzey içermeyen metal muhafazalar için tekrarlanmış ve iletim parametre değerleri Şekil 4.9.'da karşılaştırılmıştır.



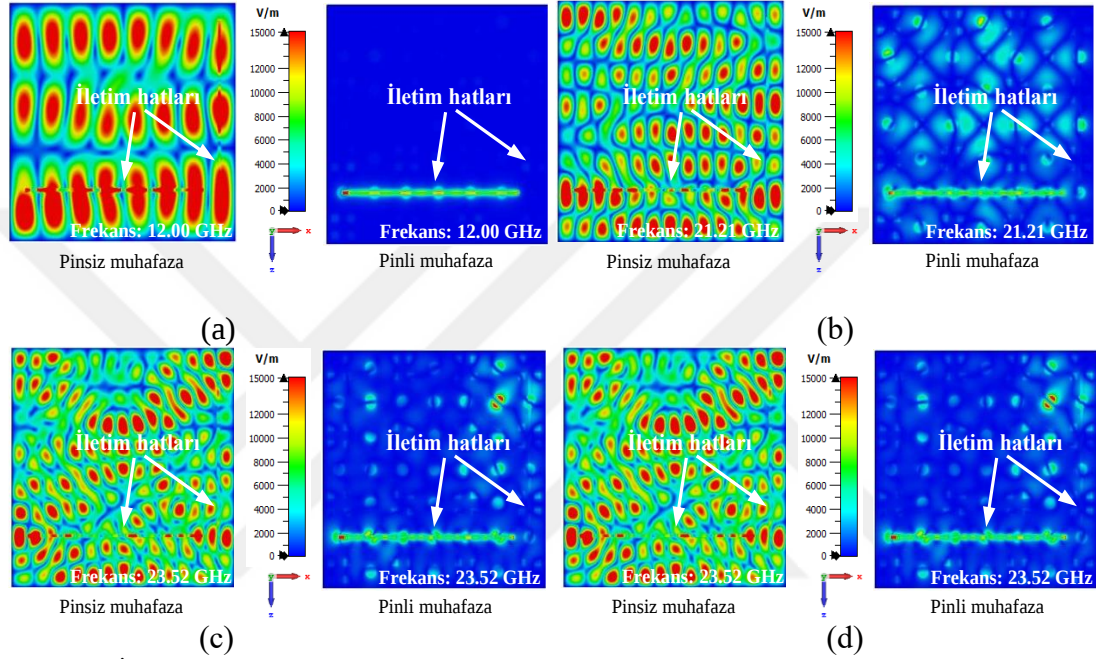
Şekil 4.8. İletim hattı içeren dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yapı

Şekil 4.9.'da verilen karşılaştırmadan PMC yüzey içermeyen metal muhafazada istenmeyen rezonansların olduğu görülürken PMC yüzey içeren metal muhafazalarda bu rezonansların çalışma frekans aralıklarında bastırıldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.9 . İletim hattı bulunduran dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren ve içermeyen multi-bant PMC yapının frekansa bağlı iletim parametre değerleri a) S21 ve b) S43

Şekil 4.10.'da 12,00 GHz, 21,21 GHz, 23,52 GHz ve 23,85 GHz rezonans frekans değerlerinde PMC yüzey içeren ve içermeyen metal muhafazaların 2D elektrik alan dağılımları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.10.'dan PMC yüzey içermeyen metal muhafazanın içinde boşluk rezonanslarının olduğu görülürken PMC yüzey içeren metal muhafazalar içinde boşluk rezonanslarının filtrelendiği görülmektedir.



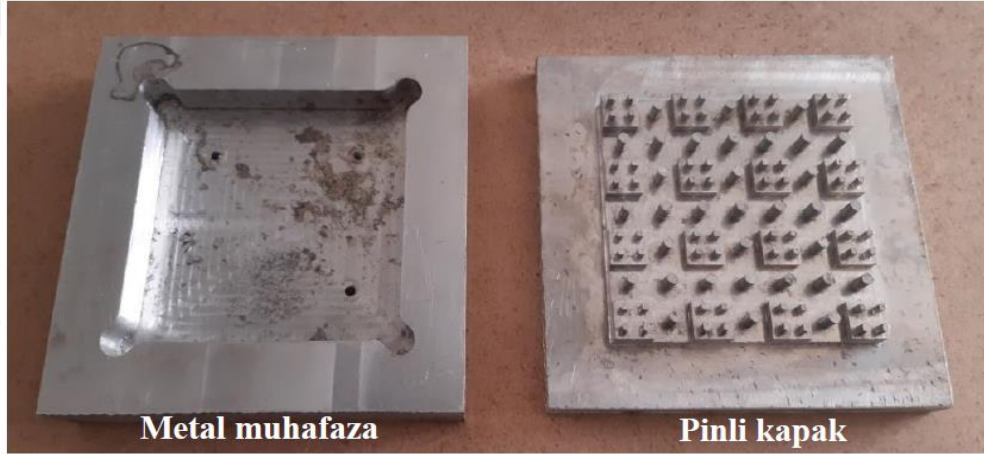
Şekil 4.10. İletim hattı bulunduran dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren ve içermeyen multi-bant PMC yapının 2D elektrik alan dağılımı (a) 12.00 GHz (b) 21.21 GHz, (c) 23.52 GHz ve (d) 23.85 GHz.

4.1. Üretim

Tez çalışması kapsamında son olarak dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yüzeyin nümerik analiz sonuçlarının elektriksel testler ile doğrulanması hedeflenmiştir. Bu amaçla benzetim modeli oluşturulan multi-bant PMC yüzeyli metal muhafazanın prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretiminde metal, plastik, cam ve ahşap gibi çok çeşitli malzemelerin sayısal komutlarla kısa zamanda seri bir şekilde yüksek kalitede üretim yapılmasına olanak sağlayan bilgisayarlı nümerik kontrol (CNC) teknolojisi tercih edilmiştir. Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de sırasıyla üretim anını gösteren bir görsel ve prototip üretimi tamamlanan metal muhafaza verilmiştir.

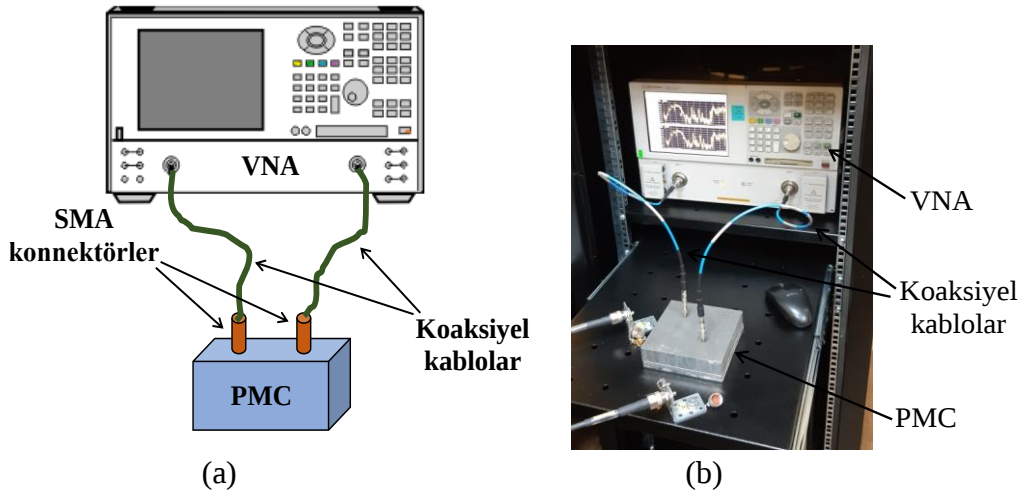


Şekil 4.11. Dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren PMC yapının prototip üretim anını gösteren görsel.



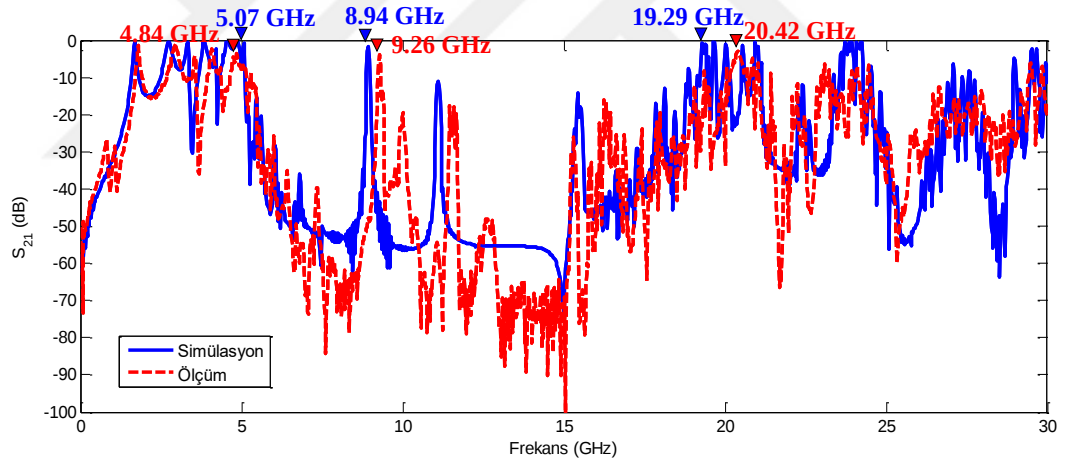
Şekil 4.12. Prototip üretimi tamamlanan dairesel ve kare kesitli pin geometrileri içeren multi-bant PMC yapısı

Multi-bant PMC yüzeyli metal muhafazanın prototip üretimi tamamlandıktan sonra elektriksel test aşamasına geçilmiştir. Şekil 4.13.'te gösterildiği gibi elektriksel testlerde 10MHz-40GHz frekans bandında saçılma parametre ölçümleri yapabilen Agilent Technologies E8363B marka vektör ağ çözümleyicisi (VNA) ve yarı esnek koaksiyel kablolar ile SMA konnektörler kullanılmıştır. Elde edilen elektriksel test sonuçları nümerik analiz sonuçları ile 0-30 GHz frekans aralığında karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13. Dairesel ve kare kesitli pin dizisi içeren multi-bant PMC yapının (a) elektriksel test düzeneğinin şematik gösterimi, ve (b) elektriksel test anını gösteren görsel

Şekil 4.14.'te verilen karşılaştırmadan elektriksel test sonuçlarının nümerik analiz sonuçlarını doğruladığı görülmektedir.



Şekil 4.14. Prototip üretimleri tamamlanan dairese ve kare kesitli pin dizisi içeren içeren multi bant PEC-PMC yapının iletim parametre değerleri

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Teknolojik cihazlardaki mikrodalga sistemler yüksek frekanslarda çalışmaktadırlar. Frekansın yüksek oluşu devre elemanlarının hem kendilerine hem de çevrelerine istenmeyen elektromanyetik girişimlerde bulunmalarına yol açar. Bu girişimin önlenmesi iki şekilde olabilir. Birinci ve en bilindik yöntem EM yutucu yapıların absorbe etme özelliğini kullanarak girişimi sönmülemektir. Ancak EM yutucuların pahalı olması ve mekanik dayanımlarının az oluşuna bağlı olarak kullanım sürelerinin kısa oluşu etkin bir yöntem olmadığını göstermektedir. Diğer yöntem ise literatüre son dönemde eklenen boşluk dalga kılavuzunu baz alan ve PMC yüzeylerini kullanarak gerçekleştirilen metal muhafaza yapılarıdır.

Literatürdeki çalışmalarda PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımları tek bir durdurma bandı için gerçekleştirilirken bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak PMC yüzey tasarımları multi-bant için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sadece dairesel kesitli ve sadece kare kesitli 7x7 pin dizisi içeren PMC yüzeylerin tasarım parametre değerleri analitik eşitlikler yardımıyla elde edilmiş ve nümerik analizleri yapılmıştır. Nümerik analizler sonucu sadece kare kesitli ve sadece dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeylerin sırasıyla 5.19-13.59 GHz ve 12.28-25.00 GHz frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiği gösterdiği görülmüştür. Çalışmanın devamında dairesel ve kare kesitli pin dizileri bir arada kullanılarak PMC yüzeyin multi-bant bant durduran filtre karakteristiği göstermesi hedeflenmiştir. Yapılan nümerik analizler sonucu multi-bant PMC yüzey tasarımının 5.07-8.94 GHz, 8.94-19.29 GHz, 21.03-23.73 GHz ve 24.24-28.98 GHz frekans aralıklarında bant durduran filtre karakteristiği sergilediği açık bir şekilde görülmüştür. Tez çalışması kapsamında önerilen yapının elektriksel performansının daha iyi irdelenebilmesi için metal muhafaza içine iletim hattı konumlandırılarak nümerik analizler tekrarlanmıştır. Nümerik analizler sonucu multi-bant PMC yüzeyin iletim hatları arasında oluşan karşılıklı kuplajları çalışma frekans aralığında bastırdığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında son olarak dairesel ve kare kesitli pin dizileri içeren multi-bant PMC yüzeyin nümerik analiz sonuçlarının elektriksel testler ile doğrulanması için CNC teknolojisi kullanılarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi tamamlanan PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametreleri VNA yardımı ile elde edilmiş ve nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan elektriksel test sonuçlarının nümerik analiz sonuçlarını doğruladığı görülmüştür.



KAYNAKLAR

- [1] Şen, Ş., Elektromanyetik Uyumluluk ve Döner Kanatlı Hava Araçları Üzerinde EMC Testleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [2] You, KY., RF Coaxial Slot Radiators: Modeling, Measurements and Applications, USA: Artech House, 2015, ISBN: 978-1-60807-822-6.
- [3] Umut, Ö., Kurtarma Gemilerinde Elektromanyetik Girişim Haritasının Çıkarılması Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [4] Gözde, M., Elektromanyetik Enerjinin Cihazlara, Sistemlere, İnsan Sağlığına Etkileri ve Trampest, Yıldız Teknik üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, Bitirme Tezi, 2014.
- [5] Cengiz, S., Elektromanyetik Girişimden Korunmada Ekranlama Etkinliği ve Elektromanyetik Ekranlama Uygulamaları, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [6] Rafiq, M., Carbon Mikrofiber Material For Elektromagnetic (Shielding) Applications, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science Electrical and computer Engineering Department, Doktora Tezi, 2015.
- [7] Mrad, R., Conducted EMC Modeling and EMI Filter Design for Integrated Class-D Amplifiers and Power Converters. Lyon Üniversitesi, Tezi Elektrik, Elektronik, Otomatik Bölümü, Doktora Tezi, 2014.
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_EMC_directives, Erişim Tarihi: 31.10.2019.
- [9] Çerezci, O., Şeker, S., Yener, Ş., Kaderoğlu, B., Hilmi, M., Ev, Ofislerde GSM Frekanslı Radyasyondan Bireysel Korunma, EMANET 2013 Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu, İstanbul, 8-9 Kasım 2013.

- [10] http://mimoza.marmara.edu.tr/~baris/dosyalar/Elektromanyetik_Uyumluluk-PCB_Uygulamalar%C4%B1.pdf , Erişim Tarihi: 31.10.2019.
- [11] Coşkun, İ., Açık Sahada Emc Anteni Kalibrasyonlarının Gerçekleştirilmesi, Saha Doğrulaması ve Ölçüm Belirsizliği, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [12] <http://wpmulti.advaniadc.com/tag/engineering/>, Erişim Tarihi: 15.12.2019.
- [13] Kılıçkaya, S., Temel Fizik, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 674, Açıköğretim Fakültesi Yayınları No: 331, 1996.
- [14] Öztürk, B., Mikrodalga Uygulamalar İçin 2.45 GHz Mikroşerit Bant Durduran Filtre Tasarımları ve Optimizasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [15] Pozar, D., Mikrodalga Mühendisliği, Dördüncü Baskıdan Çeviri, Palme Yayıncılık, 2014.
- [16] Ghosh, D., Microwave Transmission Lines – An Introduction to the Basics, Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology, Bombay.
- [17] Çilesiz, F., Mikroşerit Hatların Tasarımı ve Yüksek Frekanslarda Mikroşerit Hatlardaki Süreksizlikler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bitirme Çalışması.
- [18] http://www.tuks.nl/pdf/Reference_Material/Waveguides.pdf, Erişim Tarihi: 23.12.2019.
- [19] <http://www.antenna-theory.com/tutorial/waveguides/waveguide.php>, Erişim Tarihi: 23.12.2019.
- [20] Matthew, N., Elements of Electromagnetics, Chapter 12 Waveguides, Third Edition, Oxford University Press, 2001.
- [21] <http://www.tpub.com/neets/book11/44a.htm> , Erişim Tarihi: 23.12.2019.
- [22] Liu, P., Design of a Double Layer Cavity backed Slot Array Antenna in Gap Waveguide Technology, Department of Signals and Systems Chalmers University of Technology, Gothenburg Sweden, Master Thesis, 2016.

- [23] Zaman, A., Gap Waveguide: Low Loss Microwave Passive Compomemts And MMIC Packaging Technique For High Frequency Applications, , Chalmers Teknoloji Üniversitesi Sinyaller ve Sistemler Bölümü, Doktora Tezi, 2013.
- [24] Gözlük, T., Özgün Pinler Kullanılarak Tasarlanan Mükemmel Manyetik İletken Tabanlı Mahfazalar İle Elektromanyetik Girişimin Azaltılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [25] Pucci, E., Gap Waveguide Technology for Millimeter Wave Applications and Integration with Antennas, Chalmers Teknoloji Üniversitesi Sinyaller ve Sistemler Bölümü, Doktora Tezi, 2013.
- [26] <https://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/principles-waveguide-technology/>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2020.
- [27] Karabulut, T., Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Deneylerinin Fiziksel Analizi ve 900 /1800 MHz GSM Bandında İletim ve Işınmı Deneylerinin Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [28] <https://320volt.com/tag/pcb-topraklama/>, Erişim Tarihi: 12.01.2020.
- [29] <https://www.kozaenerji.com.tr/orta-gerilim-dagitim-trafo-merkezleri/>, Erişim Tarihi: 12.01.2020.
- [30] Ulaş, M., Dalga Kılavuzları ve Uygulamaları, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Antenler ve Mikrodalga Tekniği Dersi.
- [31] Unuk, F., Dielektrik Tabanda Bütünleştirilmiş Dalga Kılavuzu (DBD) Yapıları Kullanılarak Ayarlanabilir Mikrodalga Filtre Tasarımı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [32] Rajo-Iglesias,E., Kildal, S., Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides, IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 5, no. 3, pp. 282–289,2011.
- [33] Ashraf, Z., Rajo-Iglesias, E., Kildal, P., Prospective New PMC based Gap Waveguide Shielding for Microwave Modules, International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), Göteborg, İsveç, Eylül-2014.

- [34] <https://www.robotroom.com/PCB-Layout-Tips.html>, Erişim Tarihi: 06.11.2019.
- [35] Kildal, P. S., Alfonso, E., Valero-Nogueira, A., Rajo-Iglesias, E., Local Metamaterial-Based Waveguides in Gaps Between Parallel Metal Plates, IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol 8, 2009.
- [36] Zaman, A., Rajo, A., Kildal, P., Parallel Plate Cavity Mode Suppression in Microstrip Circuit Packages Using a Lid of Nails. IEEE Microwave And Wireless Components Letters, 20. Sayı, No 1, Ocak-2020.
- [37] <http://lea.hamradio.si/~s53mv/zifssb/kband.html>, Erişim Tarihi: 16.07.2020.
- [38] Kildal, P. S., Modelling of soft and hard surfaces using ideal perfect electric conducting/perfect magnetic conducting strip grids, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 3/2, s. 296–302, 2009.
- [39] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal_water_pipe_as_grounding_electrode.jpg , Erişim Tarihi: 03.11.2020.
- [40] https://tr.wikipedia.org/wiki/Topraklama#/media/Dosya:Hochspannungsmast_Mastfuss_Erdung_IMGP4568.jpg, Erişim Tarihi: 03.11.2020.
- [41] <https://tr.aliexpress.com/item/32816729533.html>, Erişim Tarihi : 03.11.2020.
- [42] https://www.perpaotomasyon.com/sebeke-emi-filtresi-pnf223-g-10a-kablo-tipi?gclid=CjwKCAiAnIT9BRAmEiwANaoE1dYonHQ6btrnv7gFX1mX7ew9a2tSA0pHD8IBPvQgRPNHvpmOEJuPEhoCfysQAvD_BwE, Erişim Tarihi: 03.11.2020.
- [43] <https://denkotomasyon.com.tr/dp30-emc-filtre-u-3.html>, Erişim Tarihi: 03.11.2020.
- [44] Chung, S., Chen, H., Novel Technologies for Microwave and Millimeter — Wave Applications, Chapter 24 Electrical Packaging For Microwave And Millimeter Wave Circuits” Springer Science, Business Media, LLC, First Edition, New York, 2004.
- [45] https://semam.sakarya.edu.tr/?page_id=82, Erişim Tarihi: 01.05.2021.
- [46] Schreier, J., 2019; EdaTechnical, 2019; Vis.P.J., 2019; DxZone, 2019; Reliable Techno Systems, 2019; Kratos Defense and Security Solutions, 2019.

- [47] Arslan, S., CNC EĞİTİMİ DERS NOTLARI, Kocaeli Üniversitesi Uzun Çiftlik Nuh Çimento Meslek Yüksek Okulu.
- [48] <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/> Erişim Tarihi: 13.04.2021.
- [49] <https://aktif.net/pcb-tasarimlarinda-elektromanyetik-uyumluluk-emc/>, Erişim Tarihi: 11.05.2021.
- [50] <https://www.zoodmall.uz/en/product/13028140/newpee-304000mhz-pcb-5v-dc-rf-wideband-amplifier-gain-40db-low-noise-lna-board-module/>, Erişim Tarihi: 12.05.2021.
- [51] <https://www.amazon.com/AMS1117-Supply-Arduino-Raspberry-AMS1117-5V/dp/B07S2LSR4Z>, Erişim Tarihi: 12.05.2021.
- [52] You, KY., RF Coaxial Slot Radiators: Modeling, Measurements and Applications, USA: Artech House, 2015, ISBN: 978-1-60807-822-6.
- [53] [https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0letim_hatt%C4%B1#:~:text=Telegraf%C3%A7%C4%B1lar%20denklemleri%20\(ya%20da%20telgraf,olu%C5%9Ftur%C3%A7%C4%B1lar%20denklemleri%20\(ya%20da%20telgraf,olu%C5%9Ftur%20Oliver%20Heaviside%20taraf%C4%B1ndan%20bulunmu%C5%9Ftur](https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0letim_hatt%C4%B1#:~:text=Telegraf%C3%A7%C4%B1lar%20denklemleri%20(ya%20da%20telgraf,olu%C5%9Ftur%C3%A7%C4%B1lar%20denklemleri%20(ya%20da%20telgraf,olu%C5%9Ftur%20Oliver%20Heaviside%20taraf%C4%B1ndan%20bulunmu%C5%9Ftur) , Erişim Tarihi: 21.06.2021.
- [54] Pucci, E., Uz Zaman, A., Study of Q-Factors of Ridge and Groove Gap Waveguide Resonators, IET Microwaves, Antennas & Propagation, ISSN: 1751-8725.
- [55] Nisanci, M.H., Paulis , F., Efficient Analytical Prediction of the Cavity Resonant Behavior of PEC–PMC Metallic Enclosures and Packages, IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, vol 63, no 1, pp. 93-102, Şubat 2021
- [56] Nisanci, M. H., Paulis, F., Multiband and Broadband Interference-Free Metallic Package Designs for Microwave Modules, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 30, no. 11, pp. 1053-1056, Kasım 2020
- [57] Nisanci, M. H., A Novel Pinned Cover Design With an Array of Three-Dimensional n-Pole Elements for Low-Frequency Filtering of Microwave Circuit Packages, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 6, pp. 1819-1824, Aralık 2018

- [58] Nisanci, M. H., Paulis, F., Cakir, M., Tunable Band-Gap for Metallic Packages and Cavities, 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2020, pp. 1-6.
- [59] Tesneli, A. Y., Tesneli, N. B., Nisanci, M. H., Gozluk, T, Improved PMC Packaging Design by Using Novel Pin Geometries, 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), 2019, pp. 4371-4376
- [60] Nisanci, M. H., Paulis, F., Orlandi, A., Effective noise coupling reduction in metallic enclosures hosting X-K bands microwave circuits, 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2017, pp. 1-6.
- [61] Nisanci, M. H., Paulis, Orlandi, F., Band-gap limits prediction for effective noise coupling reduction in microwave circuits metallic enclosures, 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 2016, pp. 812-817.
- [62] Computer Simulation Technology, CST Studio Suite 2019, User Guide, CST, Dassault Systèmes, 2019, available at <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammed AKGÜL

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2017
Lise	Bayrampaşa Hüseyin Bürge Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	MSB 1.HİBM	Elektronik Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. LabWIEV ile Enerji Nakil Hatlarındaki Kar ve Buz Kalınlığı Tespiti, Sedaş Proje Fikri Yarışması