

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

**AYARLANABİLİR ÇALIŞMA FREKANS
ARALIĞINA SAHİP MÜKEMMEL MANYETİK
İLETKEN YÜZEYLİ METAL MAHFAZA TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ÇAKIR

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

Ocak 2020

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AYARLANABİLİR ÇALIŞMA FREKANS
ARALIĞINA SAHİP MÜKEMMEL MANYETİK
İLETKEN YÜZEYLİ METAL MAHFAZA TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ÇAKIR

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 27.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Abdullah FERİKOĞLU
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Aşkın DEMİRKOL
Üye

Dr. Öğr. Üyesi
M. Hilmi NİŞANCI
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.

Mustafa ÇAKIR
27.01.2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübesiyle sürekli destek olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hilmi Nişancı'ya, değerli katkılarından dolayı Jüri üyelerine, eğitim öğretim hayatımda emeği geçen tüm hocalarıma, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Tuğba Çakır'a, anneme ve babama teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması kapsamında prototip üretimlerinin gerçekleştirilmesinde 117E807 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve elektriksel testlerin yapılmasında Sakarya Üniversitesi Elektromanyetik Araştırma Merkezi'nin kullanımı konusunda yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Yılmaz Uyaroğlu'na 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. Elektromanyetik Performansı Arttırmak İçin Alınacak Önlemler	3
1.1.1. Elektromanyetik filtreler	3
1.1.2. Topraklama	4
1.1.3. Ekranlama	5
BÖLÜM 2.	
DALGA KLAVUZLARI	7
BÖLÜM 3.	
TASARIM VE SİMULASYONLAR.....	11
BÖLÜM 4.	
PROTOTİP ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL TESTLER	31
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ.....	36

KAYNAKLAR.....	38
ÖZGEÇMİŞ	43



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Ω	: Ohm
λ	: Dalga Boyu
ε	: Elektrik Geçirgenlik
ε_r	: Dielektrik Sabiti
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_r	: Bağıl Manyetik Geçirgenlik
f_0	: Frekans
dB	: Desibel
EBG	: Elektromanyetik Band Boşluğu
EMI	: Elektromanyetik Girişim
GHz	: Giga Hertz
MHz	: Mega Hertz
mm	: Milimetre
PEC	: Mükemmel Elektriksel İletken
PMC	: Mükemmel Manyetik İletken
TE	: Enine Elektrik Mod
TM	: Manyetik Mod
TEM	: Enine Elektrik ve Manyetik Mod

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. (a) tam yansımali (ekranli) oda, (b) yari yansimasiz oda, (c) tam yansimasiz oda ve (d) acik saha test alanı ortamı	2
Şekil 1.2. Elektromanyetik filtreler	4
Şekil 1.3. Düşük frekanslarda topraklama uygulamaları	4
Şekil 1.4. Yüksek frekanslarda topraklama uygulamaları	4
Şekil 1.5. Ekranlama uygulamaları (a) devrenin belirli bir bölgesine ve (b) devrenin tamamına uygulanan.....	5
Şekil 1.6. Köpük esaslı EM soğurucuların mikrodalga modüllere uygulanması.....	6
Şekil 2.1. Metal mahfazalar içinde oluşan kuplajlar ve çözüm yöntemleri.....	7
Şekil 2.2. Düşük frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları.....	8
Şekil 2.3. Yüksek frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları	8
Şekil 2.4. Yüksek frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları	9
Şekil 2.5. (a) sırt boşluk, (b) oluk boşluk ve (c) mikroşerit boşluk dalga kılavuzlarında durdurma bantları	9
Şekil 3.1. 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza (a) ve (b) tasarım parametreleri.....	12
Şekil 3.2. f_{low} frekans değerinde oluşan elektrik alan dağılımı (a) pinler arasındaki vektörel dağılım, (b) pinler arasındaki 3D dağılım ve (c) eşdeğer kavite modeli.....	12
Şekil 3.3. f_{high} frekans değerinde oluşan elektrik alan dağılımı (a) pinler arasındaki vektörel dağılım, (b) pinler arasındaki 3D dağılım ve (c) eşdeğer kavite modeli	12
Şekil 3.4. 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı yansıma ve iletim parametre değerleri	14
Şekil 3.5. İletim hattı içeren PMC yüzeyli metal muhafaza	15

Şekil 3.6. İletim hattı içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın (a) yansıma S11, (b) iletim S21, (c) yakın uç kuplaj S31 ve (d) uzak uç kuplaj S41 değerleri	16
Şekil 3.7. Metal muhafazalar için 11,04 GHz frekans değerinde oluşan 2D elektrik alan dağılımları (a) pin dizisi içermeyen ve (b) pin dizisi içeren.....	17
Şekil 3.8. Farklı pin uzunlukları için PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri (a) hpin = 10 mm, (b) hpin = 9 mm, (c) hpin = 8 mm, (d) hpin = 7 mm, (e) hpin = 6 mm, (f) hpin = 5 mm, (g) hpin = 4 mm ve (h) hpin = 3 mm	18
Şekil 3.9. Üç kavite içeren metal muhafaza tasarımı.....	22
Şekil 3.10. Pinler üzerine konumlandırılan hareketli plaka tasarımı	22
Şekil 3.11. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı	23
Şekil 3.12. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal muhafaza içine konumlandırılan portlar	24
Şekil 3.13. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri (a) S21, (b) S43, (c) S65	24
Şekil 3.14. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli mikrodalga modül tasarımı	26
Şekil 3.15. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modül içine konumlandırılan portlar	26
Şekil 3.16. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S11, (b) S33, (c) S55, (d) S77, (e) S99, (f) S11 11	26
Şekil 3.17. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S21, (b) S43, (c) S65, (d) S87, (e) S10 9	28

Şekil 4.1. Prototip üretimi tamamlanan ayar lanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal mahfaza	31
Şekil 4.2. Prototip üretim anını gösteren görsel.....	32
Şekil 4.3. Prototip üretimi tamamlanan PMC yüzeyli metal mahfazanın ayar vidası ve ayar plakası.....	32
Şekil 4.4. Elektriksel testlerde kullanılan ölçüm düzeneği.....	33
Şekil 4.5. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal mahfazanın nümerik analiz sonuçları ile elektriksel test sonuçlarının karşılaştırılması (a) hPIN = 11 mm, (b) hPIN = 10 mm, (c) hPIN = 9 mm, (d) hPIN = 8 mm ve (e) hPIN = 7 mm.....	33



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3.1. 6-13 GHz frekans aralığında bat durduran filtre karakteristiği gösteren 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın parametre değerleri	14
Tablo 3.2. 6-13 GHz frekans aralığında bat durduran filtre karakteristiği gösteren 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın çalışma bandının sınır değerleri için bağıl hata oranları	15
Tablo 3.3. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın farklı çalışma bant sınır değerleri için bağıl hata oranları	21
Tablo 3.4. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın farklı çalışma bant sınır değerleri için bağıl hata oranları	22
Tablo 4.1. Prototip üretimi yapılan 6x6 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal mahfazanın parametre değerleri.....	31

ÖZET

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

Mikrodalga sistemlerinde en zorlu tasarım problemlerinden biri komşu devre modülleri arasında yüksek elektromanyetik izolasyonun sağlanmasıdır. Çoğu zaman muhtemel elektromanyetik girişimi (EMI) bastırmak için devre üzerine metalik bir muhafazanın yerleştirildiği geleneksel teknikler uygulanmaktadır. Bu geleneksel teknikler metal muhafaza içinde kalan istenmeyen gürültülerin bastırılmasına bir katkı sağlamamaktadır. Son yıllarda metal pin dizisi içeren periyodik yapılar kullanılarak oluşturulan PMC yüzeyli metal muhafazalar bu problemleri ortadan kaldırabilecek bir çözüm olarak literatürde sunulmuştur. Tez çalışmasında literatürden farklı ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı önerilmiştir. Önerilen model için ilk olarak 5x5 pin dizisi kullanılmış ve metal muhafazanın elektriksel performansı nümerik olarak irdelenmiştir. Dairesel kesitli pin dizilerinin metal muhafazanın elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin daha iyi incelenmesi için çalışmanın devamında muhafazanın içindeki pin dizileri kaldırılarak nümerik analizler tekrarlanmış ve elde edilen frekansa bağlı yansıma, iletim, yakın uç kuplaj ve uzak uç kuplaj değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın devamında önerilen model üç farklı çalışma frekansına sahip kavite bulunduran mikrodalga modüle uygulanmış ve nümerik analizler tekrarlanmıştır. Çalışmada son olarak elde edilen nümerik analiz sonuçlarının doğruluklarının gösterilmesi için 6x6 dairesel kesitli pin dizisi içeren ayarlanabilir PMC yüzeyli metal mahfazanın prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve elektriksel testleri yapılmıştır.

DESIGN OF METAL ENCLOSURE WITH PERFECT MAGNETIC CONDUCTIVE SURFACE WITH ADJUSTABLE WORKING FREQUENCY RANGE

SUMMARY

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

One of the most challenging design problems in microwave systems is to provide high electromagnetic isolation between adjacent circuit modules. Mostly, conventional techniques have been implemented in which a metallic housing is placed on the circuit to suppress possible electromagnetic interference (EMI). These traditional techniques do not contribute to the suppression of unwanted noise in the metallic enclosures. Metal enclosures with PMC surfaces, which have been created using periodic metallic array of pins in recent years, have been presented in the literature as a solution that can eliminate these problems. In this study, a novel metal PMC surfaced enclosure with a circular cross section pin array design with adjustable operating frequency range was proposed. For the proposed model, firstly 5x5 pin array was used, and the electrical performance of the metallic enclosure was numerically examined. To better examine the effects of circular cross section pin arrays on the electrical performance of the metal enclosure, numerical analyzes were repeated by removing the pin arrays inside the enclosure, and the frequency-dependent reflection, transmission, near-end coupling, and far-end coupling values were compared. In the continuation of the study, the proposed model was applied to the microwave module which has three different operating frequencies and the numerical analysis was repeated. To validate the accuracy of the numerical analysis results obtained in the study, a prototype of the metallic enclosure with adjustable PMC surface, including 6x6 circular section pin array was performed, and also electrical tests were carried out.

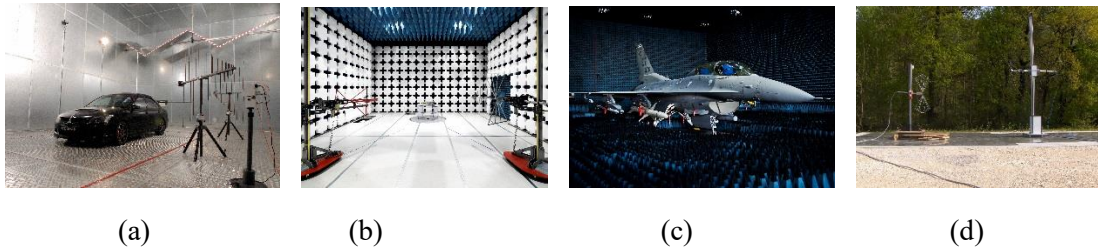
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility, EMC), genel olarak bir cihazın veya sistemin elektromanyetik ortamında bir girişime neden olmadan ve bir girişimden etkilenmeden çalışmaya devam etmesi şeklinde açıklanabilir. Bir başka ifadeyle EMC bir sistemdeki elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference, EMI) yokluğu olarak tanımlanabilir [1]-[4]. Elektromanyetik girişim (gürültü) ise cihaz üzerinde etkili olarak cihazın çalışmaya devam etmesini engelleyen elektrik ve manyetik alanların bir sonucudur [4]-[5]. Girişim kaynakları sürekli ve süreksiz olmak üzere iki ana sınıfa ayrılırlar. Sürekli girişimde kaynak ses frekansı, radyo frekansı gibi belirli bir frekans aralığında sürekli olarak yayıldığında ortaya çıkarken süreksiz girişimde ise şimşek, elektro statik deşarj (ESD) gibi kısa bir süre için enerji darbesi yaydığında ortaya çıkar [6]-[7].

Günümüzde EMC başta savunma sanayi olmak üzere uzay, havacılık, denizcilik, otomotiv, haberleşme, elektronik ve medikal gibi birçok farklı sektörde üzerinde durulan hassas bir konu haline gelmiştir. Bu amaçla ulusal ve uluslararası askeri ve sivil standartlar belirlenmiştir [3]-[8]. Bu standartlar cihazın veya sistemin elektromanyetik kalitesinin belirlenmesini sağlayan emisyon ve bağışıklık testleri içerir. Bu testler iletkenlik ve ışıma olmak üzere iki farklı yol ile yapılırlar. Emisyon testlerinde cihazın kablo üzerinden veya havadan yaydığı elektromanyetik gürültünün çevredeki sistemler üzerindeki etkileri incelenirken bağışıklık testlerinde dışarıdan bir üreteç ile üretilen test işaretlerinin cihaza kablo üzerinden veya havadan uygulanması sonucu cihazın veya sistemin çalışması üzerindeki etkileri incelenmektedir. Ayrıca iletkenlik yoluyla yapılan emisyon ve bağışıklık testlerinde cihazın veya sistemin akım ve gerilim değerleri ölçülürken ışıma yoluyla yapılan emisyon ve bağışıklık testlerinde ise elektrik alan ve manyetik alan değerleri ölçülmektedir. Ölçümlerde akım probu, Hat Empedansı Sabitleyici Şebeke (Line

Impedance Stabilization Network – LISN), elektrik alan antenleri, halka antenler veya EMI alıcılar kullanılmaktadır [2]-[6]-[8].

Yukarıda belirtilen testlerin tekrarlanabilir olması için Şekil 1.1.a., Şekil 1.1.b., Şekil 1.1.c. ve Şekil 1.1.d.'de verilen tam yansımali oda, yarı yansimasiz oda, tam yansimasiz oda ve açık saha test alanı ortamları kullanılır [9]-[12]. Tam yansımali odanın duvarları, zemini ve tavanı yüksek iletkenlik değerine sahip galvaniz kaplı elik malzemeden yapılarak odanın Faraday kafesi etkisi göstermesi sağlanır [9]. Bu sayede odanın dışında mevcut bulunan EM alanların odanın içindeki ölçüm düzeneğine benzer şekilde odanın içinde oluşan EM alanların ise odanın dışında bulunan cihazlara etki etmesi engellenerek test ortamı elektromanyetik olarak yalıtılmış olur. Ayrıca oda içinde düzgün EM alan elde etmek için tam yansımali odaya karıştırıcılar (stirrer) konumlandırılır. Karıştırıcıların konumu ve fiziksel boyutları içeride oluşacak alanı etkilemektedir [9]. Yarı yansimasiz ve tam yansimasiz odalarda ise dışarıdan kaynaklanan EM alanların bastırılması için odanın duvarları, zemini ve tavanı galvaniz kaplı elik malzeme ile kaplanırken odanın içindeki metal yüzeylerden kaynaklanacak yansımaların soğrulması için ise metal yüzeyler karbon içeren ferrit malzeme ile kaplanmaktadır [10]-[11]. Kurulum maliyeti göz önüne alındığında tam yansımali odanın yarı yansimasiz ve tam yansimasiz odalardan daha ekonomik olduğu görülmektedir. Açık alan ölçümlerinde ise herhangi bir fiziksel temas olmaksızın alıcı ve verici antenler arasına konumlandırılan test altındaki numunenin iletim veya yansımaya parametre değerlerinin elde edilmesine olanak sağlanır [12].



şekil 1.1. (a) tam yansımali (ekranlı) oda, (b) yarı yansimasiz oda, (c) tam yansimasiz oda ve (d) açık saha test alanı ortamı [13]-[16].

1.1. Elektromanyetik Performansı Arttırmak İçin Alınacak Önlemler

Bir sistemin EMC performansını arttırmak için ilk olarak kaynak ile cihaz arasında oluşması muhtemel girişimlerin belirlenerek tasarım aşamasında bazı önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu önlemler çok çeşitlilik göstermekle birlikte temel olarak filtreleme, uygun mesafe aralığının belirlenmesi, topraklama ve ekranlama olmak üzere dört ana sınıfa ayrılabilir. Bunlardan ekranlama ile uygun mesafe aralığının belirlenmesi ışıma yoluyla oluşan girişimlerde temel çözüm olarak kullanılırken verimli topraklama yapmak ve gerektiği yerde filtre uygulamak iletkenlik yolu ile oluşan girişimlerin bastırılmasında temel çözüm olarak kullanılırlar [17]-[18].

Bir sistemin EMC performansını arttırmak için ilk olarak kaynak ile cihaz arasında oluşması muhtemel girişimlerin belirlenerek tasarım aşamasında bazı önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu önlemler çok çeşitlilik göstermekle birlikte temel olarak filtreleme, uygun mesafe aralığının belirlenmesi, topraklama ve ekranlama olmak üzere dört ana sınıfa ayrılabilir. Bunlardan ekranlama ile uygun mesafe aralığının belirlenmesi ışıma yoluyla oluşan girişimlerde temel çözüm olarak kullanılırken verimli topraklama yapmak ve gerektiği yerde filtre uygulamak iletkenlik yolu ile oluşan girişimlerin bastırılmasında temel çözüm olarak kullanılırlar [17]-[18].

1.1.1. Elektromanyetik filtreler

Özellikle güç devreleri elektrik şebekesinde gerilim ve akım harmonikleri meydana getirmektedir. Meydana gelen gerilim ve akım harmonikleri güç kayıplarının, yalıtkan stresinin ve sistem elemanlarının ısılarının artmasına sebep olurken sistem üzerinde istenmeyen rezonanslar oluşturarak yüksek gerilim delinmelerine yol açmaktadır. Bu problemlerin giderilmesi için Şekil 1.2.'de verildiği gibi EMC filtrelerin kullanılması gerekmektedir.



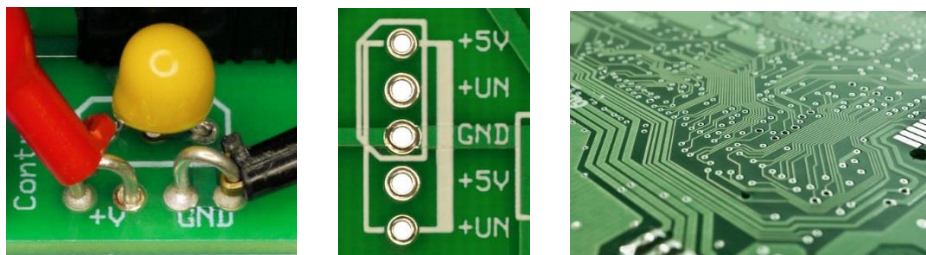
Şekil 1.2. Elektromanyetik filtreler [19].

1.1.2. Topraklama

Elektronik sistemlerde topraklama yapmanın iki temel sebebi vardır. Bunlardan birincisi güç arızası veya yıldırım deşarjı nedeniyle bir cihaz veya sistem üzerinde oluşan yüksek gerilimlerin şok ve yangın tehlikelerini önlemek, ikincisi ise elektromanyetik alanlardan, ortak empedanstan veya diğer kuplaj türlerinden kaynaklanan elektromanyetik parazitlenmeyi önleyerek EMI etkilerini azaltmaktır [17]. Şekil 1.3.'de gösterildiği gibi, düşük frekans uygulamalarda genellikle plakalar, su boruları, otomobil, uçak gemi vb. araç gövdeleri, binaların çelik konstrüksiyonları toprak yerine kullanılırken yüksek frekans devre uygulamalarında Şekil 1.4.'te verildiği gibi toprak iletkeni ile vialar kullanılmaktadır.



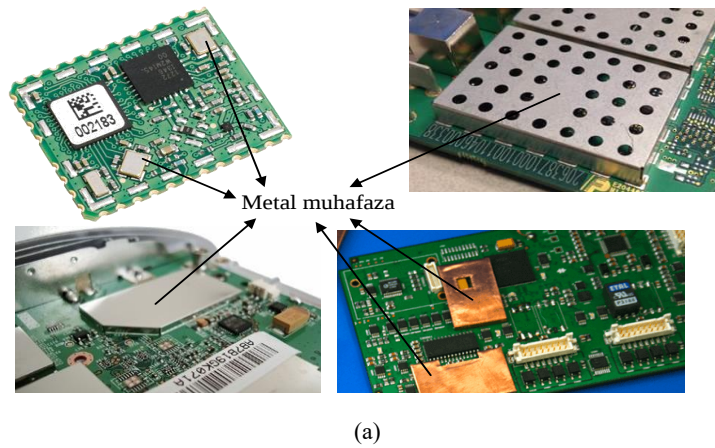
Şekil 1.3. Düşük frekanslarda topraklama uygulamaları [20]-[23].



Şekil 1.4. Yüksek frekanslarda topraklama uygulamaları [24]-[26].

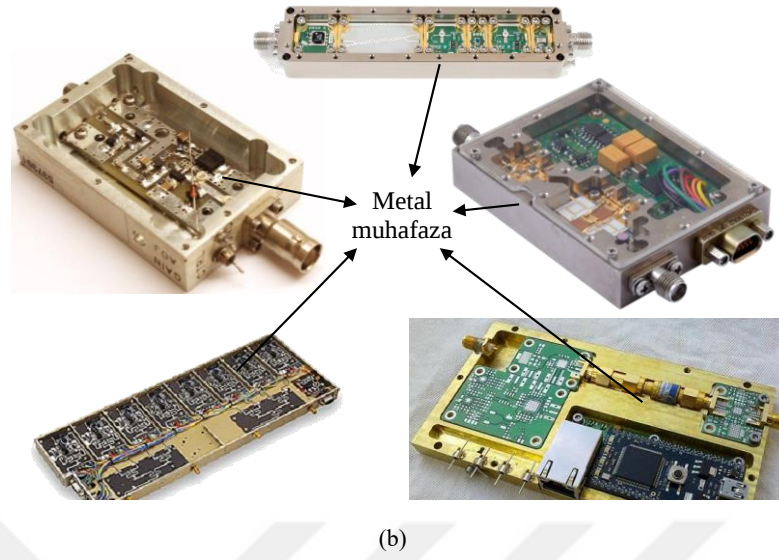
1.1.3. Ekranlama

Ekranlama en genel manada cihazların veya sistemlerin dış elektromanyetik ortamdan izole edilmesi veya iç elektromanyetik ortamın dışarıya sızmasının engellenmesi şeklinde tanımlanabilir [27]. Şekil 1.5.'de gösterildiği gibi ekranlama cihazların veya sistemlerin belirli bir bölgesine veya tamamına uygulanabilir. Bir sistemin tamamına uygulandığında sistem içinde devre bölümlenmesi de yapılabilir. Devre bölümlenmesinde çalışma frekansları aynı olan devre bölgeleri aynı modül içine alınır. Bu sayede farklı çalışma frekanslarına sahip bölgeler hem dış elektromanyetik ortamdan hem de birbirlerinden yalıtılmış olur. Ancak her ne kadar hem dış elektromanyetik ortamdan hem de birbirlerinden yalıtılmış olsalar da mikrodalga devrelerde çalışma frekansı yüksek olduğundan mahfaza içindeki bağlantı kabloları ve düzlemsel iletim hatları birer anten gibi davranarak hem devre elemanlarını hem de devrenin etrafındaki çevre elemanları istenmeyen elektromanyetik girişimlere maruz bırakırlar. Bu girişimlerin bastırılması için literatürde yaygın olarak kullanılan iki yöntem vardır. Bunlardan ilki Şekil 1.6'da gösterildiği gibi köpük esaslı EM soğurucuların mikrodalga modüllerin üstlerine yerleştirilmesi ile sağlanmaktadır. Ancak köpük esaslı EM soğurucuların hem mekanik dayanımlarının ve kullanım ömürlerinin az hem de üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı bu yöntem popülaritesini yitirmeye başlamıştır. Birinci yönteme alternatif olarak günümüzde boşluk dalga kılavuzu teknolojisinin bir uzantısı olan PMC yüzeyli metal mahfaza tasarımları önerilmiştir [28]-[31].

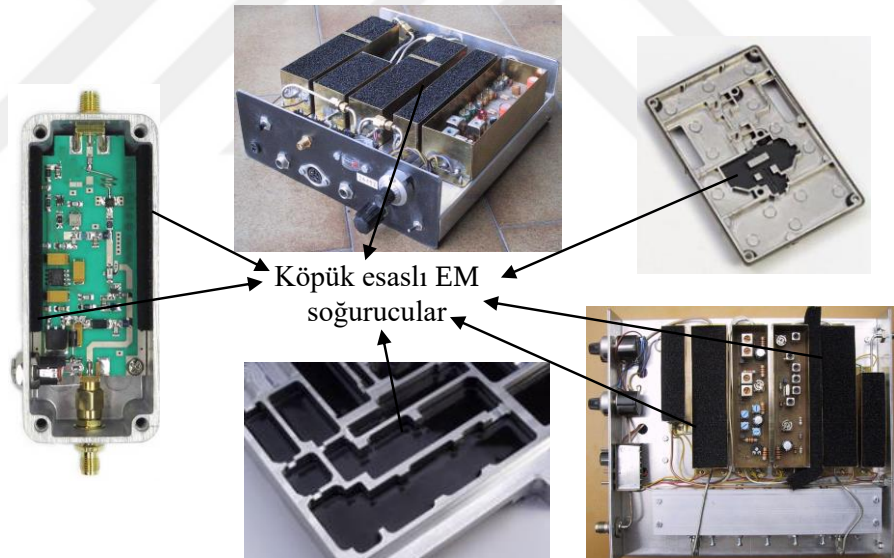


(a)

Şekil 1.5. Ekranlama uygulamaları (a) devrenin belirli bir bölgesine ve (b) devrenin tamamına uygulanan [32]-[36].



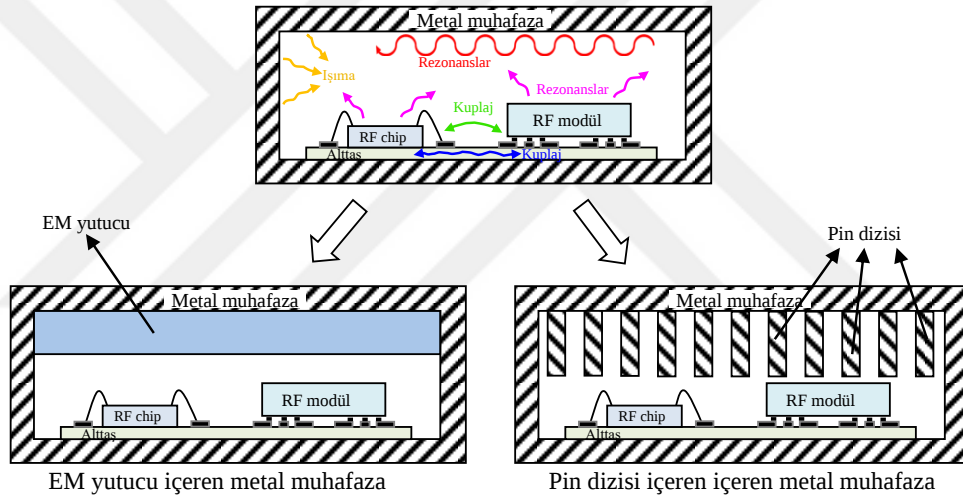
Şekil 1.5. (Devamı) Ekranlama uygulamaları (a) devrenin belirli bir bölgesine ve (b) devrenin tamamına uygulanan [32]-[36].



Şekil 1.6. Köpük esaslı EM soğurucuların mikrodalga modüllere uygulanması [37]-[39]

BÖLÜM 2. DALGA KILAVUZLARI

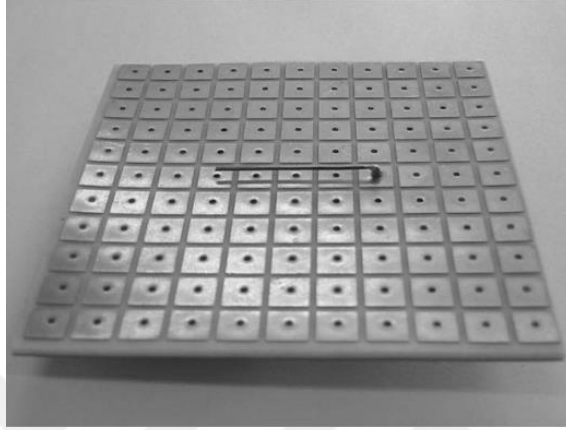
Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi mikrodalga modüllerinde bulunan aktif ve pasif devre elemanları arasındaki bağlantı hatları devre elemanları arasında havadan veya dielektrik alttaşı üzerinden istenmeyen kuplajların oluşmasına neden olurlar. Bu kuplajlar hem modüller içinde istenmeyen paralel plaka modlarının oluşmasına hem de devre elemanları arasında girişim sorunlarına neden olurlar [40]-[42].



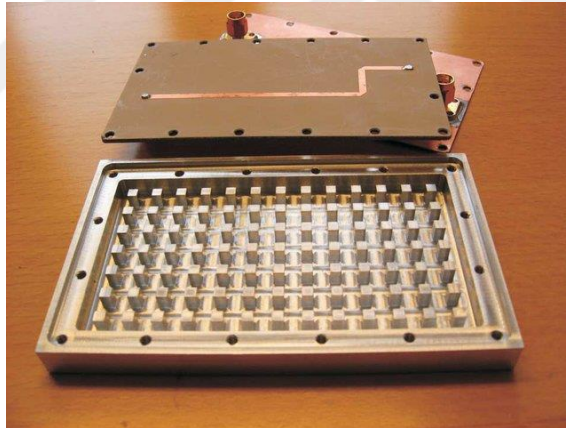
Şekil 2.1. Metal mahfazalar içinde oluşan kuplajlar ve çözüm yöntemleri

Mikrodalga modülleri içinde devre elemanları arasında oluşacak kuplajların bastırılması için günümüzde PMC yüzeyli metal mahfaza tasarımları önerilmiştir. PMC yüzeyli metal mahfaza tasarımları Per-Simon Kildal tarafından geliştirilen ve tasarlanan boşluk dalga kılavuzu teknolojisine dayanmaktadır. Boşluk dalga kılavuzu teknolojisi belirli bir bant genişliği içindeki tüm paralel plaka modlarının kesilmesini zorlayan yüksek empedanslı bir yüzey oluşturularak elde edilmektedir [43]-[45]. İdeal olarak, yüksek empedans yüzeyi, doğada bulunmayan mükemmel bir manyetik iletkenidir (Perfect Magnetic Conductor, PMC). Yüksek empedans yüzeyi

yüksek frekanslı uygulamalar için kare veya dairesel kesitli metal pinlerin periyodik olarak dizilimleri ile elde edilirken düşük frekanslı uygulamalarda mantar tipi elektromanyetik bant çukurlarının (EBG) kullanılmaları ile elde edilmektedir. Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'te sırası ile yüksek ve düşük frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları verilmiştir [46]-[51].

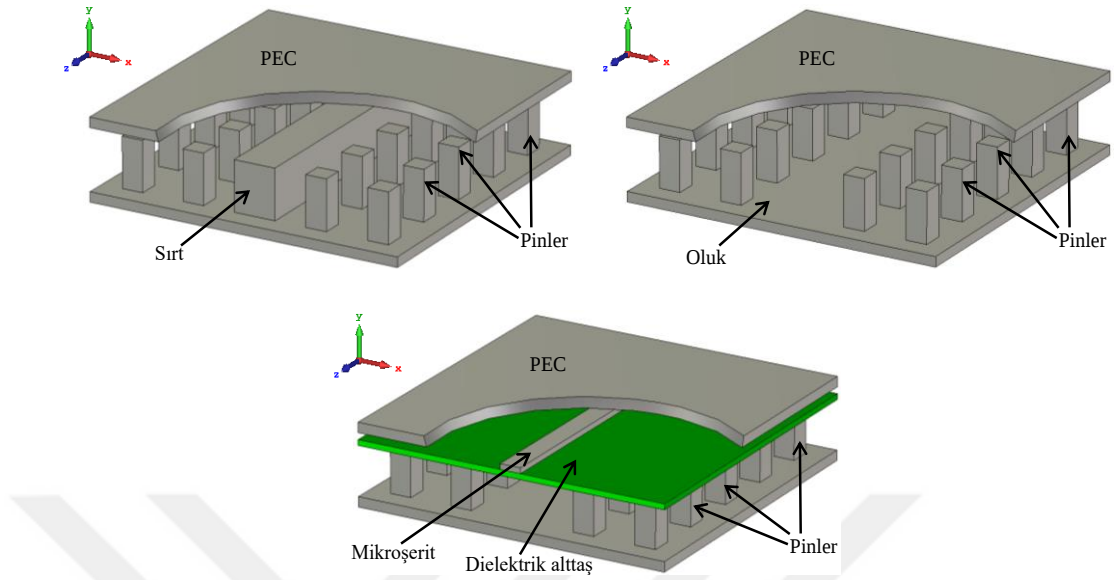


Şekil 2.2. Düşük frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları [52].



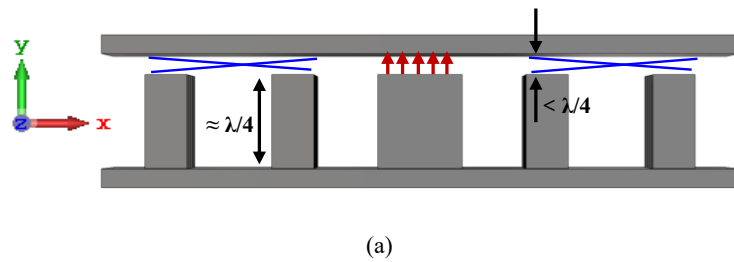
Şekil 2.3. Yüksek frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları [40].

Boşluk dalga kılavuzu tekniği için literatürde PMC yüzeyin kullanım biçimine göre sırt boşluk dalga kılavuzu, oluk boşluk dalga kılavuzu ve mikroşerit boşluk dalga kılavuzu olmak üzere üç farklı uygulama mevcuttur. Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi her üç yapıda da metal pinler PMC yüzey olarak kullanılırken metal plakalar mükemmel elektrik iletken (Perfect Electric Conductor, PEC) olarak kullanılmaktadırlar.

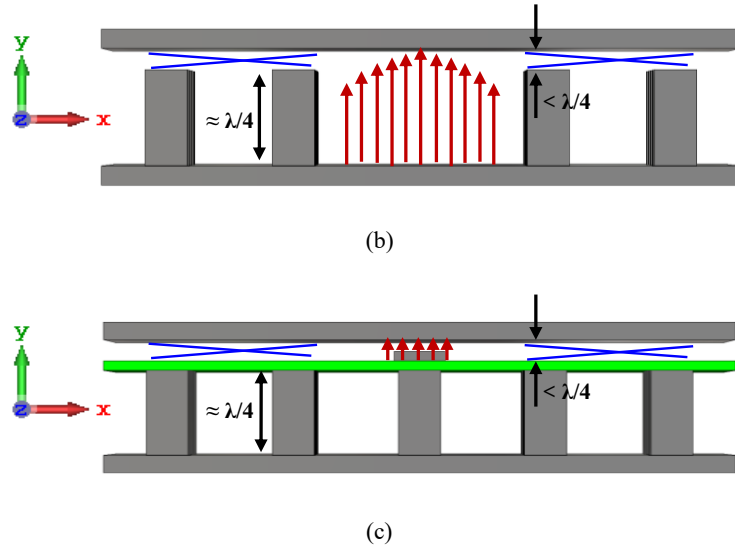


Şekil 2.4. Yüksek frekanslı PMC yüzeyli boşluk dalga kılavuz yapıları [41].

Şekil 2.5.'te gösterildiği gibi boşluk dalga kılavuzu yapılarının tasarımlarında TE ve TM modların bastırılması için PMC yüzey ile üst metal plaka arasındaki mesafenin sırası ile yarım ($\lambda/2$) ve çeyrek ($\lambda/4$) dalga boyundan daha düşük olması gerekmektedir. Ayrıca, çalışma frekans aralığının merkez frekans değeri göz önüne alındığında metal pinlerin uzunluklarının $\lambda/4$ 'ye eşit olması gerekmektedir. Bu durumda PMC yüzey yüksek empedans özelliği göstererek dalga kılavuzu içindeki tüm paralel plaka modlarının durdurma bandı boyunca yayılımlarını engellemiş olur [41], [45].



Şekil 2.5. (a) sırt boşluk, (b) oluk boşluk ve (c) mikroşerit boşluk dalga kılavuzlarında durdurma bantları [41].

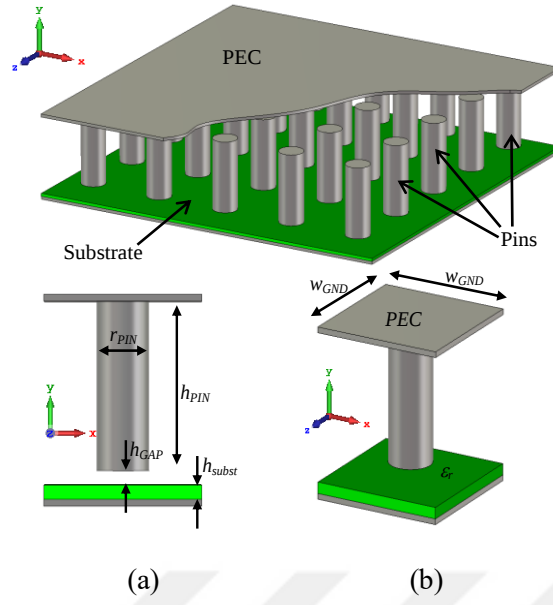


Şekil 2.5.(Devamı) (a) sırt boşluk, (b) oluk boşluk ve (c) mikroşerit boşluk dalga kılavuzlarında durdurma bantları [41].

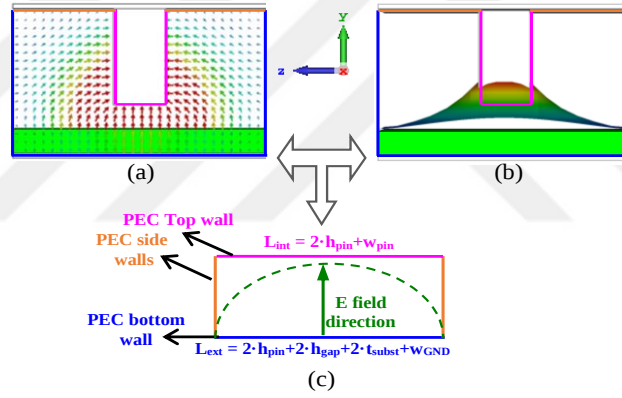
Günümüzde boşluk dalga kılavuzu konseptinden yola çıkarak yüksek empedans özelliğine sahip PMC yüzeyler mikrodalga modüllerin ekranlamasında kullanılmaya başlanmıştır. Bu durumda devre kartının topraklaması ideal olarak PEC özelliği gösterirken periyodik pin yapıları belirli bir durdurma bandında PMC yüzey özelliği göstermektedir. Böylece, tüm istenmeyen paralel plaka modlarının belirli bir frekans aralığında bastırıldığı metal mahfazalar elde edilmiştir.

BÖLÜM 3. TASARIM VE SİMULASYONLAR

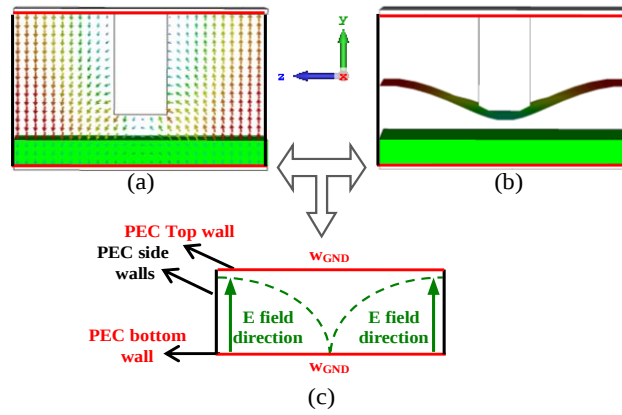
Tez çalışması kapsamında ilk olarak metal muhafazalar için çalışma frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiği gösteren dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli kapak tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.1.'den görüldüğü gibi önerilen model dairesel kesitli pinlerin çapı, uzunluğu ve periyodu sırası ile d_{pin} , h_{pin} , $WGND$, pinler ile dielektrik alttaş arasındaki mesafe h_{gap} ve dielektrik alttaşın kalınlığı t_{subst} olmak üzere beş farklı tasarım parametresine sahiptir. Literatürdeki ilk çalışmalar incelendiğinde PMC yüzeyli metal muhafazaların tasarım parametre değerlerinin istenilen çalışma frekans aralığı için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak bulunduğu görülmüştür [41],[45],[53]. Tasarım parametrelerinin optimizasyonuna ilk olarak çalışma bandının merkez frekansı f_0 'ın belirlenmesi ile başlanılmaktadır. Daha sonra pinli kapaktaki iletken pinlerin boyunun $\lambda_0/4$ 'e eşit ve pinler ile dielektrik alttaş arasındaki hava boşluğunun maksimum yüksekliğinin ise $\lambda_0/4$ olacak şekilde seçilmesi ile giriş parametreleri belirlenmiş olup diğer tasarım parametre değerlerinin çözümüne geçilmektedir. Bilindiği gibi optimizasyon yöntemlerinin performansları seçilecek algoritmalara göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bundan dolayı literatürdeki son çalışmalar optimizasyon yöntemlerinin kullanımlarını daha az gerektirecek analitik bağıntılara dayalı tasarım yöntemlerini önermektedir [54]-[55]. Önerilen analitik bağıntılar (Eşitlik 3.1.-Eşitlik 3.2.) kare kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazaların tasarım parametre değerlerine bağlı olarak çalışma frekans aralığının alt ve üst sınırlarının (f_{low} ve f_{high}) hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Analitik bağıntıların temeli Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'de gösterildiği gibi kare kesitli pinlerin etrafında oluşan elektrik alan dağılımına dayanmaktadır. Şekil 3.2. ve Şekil 3.3. incelendiğinde çalışma frekans aralığının alt ve üst sınırlarında oluşan alan dağılımlarının dikdörtgen dalga kılavuzu içindeki alan dağılımlarına benzediği görülmektedir.



Şekil 3.1. 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal mahfaza (a) ve (b) tasarım parametreleri.



Şekil 3.2. f_{low} frekans değerinde oluşan elektrik alan dağılımı (a) pinler arasındaki vektörel dağılım, (b) pinler arasındaki 3D dağılım ve (c) eşdeğer kavite modeli [54]-[55].



Şekil 3.3. f_{high} frekans değerinde oluşan elektrik alan dağılımı (a) pinler arasındaki vektörel dağılım, (b) pinler arasındaki 3D dağılım ve (c) eşdeğer kavite modeli [54]-[55].

$$f_{L_{int}} = \frac{c_0}{2 \cdot L_{int}} \quad (3.1.a.)$$

$$f_{L_{ext}} = \frac{c_0}{2 \cdot L_{ext}} \quad (3.1.b.)$$

$$L_{int} = 2 \cdot h_{pin} + w_{pin} \quad (3.2.a.)$$

$$L_{ext} = 2 \cdot h_{pin} + 2 \cdot h_{gap} + 2 \cdot t_{subst} + w_{GND} \quad (3.2.b.)$$

$$f_{low} = \frac{f_{L_{int}} + f_{L_{ext}}}{2} \quad (3.3.)$$

$$f_{high} = f_{10} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_{r0}}} \sqrt{\left(\frac{1}{w_{GND}}\right)^2 + \left(\frac{0}{w_{GND}}\right)^2} = \frac{c_0}{2 \cdot w_{GND}} \quad (3.4.)$$

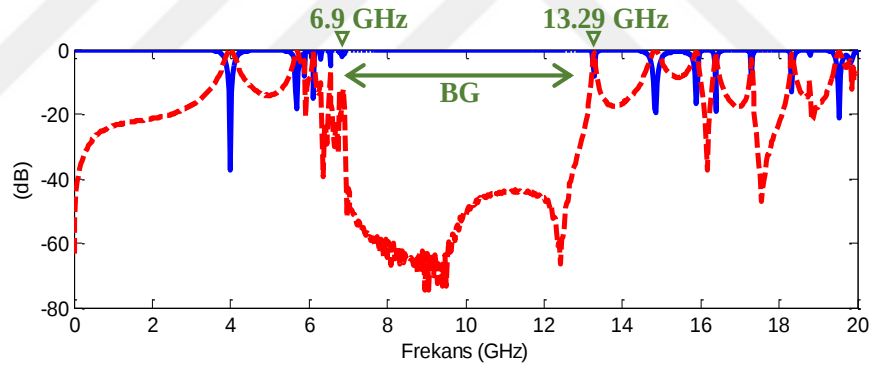
Eşitlik 3.1.- Eşitlik 3.4.'de c_0 ve ϵ_0 sırası ile boş uzayda elektromanyetik dalganın yayılım hızı ve boş uzayın elektriksel geçirgenliğini göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak X bandını kapsayacak şekilde 6-13 GHz frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiğine sahip 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın parametre değerleri elde edilmiş ve Tablo 3.1.'de listelenmiştir.

Tablo 3.1. 6-13 GHz frekans aralığında bat durduran filtre karakteristiği gösteren 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın parametre değerleri.

h_{PIN}	h_{GAP}	h_{Subst}	r_{PIN}	W_{GND}	Frekans bandı
9.5 mm	1 mm	0.5 mm	1.2 mm	6	6.09-13.04 GHz

Analitik bağıntıların doğruluğunu göstermek için Tablo 3.1.'de listelenen parametre değerlerine sahip PMC yüzeyli metal muhafazanın Computer Simulation Technology (CST) ticari paket programı kullanılarak benzetim modeli oluşturulmuştur [56]. Benzetimlerde tasarımları yapılan PMC'ler 50 Ω 'luk ayırık portlar ile Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi 2x2 ve 4x4'üncü pinlerden uyarılmıştır. Ayırık portlar PEC yüzeyden kare kesitli pinin alt yüzeyine doğru konumlandırılmıştır. Nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim ve yansıma parametre değerleri Şekil 3.4.'te karşılaştırılmıştır.



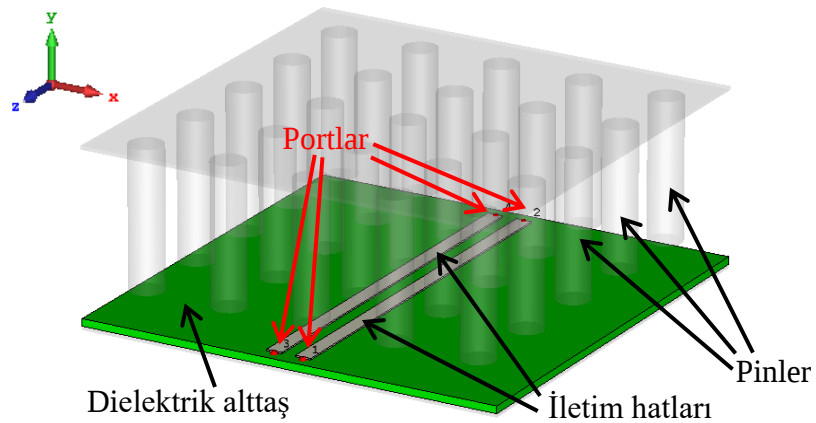
Şekil 3.4. 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı yansıma ve iletim parametre değerleri.

Şekil 3.4. incelendiğinde metal muhafazanın 6,9-13,29 GHz frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiği sergilediği görülmektedir. Nümerik analizler sonucu elde edilen çalışma bandının sınır değerleri analitik eşitliklerden elde edilen değerler ile karşılaştırılıp bağlı hatları hesaplanmış ve Tablo 3.2.'de listelenmiştir. Tablo 3.2.'den nümerik analiz sonuçları ile analitik sonuçlar arasında çalışma frekans aralığının alt ve üst sınırları için sırasıyla %11,73 ve %1,88 hata olduğu görülmektedir.

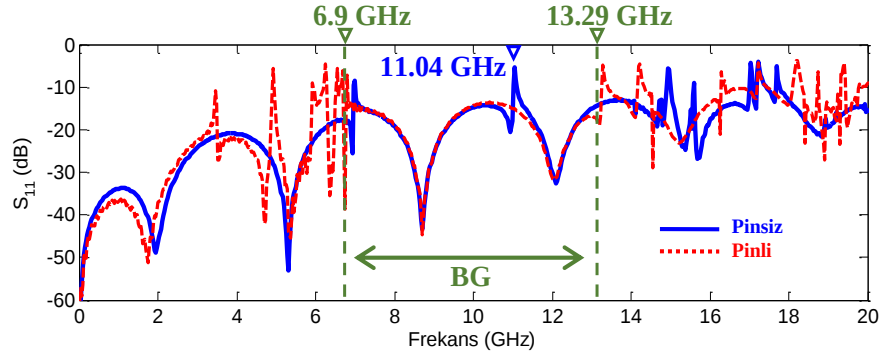
Tablo 3.2. 6-13 GHz frekans aralığında bat durduran filtre karakteristiği gösteren 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın çalışma bandının sınır değerleri için bağıl hata oranları.

Analitik olarak hesaplanan		Nümerik analizlerden hesaplanan		Bağıl Hata (%)	
f_{low} (GHz)	f_{high} (GHz)	f_{low} (GHz)	f_{high} (GHz)	f_{low}	f_{high}
6,09	13,04	6,9	13,29	11,73	1,88

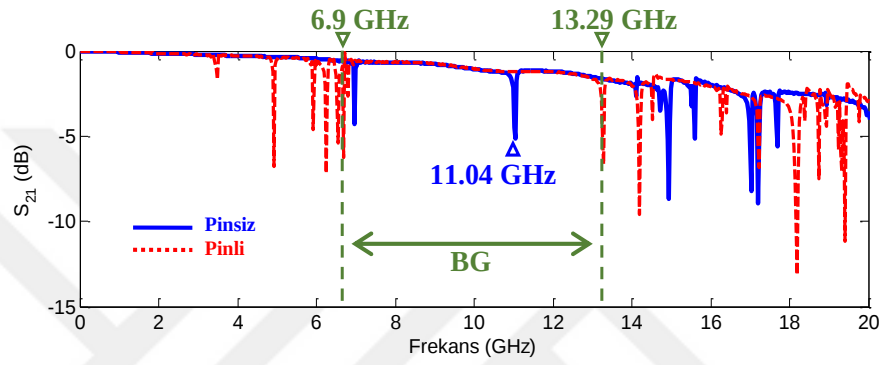
Önerilen modelin filtre karakteristiğinin daha iyi irdelenmesi için çalışmanın devamında genişliği 1,1 mm ve uzunluğu 28 mm olan 50 Ω karakteristik empedansa sahip iki mikroşerit iletim hattı tasarlanmıştır. Tasarımları yapılan mikroşerit hatlar Rogers 4350 dielektrik alttaş üzerine aralarında 1 mm boşluk olacak şekilde konumlandırılmışlardır. Şekil 3.5.'de gösterildiği gibi nümerik analizlerde mikroşerit hatların uçlarında birer adet 50 Ω 'luk ayrık port kullanılmıştır. Portlardan sadece bir tanesi ile model uyarılırken diğer portlar ile iletim (S_{21}), yakın uç kuplaj (S_{31}) ve uzak uç kuplaj (S_{41}) değerleri elde edilmiştir. Dairesel kesitli pin dizilerinin metal muhafazanın elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için muhafazanın içindeki pin dizileri kaldırılarak nümerik analizler tekrarlanmıştır. Pin dizisi içeren ve içermeyen metal muhafazalar için elde edilen S_{11} , S_{21} , S_{31} ve S_{41} parametre değerleri sırası ile Şekil 3.6.a., Şekil 3.6.b., Şekil 3.6.c. ve Şekil 3.6.d.'de karşılaştırılmıştır.



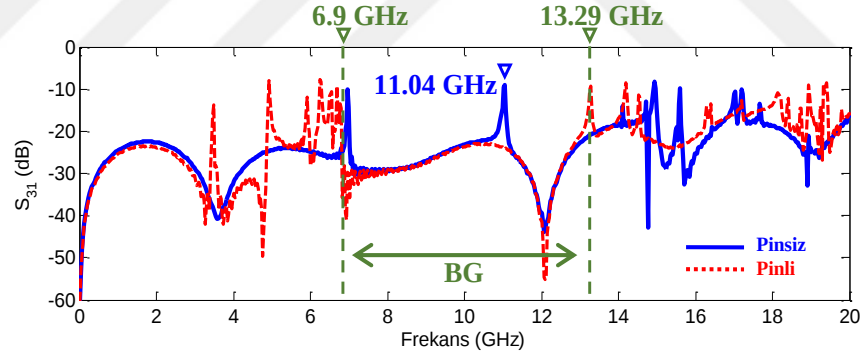
Şekil 3.5. İletim hattı içeren PMC yüzeyli metal muhafaza.



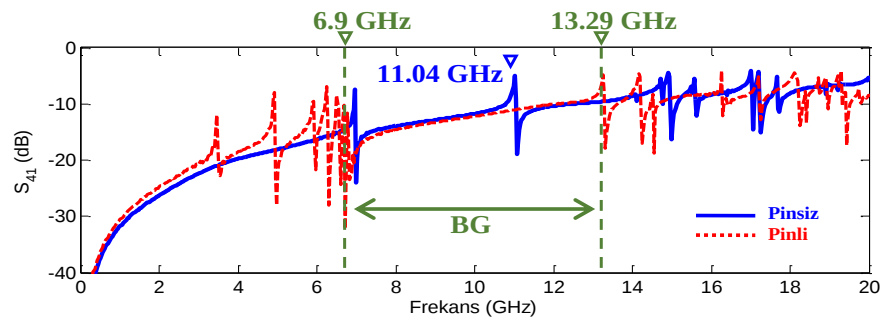
(a)



(b)



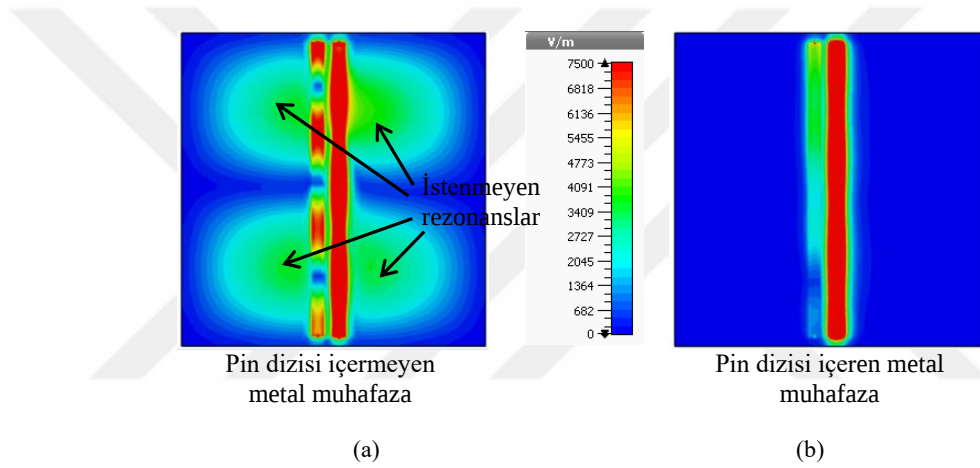
(c)



(d)

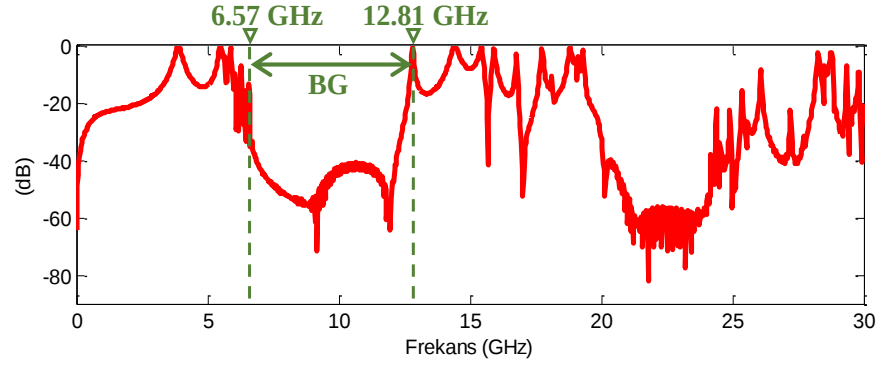
Şekil 3.6. İletim hattı içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın (a) yansıma S_{11} , (b) iletim S_{21} , (c) yakın uç kuplaj S_{31} ve (d) uzak uç kuplaj S_{41} değerleri.

Şekil 3.6. incelendiğinde pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın 6,9-13,29 GHz çalışma frekans aralığında istenmeyen rezonansları bastırdığı görülürken pin dizisi içermeyen metal muhafazanın içinde 11,04 GHz frekansında rezonans oluştuğu görülmektedir. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımına başlanmadan önce son olarak Şekil 3.7.'de 11,04 GHz rezonans frekansında oluşan 2D elektrik alan dağılımı pin dizisi içeren ve içermeyen metal muhafazalar için karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan açıkça görülebildiği gibi pin dizisi içeren PMC yüzey çalışma frekans aralığında oluşacak istenmeyen elektromanyetik gürültüleri bastırmıştır.

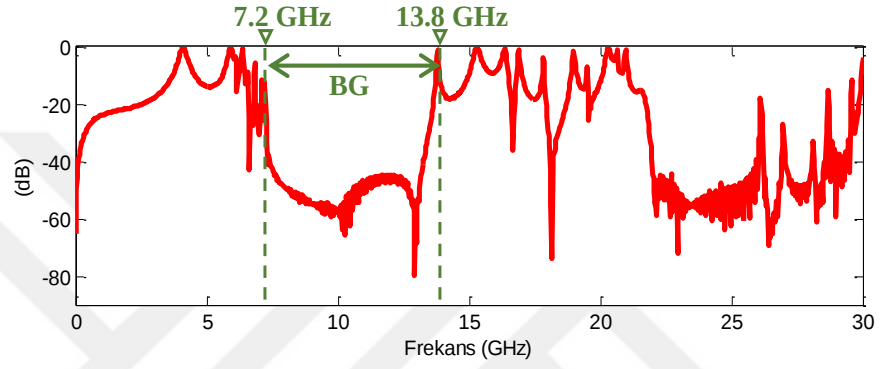


Şekil 3.7. Metal muhafazalar için 11,04 GHz frekans değerinde oluşan 2D elektrik alan dağılımları (a) pin dizisi içermeyen ve (b) pin dizisi içeren.

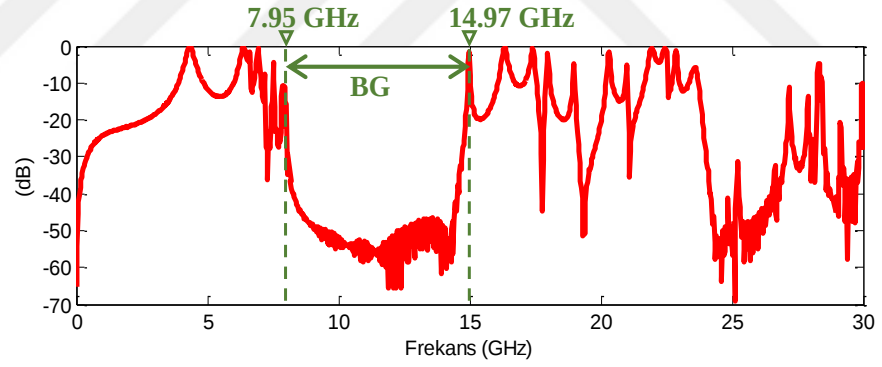
Çalışmanın devamında Eşitlik 3.1. ve Eşitlik 3.4. göz önüne alındığında çalışma bandının sınır değerlerinin pinlerin uzunluğuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Buradan yola çıkarak tez çalışmasında ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı amaçlanmıştır. Bu kapsamda Tablo 3.1.'de verilen pinler ile dielektrik alttaş arasındaki mesafe, dielektrik alttaşın kalınlığı, kare kesitli pinlerin genişliği ve periyodu sabit tutulurken pinlerin uzunluğu 3 mm ile 9 mm arasında değiştirilmiştir. Farklı pin uzunlukları için nümerik analizler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.8.'de karşılaştırılmıştır.



(a)

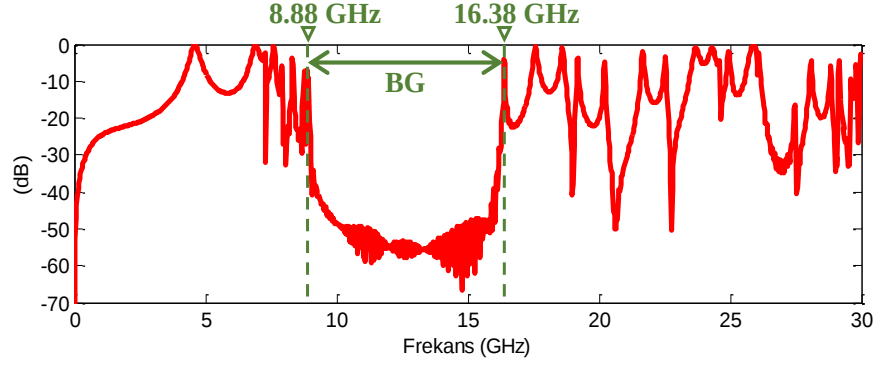


(b)

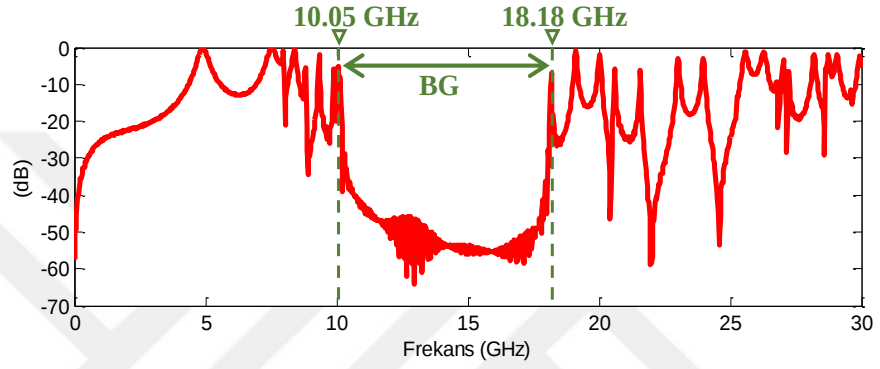


(c)

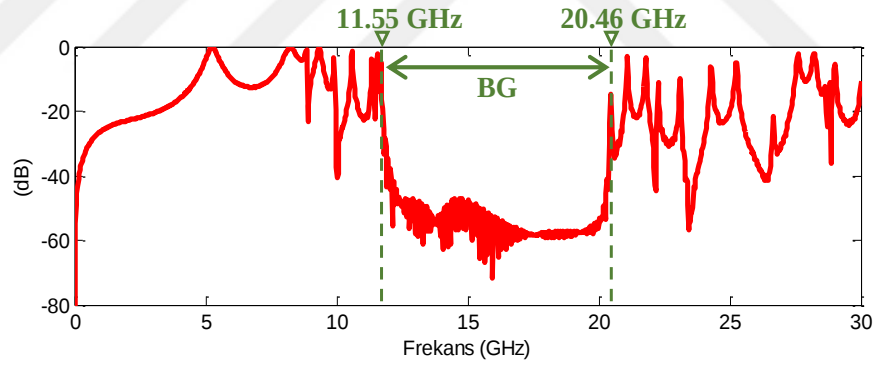
Şekil 3.8. Farklı pin uzunlukları için PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri
 (a) $h_{pin} = 10$ mm, (b) $h_{pin} = 9$ mm, (c) $h_{pin} = 8$ mm, (d) $h_{pin} = 7$ mm, (e) $h_{pin} = 6$ mm, (f) $h_{pin} = 5$ mm, (g) $h_{pin} = 4$ mm ve (h) $h_{pin} = 3$ mm.



(d)

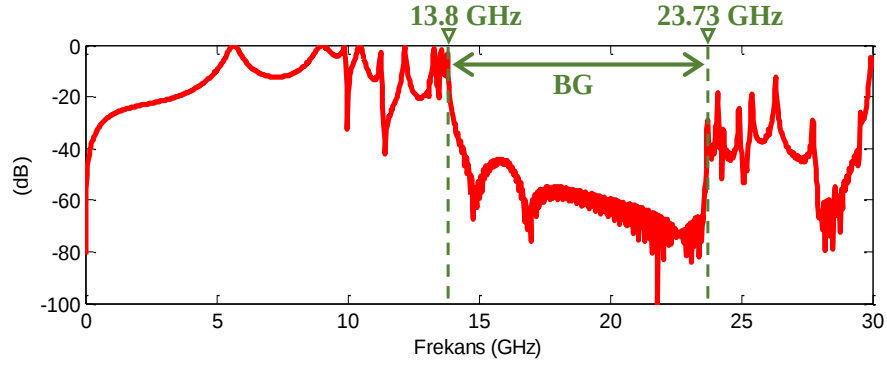


(e)

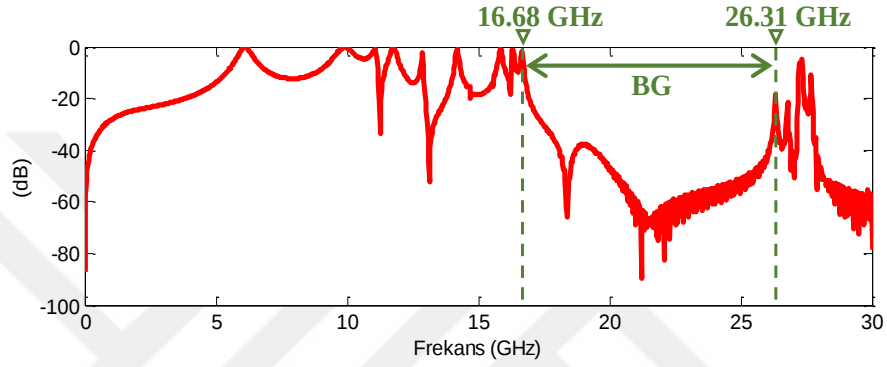


(f)

Şekil 3.8.(Devamı) Farklı pin uzunlukları için PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri (a) $h_{pin} = 10$ mm, (b) $h_{pin} = 9$ mm, (c) $h_{pin} = 8$ mm, (d) $h_{pin} = 7$ mm, (e) $h_{pin} = 6$ mm, (f) $h_{pin} = 5$ mm, (g) $h_{pin} = 4$ mm ve (h) $h_{pin} = 3$ mm.



(g)



(h)

Şekil 3.8.(Devamı) Farklı pin uzunlukları için PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri (a) $h_{pin} = 10$ mm, (b) $h_{pin} = 9$ mm, (c) $h_{pin} = 8$ mm, (d) $h_{pin} = 7$ mm, (e) $h_{pin} = 6$ mm, (f) $h_{pin} = 5$ mm, (g) $h_{pin} = 4$ mm ve (h) $h_{pin} = 3$ mm.

Şekil 3.8.'den, beklendiği gibi dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın çalışma bant aralığının pin boylarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Çalışma frekans aralığı pin boylarının kısalması ile yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Dalga boyu λ ile frekansın ters orantılı olarak değiştiği düşünüldüğünde nümerik sonuçlar teorik sonuçları desteklemektedir.

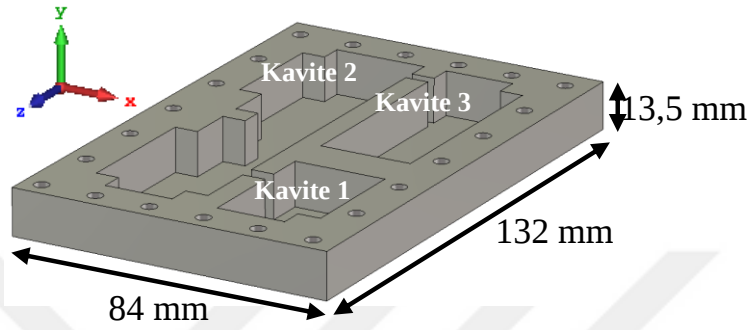
Çalışmanın devamında farklı pin uzunlukları için elde edilen çalışma frekansının sınır değerleri analitik eşitliklerden elde edilen değerler ile karşılaştırılıp bağlı hatları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.3.'te listelenmiştir. Tablo 3.3. incelendiğinde nümerik analiz sonuçları ile analitik sonuçlar arasında maksimum % 22,18 bağlı hata olduğu görülmektedir.

Tablo 3.3. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın farklı çalışma bant sınır değerleri için bağıl hata oranları.

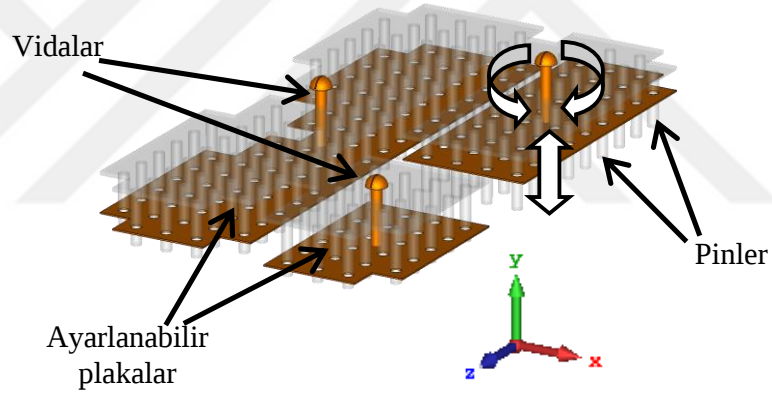
h_{pin}	Analitik olarak hesaplanan		Nümerik analizlerden hesaplanan		Bağıl Hata (%)	
	f_{low} (GHz)	f_{high} (GHz)	f_{low} (GHz)	f_{high} (GHz)	f_{low}	f_{high}
3 mm	13,61	25,00	16,68	26,31	14,93	4,97
4 mm	11,37	25,00	13,8	23,73	17,60	5,35
5 mm	9,79	25,00	11,55	20,46	15,23	22,18
6 mm	8,61	18,75	10,05	18,18	14,32	3,13
7 mm	7,69	16,66	8,88	16,38	13,40	1,70
8 mm	6,96	15,00	7,95	14,97	12,45	0,20
9 mm	6,35	13,63	7,2	13,8	11,80	1,23
10 mm	5,84	12,50	6,57	12,81	11,11	2,42

Tez çalışmasının devamında ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı farklı çalışma frekanslarına sahip kaviterler içeren mikrodalga modüle uygulanmıştır. Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi 132x84x13.5 mm fiziksel boyutlara sahip mikrodalga modül merkez çalışma frekansları 11 GHz, 16 GHz ve 21 GHz olan üç farklı kaviteden oluşmaktadır. Her bir kavitenin kendi çalışma frekansında oluşturacağı istenmeyen rezonansların bastırılması için bant durduran filtre karakteristiğine sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli kapak tasarımları yapılmıştır. Tasarımlarda istenilen çalışma frekans aralıklarının daha önce uygulandığı gibi sadece pin boylarının değiştirilmesi ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Şekil 3.10.'da gösterildiği gibi hareketli plakalar pinler üzerine konumlandırılmış ve yukarı aşağı yönde hareket ettirilerek pin boylarının değişmesi hedeflenmiştir. Plakaların yukarı aşağı yöndeki hareketleri üzerlerinde bulunan ayar vidaları ile sağlanmıştır. Hareketli plakaların pinler üzerindeki konumlarının belirlenmesi için birinci, ikinci ve üçüncü kaviterlerin çalışma bant aralıklarının alt ve üst sınırlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla 11 GHz, 16 GHz ve 21 GHz merkez çalışma

frekans değerlerine sahip kavitelerin çalışma frekans aralıkları sırası ile 6,96-15,00 GHz, 19,79-25 GHz ve 13,61-25 GHz olarak belirlenmiştir. Çalışmanın devamında Eşitlik 1-Eşitlik 4 kullanılarak ilgili bant aralıkları için pin uzunlukları hesaplanmış ve Tablo 3.4.'te listelenmiştir.



Şekil 3.9. Üç kavite içeren metal muhafaza tasarımı.

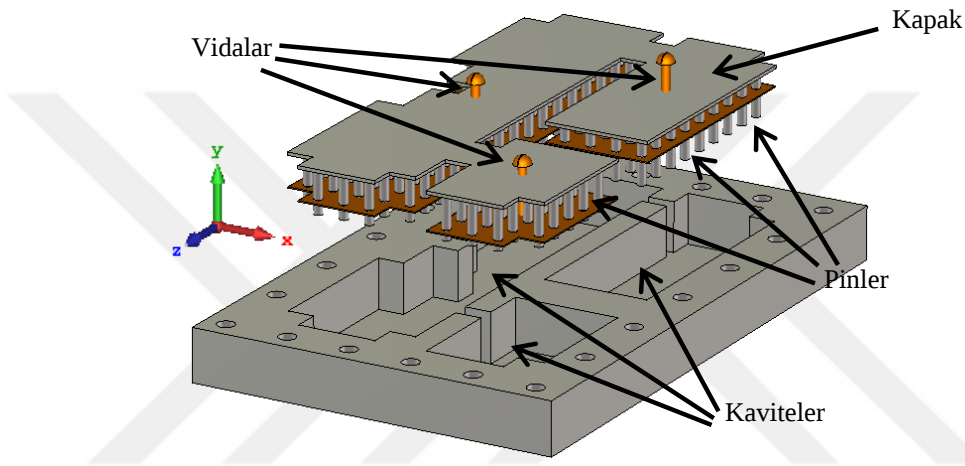


Şekil 3.10. Pinler üzerine konumlandırılan hareketli plaka tasarımı.

Tablo 3.4. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın farklı çalışma bant sınır değerleri için bağıl hata oranları.

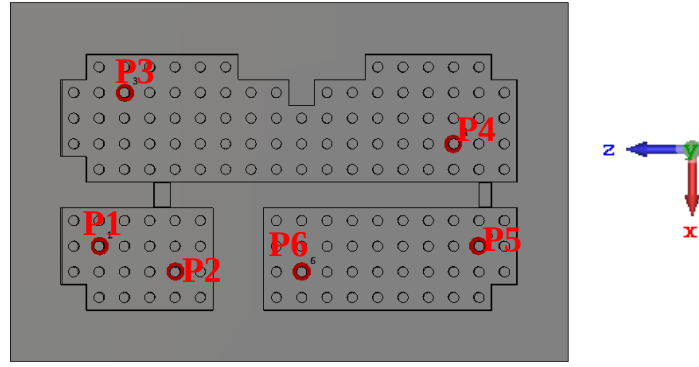
f_{low} (GHz)	f_{high} (GHz)	h_{pin} (mm)
6,96	15,00	8
9,79	25,00	5
13,61	25,00	3

Tablo 3.4.'ten görüldüğü gibi birinci kavite için pinlerin uzunluğu 8 mm, ikinci kavite için pinlerin uzunluğu 5 mm ve üçüncü kavite için pinlerin uzunluğu 3 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen pin uzunluklarının sağlanması için birinci, ikinci ve üçüncü kavitelerde hareketli plakalar metal muhafazanın tabanından sırası ile 10 mm, 7 mm ve 5 mm yüksekliğe konumlandırılmıştır. Tasarımları tamamlanan ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal muhafazanın benzetim modeli Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



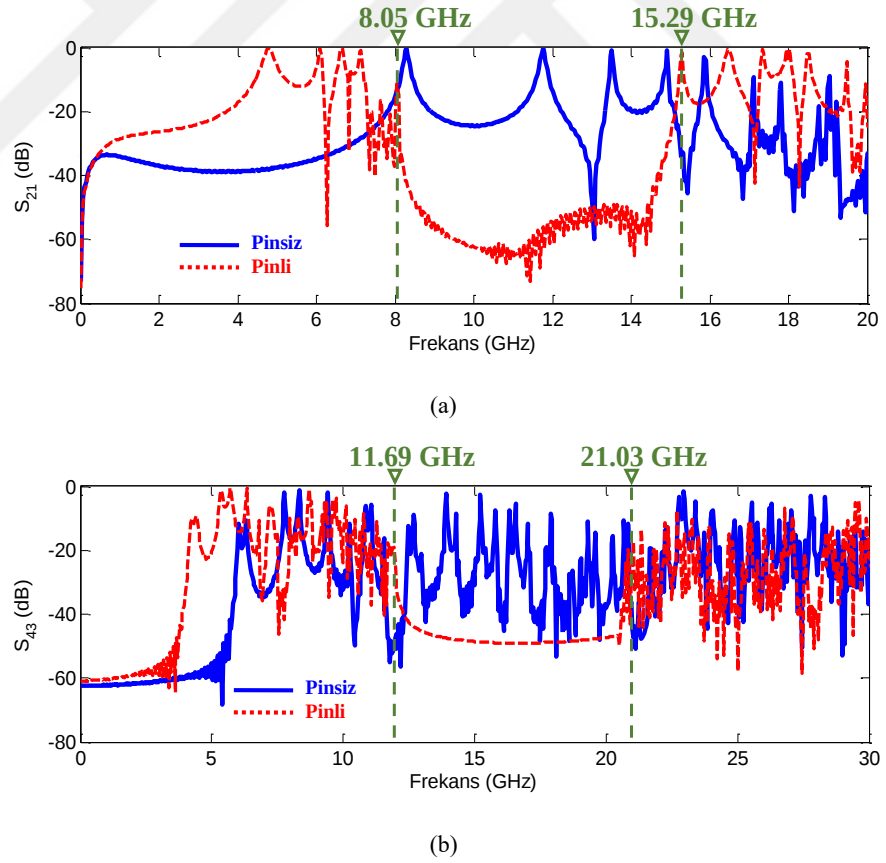
Şekil 3.11. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı.

Önerilen modelin nümerik analizlerinde Şekil 3.12.'de gösterildiği gibi her bir kavite içinde iki adet olmak üzere toplamda altı adet 50 Ω 'luk ayırık port kullanılmıştır. Nümerik analizler sonucu elde edilen PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı S-parametre değerleri ile pin dizisi içermeyen geleneksel metal muhafazanın frekansa bağlı S-parametre değerleri farklı port kombinasyonları göz önüne alınarak Şekil 3.13.'de karşılaştırılmıştır.

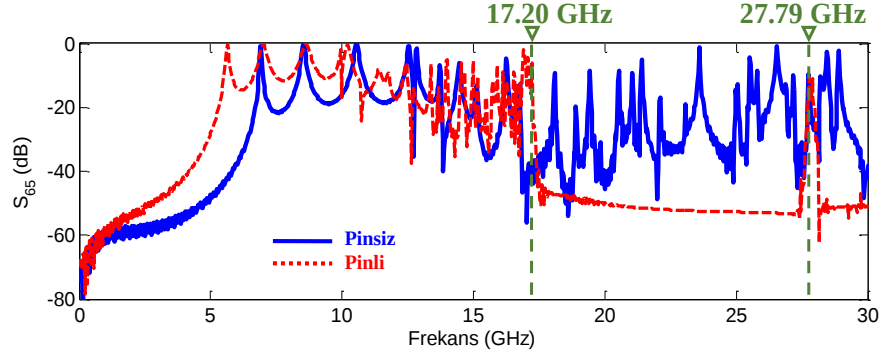


Şekil 3.12. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal muhafaza içine konumlandırılan portlar.

Şekil 3.11.'de verilen karşılaştırmalardan birinci, ikinci ve üçüncü kaviterlerde sırası ile 8,05-15,29 GHz, 11,69-21,03 GHz ve 17,20-27,79 GHz frekans aralıklarında PMC yüzeyli metal muhafaza içinde istenmeyen rezonansların bastırıldığı açık bir şekilde görülmektedir.



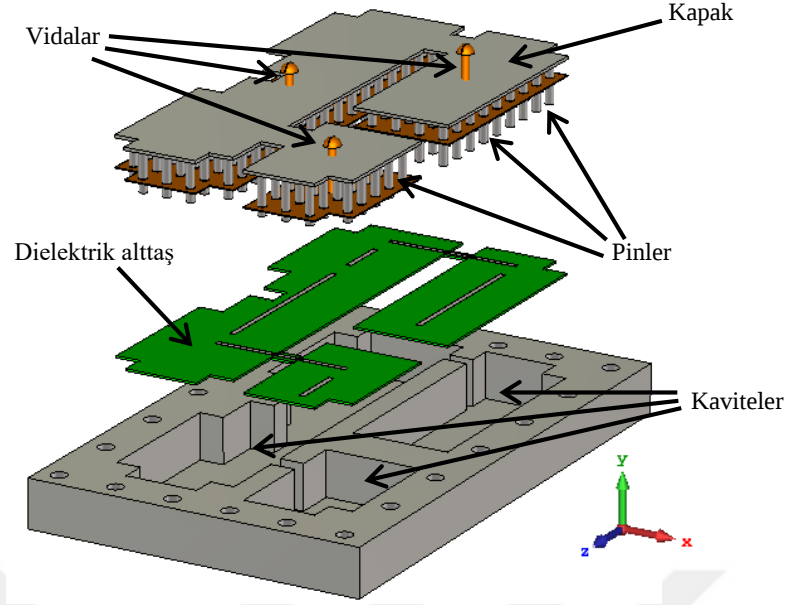
Şekil 3.13. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri (a) S_{21} , (b) S_{43} , (c) S_{65} .



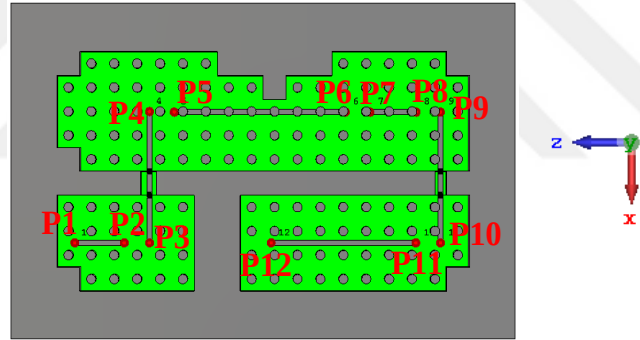
(c)

Şekil 3.13. (Devamı)Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal muhafazanın frekansa bağlı iletim parametre değerleri (a) S_{21} , (b) S_{43} , (c) S_{65} .

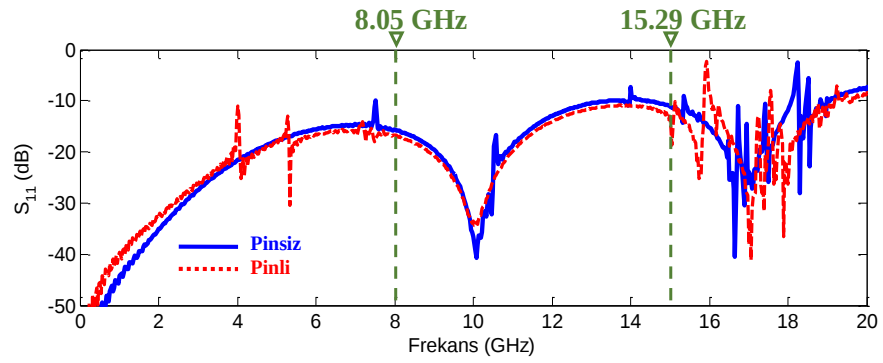
Tez çalışmasının devamında ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı içinde RF devre bulunduran mikrodalga modüle uygulanmıştır. Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.'de gösterildiği gibi RF devre genişliği 1.1 mm olan 50Ω karakteristik empedansa sahip altı adet mikroşerit iletim hattı içermektedir. Tasarımları yapılan mikroşerit hatlatlar Rogers 4350 dielektrik alataş üzerine konumlandırılmışlar ve hatların uçları 50Ω 'luk ayırık portlar ile sonlandırılmıştır. Dairesel kesitli pin dizilerinin metal muhafazanın elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için muhafazanın içindeki pin dizileri kaldırılarak nümerik analizler tekrarlanmıştır. Pin dizisi içeren ve içermeyen metal muhafazalar için elde edilen S_{11} , S_{33} , S_{55} , S_{77} , S_{99} ve $S_{11 \ 11}$ yansıma parametre değerleri ile S_{12} , S_{34} , S_{56} , S_{78} , $S_{9 \ 10}$ ve $S_{11 \ 12}$ iletim parametre değerleri sırası ile Şekil 3.16. ve Şekil 3.17.'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.14. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli mikrodalga modül tasarımı.

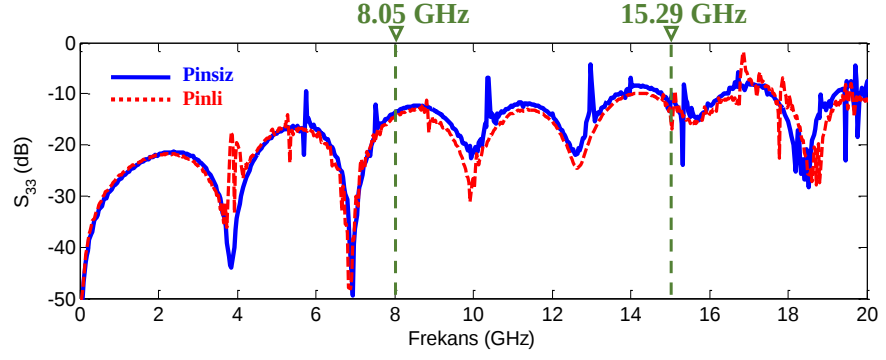


Şekil 3.15. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modül içine konumlandırılan portlar.

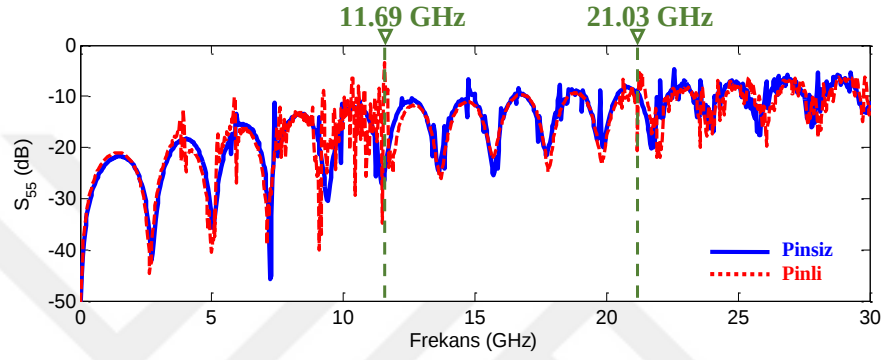


(a)

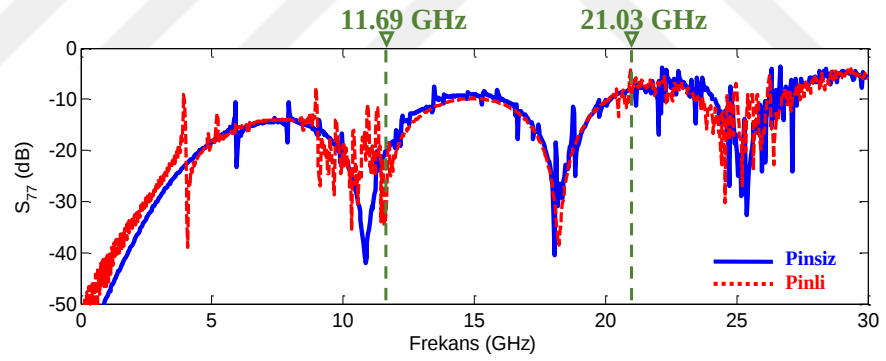
Şekil 3.16. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S_{11} , (b) S_{33} , (c) S_{55} , (d) S_{77} , (e) S_{99} , (f) $S_{11 \ 11}$.



(b)

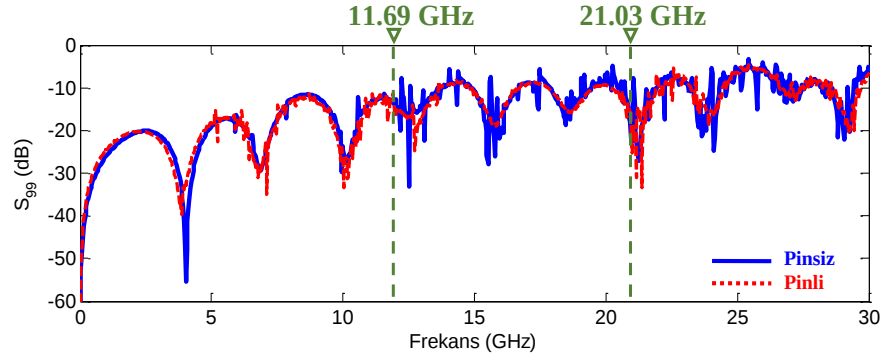


(c)

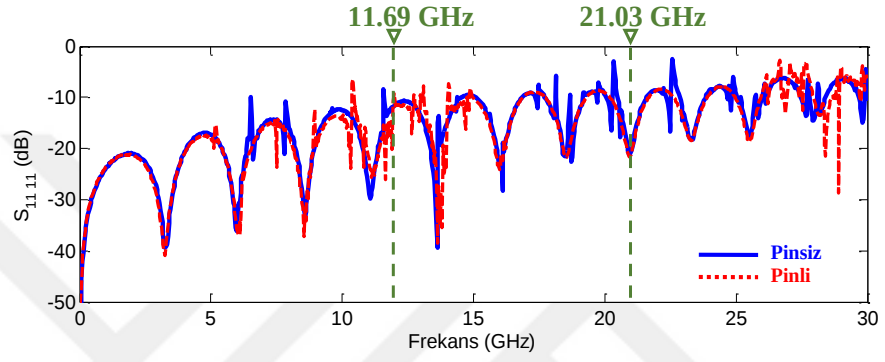


(d)

Şekil 3.16. (Devamı) Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S_{11} , (b) S_{33} , (c) S_{55} , (d) S_{77} , (e) S_{99} , (f) S_{1111} .

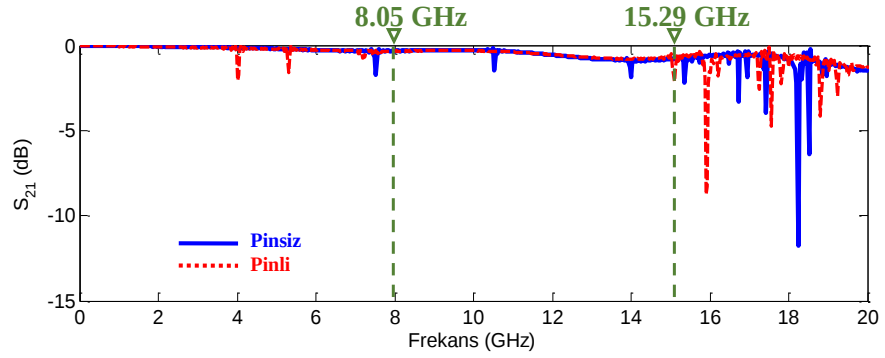


(e)



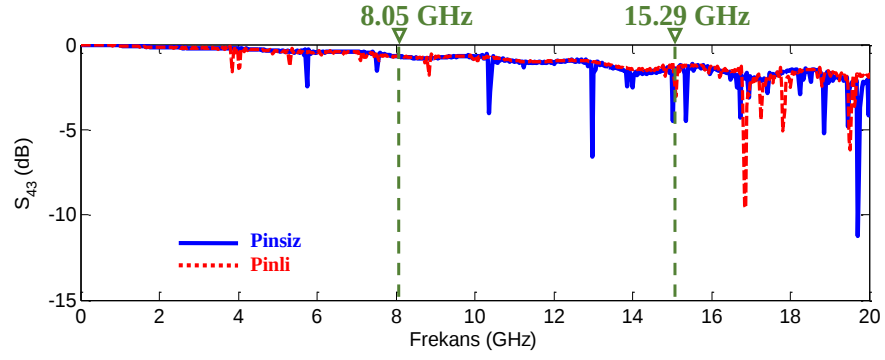
(f)

Şekil 3.16. (Devamı) Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S_{11} , (b) S_{33} , (c) S_{55} , (d) S_{77} , (e) S_{99} , (f) S_{1111} .

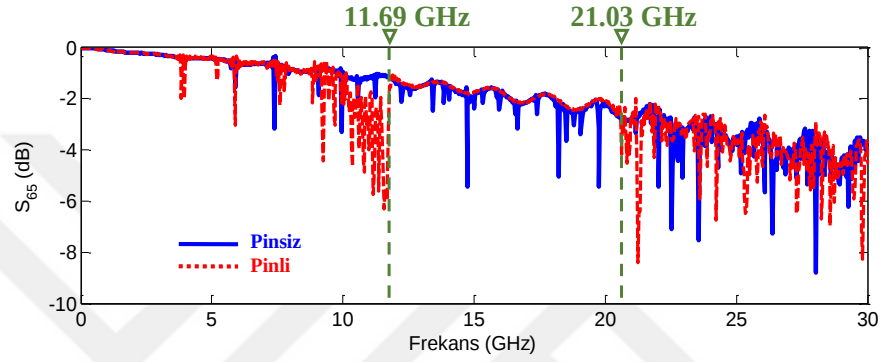


(a)

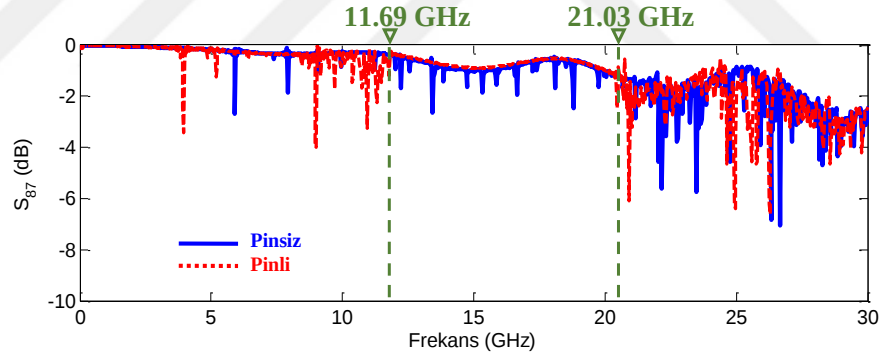
Şekil 3.17. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S_{21} , (b) S_{43} , (c) S_{65} , (d) S_{87} , (e) S_{109} , (f) S_{1211} .



(b)

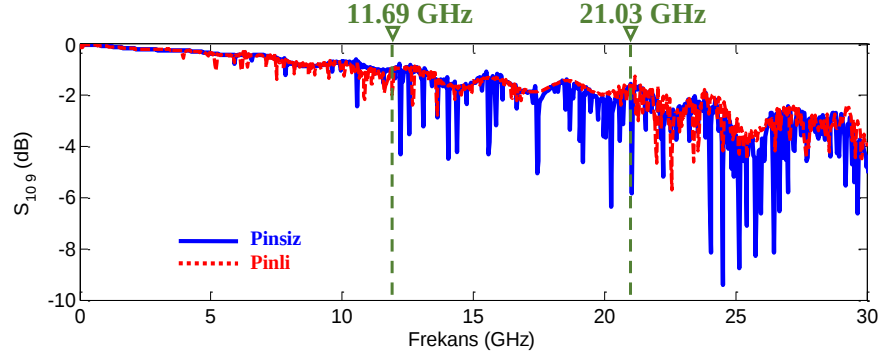


(c)

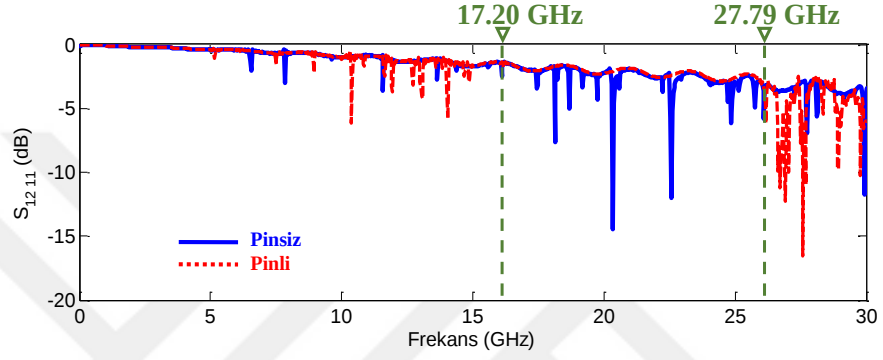


(d)

Şekil 3.17.(Devamı) Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S_{21} , (b) S_{43} , (c) S_{65} , (d) S_{87} , (e) S_{109} , (f) S_{1211}



(e)



(e)

Şekil 3.17.(Devamı) Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli mikrodalga modülün frekansa bağlı yansıma parametre değerleri (a) S_{21} , (b) S_{43} , (c) S_{65} , (d) S_{87} , (e) $S_{10\ 9}$, (f) $S_{12\ 11}$

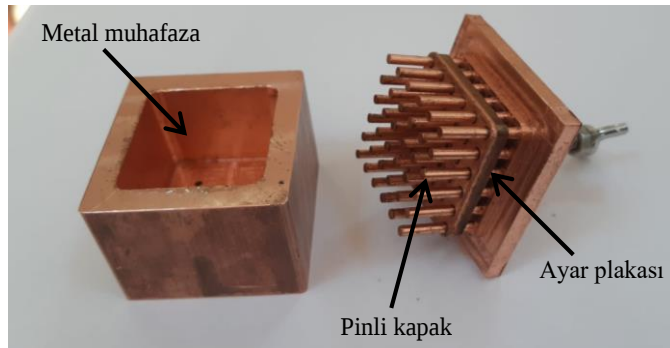
Şekil 3.16. ve Şekil 3.17.'de verilen karşılaştırmalardan içinde RF devre bulunduran mikrodalga modülün pin dizisi içermemesi durumunda birinci, ikinci ve üçüncü kavitelerinde ile 8.05-15.29 GHz, 11.69-21.03 GHz ve 17.20-27.79 GHz frekans aralıklarında rezonanslar oluşurken, dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza içinde bu rezonansların bastırıldığı açıkça görülmektedir.

BÖLÜM 4. PROTOTİP ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL TESTLER

Tez çalışmasının devamında elde edilen nümerik analiz sonuçlarının doğrulanması için dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın prototibinin üretilip elektriksel testlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda Tablo 4.1.'de verilen parametre değerlerine sahip metal mahfaza Bilgisayarlı Nümerik Kontrol (Computer Numerical Control, CNC) teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Bilindiği gibi CNC teknolojisi takım tezgahları kullanılarak sayısal komutlarla yüksek kalitede üretim yapılmasını sağlayan bir yöntemdir. AL 6000 serisi malzemeden prototip üretimi tamamlanan metal muhafaza ile üretim anını gösteren görsel sırasıyla Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Prototip üretimi yapılan 6x6 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal mahfazanın parametre değerleri.

h_{PIN}	h_{GAP}	h_{Subst}	r_{PIN}	W_{GND}	Frekans bandı
3–11 mm	1 mm	0.5 mm	1.2 mm	6	6.09-13.04 GHz

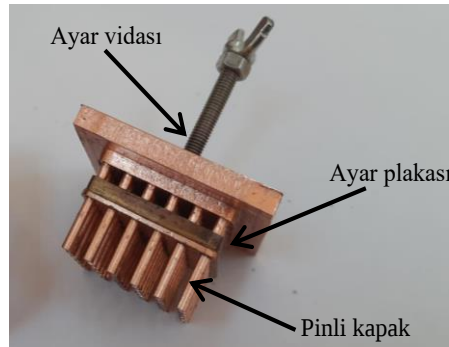


Şekil 4.1. Prototip üretimi tamamlanan ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal mahfaza.



Şekil 4.2. Prototip üretim anını gösteren görsel.

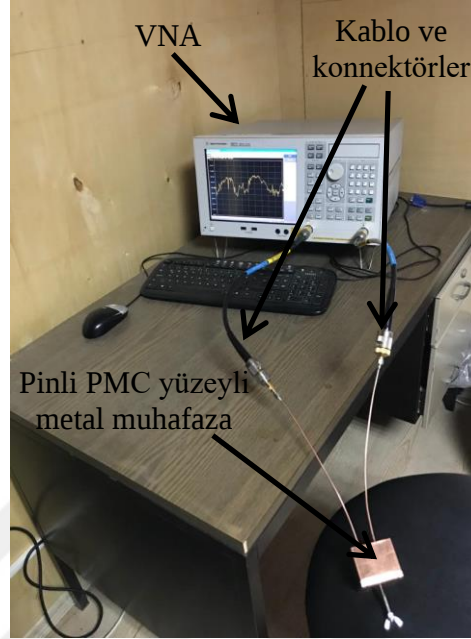
Daha önceden açıklandığı gibi ayarlanabilir çalışma frekans aralığının elde edilmesi için hareketli plaka pinler üzerine konumlandırılmış ve yukarı aşağı yönde hareket ettirilerek pin boylarının değişmesi sağlanmıştır. Şekil 4.3.'de gösterildiği gibi hareketli plaka 2.41 mm çapında dairesel kesitli delikler içermektedir. Dairesel deliklerin pinler ile elektriksel kontağının sağlaması için deliklerin çapları olabildiğince dar açılmıştır. Ayrıca hareketli plakanın üzerine konumlandırılan ayar vidasının çapı 0.5 mm seçilerek her tam dönüşte plakanın yukarı veya aşağı yönde 0.5 mm hareket etmesi sağlanmıştır.



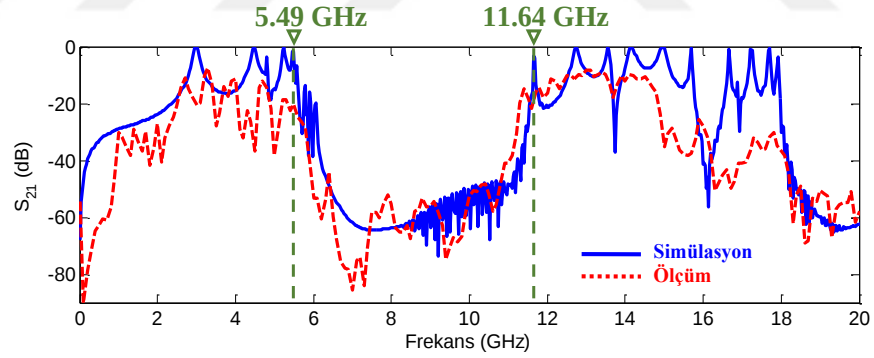
Şekil 4.3. Prototip üretimi tamamlanan PMC yüzeyli metal mahfazanın ayar vidası ve ayar plakası.

Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal mahfazanın prototip üretimi tamamlandıktan sonra Şekil 4.4.'de verilen ölçüm düzeneği kullanılarak frekansa bağlı iletim parametre değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi ölçüm düzeneği 9 kHz-20 GHz çalışma frekans aralığına sahip Agilent E5071c marka Vektör Ağ Analizör (Vector Network Analyser, VNA) ile yüksek ekranlama etkinliğine sahip koaksiyel kablolar ile konnektörlerden oluşmaktadır. Ölçümlere başlamadan önce VNA'nın doğruluğunun

belirlenmesi için SOLT kiti kullanılarak kalibrasyonu yapılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri nümerik analiz sonuçları ile Şekil 4.5.'de karşılaştırılmıştır.

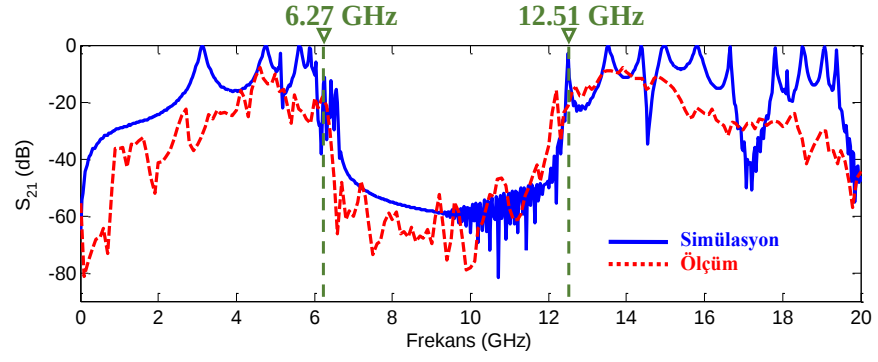


Şekil 4.4. Elektriksel testlerde kullanılan ölçüm düzeneği.

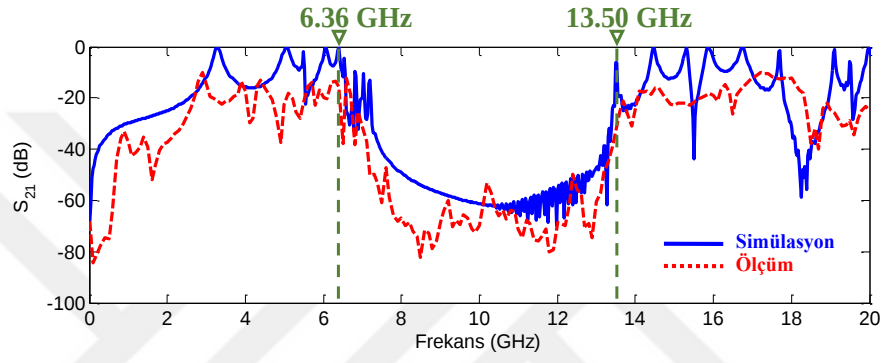


(a)

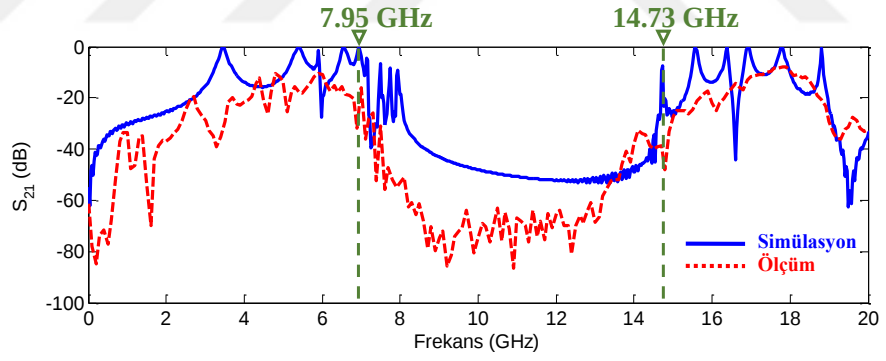
Şekil 4.5. Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal mahfazanın nümerik analiz sonuçları ile elektriksel test sonuçlarının karşılaştırılması (a) $h_{PIN} = 11$ mm, (b) $h_{PIN} = 10$ mm, (c) $h_{PIN} = 9$ mm, (d) $h_{PIN} = 8$ mm ve (e) $h_{PIN} = 7$ mm.



(b)

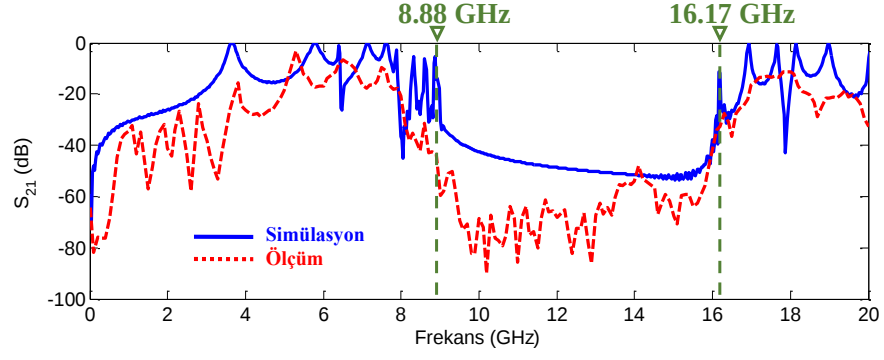


(c)



(d)

Şekil 4.5.(Devamı) Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal mahfazanın nümerik analiz sonuçları ile elektriksel test sonuçlarının karşılaştırılması (a) $h_{PIN} = 11$ mm, (b) $h_{PIN} = 10$ mm, (c) $h_{PIN} = 9$ mm, (d) $h_{PIN} = 8$ mm ve (e) $h_{PIN} = 7$ mm.



(e)

Şekil 4.5.(Devamı) Ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip PMC yüzeyli metal mahfazanın nümerik analiz sonuçları ile elektriksel test sonuçlarının karşılaştırılması (a) $h_{PIN} = 11$ mm, (b) $h_{PIN} = 10$ mm, (c) $h_{PIN} = 9$ mm, (d) $h_{PIN} = 8$ mm ve (e) $h_{PIN} = 7$ mm.

Şekil 4.5.'den 0-20 GHz frekans aralığında farklı pin uzunlukları için elde edilen ölçüm sonuçlarının nümerik analiz sonuçlarını desteklediği görülmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde PMC yüzeyli yapıların çalışma bandının sınır değerlerinin pinlerin uzunluğuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Buradan yola çıkarak tez çalışmasında ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı önerilmiştir. Önerilen modelde pinler üzerine konumlandırılmış ve yukarı aşağı yönde hareket ettirilerek pin boylarının değişmesine olanak sağlayan hareketli plakalar kullanılmıştır.

Tez çalışmasında ilk olarak X bandını kapsayacak şekilde 6-13 GHz frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiğine sahip 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı yapılmıştır. Tasarımlarda parametre değerleri analitik bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen parametre değerlerine sahip metal muhafazanın benzetim modeli oluşturularak nümerik analizleri yapılmıştır. Nümerik analizler sonucu elde edilen çalışma bandının sınır değerleri analitik eşitliklerden elde edilen değerler ile karşılaştırılıp bağıl hatları hesaplanmış ve çalışma frekans aralığının alt ve üst sınırları için sırasıyla %11,73 ve %1,88 hata olduğu görülmüştür. Tez çalışmasının devamında iki mikroşerit iletim hattı tasarlanarak pin dizisi içeren ve içermeyen metal muhafazanın içine konumlandırılmış ve yansıma (S_{11}), iletim (S_{21}), yakın uç kuplaj (S_{31}) ve uzak uç kuplaj (S_{41}) değerleri 0-20 GHz frekans aralığında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın 6,9-13,29 GHz çalışma frekans aralığında istenmeyen rezonansları bastırdığı görülürken pin dizisi içermeyen metal muhafazanın içinde 11,04 GHz frekansında rezonans oluştuğu görülmüştür. Daha sonra ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımlarına başlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak 5x5 dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafazanın pinler ile dielektrik alttaş arasındaki mesafe, dielektrik alttaşın

kalınlığı, kare kesitli pinlerin genişliği ve periyodu sabit tutularak farklı pin uzunlukları için nümerik analizler tekrarlanmıştır. Nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerlerinden metal muhafazanın çalışma bant aralığının pin boylarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Tez çalışmasının devamında ayarlanabilir çalışma frekans aralığına sahip dairesel kesitli pin dizisi içeren PMC yüzeyli metal muhafaza tasarımı 11 GHz, 16 GHz ve 21 GHz merkez çalışma frekans değerlerine sahip kaviteler içeren mikrodalga modüle uygulanmış ve nümerik analizler tekrarlanmıştır. kaviteler içeren mikrodalga modüle uygulanmış ve nümerik analizler tekrarlanmıştır. Nümerik analizler sonucu elde edilen PMC yüzeyli metal mahfazanın frekansa bağlı S-parametre değerleri ile pin dizisi içermeyen geleneksel metal mahfazanın frekansa bağlı S-parametre değerleri farklı port kombinasyonları göz önüne alınarak karşılaştırılmış ve 11 GHz, 16 GHz ve 21 GHz merkez çalışma frekans değerlerine sahip kaviteler için sırası ile 8,05-15,29 GHz, 11,69-21,03 GHz ve 17,20-27,79 GHz frekans aralıklarında istenmeyen rezonansların bastırıldığı açık bir şekilde görülmüştür. Tez çalışmasına önerilen ayarlanabilir PMC yüzeyli metal mahfaza tasarımının içinde RF devre bulunduran mikrodalga modüle uygulanması ile devam edilmiştir. Nümerik analiz sonuçları tasarım amacına uygun olarak ayarlanabilir PMC yüzeyli metal mahfazanın mikrodalga modül içinde oluşan istenmeyen rezonansları bastırdığını açık bir şekilde göstermiştir. Çalışmada son olarak elde edilen nümerik analiz sonuçlarının doğruluğunun gösterilmesi için 6x6 dairesel kesitli pin dizisi içeren ayarlanabilir PMC yüzeyli metal mahfazanın prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve elektriksel testleri yapılmıştır. Test sonuçlarının nümerik analiz sonuçlarını doğruladığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Kodali P., Engineering EMC Principles Measurements and Technologies, New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996, s. 6-17.
- [2] Clayton, R.P., "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley Sons Inc., USA, 1992.
- [3] IEEE Std C95.1. "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz". Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association, 4-11, 1999.
- [4] Çolak İ., Koşalay İ., Sefa, İ., "Yüksek Gerilimli Güç Sistemlerinde Elektromanyetik Uyumluluk Problemi Yaratan Temel Kaynakların İncelenmesi", G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 2005, 18/3, s. 397-407.
- [5] Zheng S., Wang S., Li B. L., "The application of multi-stage EMI filter design method in planar EMI filter", 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2015, s. 140-143.
- [6] Pozar D. M., Microwave Engineering, John Wiley & Sons Inc., 2. Baskı, 1998, s. 1-104-105-120.
- [7] Shishigin D. S., Shishigin S. L., "Numerical Modeling in EMC Problems of Electric Power Substations When Lightning Strikes", 2017, IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe).
- [8] Mazzola S., "MIL-STD-461: The basic military EMC specification and it's evolution over the years", 2009, IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference.
- [9] Leferink F.B.J., "Using reverberation chambers for EM measurements", 2010, SoftCOM 2010, 18th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks.

- [10] Xu Q, Huang Y., “Anechoic and Reverberation Chambers: Theory, Design, and Measurements”, Wiley-IEEE Press, USA, 2008.
- [11] Ray D. P., “Advanced design considerations of semi-anechoic chambers”, 2002, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.
- [12] Schieve R. L., “Radiated emission measurement procedures at an open-area test site”, 1989, National Symposium on Electromagnetic Compatibility.
- [13] <http://www.eee.ntu.edu.sg/research/RCActivities/Pages/Electromagnetic-Effects.aspx> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [14] <https://www.emctestleri.com/sss/emc-nedir> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [15] <https://www.tumbral.com/tag/anechoic%20chamber> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [16] <https://www.eurocem.fr/en/content/ce-marking-emc-and-radio-tests-emf> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [17] Teker A, Kuyumcu FE. “Elektro Manyetik Uyumluluk, Topraklama ve şebekelere Etkileri”. Elektrik-ElektronikBilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Kocaeli, Türkiye, 14-18 Kasım 2007.
- [18] Morgan D., "A handbook for Testing and Measurement", 2007, The Institution of Engineering and Technology.
- [19] <http://www.markeelektronik.com/tr-TR/emc-filtreler/> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [20] <http://www.yilkomer.com/wp-content/uploads/> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [21] <http://universolambda.com.br/devemos-proteger-as-entradas-de-sinal/> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [22] <https://www.webike.com.tr/products> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [23] <https://www.shutterstock.com/image-photo/welding-copper-ground-wire-substation> Erişim Tarihi: 01.10.2019.

- [24] <https://www.robotroom.com/PCB-Layout-Tips.html> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [25] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pcb-basics/> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [26] <https://www.electronics-lab.com/making-first-printed-circuit-board-getting-started-pcbway-part-1/> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [27] Klinkenbusch L., “On the shielding effectiveness of enclosures”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47/3, s. 589 –601.
- [28] Kishk, Kildal P. S., “Modelling of soft and hard surfaces using ideal perfect electric conducting/perfect magnetic conducting strip grids”, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, 3/2, s. 296–302.
- [29] Algaba Brazález A., Zaman A. U., Kildal P. S., “Improved Microstrip Filters Using PMC Packaging by Lid of Nails”, IEEE T-CPMT, 2012.
- [30] Domínguez A. T., González J.M. F., Alonso J.M. I., Sierra-Pérez M., “Design proposal for Ridge Gap Waveguide and comparison with other technologies in Ka to W bands”, 2016, 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
- [31] Mahmoud S. F., Electromagnetic Waveguides: Theory and Applications, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2006 ,s. 30-31-32-33.
- [32] <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/preisguenstiges-lorawan-modul-ist-made-in-germany-a-858213/> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [33] <https://edatechnical.wordpress.com/> Tarihi: 01.10.2019.
- [34] <https://www.petervis.com/electronics%20guides/Tom%20Tom%20One%20XL/Tom%20Tom%20One%20Circuit%20Board.html> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [35] <https://www.dxzone.com/dx29423/preamp-for-rtl-sdr.html> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [36] <http://reliabletechsys.com/services/rf-microwave-design/> Erişim Tarihi: 01.10.2019

- [37] Gear J. T., “Microwave absorbers manage military electronics RF interference”, RF Design, 2004, s. 6-9.
- [38] Sreedhar K. V. S. Prasad K. Y. S., Teja G. S., Anurag K.D., “Reduction of Cavity Resonance In Wireless Applications”, IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), 2014, 4/7, s. 51-56.
- [39] <http://lea.hamradio.si/~s53mv/zifssb/kband.html> Erişim Tarihi: 01.10.2019.
- [40] Rajo-Iglesias E., Zaman A. U., Kildal P. S., “Parallel plate cavity mode suppression in microstrip circuit packages using a lid of nails”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20, s. 31-3.
- [41] Zaman A. “Gap Waveguide: Low Loss Microwave Passive Components and MMIC Packaging Technique For High Frequency Applications”, Chalmers Teknoloji Üniversitesi Sinyaller ve Sistemler Bölümü, Doktora Tezi, 2013.
- [42] Rajo-Iglesias E., Kildal P. S., Zaman A. U., Kishk A., “Bed of Springs for packaging of microstrip circuits in the microwave frequency range”, IEEE T-CPM, 2012.
- [43] Kildal P. S., “Gap Waveguides and PMC Packaging: Octave Bandwidth mm- and submm-Wave Applications of Soft & Hard Surfaces, EBGs and AMCs”, Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 2013, s. 34-36.
- [44] Ellis M. S., “Microwave Gap Waveguide Shielding Cover”, Chalmers Teknoloji Üniversitesi Kablosuz ve Fotonik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [45] Rajo-Iglesias E., Pucci E., Kishk A., Kildal P. S., “Suppression of parallel plate modes for low frequency microstrip circuit packaging using lid of printed zigzag wires”, IEEE MWCL, 2013, 23/7, s. 359-361.
- [46] Rajo-Iglesias E., Kildal P.-S., “Numerical studies of bandwidth of parallel plate cut-off realized by bed of nails, corrugations and mushroom-type EBG for use in gap wave-guides”, IET Microwaves, Antenna & Propagation, 2011, 5/3, s. 282-289.
- [47] M. H. Nisanci, F. de Paulis, A.Orlandi, B. Archambeault, and S. Connor, “Optimum geometrical parameters for the EBG-based common mode filter design,” presented at the IEEE Symp. Electromagn. Compat., Pittsburgh, PA, USA, Aug. 5–10, 2012.

- [48] F. de Paulis, B. Archambeault, M. H. Nisanci, S. Connor, and A. Orlandi, "Miniaturization of common mode filter based on EBG patch resonance," presented at the IEC DesignCon Conf., Santa Clara, CA, USA, Jan. 30– Feb. 2, 2012.
- [49] Varner M. A., de Paulis F., Orlandi A., Connor S., Cracraft M., Archambeault B., Nisanci M. H., Di Febo D., "Removable EBG-Based Common-Mode Filter for High-Speed Signaling: Experimental Validation of Prototype Design", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57/4, s. 672 –679.
- [50] F. de Paulis, M. H. Nisanci, D. Di Febo, A. Orlandi, S. Connor, M. Cracraft, and B. Archambeault, "Standalone removable EBG-based common mode filter for high speed differential signaling," presented at the IEEE Symp. Electromagn. Compat., Raleigh, NC, USA, Aug. 4–8, 2014.
- [51] F. de Paulis, M. H. Nisanci, and A. Orlandi, "Experimental validation of an 8 GHz EBG based common mode filter and impact of manufacturing uncertainties," presented at the IEEE Symp. Electromagn. Compat., Denver, CO, USA, Aug. 5–9, 2013.
- [52] Palreddy S., "Wideband Electromagnetic Band Gap (EBG) Structures, Analysis and Applications to Antennas", Virjinya Politeknik Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Doktora Tezi, 2015
- [53] 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, 2018, 60/6, s. 1819–1824.
- [54] Nisanci M. H., de 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.
- [55] Nisanci M. H., de Paulis F., Orlandi A., "Band-Gap Limits Prediction for Effective Noise Coupling Reduction in Microwave Circuits Metallic Enclosures", 2016, International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE.
- [56] 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

Mustafa akır, 10.01.1989'da Sakarya'da doğdu. İlk ve ortaokul eğitimini Karasu İlçesi'nde tamamladı. 2006 yılında Şehit Üsteğmen Selçuk Esedoğlu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu.2013 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektronik Anadalı'nda yüksek lisansa başladı. Lisanstan mezun olduktan sonra yapı denetim ve proje işlerinde çalıştı. Şu anda Eskişehir'de bir yapı denetim firmasında çalışmakta olup yüksek lisans eğitime devam etmektedir.