

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI**



**DOKTORA TEZİ**

**İbrahim ÇATALKAYA**

**İletişim Sistemleri Anabilim Dalı**

**Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı**

**HAZİRAN 2017**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI**



**DOKTORA TEZİ**

**İbrahim ÇATALKAYA  
(705072004)**

**İletişim Sistemleri Anabilim Dalı**

**Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedef KENT**

**HAZİRAN 2017**



İTÜ, Bilişim Enstitüsü'nün 705072004 numaralı Doktora Öğrencisi **İbrahim ÇATALKAYA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Sedef KENT** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Ali YAPAR** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Filiz GÜNEŞ** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Mehmet ÇAYÖREN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Osman Nuri UÇAN** .....  
Kemerburgaz Üniversitesi

**Teslim Tarihi :** 27 Nisan 2017  
**Savunma Tarihi :** 13 Haziran 2017





*Anneme ve babama,*





## ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmama katkılarından dolayı danışmanım Prof. Dr. Sedef Kent'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın ilerleme aşamalarındaki katkılarından ve emeklerinden dolayı Prof. Dr. Ali YAPAR'a ve Prof. Dr. Filiz GÜNEŞ'e teşekkür ederim.

Doç. Dr. Mehmet ÇAYÖREN'e bu araştırmadaki yönlendirmeleri ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Doç. Dr. Serkan ŞİMŞEK'e ve Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN'a teşviklerinden ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Anneme, rahmetli babama bana güç verdikleri için çok teşekkür ederim.

Nisan 2017

İbrahim Çatalkaya



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI.....	xvii
ÖZET .....	xvii
MICROWAVE ABSORBER DESIGN.....	xxi
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	3
1.2 Literatür Araştırması .....	3
1.2.1 EM dalga soğurucuların tarihçesi .....	3
1.2.2 EM soğurucular .....	4
1.2.3 Yansımaz odalar .....	9
1.3 Hipotez .....	10
<b>2. YÖNTEM.....</b>	<b>11</b>
2.1 Amaç .....	11
2.2 Periyodik Soğurucu Yapıdan Saçılan Elektrik Alan .....	12
2.3 Periyodik Moment Yöntemi (PMM).....	13
2.3.1 PMM çözümü.....	15
2.3.2 PMM empedans matrisi için kapalı form integralin hesaplanması.....	18
2.4 Yansıma Performansının Empedans Geçişi ile İlişkisi .....	21
2.5 Soğurucu Yüzey Fonksiyonlarının Elde Edilmesi .....	23
2.5.1 Kama yüzeyi .....	24
2.5.2 Parabolik yüzey .....	25
2.5.3 Güç fonksiyonu yüzeyi .....	26
2.5.4 Üstel fonksiyonun yüzeyi.....	27
2.6 Soğurucu Yüzeylerin Optimizasyonu .....	29
<b>3. MİKRODALGA SOĞURUCU PERFORMANS ANALİZLERİ .....</b>	<b>31</b>
3.1 Amaç .....	31
3.2 Soğurucu Yapılarda Kullanılan Malzemenin Dielektrik Özellikleri.....	31
3.3 PMM Sonuçlarının Doğrulanması .....	32
3.4 Soğurucu Yapıların Yansıma Performansları .....	35
3.4.1 Geleneksel kama soğurucu.....	37
3.4.2 Yerel minimum aralık içinde (YMAİ) parabolik soğurucu .....	41
3.4.3 Yerel minimum aralık dışında (YMAD) parabolik soğurucu .....	46
3.4.4 Güç fonksiyonu soğurucu .....	50
3.4.5 Üstel fonksiyon soğurucu.....	54
<b>4. TARTIŞMA .....</b>	<b>61</b>
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>65</b>

<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>73</b>



## KISALTMALAR

<b>EMI</b>	: Electromagnetic Interference
<b>EMC</b>	: Electromagnetic Compatibility
<b>RCS</b>	: Radar Cross Section
<b>ARP</b>	: Antenna Radiation Pattern
<b>EM</b>	: Electromagnetic
<b>CISPR</b>	: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
<b>FCC</b>	: Federal Communications Commission
<b>ANSI</b>	: American National Standards Institute
<b>SRR</b>	: Split-Ring Resonator
<b>TM</b>	: Transverse Magnetic
<b>PMM</b>	: Periodic Moment Method
<b>UHF</b>	: Ultra High Frequency
<b>RAM</b>	: Random Access Memory
<b>YMAİ</b>	: Yerel Minimum Aralık İçinde
<b>YMAD</b>	: Yerel Minimum Aralık Dışında



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Referans yansıma katsayısı değerleri. ....	29
Çizelge 3.1 : Geleneksel kama soğurucu yansıma katsayısı değerleri. ....	37
Çizelge 3.2 : Geleneksel kama soğurucu RCS değerleri. ....	39
Çizelge 3.3 : Geleneksel kama soğurucu bistatik patern değerleri. ....	41
Çizelge 3.4 : YMAİ parabolik soğurucu yansıma katsayısı değerleri. ....	42
Çizelge 3.5 : YMAİ parabolik soğurucu RCS değerleri. ....	44
Çizelge 3.6 : YMAİ parabolik soğurucu bistatik patern değerleri. ....	45
Çizelge 3.7 : YMAD parabolik soğurucu yansıma katsayısı değerleri. ....	47
Çizelge 3.8 : YMAD parabolik soğurucu RCS değerleri. ....	48
Çizelge 3.9 : YMAD parabolik soğurucu bistatik patern değerleri. ....	50
Çizelge 3.10 : Güç fonksiyonu soğurucu yansıma katsayısı değerleri. ....	51
Çizelge 3.11 : Güç fonksiyonu soğurucu RCS değerleri. ....	53
Çizelge 3.12 : Güç fonksiyonu soğurucu bistatik patern değerleri. ....	54
Çizelge 3.13 : Üstel fonksiyon soğurucu yansıma katsayısı değerleri. ....	56
Çizelge 3.14 : Üstel fonksiyon soğurucu RCS değerleri. ....	57
Çizelge 3.15 : Üstel fonksiyon soğurucu bistatik patern değerleri. ....	59
Çizelge 4.1 : Soğurucu yapıların 2 GHz için yansıma değerleri. ....	61
Çizelge 4.2 : Soğurucu yapıların 12 GHz için yansıma değerleri. ....	62
Çizelge 4.3 : Soğurucu yapıların en iyi yansıma değerleri. ....	62
Çizelge 4.4 : Soğurucu yapıların 2 GHz için RCS değerleri. ....	62
Çizelge 4.5 : Soğurucu yapıların 12 GHz için RCS değerleri. ....	63
Çizelge 4.6 : Soğurucu yapıların en iyi RCS değerleri. ....	64





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Dallenbach katmanı.....	5
Şekil 1.2 : Salisbury ekranı.....	6
Şekil 1.3 : Jaumann katmanı.....	6
Şekil 1.4 : Örnek bir metamalzeme yapı. ....	7
Şekil 1.5 : Örnek bir kama soğurucu. ....	7
Şekil 1.6 : Değişken yüklü soğurucu (tapered loading absorber).....	8
Şekil 1.7 : Uydurma katmanlı soğurucu. ....	8
Şekil 1.8 : Soğurucu kullanılan bir yansısız oda.....	9
Şekil 2.1 : Bir boyutlu kayıplı periyodik yapıya gelen düzlem dalga. ....	12
Şekil 2.2 : Üçgen PMM hücreleri.....	15
Şekil 2.3 : Bir-boyutlu PMM için genel dörtgen hücre. ....	18
Şekil 2.4 : Bir-boyutlu PMM için genel üçgen hücre.....	19
Şekil 2.5 : Kama ve piramit türü soğurucuların çalışma prensibi.....	22
Şekil 2.6 : Kama, dışbükey ve içbükey soğurucuların yansıma performansları.....	22
Şekil 2.7 : Doğrusal yüzey kesiti. ....	24
Şekil 2.8 : Örnek parabolik fonksiyonlar.....	26
Şekil 2.9 : Farklı “m” değerleri için güç fonksiyonu grafikleri. ....	27
Şekil 2.10 : Örnek güç fonksiyonu. ....	27
Şekil 2.11 : Farklı b değerleri için üstel fonksiyon grafikleri.....	28
Şekil 3.1 : Kayıplı malzemenin dielektrik sabitinin gerçel kısmı.....	32
Şekil 3.2 : Kayıplı malzemenin dielektrik sabitinin sanal kısmı. ....	32
Şekil 3.3 : Soğurucu yapının fiziksel boyutları. ....	33
Şekil 3.7 : Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (genlik).....	38
Şekil 3.8 : Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).....	38
Şekil 3.9 : Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).....	39
Şekil 3.10 : Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu RCS. ....	40
Şekil 3.11 : Geleneksel kama soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri. ....	40
Şekil 3.12 : Parabolik soğurucu yapının fiziksel boyutları.....	41
Şekil 3.13 : YMAİ parabolik soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı. ....	42
Şekil 3.14 : YMAİ parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).....	43
Şekil 3.15 : YMAİ parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).....	44
Şekil 3.16 : YMAİ parabolik soğurucu normal geliş TM modu RCS. ....	44
Şekil 3.17 : YMAİ parabolik soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri. ....	45
Şekil 3.18 : YMAD parabolik soğurucu yapının fiziksel boyutları.....	46

<b>Şekil 3.19</b> : YMAD parabolik soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı. ....	<b>47</b>
<b>Şekil 3.20</b> : YMAD parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz). ....	<b>47</b>
<b>Şekil 3.21</b> : YMAD parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma). ....	<b>48</b>
<b>Şekil 3.22</b> : YMAD parabolik soğurucu normal geliş TM modu RCS. ....	<b>49</b>
<b>Şekil 3.23</b> : YMAD parabolik soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri. ....	<b>49</b>
<b>Şekil 3.24</b> : Güç fonksiyonu soğurucu yapının fiziksel boyutları. ....	<b>50</b>
<b>Şekil 3.25</b> : Güç fonksiyonu soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı. ....	<b>51</b>
<b>Şekil 3.26</b> : Güç fonksiyonu soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz). ....	<b>52</b>
<b>Şekil 3.27</b> : Güç fonksiyonu soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma). ....	<b>52</b>
<b>Şekil 3.28</b> : Güç fonksiyonu soğurucu normal geliş TM modu RCS. ....	<b>53</b>
<b>Şekil 3.29</b> : Güç fonksiyonu soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 3.30</b> : Üstel fonksiyon soğurucu yapının fiziksel boyutları. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 3.31</b> : Üstel fonksiyon soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 3.32</b> : Üstel fonksiyon soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz). ....	<b>56</b>
<b>Şekil 3.33</b> : Üstel fonksiyon soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma). ....	<b>57</b>
<b>Şekil 3.34</b> : Üstel fonksiyon soğurucu normal geliş TM modu RCS. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 3.35</b> : Üstel fonksiyon soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 4.1</b> : Soğurucu yapıların frekans cevabı karşılaştırması. ....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.2</b> : Soğurucu yapıların RCS değişimleri. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.3</b> : En iyi performanslı ilk üç soğurucu yansımaya değerleri. ....	<b>64</b>

## MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI

### ÖZET

Elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference, EMI), elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility, EMC), anten yayılım pateni (Antenna Radiation Pattern, ARP), radar kesit alanı (Radar Cross Section, RCS) gibi ölçümlerin doğru ve güvenilir olarak yapılabilmesi için ölçülecek ekipman civarında, ölçümlerin doğruluğunu etkileyebilecek herhangi bir bozucu elektromanyetik (Electromagnetic, EM) dalga kaynağı veya kaynaktan gelen dalgaları yansıtan bir nesne bulunmamalıdır. Genellikle elektronik cihazlardan yayılan istenmeyen veya kaçak elektromanyetik sinyal radyasyonu, yayılan radyasyon güçlü olduğunda canlılar için de ciddi tehlike oluşturabilir ve yakınlarda bulunan diğer elektronik cihazlarda arızalara sebep olabilir. İşte bütün bu nedenlerden dolayı istenmeyen veya kaçak EM sinyal yayılımının tespiti çok önemlidir.

Doğru ve güvenilir ölçüm sonuçları elde etmek, ölçümlerin bozucu EM dalga kaynağı veya yansımaya sebep olabilecek nesnelere bulunmadığı açık bir alanda yapılması ile mümkündür. Ancak günümüzde bütün frekans bandlarının yoğun olarak kullanılması nedeniyle ölçüm yapılacak noktada çok fazla bozucu EM dalga kaynağının bulunması, yansımaya sebep olabilecek nesnelere bulunmadığı böylesi bir açık alan bulmanın zorluğu, açık alandaki ölçümün doğruluğunu etkileyebilecek sıcaklık, nem vb. gibi çevresel etmenlerin çok değişken olması gibi nedenlerden dolayı ölçümlerin açık alanda yapılması pek mümkün değildir. Bu halde ölçümler, yansıyan veya saçılan dalgaların sebep olduğu hatalı ölçüm sonuçlarını önlemek, doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için duvarları, tavan ve tabanı EM soğurucularla kaplanmış, kapalı bir alanda çalışmasına olanak sağlayan, yansımaz oda olarak adlandırılan kapalı ortamlarda yapılır. Yansımaz odalar, serbest uzay şartlarını kapalı bir ortamda elde etmek için oluşturulmuş yapılardır.

EM soğurucular ölçümler sırasında üzerlerine gelen EM dalgaların yansımalarını engellemek, istenmeyen veya rastgele yayılan EM radyasyonu önlemek için kullanılırlar. Soğurucular, EMC, EMI, ARP ve RCS ölçümlerinin kapalı bir ortamda doğru ve güvenilir olarak gerçekleştirilmesi için vazgeçilmez unsurlardır. Birçok elektronik sistem soğurucular yardımıyla geliştirilmiştir.

EM soğurucuların soğurma performansı yapılan ölçümlerin doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerdendir. Soğurucular yapılarında kullanılan malzemelerin kimyasal, fiziksel, elektriksel özelliklerine veya geometrilerine bağlı olarak düşük yansıma katsayısına sahip yapılardır. Soğurucu malzemenin elektriksel özellikleri diğer faktörler yanında soğurma performansı üzerinde oldukça etkilidir. Mikrodalga soğurucular EM dalgaları, sahip oldukları dielektrik veya manyetik kayıplar sayesinde soğururlar. Soğurulan EM dalga zayıflar ve sahip olduğu enerji ısı enerjisine dönüşür. Soğurucunun soğurma kapasitesi, soğurucu malzemenin dielektrik ve manyetik geçirgenlik özelliklerine bağlıdır. Soğurucuda kullanılan malzemenin bağıl dielektrik sabiti elektriksel faktörlerin en önemlilerinden biridir. Bağıl dielektrik sabiti, malzeme

içinde depolanan elektrostatik enerjinin bir ölçüsüdür ve EM dalganın malzeme içindeki yayılım hızını etkiler.

Soğurucular çalışma şekline göre genel olarak rezonans (resonating) ve kademeli (graded) soğurucular olmak üzere iki ana kategoriye ayrılırlar. Yansımaz odalarda EMC / EMI ölçümlerinde çoğunlukla, en çok bilinen, geniş bantlı kademeli soğuruculardan olan kama veya piramit tipi EM soğurucular kullanılır. Gelen EM dalgaların büyük bir kısmını soğurması için soğurucuların düşük yansımaya katsayısına sahip, geniş bir frekans bandında ve geniş bir geliş açısı aralığında iyi bir soğurma performansına sahip olması beklenir. Böylece, kapalı bir alanda oldukça iyi bir şekilde serbest uzay şartları sağlanmış olur.

Yansımaz odanın kullanılabilir alanını daraltmaması için oda içinde kullanılacak soğurucuların yüksekliklerinin mümkün olduğunca az olması tercih edilir. Kama veya piramit tipi soğurucuların yüksekliğinin fazla olması yansımaz odanın kullanılabilir alanını sınırlar. Bu sebeple boyutları küçük yansımaz odalarda kullanım alanları sınırlıdır.

Yansımaz odalarda kullanılan soğurucuların soğurma performansı kullanılan malzemenin elektriksel özellikleri gibi birçok parametre yanında soğurucu geometrisine de bağlıdır. Özellikle geniş bantlı soğurucularda soğurucunun geometrik şekli soğurma performansı üzerinde önemli etkenlerden biridir. Soğurucuların geliştirilmesi sürecinde farklı geometriler kullanılmıştır. Piramit, kama, kesik kama (truncated wedge) gibi birçok farklı soğurucu geometrisi vardır. Serbest uzayın empedans değerinden soğurucu tabanına doğru düzgün empedans geçişi sağlamaları nedeniyle kama veya piramit tipi konik yüzeylerin daha iyi soğurma performansına sahip olduğu söylenebilir. Bu tür yüzeyler sahip oldukları geometri sebebiyle düzgün empedans geçişi sağlarlar. Kademeli empedans geçişi, yansıyan EM dalganın minimum olduğu bir empedans uydurma devresi gibi davranır. Kama veya piramit tipi soğurucularda empedans uyumsuzlukları minimum seviyede olmaktadır. Bu soğurucular kullanılarak soğurucu üzerine gelen EM dalganın enerjisi maksimum seviyede soğurulmaktadır. Ayrıca soğurucu yapının her bir elemanının (kama, piramit) boyutu gelen EM dalganın dalga boyuna göre daha büyük olduğunda EM dalga, soğurucunun sahip olduğu geometri sebebiyle, geri yansıtılmadan önce soğurucunun yüzeyleri arasında defalarca yansımaya uğrayacaktır. Yanyana yüzeyler arasında defalarca yansımaya uğrayan EM dalga her yansımada bir miktar soğurulacak ve enerjisini büyük oranda kaybedecektir. Yüksek frekanslarda, kamanın kenarındaki uç noktalardan kaynaklanan ve soğurma performansını etkileyen kırınım etkisi de saçılan elektrik alanına dikkate değer ölçüde katkı yapmaktadır. Bu nedenle bu tür yapıların sayısal analizinde kullanılan yöntemlerde kırınım etkisinin de dikkate alınması gereklidir. Moment yöntemi (Method of Moments, MoM) bu amaçla kullanılacak yöntemlerden biridir. Buradan yola çıkarak, soğurucu yapının geometrisinde yapılacak değişikliklerle empedans uyumunda ve soğurucu yüzeyler arasındaki yansımaya sayısında dikkate değer iyileştirmeler sağlanabilir ve soğurma performansı artırılabilir.

Bu tez çalışmasında, soğurucularının soğurma performanslarını, yapılarında kullanılan malzemelerin kimyasal, elektriksel vb. özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapmadan, yalnızca soğurucu geometrisine yönelik iyileştirmeler yaparak arttırmak amaçlanmıştır. Bunu yaparken kullanılan yöntem, daha iyi empedans uyumu sağlayacak, EM dalga geri yansıtılmadan önce soğurucu elemanların yüzeyleri arasında çok sayıda yansımaya sağlayacak bir soğurucu geometrisi elde etmeye

dayanmaktadır. Aynı zamanda soğurucu performansının analizinde kullanılan yöntemlerde de iyileştirmelerin yapılması hedeflenmiştir.

Kama şeklindeki soğurucuda empedans geçişi serbest uzaydan soğurucu tabanına doğru doğrusal olarak değişir. Daha iyi empedans geçişi ve soğurucu yüzeyleri arasında çok sayıda yansıma sağlamak için kama soğurucunun yüksekliğinin artırılması, diğer bir ifadeyle tepe açısının azaltılması gereklidir. Ancak soğurucu yüksekliği, yansımatsız odanın ölçüm için kullanılabilir alanını sınırlar. Bu sebeple yüksekliği fazla olan soğurucuların yarı yansımatsız veya küçük boyutlu yansımatsız odalarda kullanımı sınırlıdır. Yansımatsız odaların ölçüm alanını artırmak, aynı veya daha iyi soğurma performansı elde etmek ancak daha az yüksekliğe sahip farklı soğurucu geometrileri kullanarak mümkündür. Kama şekli yerine doğrusal olmayan bir soğurucu geometrisi kullanmak yansımatsız odanın ölçüm alanını arttırarak EMI/EMC ölçümlerinin performansını arttırmaya yardımcı olur. Ayrıca doğrusal olmayan soğurucu geometrisi daha düzgün bir empedans geçişi ve / veya soğurucu yüzeyleri arasında daha fazla sayıda yansıma sağlar.

Bu çerçevede bu tez çalışmasının katkısı, soğurucu yüzey fonksiyonlarını elde etmeyi sağlayacak bir yöntem önererek geleneksel kama soğurucudan daha iyi soğurma performansına sahip soğurucular elde etmektir. Çalışmada soğurucu yapılardan saçılan elektrik alanı elde etmek için Periyodik Moment Yöntemi (Periodic Moment Method, PMM) kullanılmıştır. Elektrik alanı soğurucu yapının eksenine doğrultusunda kutuplanmış düzlem EM dalganın (TM modu) yansıma değerleri dikkate alınmıştır. TM modu yansıma performansı, TE modu yansıma performansından daha kötü olduğu için çalışma TM modu ile sınırlıdır.

Tezin organizasyonu şu şekildedir: Literatür araştırması kapsamında EM soğurucuların tarihçesi, gelişimi incelenmiş, periyodik soğurucuların çeşitleri, yansımatsız odalar ve soğurucuların yansımatsız odalarda kullanımından bahsedilmiştir. Tez çalışmasında kullanılacak yöntemlerin açıklanması kapsamında EM dalganın periyodik soğurucu yapılardan saçılması incelenmiş, teorik altyapı oluşturması amacıyla periyodik soğurucu yapıların analizinde kullanışlı bir araç olan PMM açıklanmıştır. Sonraki bölümde elde edilen integral denklemin PMM çözümünün detayları, çözümün referans soğurucu yapı üzerinden kapalı form çift katlı integrasyon yöntemiyle elde edilmesi verilmiştir. Yansıma performansının empedans geçişi ile ilişkisi araştırılmış, dışbükey, doğrusal ve içbükey yüzeylerin yansıma performansları karşılaştırılarak içbükey yüzeylerin dikkate değer şekilde daha iyi yansıma performansına sahip oldukları gösterilmiştir. Çok bilinen bazı içbükey fonksiyonlar temel alınarak soğurucu yüzeylerde kullanılacak, sınır koşullarını sağlayan içbükey fonksiyonların elde edilişi açıklanmıştır. İçbükey yüzey fonksiyonları kullanılarak elde edilen soğurucu yüzeylerin MATLAB optimizasyon araçları yardımıyla en iyi soğurma performansını sağlayacak şekilde optimizasyonu açıklanmıştır.

Soğurucu performans analizleri bölümünde soğurucu yapı malzemesi olarak kabul edilen karbon katkılanmış köpükten oluşan kayıplı malzemeye ait dielektrik katsayılarından bahsedilmiş, PMM yöntemi kullanılarak yazılan MATLAB programının doğru çalıştığı gösterilmiş ve soğurucu tasarımlarının PMM hesaplamalarına ait sonuçlar sunulmuştur. Yansıma katsayısı, faz, RCS ve bistatik patern grafikleri her soğurucu yapı için ayrı ayrı verilmiştir. Soğurucu yapıların TM modu yansıma performansı sonuçlarının geleneksel kama soğurucu ve birbirleriyle karşılaştırılması tartışma bölümünde sunulmuştur. Tez çalışmasının genel bir

değerlendirmesinin yer aldığı ve ilerleyen dönemde yapılacak çalışmaların irdelendiği sonuç bölümü son bölüm olarak eklenmiştir.



## MICROWAVE ABSORBER DESIGN

### SUMMARY

In order to provide accurate and reliable measurements of important parameters such as electromagnetic interference (EMI), electromagnetic compatibility (EMC), antenna radiation pattern (ARP), radar cross section (RCS), there are not any electromagnetic (EM) wave source or objects, that reflect incident EM waves, around the equipment to be measured. Existence of such unwanted EM wave source or objects affects the accuracy of the measurements. Unwanted or stray electromagnetic signal radiation, usually emitted from electronic devices, can be a serious threat to living beings and cause faults on other electronics devices located nearby when radiation is strong. For all these reasons, it is very important to detect unwanted or stray EM signal propagation.

Obtaining accurate and reliable measurement results is possible by performing measurements on open field, which there are not unwanted EM wave source or objects that could cause reflection. However, due to reasons such as the presence of unwanted EM wave sources because of occupation of frequency bands, difficulty of finding such an open area where there are no objects that could cause reflections, unstable environmental factors such as temperature, humidity, etc., which may affect the accuracy of open field measurements, it is not possible to perform measurements in an open area. Measurements are performed in a closed area, which is called as anechoic chamber and its walls, ceiling and basement are covered with EM absorbers to prevent inaccurate measurement results caused by reflected or scattered waves, to obtain accurate and reliable results. Anechoic chambers are built to obtain free space conditions in a closed environment.

EM absorbers are used to prevent reflection of EM waves incident upon them while performing measurements and to prevent unwanted or stray EM radiation. Absorbers are essential elements for accurate, reliable EMC, EMI, ARP and RCS measurements in a closed environment. Measurements of many electronic systems are performed by using absorbers. Absorption performance of EM absorbers is one of the most important factor, which affects accuracy of performed measurements. Absorbers are structures which have low reflection coefficient depending on chemical, physical, electrical properties of their materials used in or their geometry. Electrical properties of the absorber material have a significant effect on absorption performance as well as other factors. Microwave absorbers absorb EM waves due to their dielectric or magnetic losses which they have. Absorbed EM waves are attenuated and its energy transformed into heat energy. Absorption capacity of the absorber depends on the dielectric permittivity and magnetic permeability properties of the absorber material. Relative dielectric constant of the material used in the absorber is one of the most important factor of the electrical factors. The relative dielectric constant is a measure of the electrostatic energy stored in the material and affects the propagation speed of the EM wave in the material.

Absorbers are generally divided into two main categories according to absorbing mechanism as resonating and graded absorbers. Wedge or pyramidal type EM absorbers, which are commonly used and well known graded type broadband absorbers, are used for EMC / EMI measurements in anechoic chambers. Absorbers, that have good absorption performance in a wide frequency band and a wide range of angle of incidence, are preferable in order to absorb most of the incident EM waves. Thus, almost perfect free space conditions are obtained to perform measurements in a closed area. Absorbers having lower heights are preferred not to limit usable measurements space of the anechoic chamber. Higher height of wedge or pyramidal type absorbers limits usable measurement space of the chamber and restricts usage of absorbers in small and semi-anechoic chambers. Absorption performance of the absorbers used in anechoic chambers depends on absorber geometry as well as various parameters such as the electrical properties of the absorber material. Geometry of the absorber is one of the important factors on absorption performance of the absorber, especially for broadband absorbers. Different geometries are used during the development of the absorbers. There are various absorber geometries such as pyramid, wedge, truncated wedge. Wedge or pyramidal type conical surfaces have better absorption performance due to the smooth impedance transition from the impedance value of free space to the absorber base. Such surfaces provide a smooth impedance transition due to the geometry they have. Gradual impedance transition acts as an impedance matching circuit with a minimum amount of the reflected EM wave. Impedance mismatches are minimized by using wedge or pyramidal type absorbers. Thus, energy of the EM wave incident upon absorber is absorbed at the maximum level. On the other hand, while size of each element (wedge, pyramid) of the absorber structure is larger than the wavelength of the incident EM wave, incident waves are reflected numerous times between surfaces of the absorber elements due to the geometry of the absorber before being reflected back. Thus, EM wave, which is reflected numerous times between surfaces of the absorber elements, is absorbed upon each reflection and lose significant portion of its energy. Diffraction due to edges of wedge absorber contribute electric field significantly at higher frequencies, which effects absorption performance of the absorber. Therefore, it is necessary to take into account the diffraction effect in the methods used for numerical analysis of such structures. Method of Moments (MoM) is one of the techniques that can be used for this purpose. From there, considerable improvements are obtained in the impedance matching as well as number of reflections between surfaces of absorber elements and absorption performance is improved by changing the geometry of the absorber structure.

In this thesis study, absorption performances of the absorbers are improved by changing absorber geometry not by changing material properties such as chemical, electrical properties etc. A methodology is used based on obtaining an absorber geometry that will provide better impedance matching and provide multiple reflections between surfaces of absorber elements before the EM wave is reflected back. Improving methods used for the analysis of absorber performance is also within the scope of thesis study.

Impedance transition of the wedge-shaped absorber varies linearly from the free space to the absorber base. It is required to increase the height of the wedge absorber in order to provide better impedance transitions and multiple reflections between the surfaces of absorber elements, in other words, it is necessary to reduce apex angles of the wedges. However, increased absorber height limits available measurement space of



the anechoic chamber. Therefore, it is not preferable to use increased height absorbers in small or semi-anechoic chambers. On the other hand, it is possible to increase the measurement space of anechoic chambers and to obtain the same or better absorption performance by using different absorber geometries with lower heights. Using a nonlinear absorber geometry instead of a wedge-shaped geometry helps to improve the performance of EMI / EMC measurements by increasing the measurement space of the anechoic chamber. In addition, nonlinear absorber geometry provides a smoother impedance transition and / or more multiple reflections between the surfaces of absorber elements.

Within this framework, the contribution of this study is proposing a method to obtain surface functions for absorbers that have better absorption performance than a wedge-shape absorber. Scattered electric fields from absorber structures have been analyzed by using the PMM. Reflection values of the plane electromagnetic wave that is E-field polarized along the axes of the absorber structure (TM case) are calculated. Since the TM case reflection performances are worse than the TE case performances, the scope of the study is limited for the TM case only.

The organization of the thesis is as follows: In the literature survey, the history of EM absorbers, their development, types of periodic absorbers, anechoic chambers and the use of absorbers in anechoic chambers are described. Within the scope of explaining the methods to be used in the thesis study, EM wave scattering from periodic absorber structures is given and Periodic Moment Method (PMM), which is a useful tool for analyzing periodic absorber structures, is explained in detail in order to provide theoretical background. Obtaining triangle mesh of the absorber structure is shown, using equivalent square cell instead of triangle cell is explained. Square cells with the same area and centroid as the triangular equivalent provide the same scattering values as the less computational time. modified scattering formulas because of using square cell are given. The details of the PMM solution of obtained integral equation, finding solution by closed form double integration method over the reference absorber structure are given in the following section. Advantage of using square cell equivalent instead of triangle cell while performing closed form double integration calculation is shown.

Relation between reflection performance and impedance transition for absorbers with different geometries is investigated by performing PMM calculation of sample convex, concave and wedge absorber structures. It has been shown that convex surfaces have significantly better reflection performance by comparing the reflection performances of concave, linear and convex surfaces. Obtaining of convex functions, that satisfy boundary conditions to be used on absorber surfaces, is explained based on some well-known convex functions. Optimization using MATLAB optimization tools to provide optimal absorption performance of the absorbing surfaces obtained by using convex surface functions is explained. In the absorber performance analysis section, the dielectric coefficients of the lossy material composed of carbon-doped foam, which is considered as absorber structure material, are given, verification of MATLAB program written by using PMM is shown and the results of PMM calculations of absorber designs are presented. Reflection coefficient, phase, RCS and bistatic pattern plots are given for each absorber structure separately. Comparison of the TM mode reflection performance results of the absorber structures and the conventional wedge absorber is presented in discussion section. Results show that convex shaped absorbers have significantly better absorption performance than the conventional wedge type absorber. TM mode RCS performances of the absorber structures and the conventional

wedge absorber are also compared. Comparison of reflection results of conventional wedge absorber, parabolic absorber which its local minimum is inside interval, and power function absorber, that have the best reflection performances are presented. A general evaluation of the thesis study and future studies are given in conclusion section.



## 1. GİRİŞ

Elektronik ekipmanların çalıştığı ortamdaki herhangi bir kaynaktan yayılan bozucu elektromanyetik (EM) dalga radyasyonu elektronik ekipmanın çalışmasını engelleyebilir [1]. İstenmeyen EM radyasyonun sebep olduğu bu durum EM girişim (EMI) olarak adlandırılır. Elektronik ekipmanın çalıştığı ortamda herhangi bir bozucu etkiye neden olmayacak şekilde kararlı ve güvenilir olarak EM uyumluluk (EMC) içinde çalışması gerekir. Bu nedenle elektronik ekipmanların geniş bir frekans bölgesinde EMI ve EMC performansları ve ölçümlerinin doğru şekilde yapılması standartlarla belirlenmiş sınırlar arasında olup olmadığının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir [2]. Bu standartlar CISPR, FCC, ANSI gibi uluslararası organizasyonlar tarafından belirlenmiştir [3]. Ölçümlerin doğru olarak yapılabilmesi için ölçülecek ekipman civarında, ölçümlerin doğruluğunu etkileyebilecek herhangi bir bozucu EM dalga kaynağı veya kaynaktan gelen dalgaları yansıtan bir nesne bulunmamalıdır.

EMI ve EMC ölçümleri bozucu bir EM dalga kaynağı veya yansımaya sebep olabilecek nesnelerin bulunmadığı açık bir alanda yapılabilir. Ancak birçok etkenden dolayı pratik olarak bu mümkün değildir. İlk etken olarak yansımaya sebep olabilecek nesnelerin bulunmadığı böylesi bir açık alan bulmak oldukça zordur. İkinci bir etken de açık alandaki ölçümün doğruluğunu etkileyebilecek sıcaklık, nem vb. gibi çevresel etmenlerin çok değişken olmasıdır. Bu tür çevresel etkenler iletkenlik üzerinde etkilidir ve ölçümlerin hatalı yapılmasına sebep olabilmektedirler. Ayrıca günümüzde hemen hemen bütün frekans bandlarının yoğun olarak kullanılması nedeniyle ölçüm yapılacak noktada çok fazla bozucu EM dalga kaynağının bulunması da önemli bir etkidir [4, 5].

Yansıyan veya saçılan dalgaların sebep olduğu hatalı ölçüm sonuçlarını önlemek, doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için ölçümler yansısız odalarda yapılır [6]. Yansısız odalar, duvarları, tavan ve tabanı EM soğurucularla kaplanmış, ölçümlerin kapalı bir alanda doğru ve güvenilir olarak yapılmasına olanak sağlayan ortamlardır. EM soğurucular birçok mikrodalga uygulamasında istenmeyen veya rastgele yayılan

EM radyasyonu engellemek için kullanılırlar [7]. EM soğurucular, yapılarında kullanılan malzemelerin kimyasal, fiziksel, elektriksel özelliklerine veya geometrilerine bağlı olarak yansıyan EM dalgaları soğuran, zayıflatan, yansıma katsayıları oldukça düşük yapılardır [8]. Soğurucularla kaplanmış bir yansız oda bu özellikleriyle hiçbir EM girişimin olmadığı, ideal ölçüm ortamına sahip, açık bir alanda yapılabilecek ölçümlerin benzer test ortamında kapalı bir ortamda yapılabilmesini (açık alan şartları) sağlar [7, 9]. Kullanılan EM soğurucuların soğurma performansı yapılan ölçümlerin doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerdendir. Soğurucular, yapılarında kullanılan malzemelerin sahip olduğu elektrik veya manyetik kayıplar sayesinde EM dalgaları soğurur, EM dalgaların sahip olduğu enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek dalgaları zayıflatırlar. Mikrodalga soğurucuların yapısında kullanılan malzemenin özellikleri soğurma performansı bakımından önemlidir [7, 10, 11]. Soğurucuların geniş bir frekans bandında ve EM dalganın geniş bir geliş açısı aralığında iyi bir soğurma performansına sahip olması istenir. Ayrıca yansız odanın kullanılabilir alanını daraltmaması için yüksekliğinin mümkün olduğunca az olması tercih edilir. Kama veya piramit tipi soğurucuların yüksekliğinin fazla olması yansız odanın kullanılabilir alanını sınırlar. Bu sebeple boyutları küçük yansız odalarda kullanım alanları sınırlıdır [12]. Kama veya piramit tipi EM soğurucular en çok bilinen, geniş bantlı ve yansız odalarda sıklıkla kullanılan soğurucular arasındadırlar [13-18].

Soğurucuların geliştirilmesi sürecinde farklı yöntemler, geometriler ve teknikler kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin dielektrik katsayısı gibi birçok parametre mikrodalga soğurucunun soğurma performansını etkiler [9]. Ancak EM soğurma yalnızca kullanılan malzemenin elektriksel özelliklerine bağlı değildir aynı zamanda soğurucunun geometrisine de bağlıdır. Özellikle geniş bantlı soğurucularda soğurucunun geometrik şekli soğurma performansını etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Serbest uzayın sahip olduğu empedans değerinden soğurucu tabanına doğru daha iyi empedans uyumu olması sebebiyle kama veya piramit tipi konik yüzeylerin daha iyi soğurma performansına sahip olduğu gözlenmektedir [11]. Yansız odalarda kullanılan kama veya piramit şeklinde geometriye sahip, yapısında kayıplı dielektrik malzeme bulunan geleneksel EM soğurucular serbest uzay empedansından soğurucu tabanına doğru kademeli bir empedans değeri değişimine sahiptirler. Bu sayede empedans uyumsuzlukları minimum, soğurulan enerji seviyesi ise maksimum

seviyede olmaktadır. Soğurucu içinde ilerleyen EM dalga kayıplı ortam içinde gittikçe zayıflar ve enerjisini kaybeder [6, 9, 11]. Periyodik soğurucu yapının her bir elemanının (kama, piramit) boyutu gelen EM dalganın dalga boyuna göre daha büyük olduğunda, EM dalga soğurucunun yüzeylerinden yansıtacaktır. Yanyana yüzeyler arasında defalarca yansımaya uğrayan dalga her yansımada bir miktar soğurulacak ve enerjisinin bir kısmını kaybedecektir [9]. Daha yüksek frekanslarda, soğurucu yapının kenarlarından kaynaklanan kırınım (diffraction), etkili olmaya başlar ve soğurucu yapının soğurma performansını etkiler [19]. Bu nedenle, soğurucu yapıların analizinde kırınım hesaba katılmalıdır ve MoM, bu amaçla kullanılacak etkili tekniklerden biridir [20-22].

Mikrodalga soğurucular yansısız oda içinde yansıyan mikrodalga işaretlerini soğurmak için kullanılan en önemli bileşenlerdendir ve birçok askeri, sivil elektronik sistemin geliştirilmesinde oldukça önemli bir yere sahiptirler [23].

## **1.1 Tezin Amacı**

Günümüzde yansısız odalarda sıklıkla kama veya piramit mikrodalga soğurucular kullanılmaktadır. Kullanılan soğurucuların soğurma performansı giriş bölümünde de belirtildiği gibi soğurucunun geometrik şekli, yapısında kullanılan malzemenin kimyasal, fiziksel, elektriksel özellikleri, gelen elektromanyetik dalganın frekansı gibi faktörlere bağlıdır.

Bu tezin amacı, bahsedilen mikrodalga soğurucularının soğurma performansını iyileştirmektir. Ancak bu iyileştirmeyi yaparken temel amaç yapılarında kullanılan malzemelerin kimyasal, elektriksel vb. özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapmadan, yalnızca soğurucu geometrisine yönelik iyileştirmeler yaparak soğurma performansını arttırmaktır. Bu iyileştirmeleri yaparken soğurucu performansının analizinde kullanılan yöntemlerde de iyileştirmelerin yapılması hedeflenmiştir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

### **1.2.1 EM dalga soğurucuların tarihçesi**

EM dalga soğurucularla ilgili ilk çalışmalar 1930'lu yılların ortalarında başlamıştır. Bu çalışmalar uygulamaya yönelik çalışmalar değil daha çok teorik ve deneysel çalışmalardı. Bilinen ilk patenti alınmış EM soğurucu Hollanda'da geliştirilen çeyrek

dalga rezonans tipi bir soğurucudur. Bu soğurucu 1936 yılında patenti alınmış, 2 GHz frekans bandı için tasarlanmış bir soğurucudur [24].

EM soğurucuların yansız odalardaki ilk kullanımını 1950'li yıllarda olmuştur. Mikrodalga frekanslarında serbest uzay ortamının benzerini oluşturmak için kullanılmışlardır. Doğrusal bir geometrik şekle sahip kademeli soğurucular (Gradually tapered) olarak adlandırılan soğurucular ise geniş bantlı soğurma performansı elde etmek için II. Dünya Savaşı yıllarında kullanıldı [24, 25]. Bu tip soğurucular kama veya piramit şeklinde bir geometrik şekle sahip, tepe noktasından itibaren soğurucu tabanına kadar doğrusal bir geometrik değişim gösteren soğuruculardır. Bu özellikleri ile serbest uzay ve soğurucu tabanı arasında empedans uyumu sağlarlar. Piramit şeklindeki soğurucu, empedans uydurma tekniği kullanılarak geliştirilmiş ilk geniş bantlı soğurucudur. Neher bu soğurucuyu II. Dünya Savaşı yıllarında geliştirmiş ve patentini almıştır [26-30]. Bu tür geniş bantlı soğurucuların karakteristik empedansı serbest uzayın empedansından kayıplı ortamın taban empedansına kadar kademeli olarak değişmektedir.

Geçmişte piramit (pyramidal), kama (wedge), kesik kama (truncated wedge), kavisli kama (curved wedge), testere dişli kama (serrated wedge) vb. gibi bazı soğurucular geliştirilmiştir. Bu soğurucular kademeli soğurucu temel alınarak geliştirilmiş soğuruculardır [31]. Uzun yıllar önce geliştirilmiş olmalarına rağmen kama veya piramit tipi soğurucular günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kama veya piramit tipi soğurucular oldukça iyi soğurma performansına sahip en başarılı soğurucu geometrilerindendir.

### 1.2.2 EM soğurucular

EM soğurucunun boş uzayda bulunduğu varsayılırsa, iki ortam sınırına gelen elektromanyetik dalganın hangi oranda geri yansıdığını belirten yansımaya katsayısı aşağıdaki gibi verilebilir [32-36].

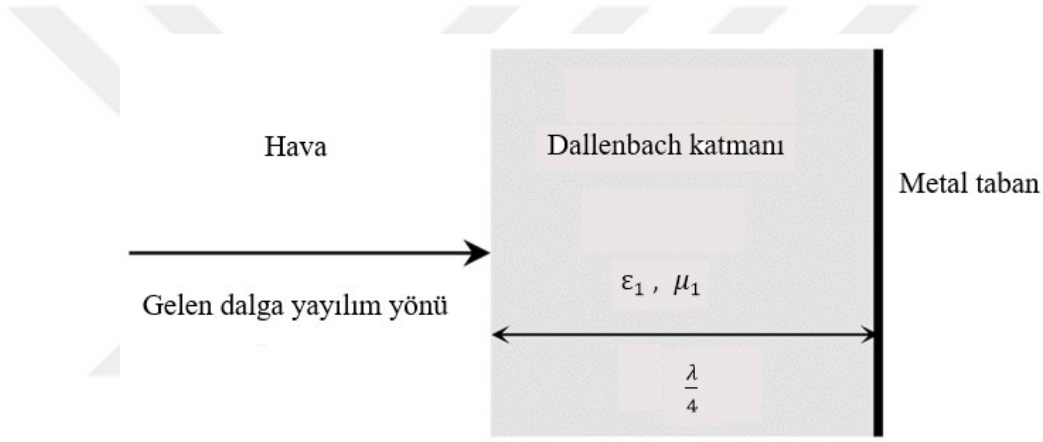
$$\Gamma = (Z_M - Z_0)/(Z_M + Z_0) \quad (1.1)$$

Burada  $Z_0$  boş uzayın karakteristik empedansı ve  $Z_M$  soğurucunun karakteristik empedansını ifade etmektedir.

Soğurucular, temel olarak iki ana sınıfta değerlendirilebilirler. Bunlardan ilki genellikle belirli bir rezonans frekansında ve oldukça dar bir frekans bandında çalışan

rezonans soğurucularıdır. Soğurma performansının en iyi olduğu frekans, soğurucu kalınlığının, gelen elektromanyetik dalganın dalga boyunun dörtte birine eşit olduğu frekanstır. II. Dünya Savaşı sırasında ve hemen sonrasında geliştirilen Dallenbach akortlu katmanı (Dallenbach Tuned Layer), Salisbury ekranı (Salisbury Screens) ve Jaumann katmanı (Jaumann Layers) bu türden soğurucular arasındadır. Günümüzde popüler olan metamalzeme soğurucular da rezonans soğurucular arasında sayılabilir.

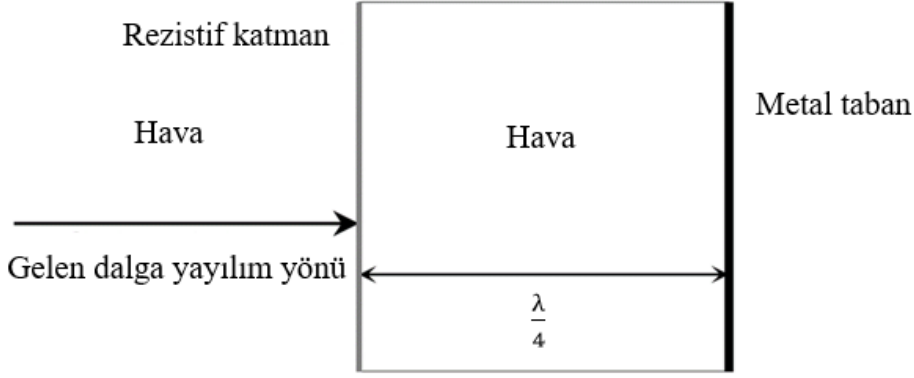
Dallenbach katmanı, Şekil 1.1’de görüldüğü gibi metal taban üzerine dalga boyunun dörtte biri kalınlıkta, kompleks dielektrik ve manyetik sabitli yüksek kayıplı bir katmanın eklenmesiyle oluşturulmuştur. Kayıplı malzeme katmanının kalınlığı, dielektrik ve manyetik özellikleri değiştirilerek istenilen frekanstaki EM dalganın soğurulması sağlanabilir [2, 37].



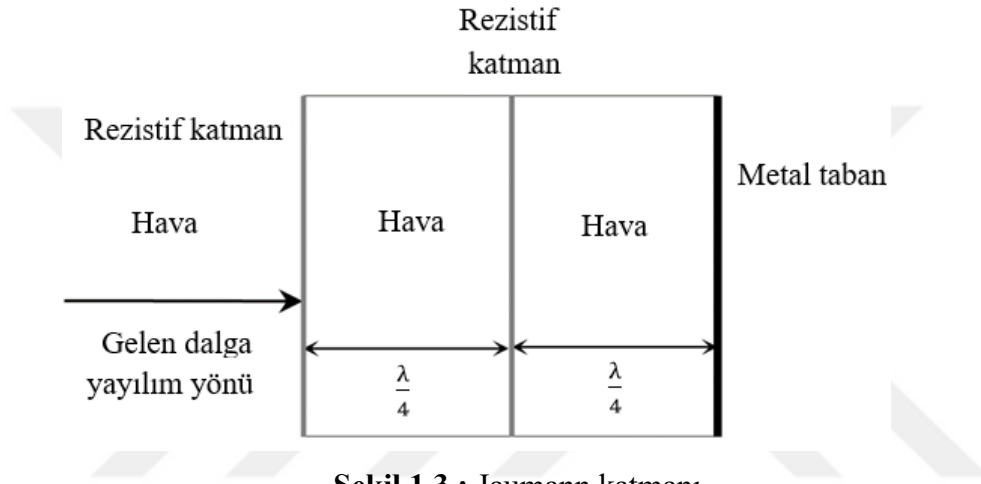
Şekil 1.1 : Dallenbach katmanı.

Salisbury ekranı, 1952 yılında patenti alınmış, metal yansıma yüzeyinden çeyrek dalga boyu mesafeye 377 ohm / square dirence sahip bir rezistif kaplama eklenerek geliştirilmiş bir soğurucudur. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi yansıtıcı yüzey ile rezistif kaplama arasında bir hava boşluğu mevcuttur ancak bu amaçla düşük dielektrik geçirgenliğe sahip bir malzeme de kullanılabilir [38-40].

Jaumann katmanı, Salisbury ekranı temel alınarak geliştirilen ve band genişliği Salisbury ekranına göre daha fazla olan bir rezonans soğurucu türüdür. Band genişliğini arttırmak için Salisbury ekranındakinden farklı olarak Şekil 1.3’te görüldüğü gibi metal tabanın üzerine dalga boyunun dörtte biri aralıklarla birbirinden ayrılmış çoklu rezistif katmanlar ilave edilmiştir [41-44]. Band genişliğinin bu şekilde artırılmasının dezavantajı ise soğurucu kalınlığının artmasıdır.



**Şekil 1.2** : Salisbury ekranı.



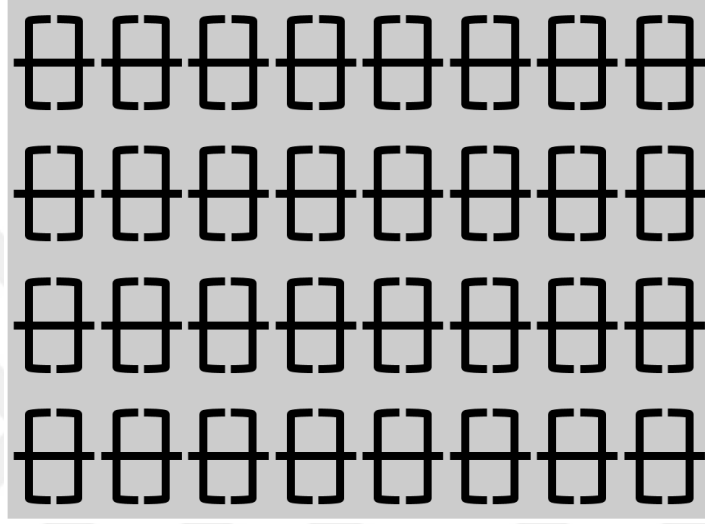
**Şekil 1.3** : Jaumann katmanı.

Metamalzeme soğurucular geleneksel soğuruculara göre hem daha küçük boyutlu oluşları hem de performanslarının iyiliği sebebiyle yoğun ilgi görmektedirler [45-49]. Metamalzemeler, hem negatif dielektrik sabitine hem de negatif manyetik geçirgenliğe sahip malzemelerdir. Negatif dielektrik sabiti iletken şeritler ve negatif manyetik geçirgenlik split-ring rezonatörler (SRR) kullanılarak sağlanabilir [50-56]. SRR dizileri rezistif bir katmanın arkasında kullanılarak SRR temelli soğurucu elde edilebilir [57-60]. Rezistif katmanı bulunmayan metamalzeme soğurucular 1-boyutlu manyetik ve elektrik rezonatörler kullanılarak tasarlanabilirler [61]. Bu tür bir soğurucuyla hem empedans uyumu hem de soğuruculuk sağlamak mümkündür. Şekil 1.4'te bu tür bir örnek metamalzeme soğurucu görülmektedir.

İkinci ana soğurucu sınıfı ise kademeli dielektrik soğuruculardır. Kademeli soğurucular, yansımanın en az seviyede olması için, gelen EM dalganın ortamı ile soğurucu ortam arasındaki empedans geçişinin kademeli bir geçiş olması esasına göre oluşturulmuşlardır. Soğurucu kalınlığının bir veya daha fazla dalga boyu kalınlığında yapılması, gelen dalganın hemen hemen tamamen soğurulmasını sağlar. Ancak bu

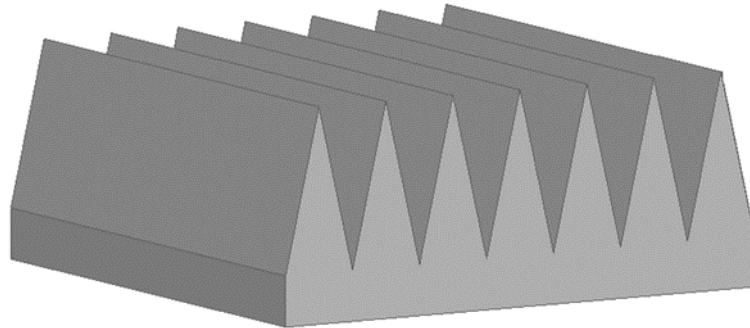


durumda soğurucu oldukça fazla yer kaplayan ve ağırlığı fazla olan bir soğurucu olacaktır. Kademeli soğurucular genel olarak iletkenlik katılmış (karbon katkılanmış) veya emdirilmiş poliüretan köpük malzemeden yapılırlar. Kademeli empedans değişimi ise soğurucunun geometrik şekli ile (kama, piramit vb.) veya katmanlarının karbon katkılama oranları değiştirilerek elde edilir. Piramit veya kama soğurucular, değişken yüklü soğurucular (Tapered Loading) soğurucular, uydurma katmanlı soğurucular (Matching Layer) bu türden soğuruculardır [2, 62-65].



Şekil 1.4 : Örnek bir metamalzeme yapısı.

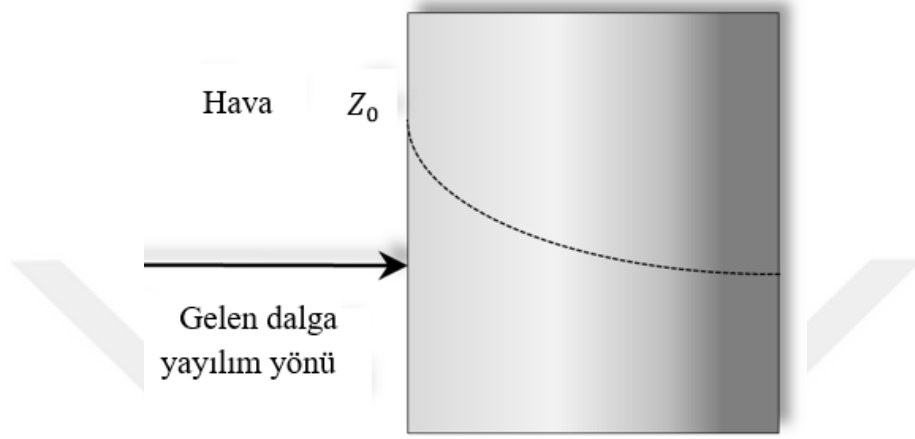
Kama veya piramit şeklindeki soğurucular, soğurucunun tepe noktasından taban noktasına kadar kademeli bir empedans geçişi sağlarlar. Boşluğun empedans değerinden soğurucu malzemenin empedans değerine kademeli empedans geçişi, gelen EM dalganın geri yansımadan soğurucu malzemeye geçişini sağlar [2, 66-69]. Şekil 1.5’te örnek bir kama soğurucu görülmektedir.



Şekil 1.5 : Örnek bir kama soğurucu.

Değişken yüklü soğurucular Şekil 1.6’da görüldüğü gibi gelen dalganın, ortam empedansına yakın bir empedans değerine sahip düşük kayıplı ön yüzden arka bölüme

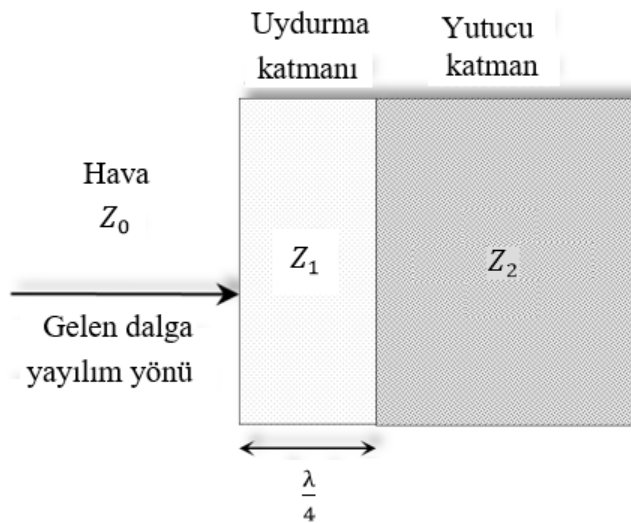
doğru empedans değeri ve kaybı kademeli olarak artarak değişen bir yapıdadır. Gelen dalğanın ortam empedansına yakın empedanslı düşük kayıplı homojen bir katmandan başlayarak, empedansı kademe kademe artan daha yüksek kayıplı homojen katmanlardan da oluşabilir. Bu tür soğurucular piramit veya kama türü soğuruculara göre daha ince olmalarına rağmen piramit veya kama soğurucuların soğurma performansı daha iyidir.



**Şekil 1.6 :** Değişken yüklü soğurucu (tapered loading absorber).

Uydurma katmanlı soğurucu, Şekil 1.7’de görüldüğü gibi gelen elektromanyetik dalğanın ortam empedansı ile soğurucu malzemenin empedansı arasında, iki ortamın empedansını uyduran çeyrek dalga boyu genişlikte bir geçiş katmanı eklenerek oluşturulur. Bu geçiş katmanının empedansı aşığıdaki gibi verilir.

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 \cdot Z_2} \quad (1.2)$$



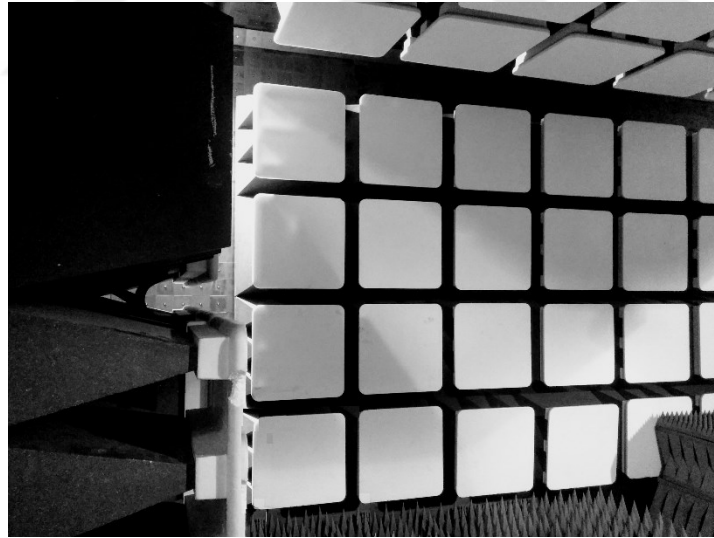
**Şekil 1.7 :** Uydurma katmanlı soğurucu.

Ancak empedans uydurma katmanının çeyrek dalga boyundaki kalınlığı hangi frekans değeri için oluşturulmuşsa, soğurucu o frekans değerinin civarındaki dar bir frekans bandında iyi soğurma sağlar.

### 1.2.3 Yansımaz odalar

Yansımaz odalar, tüm iç duvarları istenmeyen bozucu işaretleri soğuran soğurucu malzemeyle kaplanmış elektromanyetik olarak ekranlanmış, EMC, EMI, ARP ve RCS ölçümlerinde kullanılan odalardır [70]. Genellikle UHF ve daha yüksek frekanslardaki ölçümlerde kullanılırlar [25].

Kullanılan soğurucular, yapılarında kullanılan malzemelerin kimyasal, fiziksel, elektriksel özelliklerine veya geometrilerine bağlı olarak elektromanyetik dalgaları soğuran, yansıma katsayıları oldukça düşük yapılardır. Soğurucularla kaplanmış bir yansımaz oda, bu özellikleriyle, hiçbir girişimin olmadığı ideal ölçüm ortamına sahip açık bir alanda yapılabilecek ölçümlerin kapalı bir ortamda yapılabilmesini, başka bir ifadeyle açık alan şartlarını sağlar. Şekil 1.8’de tavan, taban ve duvarları soğurucu ile kaplanmış bir yansımaz oda görülmektedir.



Şekil 1.8 : Soğurucu kullanılan bir yansımaz oda.

Mikrodalga soğurucular ve yansımaz odalarla ilgili en fazla gelişme 1950’li yılların başında kaydedilmiştir. 1953 yılında anten ölçümleri araştırması ve ölçümleri sırasında ilk yansımaz odalar oluşturulmaya başlandı [24].

Bina içi ölçümlerin doğruluğunu arttırmak için dikdörtgen şeklindeki bir yansımaz odanın duvarlarını, panel şeklindeki soğurucular yerine uzun piramit şeklindeki soğurucu yapılarla kaplama fikri yine savaş yıllarında ortaya çıkmıştır. Piramit

şeklindeki soğurucudan yansıyan işaret seviyesinin, panel şeklinde bir soğurucudan yansıyan işaret seviyesinden çok daha düşük olduğu gösterilmiştir [27].

### 1.3 Hipotez

Kama tipi soğurucu geometrisi EMC / EMI testlerinde sıklıkla kullanılan soğurucu şekillerindedir [71]. Kama şekli serbest uzayın empedans değerinden soğurucu tabanının empedans değerine kadar oldukça iyi empedans uyumu sağlamaktadır. Düzgün empedans değişimi, kama soğurucunun, minimum yansımayı sağlayacak şekilde bir empedans uydurucu devre gibi davranmasını sağlamaktadır [69]. Aynı zamanda, gelen EM dalga geri yansımadan önce kama soğurucunun birbirine komşu yüzeyleri arasında defalarca yansımaya uğramaktadır. EM dalga enerjisinin büyük bölümünü kama geometrisinin avantajından kaynaklanan çok sayıda yansıma nedeniyle kaybetmektedir [24].

Bu tezde, daha iyi empedans uyumu sağlayabilecek soğurucu geometrileri elde etme yöntemleri incelenmiştir. Diğer bir ifadeyle, gelen EM dalganın geri yansımadan önce soğurucu yüzeyleri arasında çok sayıda yansımaya uğrayarak enerjisinin büyük bölümünü kaybetmesini sağlayacak soğurucu geometrileri elde edilmeye çalışılmıştır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1 Amaç

EM dalga soğurucular ve yansız odalarda kullanımı, elektromanyetik dalga soğurucuların tasarlanma amaçları, farklı soğurucu türleri ve çalışma prensipleri araştırılmış, bu soğurucularla ilgili çalışmalar incelenmiştir. Yansız odaların kullanım amacı ve gelişimi, yansız oda iç yüzeylerinde sıklıkla kullanılan bu çalışmada karşılaştırma yapmak amacıyla referans yapı olarak ele alınan kama tipi soğurucunun tasarım prensipleri ve bu konularla ilgili çalışmalar ele alınmıştır. EM dalga saçılması problemlerinin çözümünde kullanılan PMM yöntemi [19] çalışması temel alınarak ayrıntılı olarak incelenmiştir.

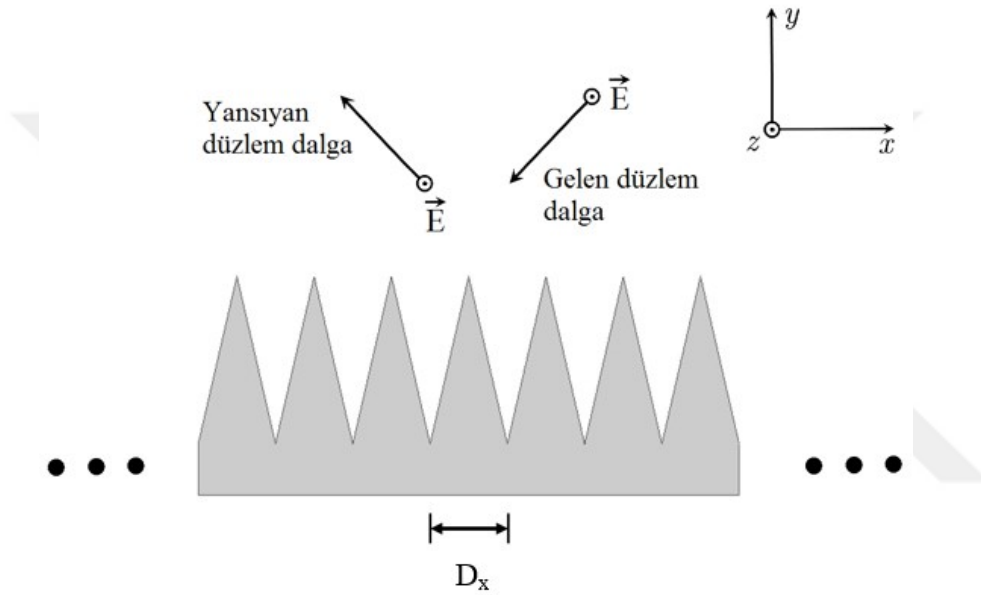
Periyodik soğurucu yapıların analizini yapmak amacıyla PMM yöntemini temel alan bir MATLAB programı yazılmıştır. Bu program yardımıyla referans soğurucu yapı analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar [19] çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılarak yazılan MATLAB programının doğru sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir. İçbükey soğurucu yapının dışbükey ve kama tipi soğurucu yapıdan daha iyi sonuçlar sağladığı gösterilerek farklı içbükey soğurucu yapılara ait yüzey fonksiyonlarının elde edilmesi için bir yöntem önerilmiştir.

Önerilen yöntem uygun olarak farklı içbükey soğurucu yüzeylere ait analitik fonksiyon ifadeleri elde edilmiştir. Optimizasyon teknikleri kullanılarak yüzey fonksiyonlarının parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Bu soğurucu yapıların yansıma performansları ve kama tipi soğurucunun yansıma performansları karşılaştırılmıştır.

Elektrik alan vektörü soğurucu eksenine paralel (TM modu) düzlem EM dalgaya ait yansıma değerleri hesaplanmıştır. TM modu yansıma performansı değerleri TE modu değerlerinden daha kötü olduğu için çalışmada TM modu değerleri esas alınmıştır [72].

## 2.2 Periyodik Soğurucu Yapıdan Saçılan Elektrik Alan

Şekil 2.1’de zamana bağlı değişimi ( $e^{j\omega t}$ ) şeklinde kabul edilmiş ve bastırılmış TM polarizeli düzlem dalga, şekilde verilen koordinat eksenleri esas alınarak boşlukta, “x” eksenini doğrultusunda periyodik “z” eksenini doğrultusunda sonsuz uzun (tek-periyodik) kama şeklinde, özdeş, kayıplı dielektrik yüzeye çarpmaktadır. Gelen dalga şekilde gösterildiği gibi yansımaya uğramaktadır. Soğurucu yapının soğurma performansını gelen ve yansıyan dalgalardan elde etmek mümkündür. Periyodik moment yöntemi çözümü bu amaçla kullanılabilir sayısal çözüm yöntemlerinden biridir [73-76].



Şekil 2.1 : Bir boyutlu kayıplı periyodik yapıya gelen düzlem dalga.

Kayıplı dielektrik malzemeden oluşan soğurucu yapıdan saçılan alanlar ve hacim elektrik akımları arasındaki ilişki hacim eşdeğerliği teoremi kullanılarak (2.1) denklemindeki gibi ifade edilebilir [77].

$$\mathbf{J}^s = j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0)\mathbf{E} \quad (2.1)$$

Denklemdaki  $\mathbf{J}^s$  eşdeğer saçılan akımlar,  $\varepsilon$  malzemenin dielektrik katsayısı,  $\mathbf{E}$  kayıplı malzeme içindeki toplam elektrik alan,  $\varepsilon_0$  ise serbest uzayın dielektrik katsayısıdır. Serbest uzayda yayılan düzlem dalga  $\mathbf{E}^i$  gelen elektrik alanına sahiptir, soğurucu yapıya çarptıktan sonra saçılan ve serbest uzayda yayılan dalganın  $\mathbf{E}^s$  elektrik alanı  $\mathbf{J}^s$  saçılan akımları tarafından oluşturulur.

Elektrik alanı  $\hat{z}$  yönünde polarizeli (TM polarizasyonu) gelen dalganın elektrik alanı (2.2) denklemindeki gibi verilir.

$$\mathbf{E}^i(\mathbf{R}) = \hat{z}e^{-jk_0R} = \hat{z}e^{-jk_0(s_x x + s_y y)} \quad (2.2)$$

Bu denklemdeki  $\mathbf{k}_0 = k_0\hat{s}$  şeklinde,  $\hat{s} = \hat{x}s_x + \hat{y}s_y$  şeklinde ifade edilir ve gelen dalganın yayılım yönündeki birim vektörünü ifade etmektedir. Şekil 2.1’de referans olarak ele alınan soğurucu kamanın içindeki saçılan akımların  $\hat{z}$  bileşeni (2.3) denkleminde verilmiştir.

$$J_z^S = j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0)E_z \quad (2.3)$$

Soğurucu yapı periyodik olduğundan diğer kamaların herhangi bir noktasındaki saçılmış akımlarla referans kamanın eşdeğer noktasındaki akımlar arasında sadece belirli bir faz farkı kadar fark vardır. Şekil 2.1’deki durum için, n. soğurucu kamadaki saçılmış akım (2.4)’deki gibi verilir,

$$J_z^S(\mathbf{R}' + \hat{x}D_x n) = J_z^S(\mathbf{R}')e^{-jk_0 D_x n s_x} \quad (2.4)$$

Burada n, periyodik kamaların numarasını belirten bir tamsayıdır. Kamalar arası mesafe  $D_x$  ve referans kamanın kesitindeki pozisyon vektörü  $\mathbf{R}'$  ile gösterilmiştir. Periyodik yapıdaki düzlem dalga saçılmasını elde edebilmek için referans kamanın sonlu sayıdaki yeterince küçük hücrelerinin saçılan akımlarını belirlemek yeterlidir. Sonlu sayıda bilinmeyen değerleri bulunarak çözüm elde edilebilir.

### 2.3 Periyodik Moment Yöntemi (PMM)

Periyodik bir soğurucu yapıdan saçılan akımların oluşturduğu saçılmış elektrik alan, referans elemanın yüzey kesiti üzerinden integrasyonu ile elde edilen alanın sonsuz adet soğurucu yapı ve faz farkları dikkate alınarak toplanmasıyla (2.5) denkleminde verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\mathbf{E}^S(\mathbf{R}) = \hat{z}E_z^S(\mathbf{R}) = -\hat{z}\frac{Z_0}{2D_x} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \iint_{ref} \frac{e^{-jk_{\pm}(\mathbf{R}-\mathbf{R}')}}{r_y} J_z^S(\mathbf{R}') dx' dy' \quad (2.5)$$

Burada,  $\mathbf{R}' = (x', y')$ , referans kamanın kesitindeki saçılan akımların olduğu hücrelerin merkezi (kaynak noktası),  $\mathbf{R} = (x, y)$  ise saçılan alanın hesaplandığı noktadır. (2.5) denklemindeki  $\mathbf{k}_{\pm}$  vektörü saçılan dalğanın yayılım yönündeki birim vektördür ve (2.6) denkleminde verilmiştir.

$$\mathbf{k}_{\pm} = \hat{x} \left( s_x + \frac{i\lambda_0}{D_x} \right) k_0 \pm \hat{y} r_y k_0, y \cong y' \quad (2.6)$$

$$r_y = \begin{cases} \sqrt{1 - \left( s_x + \frac{i\lambda_0}{D_x} \right)^2}, & \left( s_x + \frac{i\lambda_0}{D_x} \right)^2 \leq 1 \\ -j \sqrt{\left( s_x + \frac{i\lambda_0}{D_x} \right)^2 - 1}, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.7)$$

$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$  boşluğun karakteristik empedansıdır.

Düzlem dalgaların sonsuz toplamı ve referans kamanın kesiti üzerinden alınan yüzey integraliyle hesaplanan alan formülünde düzlem dalğanın, formüldeki  $r_y$  gerçel iken yayıldığına,  $r_y$  sanal olduğunda ise zayıflayarak yok olduğuna dikkat edilmelidir. Düzlem dalga ile aydınlatılmış periyodik diziler için saçılmış uzak alan ( $y \rightarrow \pm\infty$ ) çözümü sonsuz toplam içindeki sadece gerçel  $r_y$  terimli yayılan düzlem dalgaların birleşimi ile elde edilebilir. Bu amaçla sonsuz toplam içindeki sanal  $r_y$  terimli zayıflayan düzlem dalgalar hesaba katılmadan sonlu sayıdaki yayılan düzlem dalga dikkate alınmalıdır. Ancak, yakın veya periyodik dizi içindeki saçılmış alanların hesaplanması için sonsuz toplamdaki zayıflayan düzlem dalgaların da dikkate alınması gerekir. Uygulama, bu türden yakın saçılmış alanların hesaplanmasında uygun sonuçlar elde etmek için, tüm yayılan dalgalar (gerçel  $r_y$  değerine sahip dalgalar) ve daha küçük  $|r_y|$  değerine sahip olan sonlu sayıdaki zayıflayan dalga dikkate alınır. (2.5) denklemindeki sonsuz toplam yakınsak bir seridir. Kamalar arası mesafe küçük olduğunda veya diğer bir ifadeyle periyot küçüldüğünde (2.7) ifadesindeki  $\lambda_0/D_x$  oranı daha büyük olur. Bunun sonucunda yayılan mod sayısı daha az olacağından sonsuz toplam daha hızlı yakınsar.

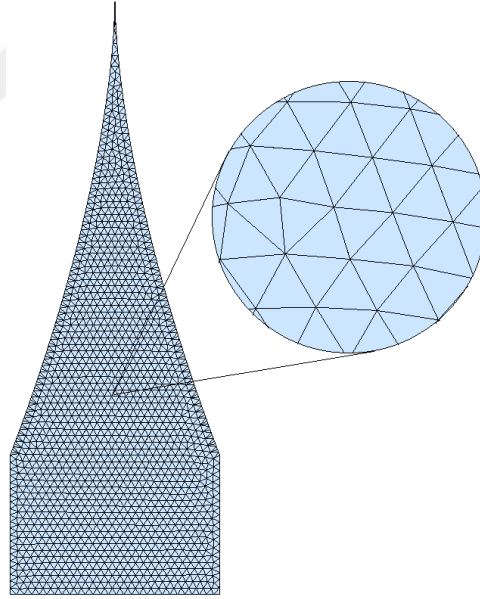


### 2.3.1 PMM çözümü

Toplam elektrik alan, saçılan alan ve gelen alan arasında  $-E^s + E = E^i$  bağıntısı yazılabilir. (2.1), (2.2) ve (2.5) ifadelerindeki toplam, gelen ve saçılan alan terimleri kullanılarak elde edilecek integral denklemin çözümüyle bilinmeyen  $J^s$  akımları elde edilebilir. Bu amaçla referans kama kesiti, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, N adet baz fonksiyonuna karşılık gelen N adet üçgen hücreye ayrılmıştır. Baz fonksiyonları (2.8) ifadesinde verilen darbe şeklindeki baz fonksiyonlarıdır.

$$J_{zn}^s = \begin{cases} \frac{1}{A_n}, & n. \text{ hücre içinde} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.8)$$

Burada  $A_n$ , n. hücrenin alanıdır. Darbe baz fonksiyonları kullanılarak referans kama kesiti üzerinden ayrıklaştırma yardımıyla her bir hücre için ayrı ayrı olmak üzere N adet lineer bağımsız denklem (2.9)’da verildiği gibi elde edilir.



Şekil 2.2 : Üçgen PMM hücreleri.

$$\sum_{n=1}^N I_n \left[ -E_{zn}^s(x_m, y_m) + \frac{J_{zn}^s(x_m, y_m)}{j\omega(\epsilon(x_m, y_m) - \epsilon_0)} \right] = e^{-jk_0(s_x x_m + s_y y_m)}, \quad (2.9)$$
$$m = 1, 2, \dots, N$$

(2.9) ifadesinde yer alan  $E_{zn}^s$  terimini (2.10)’da vermiştir.

$$E_{zn}^s(x, y) = -\frac{Z_0}{2D_x} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \iint_{ref} \frac{e^{-jk_{\pm}(R-R')}}{r_y} J_{zn}^s(\mathbf{R}') dx' dy' \quad (2.10)$$

Saçılan elektrik alan, toplam alan ve gelen alandan ayrıklaştırma ile elde edilen yukarıdaki (2.9) denklemi matris formunda (2.11)'de verilmiştir.

$$[Z + \Delta Z][I] = [V] \quad (2.11)$$

Matris formundaki ifadede yer alan I, V sütun vektörleri ile Z ve  $\Delta Z$  kare matrisleri (2.12), (2.13), (2.14) ve (2.15) ifadelerinde verilmiştir.

$$[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[V] = \begin{bmatrix} E_z^i(x_1, y_1) \\ E_z^i(x_2, y_2) \\ \vdots \\ E_z^i(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -E_{z1}^s(x_1, y_1) & -E_{z2}^s(x_1, y_1) & -E_{zN}^s(x_1, y_1) \\ -E_{z1}^s(x_2, y_2) & -E_{z2}^s(x_2, y_2) & -E_{zN}^s(x_2, y_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -E_{z1}^s(x_N, y_N) & -E_{z2}^s(x_N, y_N) & -E_{zN}^s(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Burada  $\Delta Z$  matrisinin köşegen matris olduğu ve toplam elektrik alanın her hücre için darbe baz fonksiyonları ile ayrıklaştırılmasından oluştuğu görülebilir.

$$[\Delta Z] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{j\omega(\varepsilon(x_1, y_1) - \varepsilon_0)A_1}{0} & \frac{1}{j\omega(\varepsilon(x_2, y_2) - \varepsilon_0)A_2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{1}{j\omega(\varepsilon(x_N, y_N) - \varepsilon_0)A_N} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

(2.11) ifadesinin her iki tarafı soldan  $Z+\Delta Z$  matrisinin tersi ile çarpılarak bilinmeyen akım vektörü (2.16) ifadesinde verildiği gibi elde edilir.

$$[I] = [Z + \Delta Z]^{-1}[V] \quad (2.16)$$

Saçılan alan, akım vektörü kullanılarak bulunabilir. (2.8), (2.10) ve (2.14)'ten darbe bazlı ve nokta-uyumlu formülasyon için empedans elemanları (2.17)'deki gibi verilir,

$$Z_{mn} = -E_{zn}^s(\mathbf{R}_m) = \frac{Z_0}{2D_x A_n} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \iint_{\text{hücre } n} \frac{e^{-jk_{\pm}(\mathbf{R}_m - \mathbf{R}')} }{r_y} dx' dy' \quad (2.17)$$

$\mathbf{R}'$  referans kama içindeki  $(x', y')$  merkezli, kaynak noktası olan n. hücrenin pozisyon vektörü,  $\mathbf{R}_m$  referans kama içindeki  $(x, y)$  merkezli, saçılan alanın hesaplanacağı nokta olan m. hücrenin pozisyon vektörü olduğundan (2.17) denklemi (2.18)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$Z_{mn} = \frac{Z_0}{2D_x A_n} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-jk_0 x r_x}}{r_y} \iint_{\text{hücre } n} e^{jk_0(x' r_x - |y-y'| r_y)} dx' dy' \quad (2.18)$$

Normal geliş durumu için  $s_x = 0$  olacağından  $r_x = i \frac{\lambda}{D_x}$  olarak alınabilir. Bu durumda sonsuz toplam ifadesindeki negatif ve pozitif terimleri ayrı ayrı hesaplamak yerine sadece pozitif terimler hesaplanıp negatif terimler için  $r_x$  yerine  $(-r_x)$  koyularak negatif terimler kolayca elde edilebilir ve hesaplama zamanı yaklaşık olarak yarı yarıya azaltılabilir. Pozitif terimler için hesaplanan  $r_y$  değerlerinin negatif terimler için de aynen kullanılabileceği açıktır. Bu durumda,

$$\begin{aligned} Z_{mn} = & \frac{Z_0}{2D_x A_n} \left[ \iint_{\text{hücre } n} e^{-jk_0 |y-y'| r_y} dx' dy' \right. \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-jk_0 x r_x}}{r_y} \iint_{\text{hücre } n} e^{jk_0(x' r_x - |y-y'| r_y)} dx' dy' \right. \\ & \left. \left. + \frac{e^{jk_0 x r_x}}{r_y} \iint_{\text{hücre } n} e^{-jk_0(x' r_x + |y-y'| r_y)} dx' dy' \right) \right] \quad (2.19) \end{aligned}$$

olarak elde edilir. Eğik geliş durumunda ise (2.18) denkleminin kullanılması gereklidir.

Akım vektörü bulunduğundan sonra saçılan uzak alanın hesaplanması yeteri kadar uzak bir noktada her hücrenin bu noktadaki saçılan alanının vektörel olarak toplanmasıyla bulunur. Aşağıdaki denklemde  $[Z]$  bir satır vektörü,  $[I]$  ise bir sütun vektörü olduğundan elde edilecek saçılan alanın bir skaler olacağı açıktır.

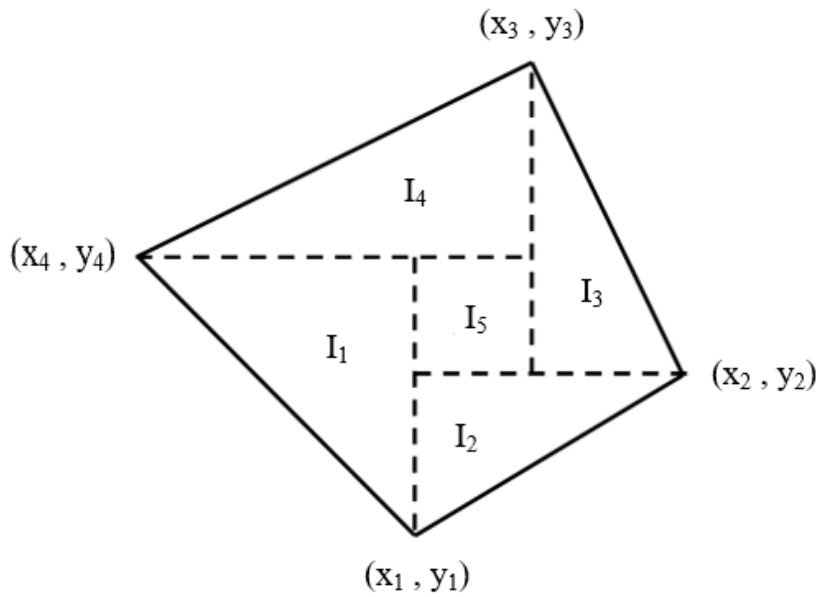
$$E^s = -[Z][I] \quad (2.20)$$

$$[Z] = [Z_{11} \ Z_{12} \ Z_{13} \ \dots \ Z_{1N}] \quad (2.21)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_N \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

### 2.3.2 PMM empedans matrisi için kapalı form integralin hesaplanması

Çift katlı integralin çözümü genel üçgen hücre üzerinden kapalı form çözüm uygulanarak elde edilmiştir. Önceki çalışmalardan [19] çalışmasında kapalı form çözüm alt ve üst kenarları birbirine paralel dörtgen (quadrilateral) hücreler üzerinden integrasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Şekil 2.3'te verilen genel bir dörtgen hücre için integrasyon, hücre dört adet dik üçgen ve bir adet kareye bölünüp, her bir parçanın çift katlı integral çözümleri toplanarak elde edilmiştir.



Şekil 2.3 : Bir-boyutlu PMM için genel dörtgen hücre.

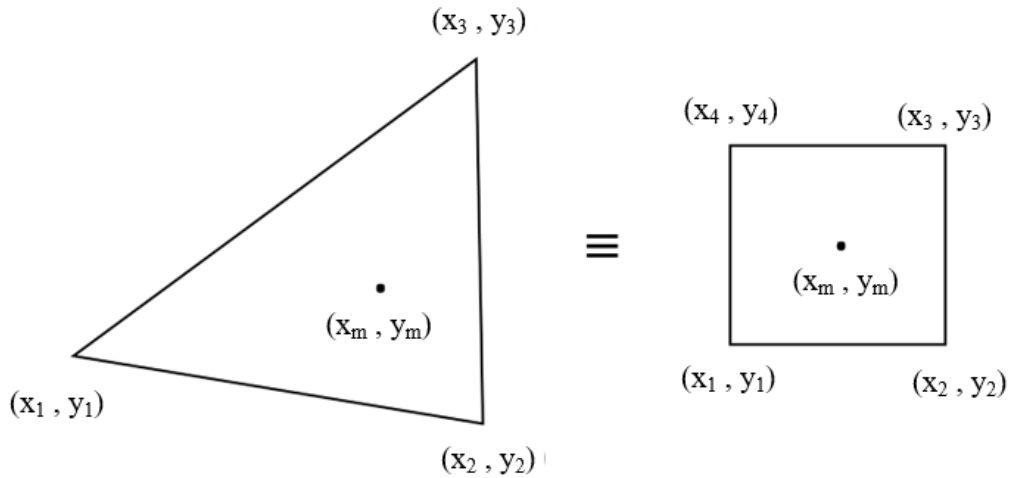
$$I = \iint_{cell\ n} e^{jk_0(x'r_x - |y-y'|r_y)} dx' dy' = \sum_{l=1}^5 I_l \quad (2.23)$$

Ancak üçgen parçaların her biri için integral sınırlarından biri doğru denklemi olacağından bu integrallerin ayrı ayrı hesaplanması oldukça fazla zaman gerektirecektir.

Bu çalışmada dörtgen hücre yerine Şekil 2.4'te gösterildiği gibi üçgen hücreler kullanılmış ve direkt olarak üçgen hücrenin alanına eşit, hücre merkezi aynı olan bir kare üzerinden çift katlı integraller hesaplanmıştır. Böylece sadece bir tane çift katlı integral hesaplanarak çözüm daha kısa sürede ve daha basit şekilde bulunmuştur. Kare hücre kullanıldığında integral sınırları doğru denklemi yerine sabit sayılar olacağından çözüme ulaşmak daha kolay olacaktır. Kare hücrenin kenar uzunluğu,  $n$ . üçgen hücrenin alanı  $A_n$  olmak üzere,  $\sqrt{A_n}$  olarak elde edilir. Bu durumda üçgen hücreye eşdeğer olarak alınan kare hücrenin kenar koordinatları,

$$\begin{aligned} (x_1, y_1) &= (x_m - \sqrt{A_n}/2, y_m - \sqrt{A_n}/2) \\ (x_2, y_2) &= (x_m + \sqrt{A_n}/2, y_m - \sqrt{A_n}/2) \\ (x_3, y_3) &= (x_m + \sqrt{A_n}/2, y_m + \sqrt{A_n}/2) \\ (x_4, y_4) &= (x_m - \sqrt{A_n}/2, y_m + \sqrt{A_n}/2) \end{aligned} \quad (2.24)$$

olarak verilir.



Şekil 2.4 : Bir-boyutlu PMM için genel üçgen hücre.

Burada  $(x_m, y_m)$  hücrelerin merkez koordinatını göstermektedir. Kare hücrenin kenar koordinatlarında  $x_1 = x_4$  ve  $y_3 = y_4$  olduğu açıktır. Çift katlı integralin kare hücre üzerinden integrali aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I = \int_{y_2}^{y_4} \int_{x_1}^{x_3} e^{jk_0(x'r_x - |y-y'|r_y)} dx' dy' \quad (2.25)$$

integraller aşağıdaki gibi ayrılırsa,

$$I = \int_{x_1}^{x_3} e^{jk_0x'r_x} dx' \int_{y_2}^{y_4} e^{-jk_0|y-y'|r_y} dy' \quad (2.26)$$

elde edilir. Burada ilk integrali,

$$I_{x'} = \int_{x_1}^{x_3} e^{jk_0x'r_x} dx' \quad (2.27)$$

ve ikinci integrali,

$$I_{y'} = \int_{y_2}^{y_4} e^{-jk_0|y-y'|r_y} dy' \quad (2.28)$$

ve,

$$I = I_{x'} I_{y'} \quad (2.29)$$

olarak ifade edersek,

$$I_{x'} = (x_3 - x_1) e^{jk_0 r_x} EC[jk_0 r_x (x_3 - x_1)] \quad (2.30)$$

olarak verilir.  $I_{y'}$  ise  $y \geq y_1$  ve  $y_4$  için,

$$I_{y'} = e^{-jk_0 r_y |y-y_2|} (y_4 - y_2) EC[\pm jk_0 r_y (y_4 - y_2)] \quad (2.31)$$

diğer durumlarda,

$$I_{y'} = (y - y_2)EC(-jk_0|y_2 - y|r_y) + (y_4 - y)EC(-jk_0|y_4 - y|r_y) \quad (2.32)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$EC[x] = \frac{e^x - 1}{x} \quad (2.33)$$

ve,

$$\lim_{x \rightarrow 0} EC[x] = 1 \quad (2.34)$$

Z matrisi hesaplandıktan sonra I matrisi Z ve ΔZ matrisleri kullanılarak  $[I] = [Z + \Delta Z]^{-1}[V]$  ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada karşılaşılan bir diğer sorun, I matrisinden saçılan uzak alan ifadesinin nasıl elde edileceğidir. Yararlanılan kaynakta uzak alan ifadesinin açık formülasyonu verilmemiştir.

Programda uzak saçılmış alan hesaplanırken uzak alan değeri aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır.  $J_z^s$  matrisi I matrisi ve  $J_{zn}^s$  matrisleri kullanılarak (2.35) bağıntısından hesaplanmıştır.

$$J_z^s = \sum_{n=1}^N I_n J_{zn}^s \quad (2.35)$$

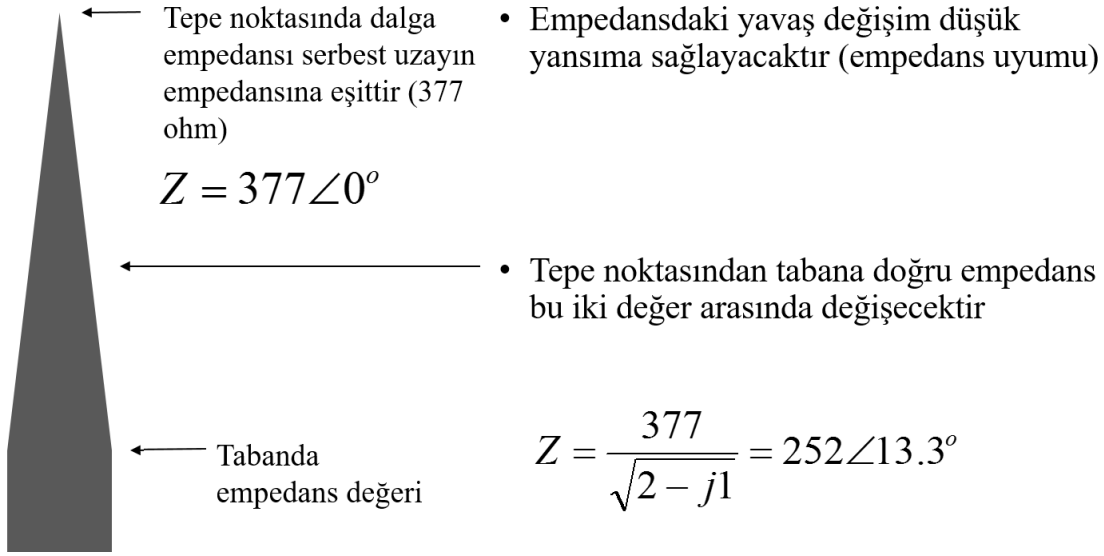
Hesaplanan  $J_z^s$  değeri, aşağıdaki (2.36) denklemdeki yüzey integrali toplam haline dönüştürülerek yerine konulmuş ve saçılan alan hesaplanmıştır. Yüzey integralindeki R vektörü saçılmış alanın hesaplandığı gözlem noktası, R' vektörü ise her hücrenin merkezini gösteren kaynak noktasıdır.

$$E^s(R) = \hat{z}E_z^s(R) = -\frac{\hat{z}Z_0}{2D_x} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \iint_{\text{ref}} \frac{e^{-jk_{\pm}(R-R')}}{r_y} J_z^s(R') dx' dy' \quad (2.36)$$

## 2.4 Yansıma Performansının Empedans Geçişi ile İlişkisi

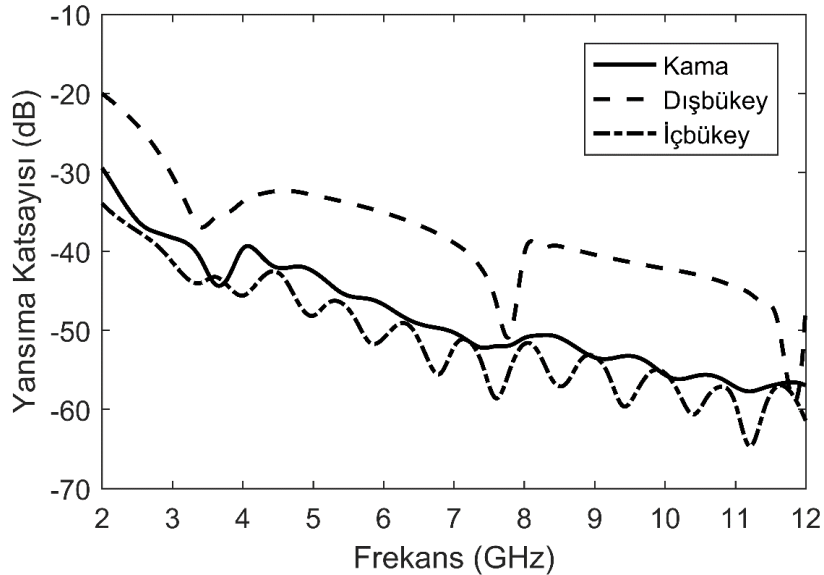
Mikrodalga soğurucular, gelen elektromanyetik dalganın mümkün olduğunca yansıma olmayacak şekilde soğurulması için hava veya serbest uzayın empedansından soğurucunun empedansına doğru düzgün bir empedans geçişine sahip olmalıdırlar [31, 78]. Kama veya piramit tipi soğurucular doğrusal olarak değişen bir geometrik şekle

ve düzgün empedans geçişine ve empedans uyumuna sahip olduklarından oldukça iyi yansıma performansları vardır.



**Şekil 2.5 :** Kama ve piramit türü soğurucuların çalışma prensibi

Doğrusal olmayan geometrik şekle sahip soğurucuların empedans geçişi, empedans uyumu ve yansıma performansı farklı olacaktır. Şekil 2.6'da kama, dışbükey ve içbükey geometrik şekle sahip soğurucuların yansıma performanslarının karşılaştırması, aralarındaki farkları belirtmek için verilmiştir.



**Şekil 2.6 :** Kama, dışbükey ve içbükey soğurucuların yansıma performansları.

Elde edilen sonuçlardan, kama tipi soğurucunun yansıma performansının dışbükey geometrik şekle sahip soğurucunun yansıma performansından daha iyi olduğu görülmektedir. İçbükey geometrik şekle sahip soğurucunun yansıma performansının



ise hem kama tipi hem de dışbükey soğurucudan daha iyi olduğu açıktır. İçbükey geometriye sahip soğurucu özellikle soğurucu tepesine yakın noktalarda daha iyi empedans geçişi sağlamaktadır. Polinom fonksiyonları, güç fonksiyonu, üstel fonksiyon gibi çeşitli içbükey fonksiyonlar kullanılarak oluşturulmuş soğurucu yapıların empedans geçişlerini, bu fonksiyonların katsayı ve parametrelerini optimize ederek iyileştirmek ve daha iyi yansıma performansı elde etmek mümkündür.

Diğer taraftan, soğurucu elemanların boyutu (kama vb.) dalga boyuna göre daha büyükse, gelen EM dalga geri yansımadan önce soğurucu yapının komşu yüzeyleri arasında defalarca yansımaya uğrayacaktır [9]. Böylece, her yansımada soğurucunun geometrisinden dolayı EM dalganın enerjisinin önemli bir kısmı soğurulacaktır [24].

## 2.5 Soğurucu Yüzey Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Bu bölümde “ $L$ ” periyotlu ve “ $h$ ” yüksekliğine sahip periyodik soğurucu yapı temel alınarak kama yüzeyine ait yüzey denklemi oluşturulmuştur. Kama yapı ile aynı periyot ve yüksekliğe sahip parabolik fonksiyon yüzeyi, güç fonksiyonu yüzeyi ve üstel fonksiyon yüzeyi gibi içbükey yüzeylere ait fonksiyonlar elde edilmiştir.

Şekil 2.1’de gösterilen yapıya benzer şekilde “ $L$ ” periyoduna ve “ $h$ ” yüksekliğine sahip herhangi bir kayıplı yapının merkezdeki referans elemanının kesitini ele alalım. Bu kayıplı yapının yüzeyini ifade eden fonksiyon  $[-L/2, L/2]$  aralığında “ $y$ ” eksenine göre simetrik iki parçaya sahiptir.  $[0, L/2]$  aralığındaki “ $x$ ” değişkenine bağlı fonksiyonun bilinmesi,  $[-L/2, 0]$  aralığındaki simetrik parçanın da bilinmesi demektir. Yüzey fonksiyonlarının elde edilmesinde bu yöntem izlenmiştir.

Daha iyi yansıma performansına sahip oldukları önceki bölümde açıklanan içbükey periyodik soğurucu yapıların yüzey fonksiyonları konkavlık teoremine uygun fonksiyonlardır. Bu teoremden yola çıkarak  $[0, L/2]$  aralığında ikinci türeve sahip herhangi bir  $f(x)$  fonksiyonu,  $f''(x) > 0$  şartını sağlıyorsa içbükey fonksiyondur. Fonksiyon  $f(0) = h$  ve  $f(L/2) \geq 0$  sınır koşullarını sağlar. Burada “ $h$ ” referans elemanın yüksekliğidir. Yukarıda bahsedilen polinom fonksiyonları, güç fonksiyonu, üstel fonksiyon gibi bazı içbükey fonksiyonlar konkavlık teoremini sağlarlar.

### 2.5.1 Kama yüzeyi

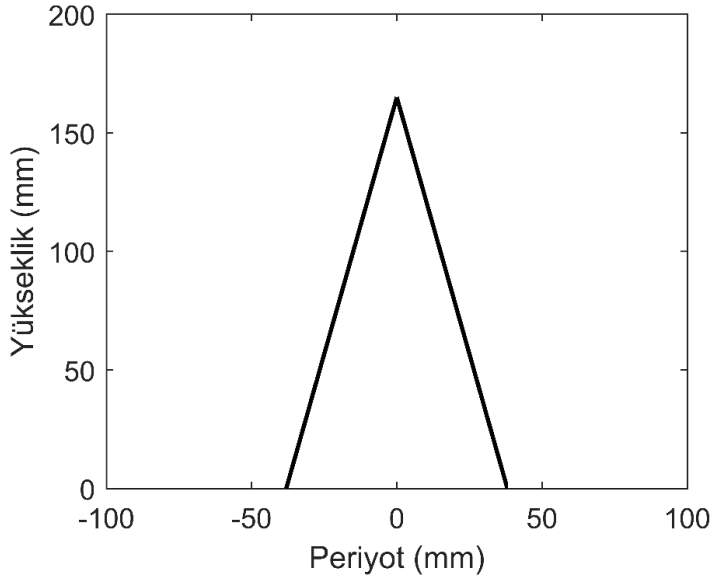
Yansımaz odalarda sıkça kullanılan kama tipi soğurucuların yüzey kesiti aşağıdaki gibi bir doğrusal fonksiyonla ifade edilebilir.

$$f(x) = ax + b \quad (2.37)$$

Yukarıdaki ifade doğrusal bir fonksiyonun genel ifadesidir. Yüksekliği “ $h$ ”, kama periyodu “ $L$ ” olan bir kama yüzeyi kesitini esas alırsak, bu fonksiyonun  $(0, h)$  sınır koşulunu sağlaması gerektiğinden,  $b=h$  olması gerektiği kolayca görülür. Kama yüzeyi kesitinin aynı zamanda  $(L/2, 0)$  sınır koşulunu da sağladığı göz önüne alınırsa  $a=-2h/L$  olarak elde edilir. Bu durumda fonksiyonun ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$f(x) = -\frac{2h}{L}x + h \quad (2.38)$$

Bu doğrusal yüzey kesiti ifadesi  $(0, L/2)$  aralığı için geçerlidir.  $(-L/2, 0)$  aralığı için ise, elde edilen doğrusal yüzey kesiti ifadesinin  $y$  eksenine göre simetriğinin bulunması gerekir. Yukarıda izlenen yöntemle benzer şekilde yüzey kesiti fonksiyonunun sağlaması gereken  $(0, h)$ ,  $(-L/2, 0)$  şartlarından,  $(-L/2, 0)$  aralığı için doğrusal yüzey kesitini ifade eden fonksiyon (2.39)’daki gibi bulunur.



Şekil 2.7 : Doğrusal yüzey kesiti.

$$f(x) = \frac{2h}{L}x + h \quad (2.39)$$

Aynı sonuca  $(0, L/2)$  aralığı için elde edilen fonksiyonun  $y$  eksenine göre simetriğini alarak da ulaşılabilir. Şekil 2.7’de  $h=165.1 \text{ mm}$  ve  $L=76.2 \text{ mm}$  için elde edilen doğrusal yüzey kesiti grafiği verilmiştir.

### 2.5.2 Parabolik yüzey

İkinci dereceden içbükey bir polinom fonksiyonunun konkavlık teoremine uygun bir şekilde  $[0, L/2]$  aralığında  $f''(x)=a$  gibi bir pozitif ikinci türeve sahip olduğunu varsayalım. Bu fonksiyonun ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$f(x) = \frac{a}{2}x^2 + bx + h \quad (2.40)$$

Bu fonksiyonun yerel minimumu  $[0, L/2]$  aralığında veya aralık dışında olabilir. Bu fonksiyon yerel minimumu  $[0, L/2]$  aralığının dışında olan ve  $f(0)=h$  ve  $f(L/2)=0$  sınır koşullarını sağlayan bir içbükey fonksiyon ise fonksiyonun ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

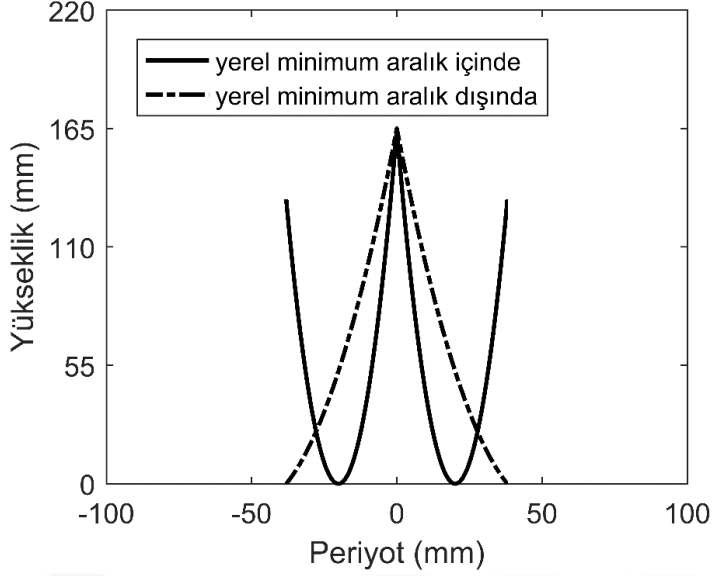
$$f(x) = \frac{a}{2}x^2 + \left(-\frac{aL}{4} - \frac{2h}{L}\right)x + h \quad (2.41)$$

Bu fonksiyon azalan bir fonksiyondur ve fonksiyonun birinci türevi  $(L/2, 0)$  noktasında  $-2h/L \leq f'(L/2) \leq 0$  şartını sağlar. Aynı zamanda “ $a$ ” değerinin  $0 \leq a \leq 8h/L^2$  şartını sağlaması gerekir.

Bu fonksiyon yerel minimumu  $(x_m, y_m)$ ,  $[0, L/2]$  aralığının içinde olan ifadesi aşağıdaki gibi olan bir içbükey fonksiyon ise  $f(x_m)=0$  ve  $f'(x_m)=0$  şartlarını sağlar. Aynı zamanda “ $a$ ” değeri  $a \geq 8h/L^2$  şartını sağlar.

$$f(x) = \frac{a}{2}x^2 - \sqrt{2ah}x + h \quad (2.42)$$

Aşağıdaki şekilde yerel minimumu  $[0, L/2]$  aralığı içinde ve dışında olan örnek parabolik fonksiyonlara ait grafikler görülmektedir.



Şekil 2.8 : Örnek parabolik fonksiyonlar.

### 2.5.3 Güç fonksiyonu yüzeyi

İçbükey bir yüzey fonksiyonu olan güç fonksiyonunun genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$f(x) = ax^m \quad (2.43)$$

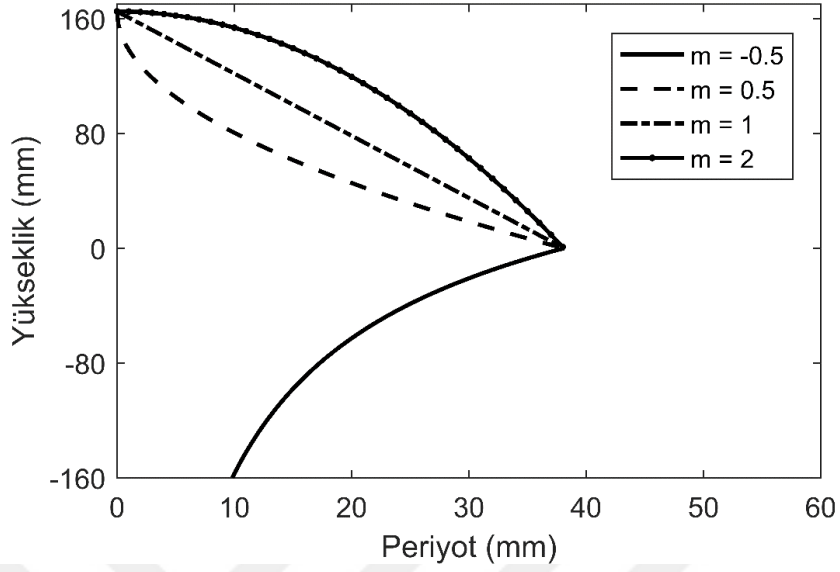
Burada “ $m$ ” ve “ $a$ ” sabit birer sayıdır. Bu güç fonksiyonunun  $f(0)=h$  ve  $f(L/2)=0$  sınır koşullarını sağlayacak şekilde düzenlenmesiyle aşağıdaki ifade elde edilir.

$$f(x) = -h(2x/L)^m + h \quad (2.44)$$

Şekil 2.9’den da görüleceği gibi farklı “ $m$ ” değerleri için farklı yüzey fonksiyonu grafikleri elde edileceği açıktır.

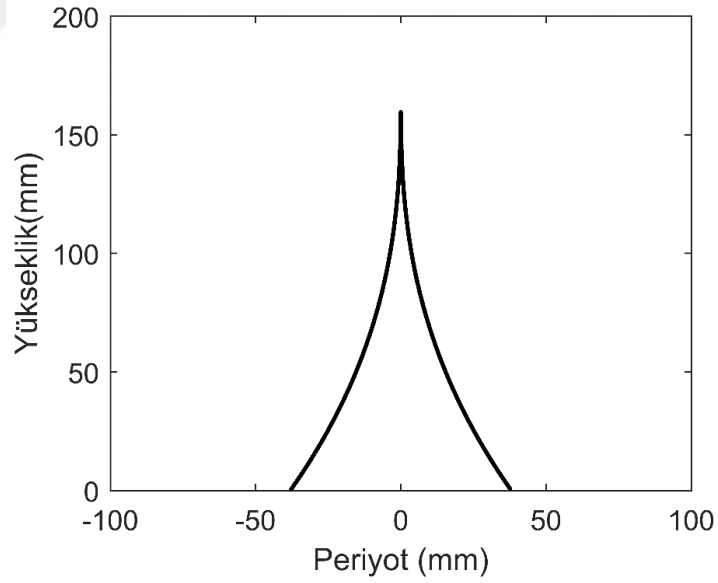
Fonksiyon grafiklerinden görüleceği üzere  $m \leq 0$  değerleri için elde edilen fonksiyonlar  $(0, h)$  noktasındaki sınır koşulunu sağlamamaktadırlar. Elde edilen grafiklerden  $m=1$  için  $(0, h)$  ve  $(L/2, 0)$  noktalarındaki sınır koşullarını sağlayan kama yüzeyinin elde edildiği görülmektedir. Fonksiyon grafiklerinden  $m > 1$  için elde edilenler dışbükey yüzeylere ait fonksiyon grafikleridir ve yansıma performansları içbükey yüzeylerden daha kötüdür. Güç fonksiyonu “ $m$ ” değerinin  $(0, 1)$  aralığında olduğu grafikler ise içbükey yüzeylere ait fonksiyon grafikleridir. Güç fonksiyonunun ifadesi  $[-L/2, L/2]$  aralığı için aşağıdaki şekilde verilir.

$$f(x) = -h(2|x|/L)^m + h \quad (2.45)$$



Şekil 2.9 : Farklı “m” değerleri için güç fonksiyonu grafikleri.

Şekil 2.10’da  $m=0.4$  olan örnek güç fonksiyonuna ait grafik görülmektedir.



Şekil 2.10 : Örnek güç fonksiyonu.

#### 2.5.4 Üstel fonksiyonun yüzeyi

Üstel türde bir fonksiyon da iç bükey bir yüzey fonksiyonudur. Üstel fonksiyonunun genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$f(x) = be^{mx} + c \quad (2.46)$$

veya

$$f(x) = b10^{mx} + c \quad (2.47)$$

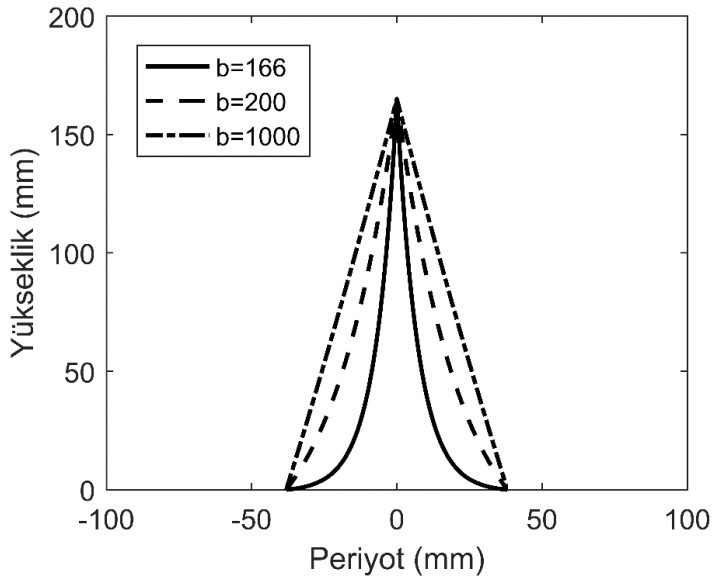
Üstel yüzey fonksiyonunun sağlaması gereken sınır koşulları da diğer yüzey fonksiyonları gibi  $(0, h)$  ve  $(L/2, 0)$  dir.  $(0, h)$  sınır koşulundan  $c=h-b$  ve  $(L/2, 0)$  sınır koşulundan  $m=(2/L)\ln(1-h/b)$  olarak bulunur. Böylece  $(0, h)$  ve  $(L/2,0)$  noktalarından geçen yüzeyin denklemi,

$$f(x) = be^{\ln(1-h/b)\frac{2}{L}x} + h - b \quad (2.48)$$

olarak elde edilir. Denklemdaki logaritmik ifadenin tanımlı olabilmesi için  $h/b$  oranının  $h < b$  şartını sağlaması gerektiği açıktır. Üstel fonksiyonunun  $[-L/2, L/2]$  aralığı için ifadesi aşağıdaki şekilde verilir.

$$f(x) = be^{\ln(1-h/b)\frac{2}{L}|x|} + h - b \quad (2.49)$$

Aşağıdaki şekilde farklı  $b$  değerleri için elde edilen farklı yüzey grafikleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.11** : Farklı  $b$  değerleri için üstel fonksiyon grafikleri.

Şekilden görüldüğü gibi “ $h/b$ ” oranının çok küçük olduğu durumlarda (büyük “ $b$ ” değerleri için) üstel fonksiyon yüzeyinin kama yüzeyine yakınsadığı görülmektedir.

“ $h/b$ ” oranının  $h/b < 1$  ancak  $l$ 'e çok yakın olduğu  $b=166$  değeri için elde edilen yüzey tam bir içbükey yüzeydir.

## 2.6 Soğurucu Yüzeylerin Optimizasyonu

İçbükey yüzey fonksiyonları kullanılarak elde edilen soğurucu yüzeyler MATLAB optimizasyon araçlarından “*fmincon*” yardımıyla en iyi soğurma performansını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Optimizasyon, verilen belirli koşullar altında en az yansımaya sağlayacak yüzey fonksiyonu parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Optimize edilecek soğurucu yüzeyin 2-12 GHz frekans bandı boyunca 1 GHz aralıklarla hesaplanan yansımaya katsayısı değerlerinin ortalaması minimize edilecek değer olarak ele alınmıştır. Optimize edilen soğurucunun belirlenen frekanslardaki yansımaya katsayısı değerlerinin geleneksel kama soğurucunun yansımaya değerlerinden daha düşük olması hedeflenmiştir. Bu amaçla referans olarak alınan geleneksel kama soğurucu yansımaya katsayısı değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1 :** Referans yansımaya katsayısı değerleri.

Frekans (GHz)	Yansımaya katsayısı (dB)
2	-29,4080866873824
3	-38,2494148171954
4	-39,6298333268949
5	-42,5087189270736
6	-46,7056268510641
7	-50,2476472237095
8	-50,9403352153495
9	-53,4039626695029
10	-55,6067363900982
11	-57,1195795658684
12	-56,9480640582895

Yerel minimumu  $[0, L/2]$  aralığı dışında olan parabolik fonksiyona sahip soğurucu yüzey için (2.41) denklemindeki “ $a$ ” parametresi optimize edilmiştir. Yerel minimumu  $[0, L/2]$  aralığı içinde olan parabolik yüzey fonksiyonuna sahip soğurucu yüzey için (2.42) denklemindeki “ $a$ ” parametresi optimize edilmiştir.

Güç fonksiyonu yüzeyinin optimizasyonu için (2.45) denklemindeki “ $m$ ” parametresi optimize edilmiştir.

Üstel fonksiyon yüzeyi optimize edilirken (2.46) denklemindeki “ $m$ ” parametresi değiştirilerek en az yansımanın sağlandığı “ $m$ ” değerine sahip üstel fonksiyon yüzeyi elde edilmiştir.





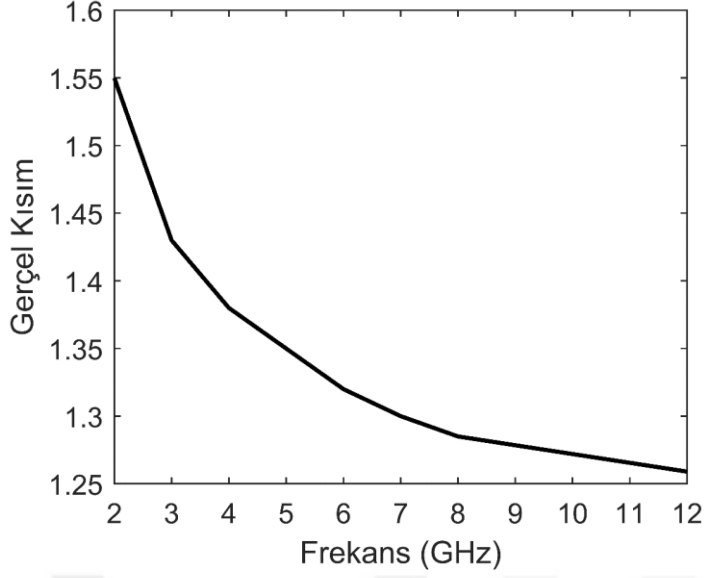
### **3. MİKRODALGA SOĞURUCU PERFORMANS ANALİZLERİ**

#### **3.1 Amaç**

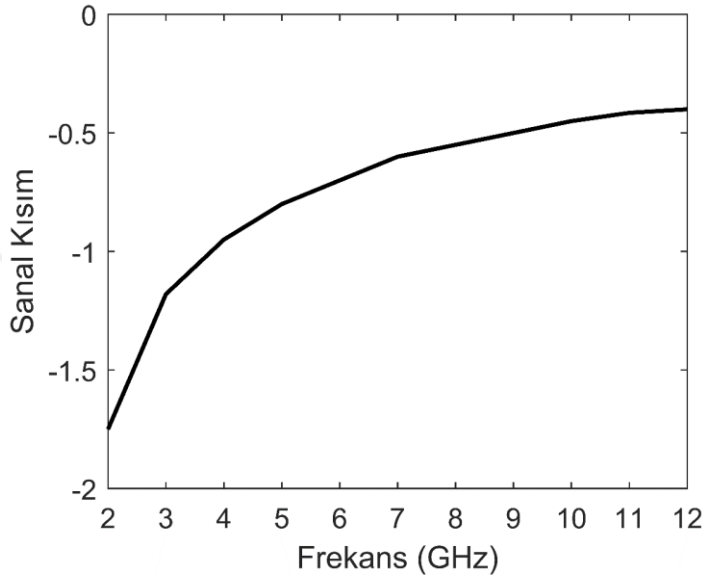
Bu bölümde, bazı mikrodalga kama soğurucu tasarımlarının PMM hesaplamalarına ait sonuçlar sunulmuştur. Bu soğurucu yapılar geleneksel kama soğurucu, kama soğurucuya benzer olarak tekli periyodikliğe sahip parabolik fonksiyon, güç fonksiyonu ve üstel fonksiyon gibi içbükey fonksiyonlar temel alınarak tasarlanmış tekli periyodik soğurucu yapıları içermektedir. Bu soğurucu yapıların tasarlanmasında temel alınan fonksiyonların yüzeyin içbükeyliğini etkileyen parametrelerinin optimizasyonu yapılarak kama soğurucudan daha iyi soğurma performansına sahip yapılar araştırılmıştır. Analiz edilen bütün soğurucu yapıların aynı dielektrik özellik, kama periyodu ve yüksekliğine sahip olduğu kabul edilmiştir. Soğurucu yapıların analizinde gelen EM dalganın TM (enine manyetik) modu olması durumu dikkate alınmıştır. Sonsuz uzunluktaki ve sonsuz adet elemente sahip (sonsuz periyotlu) soğurucu yapıya ait yansıma katsayısı, faz, radar kesit alanı (RCS) ve bistatik patern grafikleri yansısız oda soğurma performansını belirlemek için PMM çözümlerinden elde edilmiştir. PMM hesaplamalarında 3.30 GHz saat frekansında çalışan her biri 4 çekirdekli 2 adet Xenon işlemciye (toplam 8 çekirdek), 48 GB rastgele erişimli belleğe (RAM) sahip 64-bit tabanlı bir bilgisayar kullanılmıştır. Hesaplanan yansıma performansı değerlerinden elde edilen grafiklerin daha yüksek kalitede olması için doğrusal enterpolasyon kullanılarak nokta sayısı arttırılmıştır.

#### **3.2 Soğurucu Yapılarda Kullanılan Malzemenin Dielektrik Özellikleri**

Bu bölümde PMM hesaplamalarında soğurucu yapı malzemesi olarak kabul edilen karbon katkılanmış köpükten oluşan kayıplı malzemeye ait dielektrik katsayılarından bahsedilmiştir. Bu tür malzemeler yansısız odalarda kullanılan mikrodalga soğurucularda kayıplı malzeme olarak sıklıkla kullanılırlar. PMM hesaplamalarında [19, 72] çalışmalarında bahsedilen “black wedge” kayıplı malzemesi temel alınmıştır. Bu malzemeye ait kompleks dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarının frekansa bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.1 :** Kayıplı malzemenin dielektrik sabitinin gerçel kısmı.



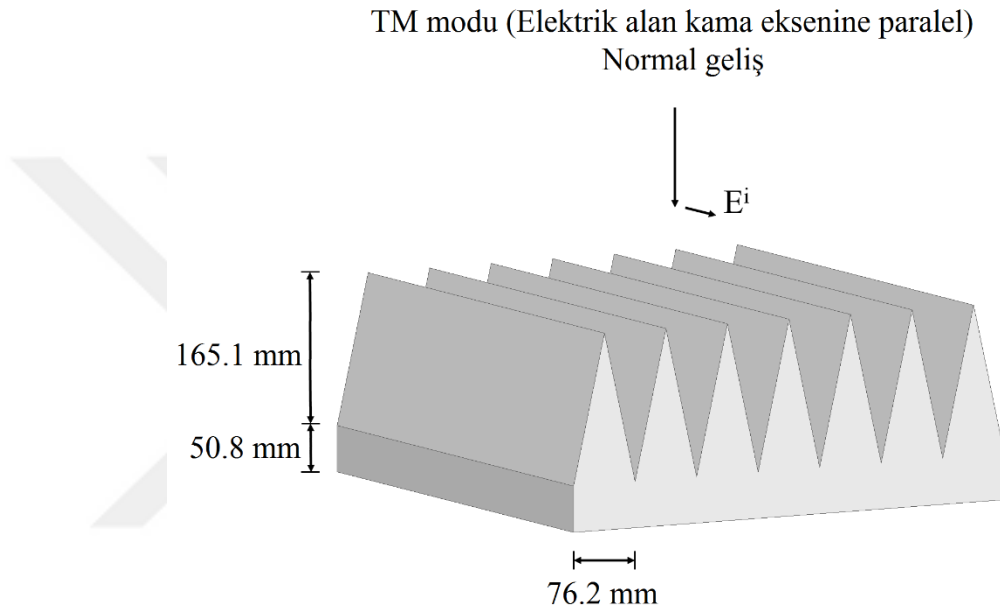
**Şekil 3.2 :** Kayıplı malzemenin dielektrik sabitinin sanal kısmı.

PMM hesaplamalarında kullanılmak üzere istenilen herhangi bir ara frekans değerine ait kompleks dielektrik sabitini bulmak için doğrusal enterpolasyondan yararlanılarak nokta sayısı arttırılmış ve ara frekans değerlerine ait kompleks dielektrik sabitleri elde edilmiştir.

### 3.3 PMM Sonuçlarının Doğrulanması

Kayıplı dielektrik malzeme kullanılan soğurucu yapının 2-8 GHz frekans aralığındaki normal geliş (0 derece) durumu için yansıma performansı ve 2 GHz frekansındaki 0-70

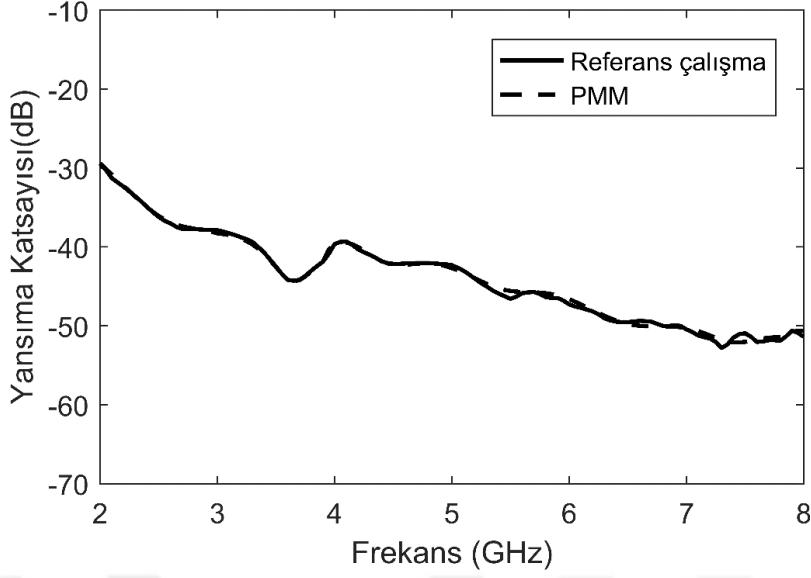
derece geliş açısı aralığındaki bistatik paterni PMM hesaplamaları ile elde edilmiştir. Analizlerde TM modlu dik polarizasyonlu (elektrik alan kama eksenine paralel ve geliş düzlemine dik) düzlem EM dalga kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aynı dielektrik sabiti ve fiziksel özelliklere sahip [19, 72] çalışmalarındaki soğurucu yapının (“black wedge”) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Böylece PMM yöntemi kullanılarak yazılan MATLAB programının doğru çalıştığı kanıtlanmıştır. Doğrulama amacıyla yapılan PMM hesaplamalarında temel alınan soğurucu yapının fiziksel boyutları Şekil 3.3’te verilmiştir.



**Şekil 3.3 :** Soğurucu yapının fiziksel boyutları.

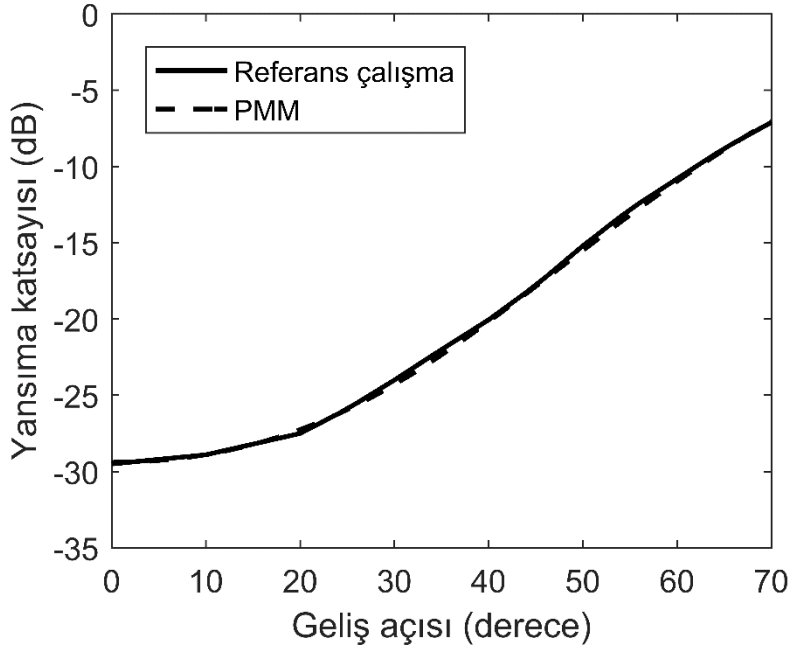
Şekilde görülen soğurucu yapının periyodu 76.2 mm (3 inch), taban kalınlığı 50.8 mm (2 inch), yüksekliği ise 165.1 mm (6.5 inch) olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3.4’te soğurucu yapının PMM hesaplamaları ile elde edilen yansımaya performansı sonuçları ile [19] çalışmasındaki yansımaya performansı sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçlar TM modlu gelen elektromanyetik dalganın normal geliş durumu için elde edilmiştir. PMM hesaplamaları 50 MHz aralıklarla daha çok frekans noktasında gerçekleştirildiği için özellikle 5 GHz frekansından sonra referans çalışma ile elde edilen sonuçlara göre daha düzgün değişen bir grafik elde edilmiştir. PMM hesaplamaları ile elde edilen 2-8 GHz frekans aralığındaki yansımaya performansı [19] çalışmasında verilen sonuçlarla uyumludur.



**Şekil 3.4 :** Soğurucu yapının frekans cevabı karşılaştırması.

Şekil 3.5'te soğurucu yapının PMM hesaplamaları ile elde edilen bistatik patern sonuçları ile [19, 72] çalışmalarındaki bistatik patern sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir.



**Şekil 3.5 :** Soğurucu yapının bistatik patern karşılaştırması.

Elde edilen sonuçlar TM modlu gelen EM dalganın eğik geliş durumu için elde edilmiştir. PMM sonuçları ile referans çalışma sonuçları 35 derece ve 55 derece geliş açısı değerlerinde ihmal edilebilecek kadar küçük farklar oluşmuştur. Bu farklar referans çalışma sonuçlarının özgün çalışmadan sayısal olarak elde edilmesi sırasında

yapılan ölçme hatalarından kaynaklanabilir. PMM hesaplamaları ile elde edilen 0-70 derece geliş açısı aralığında ve 2 GHz frekansındaki bistatik patern sonuçları [19, 72] çalışmalarında verilen sonuçlarla uyumludur.

Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi, PMM MATLAB programı ile doğru sonuçlar elde edilmektedir. Elde edilecek sonuçların güvenilir olduğu açıktır.

### 3.4 Soğurucu Yapıların Yansıma Performansları

Bu bölümde, periyodu 76.2 mm, taban kalınlığı 50.8 mm, yüksekliği ise 165.1 mm olan mikrodalga soğurucu yapıların normal geliş durumu için 2-12 GHz frekans aralığında 0.1 GHz aralıklarla hesaplanan yansıma performansları ayrı ayrı sunulmuştur. MATLAB programıyla geliştirilen hızlandırma teknikleri sayesinde [19] çalışmasındaki 2-8 GHz frekans aralığındaki sonuçlar yerine daha geniş bir frekans aralığı olan 2-12 GHz frekans aralığındaki sonuçlar sunulmuştur.

Gelen EM dalganın dalga boyu ile soğurucu yapının periyodu arasındaki oranın ( $\lambda/D_x$ ) katları diğer bir deyişle  $r_y$ 'nin gerçel olması saçılan uzak alana etki eden yayılan dalgaları belirlemektedir. Saçılan uzak alan ile ilgili verilen bağıntılardan da görülebileceği gibi PMM analizlerinde kullanılan periyodu  $D_x = 76.2$  mm seçilen periyodik yapıda normal geliş durumu için sonsuz toplamda  $r_y$ 'nin gerçel olduğu terim 3.937 GHz frekansına kadar sadece  $i = 0$  indisli terimdir. Bu frekans değerinden sonra ise  $i = 1$  ve  $i = -1$  indisli terimler için de  $r_y$  gerçel olmaktadır. Frekans arttıkça daha fazla saçılan dalga uzak alanda yayılmaya başlamakta ve 7.874 GHz frekansından sonra  $i = 2$  ve  $i = -2$  indisli terimler, 11.811 GHz frekansından sonra ise  $i = 3$  ve  $i = -3$  indisli terimli düzlem dalgalar da yayılmaktadırlar. Ancak normal geliş durumunda negatif ve pozitif indeksli terimler genlikleri aynı ancak fazları ters terimler olduğu için sonsuz toplamda birbirlerini yok etmektedirler. Bu sebeple temel mod ( $i = 0$ ) dışındaki modların sonsuz toplama katkıları yoktur ve saçılan uzak alan hesaplanırken sadece temel mod dikkate alınarak program verimliliği artırılmıştır.

Soğurucu yapıların farklı geliş açıları için yansıma performansı 2, 4, 8 ve 12 GHz frekanslarında, 0-70 derece geliş açısı aralığında TM modlu gelen elektromanyetik dalga için verilmiştir. Yansımasız odanın boyutları göz önüne alındığında geliş açısı değerinin 70 dereceye kadar incelenmesi yeterlidir.

Eğik geliş durumunda negatif indisli terime sahip saçılan dalgalar yayılmamaktadırlar. Bu durum  $\theta = \sin^{-1}(1 - i\lambda/D_x)$  ifadesinden bulunabilir. Geliş açısının 0.9023 derece değerinden sonra  $i = 3$  indisli saçılan düzlem dalga yayılmayacaktır  $i = 0$ ,  $i = 1$  ve  $i = 2$  indisli düzlem dalgalar yayılacaktır. Geliş açısının 20.1105 derece değerinden sonra ise  $i = 0$  ve  $i = 1$  indisli saçılan düzlem dalgalar yayılmaya devam edeceklerdir. Geliş açısının 42.2151 derece değerinden sonra  $i = 0$  indisli yani temel moddaki saçılan düzlem dalga dışında yayılan başka modun olmadığı gözlemlenmektedir.

Frekansın 8 GHz olduğu durumda geliş açısının 0 derece değeri için  $i = 0$ ,  $i = \pm 1$  ve  $i = \pm 2$  indisli saçılan dalgaların yayıldığı görülmektedir. Geliş açısının 0.9023 değerinden sonra  $i = 2$  indisli saçılan düzlem dalga yayılmayacaktır  $i = 0$  ve  $i = 1$  indisli düzlem dalgalar yayılacaktır. Geliş açısının 30.5223 derece değerinden sonra ise  $i = 0$  indisli yani temel moddaki saçılan düzlem dalga dışında yayılan başka modun olmadığı gözlemlenmektedir.

Frekansın 4 GHz olduğu durumda geliş açısının 0 derece değeri için  $i = 0$  ve  $i = \pm 1$  indisli saçılan dalgaların yayıldığı görülmektedir. Geliş açısının 0.9023 değerinden sonra  $i = 1$  indisli saçılan düzlem dalga yayılmamaktadır yani  $i = 0$  indisli temel moddaki saçılan düzlem dalga dışında yayılan başka modun olmadığı gözlemlenmektedir.

Frekansın 2 GHz olduğu durumda geliş açısından bağımsız olarak sadece  $i = 0$  indisli yani temel moddaki saçılan düzlem dalganın yayıldığı gözlemlenmektedir.

RCS (Radar kesit alanı) değerleri [19] çalışmasındaki gibi 609.6mm x 609.6mm (24inch x 24inch) boyutlarında düz bir plaka temel alınarak (flat plate RCS) elde edilmiştir. Düz plakanın kare şeklinde olduğu varsayılırsa “ $a$ ” karenin kenar uzunluğu olmak üzere RCS hesaplamalarında kullanılan bağıntı (3.1) ifadesinde verilmiştir.

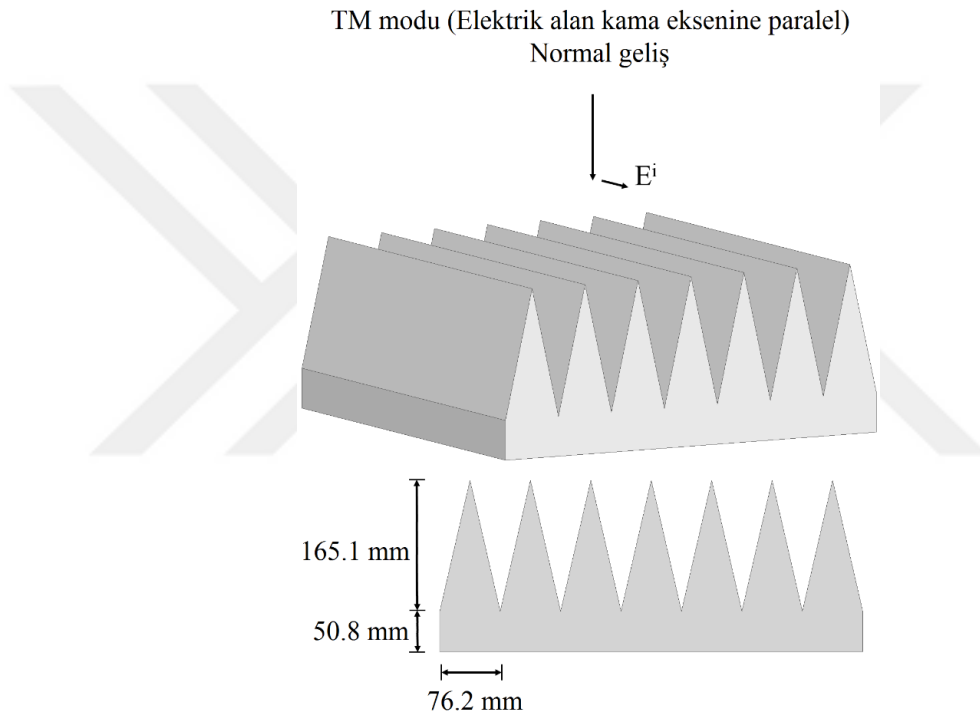
$$\sigma = 4\pi \left(\frac{a^2}{\lambda}\right)^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (3.1)$$

Bu ifadede yer alan parametreler,  $\lambda$  hesaplama yapılan frekanstaki dalga boyu,  $E^i$  gelen elektrik alan ve  $E^s$  saçılan elektrik alandır. Desibel cinsinden değerleri elde etmek için  $10\log(\sigma)$  bağıntısı kullanılmalıdır.

PMM hesaplamalarında “black wedge” olarak adlandırılan malzemeye ait Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gerçel ve sanal kısımları verilen dielektrik sabiti değerleri kullanılmıştır.

### 3.4.1 Geleneksel kama soğurucu

Şekil 3.6 geleneksel kama soğurucu yapının fiziksel boyutlarını göstermektedir. Şekil 3.7 geleneksel kama soğurucu yapı üzerine normal geliş açısı ile gelen düzlem EM dalga için TM modu yansıma performansı sonuçlarını göstermektedir. Geleneksel kama soğurucu yapı 2 GHz civarında yaklaşık -29 dB yansıma performansına sahip iken frekans yükseldikçe yansıma performansının arttığı gözlenmektedir. Yansıma katsayısının 3.65 GHz civarında değeri yaklaşık olarak -44 dB'dir. Yansıma katsayısının 11.2 GHz frekansında ise -57.7 dB değerini alarak oldukça düşük bir yansıma katsayısına sahip olduğu görülmektedir.

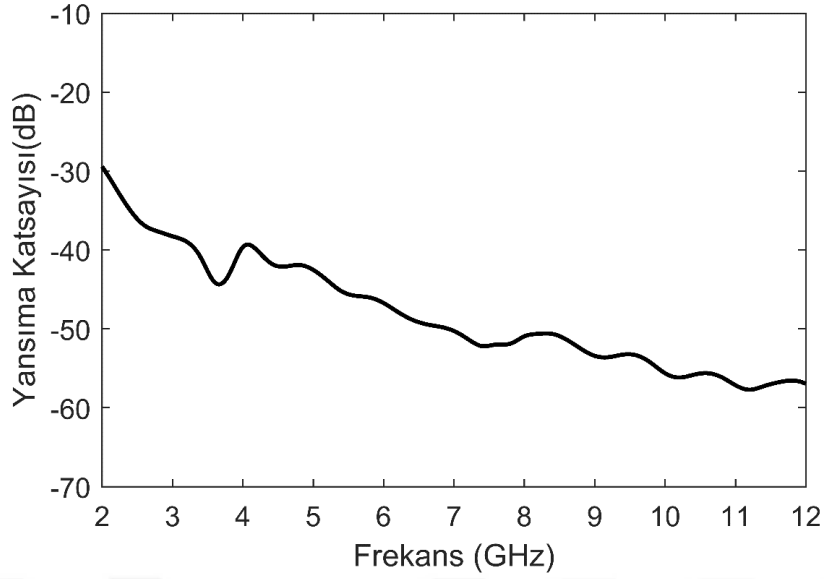


Şekil 3.6 : Geleneksel kama soğurucu yapının fiziksel boyutları.

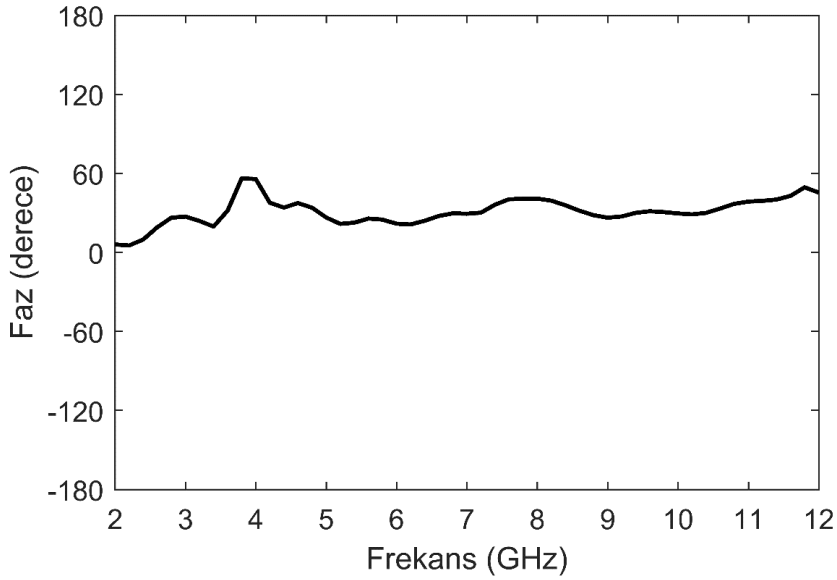
Yansıma katsayısıyla ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Geleneksel kama soğurucu yansıma katsayısı değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	11.2	2	12
Yansıma katsayısı (dB)	-29.4	-57.7	-29.4	-56.95



**Şekil 3.7 :** Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (genlik).



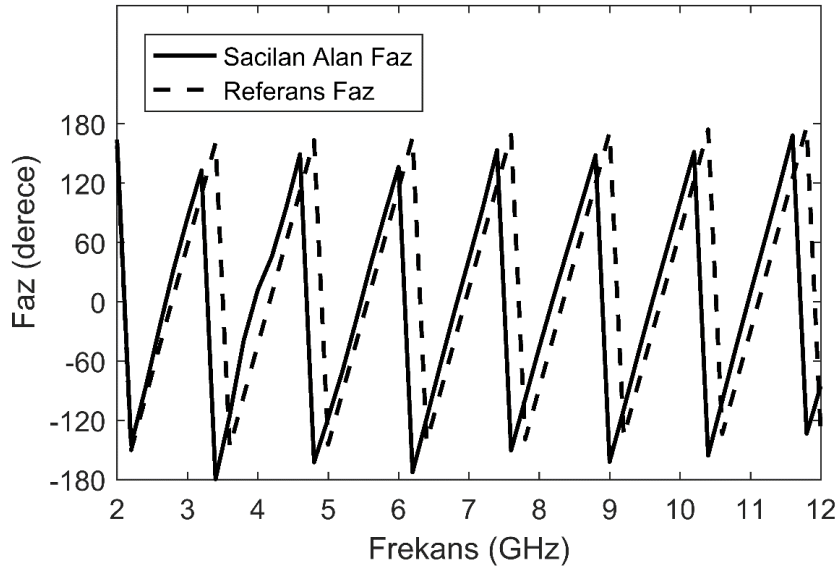
**Şekil 3.8 :** Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).

Şekil 3.8'de geleneksel kama soğurucu yapının, faz referansı kamanın tepe noktası seçilerek elde edilmiş TM modu yansıma katsayısının fazı görülmektedir. Fazın 2 GHz civarında 0 dereceye yakın olduğu 4 GHz civarında yaklaşık 60 derece olduğu görülmektedir. Daha yüksek frekanslarda ise fazın tekrar düşüş gösterdiği ve 30 dereceler civarında olduğu gözlenmektedir. Fazın 0 dereceye yakın olduğu 2 GHz civarında baskın saçılma teriminin kamanın tepe noktasındaki kırınım etkisinden kaynaklandığı görülmektedir. Şekil 3.9'da faz referansı olarak seçilen kama tepe



noktasında gelen EM dalganın fazı ve saçılan alanın fazı verilmiştir. Saçılan alanın fazının referans faz ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Bu da baskın saçılmanın tepe noktasından kaynaklandığının bir diğer göstergesidir.

Şekil 3.10’da geleneksel kama soğurucu yapının TM modu RCS değişimi görülmektedir. RCS hesaplamaları PMM yardımıyla [19] çalışmasındaki gibi 609.6mm x 609.6mm (24inch x 24inch) boyutlarında soğurucu panel göz önüne alınarak 2-10 GHz frekans aralığı yerine daha geniş bir frekans bandında 2-12 GHz arasında yapılmıştır. RCS 2 GHz için yaklaşık -10.5 dBsm, 3.64 GHz frekansında hızlı bir düşüş göstererek -20.24 dBsm değerini almıştır. Bu noktadan sonra 4.1 GHz frekansında artış göstererek -14.24 dBsm değerine ulaşmıştır. Artan frekans değerlerinde yansıma katsayısına paralel şekilde RCS değerleri de düşmeye başlamış ve band sonunda yaklaşık -22.5 dBsm RCS değeri elde edilmiştir. En düşük RCS değeri ise 11.18 GHz frekansında -23.87 dBsm olarak elde edilmiştir.

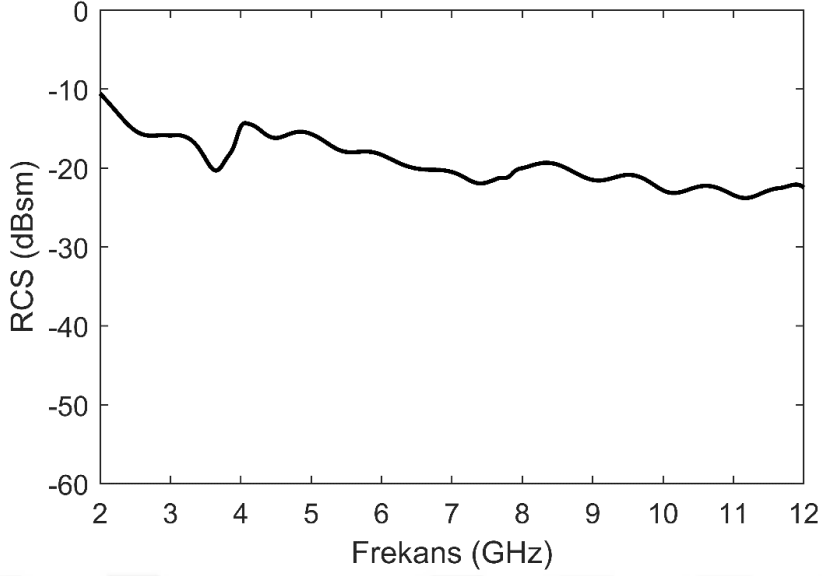


**Şekil 3.9 :** Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).

RCS ile ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

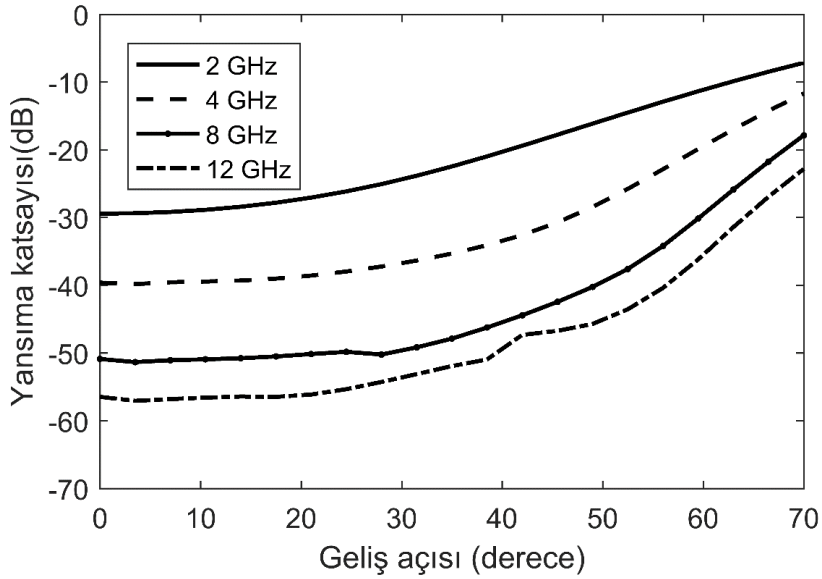
**Çizelge 3.2 :** Geleneksel kama soğurucu RCS değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	11.18	2	12
RCS (dBsm)	-10.54	-23.87	-10.54	-22.5



**Şekil 3.10 :** Geleneksel kama soğurucu normal geliş TM modu RCS.

Şekil 3.11'de geleneksel kama soğurucu yapının farklı geliş açıları için yansımaya performansı verilmiştir.



**Şekil 3.11 :** Geleneksel kama soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri.

Soğurucu yapı üzerine gelen elektromanyetik dalga TM modlu 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerinde, 0-70 derece geliş açısı aralığında ve dik polarizasyonludur ( $\Phi=0$ ). Geleneksel kama soğurucunun normal geliş durumu için 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerindeki yansımaya katsayı yaklaşık olarak sırasıyla -29.4 dB, -39.6 dB, -50.86 dB ve -56.45 dB değerlerine sahiptir. Geliş açısı arttıkça yansımaya katsayısı değerlerinin de düzgün bir şekilde arttığı görülmektedir. Eğik geliş için yansımamanın daha az olması

beklenen bir durumdur. Farklı frekans ve geliş açısı değerleri için bazı önemli yansımaya katsayısı değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

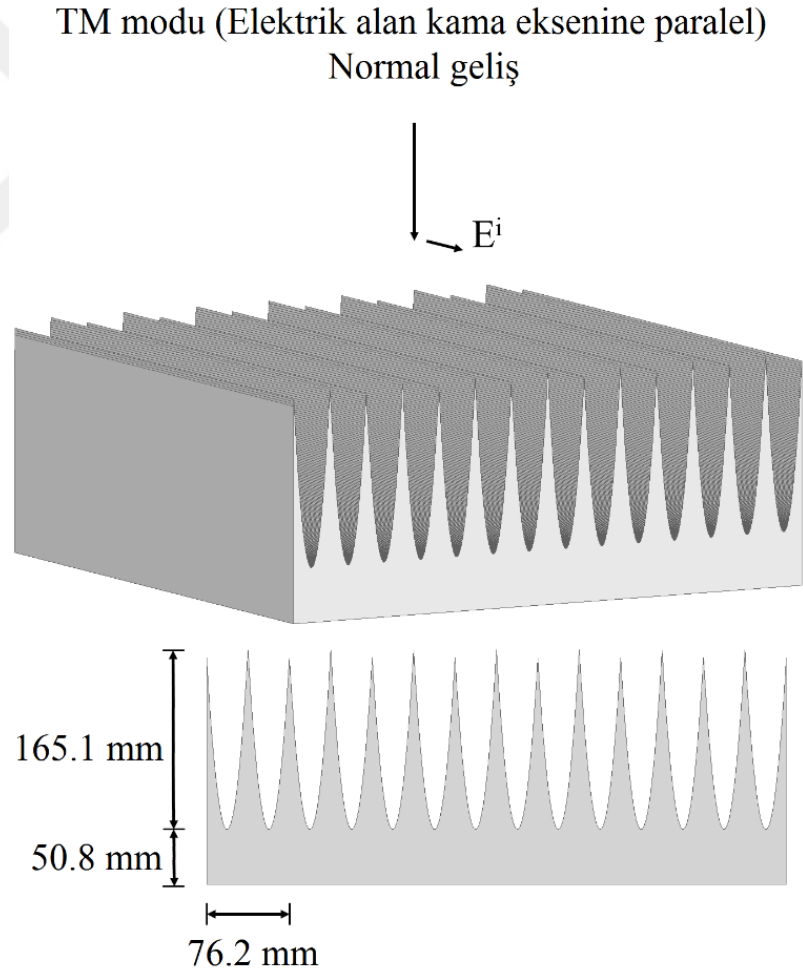
**Çizelge 3.3 :** Geleneksel kama soğurucu bistatik patern değerleri.

	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz
0 derece geliş	-29.4 dB	-39.6 dB	-50.86 dB	-56.45 dB
En iyi değer ve geliş açısı	-29.4 dB	-39.81 dB	-51.32 dB	-57.04 dB
	0	3.5	3.5	3.5
70 derece geliş	-7.13 dB	-11.67 dB	-17.85 dB	-22.81 dB

Geliş açısının 70 derece değeri için yansımaya katsayısının yaklaşık olarak sırasıyla -7.13 dB, -11.67 dB, -17.85 dB ve -22.8 dB değerlerini aldığı görülmektedir.

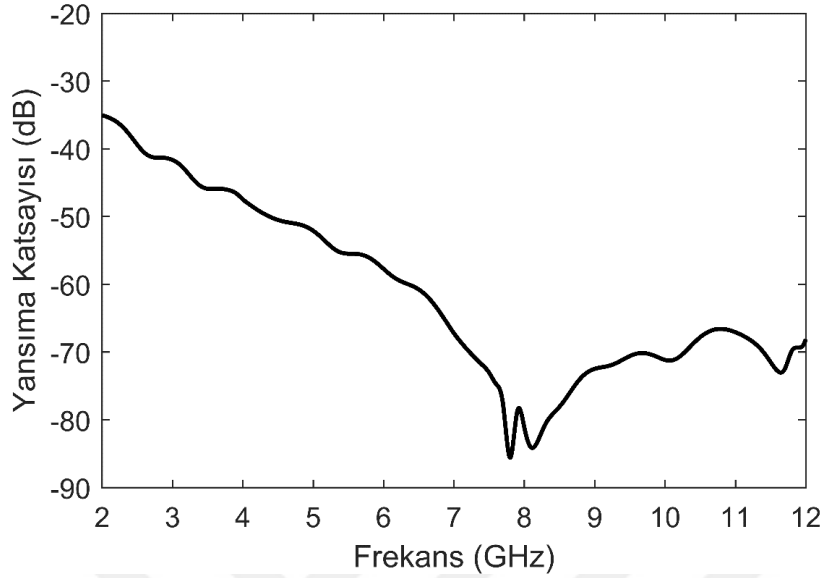
### 3.4.2 Yerel minimum aralık içinde (YMAİ) parabolik soğurucu

YMAİ parabolik soğurucu yapının fiziksel boyutları Şekil 3.12'de görülmektedir.



**Şekil 3.12 :** Parabolik soğurucu yapının fiziksel boyutları.

Soğurucu yapı üzerine normal geliş açısı ile gelen düzlem EM dalga için TM modu yansımaya performansı sonuçları Şekil 3.13'te verilmiştir.



**Şekil 3.13 :** YMAİ parabolik soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı.

Soğurucu yapı band başı olan 2 GHz civarında yaklaşık -35 dB yansımaya performansına sahiptir. Yansımaya katsayısı değeri yaklaşık 7.8 GHz civarına kadar düzgün bir şekilde azalmış ve 7.8 GHz frekansında yaklaşık -85.5 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Yansımaya değeri 8.1 GHz frekans değerinde -84 dB değerinden itibaren band sonuna kadar biraz yükselmiş ve band sonunda -68 dB değerini almıştır. Yansımaya performansının en iyi olduğu frekans değeri yaklaşık 8.1 GHz civarındadır. Yansımaya katsayısıyla ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

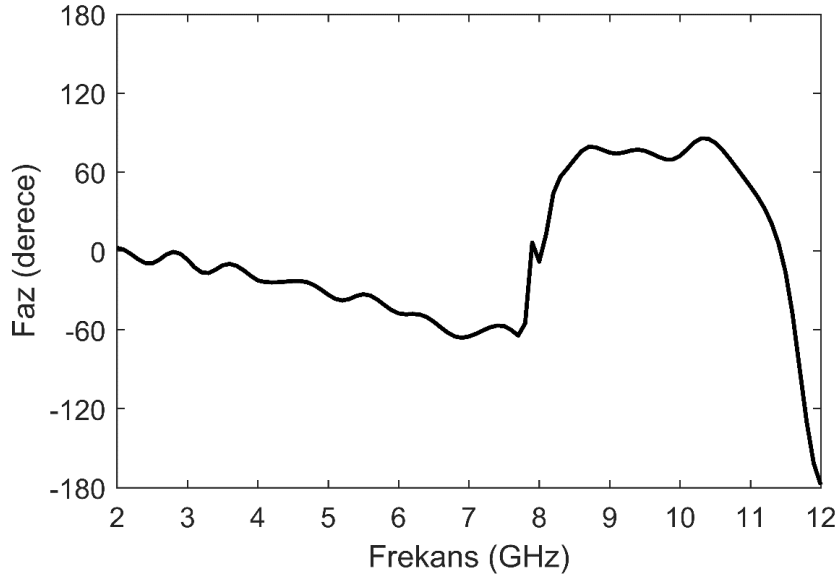
**Çizelge 3.4 :** YMAİ parabolik soğurucu yansımaya katsayısı değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	8.1	2	12
Yansımaya katsayısı (dB)	-35	-85.59	-35	-68

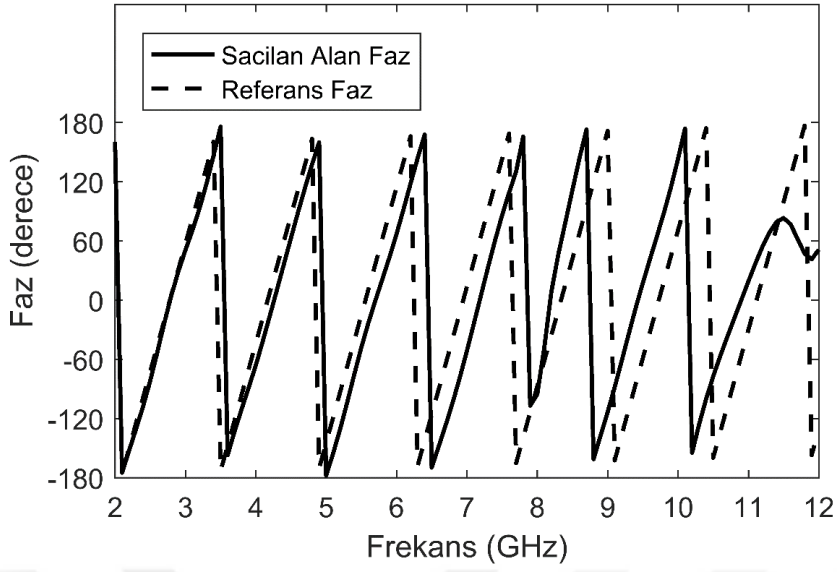
Şekil 3.14'te, YMAİ parabolik soğurucu yapının, faz referansı soğurucu yapının tepe noktası seçilerek elde edilmiş TM modu yansımaya katsayısının fazı verilmiştir. Fazın 2 GHz civarında yaklaşık 0 derece olduğu, 7.7 GHz frekansına kadar fazın yaklaşık -0 derece ile -64 derece arasında değiştiği görülmektedir. Bu noktadan sonra fazdaki değişimler artarak 8.3 GHz frekansında yaklaşık 85.7 değerine ulaşmıştır. Sonrasında hızlı bir düşüşle 12 GHz frekansında fazın değeri yaklaşık -178 dereceye ulaşmıştır.

Fazın 0 dereceye yakın olduğu değerler baskın saçılma teriminin soğurucu yapının tepe noktasından kaynaklandığını, 0 dereceden farklı olduğu değerler baskın saçılma teriminin soğurucu yapının tepe noktasından değil taban noktalarından kaynaklandığını, saçılan EM dalganın çok sayıda yansımaya uğradığını göstermektedir. Şekil 3.15'te faz referansı olarak seçilen YMAİ parabolik soğurucu yapının tepe noktasında, gelen EM dalganın fazı ve saçılan alanın fazı verilmiştir. Başlangıçta iki faz arasındaki farkın 0 dereceye yakın olduğu, 7.7 GHz frekansından sonra iki faz arasındaki değişim göze çarpmaktadır. Bu da saçılan EM dalganın çok sayıda yansımaya uğradığını ve saçılma merkezinin tepe noktasından daha aşağılarda olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.16'da YMAİ parabolik soğurucu yapının TM modu RCS değişimi görülmektedir. RCS 2 GHz için yaklaşık -16 dBsm değerindedir. Bu değerden sonra azalarak 7.8 GHz frekansında band içindeki en iyi değeri olan -54.9 dBsm değerini almıştır. Bu noktadan sonra 7.93 GHz frekansında yaklaşık -47.4 dBsm olmuştur. RCS 8.1 GHz frekansında -53.1 dBsm değerini, 10.8 GHz frekansında ise yaklaşık -33 dBsm değerini almıştır. RCS 11.65 GHz frekansındaki -38.8 dBsm değerinden sonra band sonundaki 12 GHz frekansında yaklaşık -33.7 dBsm RCS değerini almıştır. RCS ile ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.5'te verilmiştir.



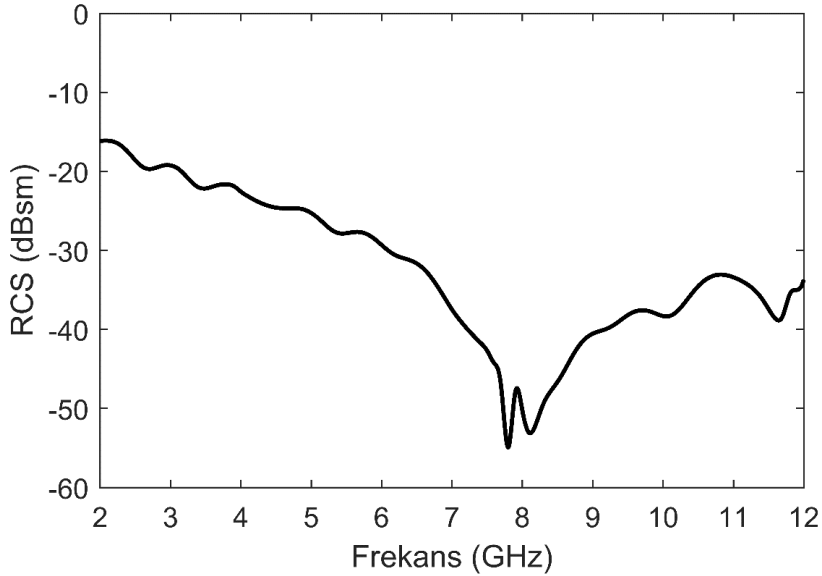
**Şekil 3.14 :** YMAİ parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).



Şekil 3.15 : YMAİ parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).

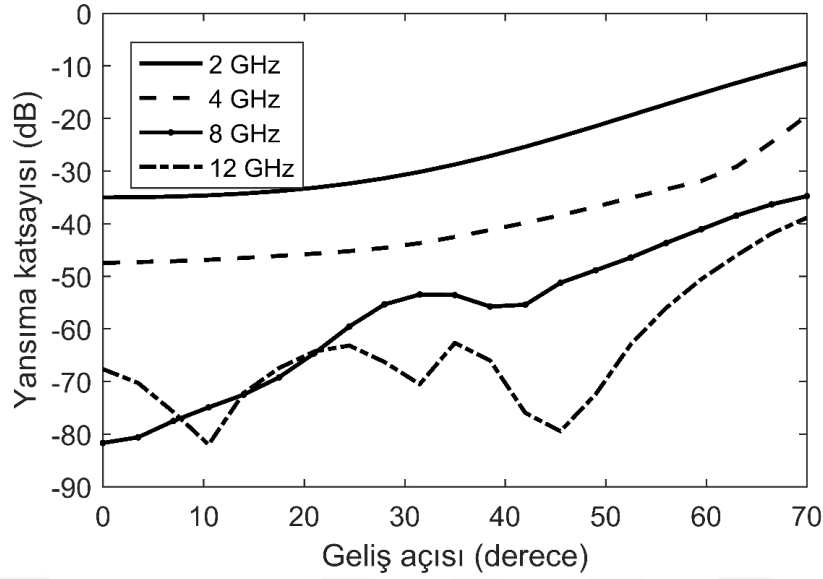
Çizelge 3.5 : YMAİ parabolik soğurucu RCS değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	7.8	2	12
RCS (dBsm)	-16.13	-54.9	-16.13	-33.66



Şekil 3.16 : YMAİ parabolik soğurucu normal geliş TM modu RCS.

Şekil 3.17'de YMAİ parabolik soğurucu yapının farklı geliş açıları için yansımaya performansı görülmektedir.



**Şekil 3.17 :** YMAİ parabolik soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik patenleri.

Soğurucu yapı üzerine gelen elektromanyetik dalga TM modlu 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerinde, 0-70 derece geliş açısı aralığında ve dik polarizasyonludur ( $\Phi=0$ ). YMAİ parabolik soğurucunun normal geliş durumu için 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerindeki yansımaya katsayısı yaklaşık olarak sırasıyla -35 dB, -47.4 dB, -81.7 dB ve -67.6 dB değerlerine sahiptir. 2 ve 4 GHz için geliş açısı arttıkça yansımaya katsayısı değerinin 0 derece geliş açısı değerinden itibaren düzgün bir şekilde arttığı görülmektedir. Gelen EM dalga frekansının 8 GHz olduğu frekans değerinde 38.5 derece geliş açısı için yaklaşık -55.7 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Frekansın 12 GHz ve geliş açısının 10.5 derece olduğu durum için yaklaşık -82 dB, 31.5 derece olduğu durum için yaklaşık -70.5 dB, 45.5 derece olduğu durum için yaklaşık -79.4 dB yansımaya değerleri elde edilmiştir. Farklı frekans ve geliş açısı değerleri için bazı önemli yansımaya katsayısı değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

**Çizelge 3.6 :** YMAİ parabolik soğurucu bistatik paten değerleri.

	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz
0 derece geliş	-35 dB	-47.44 dB	-81.66 dB	-67.64 dB
En iyi değer ve geliş açısı	-35 dB	-47.44 dB	-81.66 dB	-81.98 dB
	0	0	0	10.5
70 derece geliş	-9.44 dB	-19.46 dB	-34.75 dB	-38.85 dB

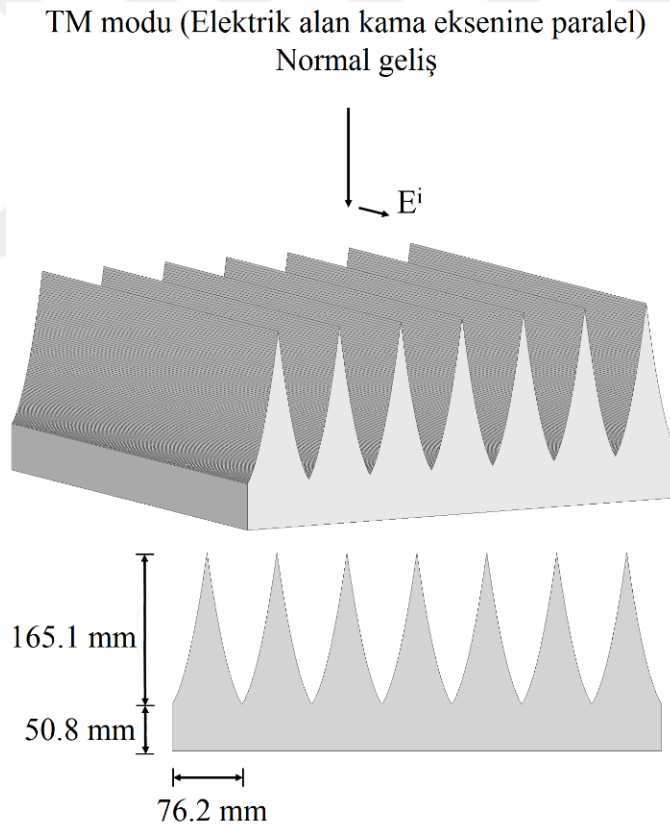
Geliş açısının 70 derece değeri için yansımaya katsayısının 2, 4, 8 ve 12 GHz için yaklaşık olarak sırasıyla -9.4 dB, -19.5 dB, -34.8 dB ve -38.9 dB değerlerini aldığı görülmektedir.

### 3.4.3 Yerel minimum aralık dışında (YMAD) parabolik soğurucu

Yerel minimumu  $[0, L/2]$  aralığı dışında olan parabolik soğurucu yapının fiziksel boyutları Şekil 3.18’de görülmektedir.

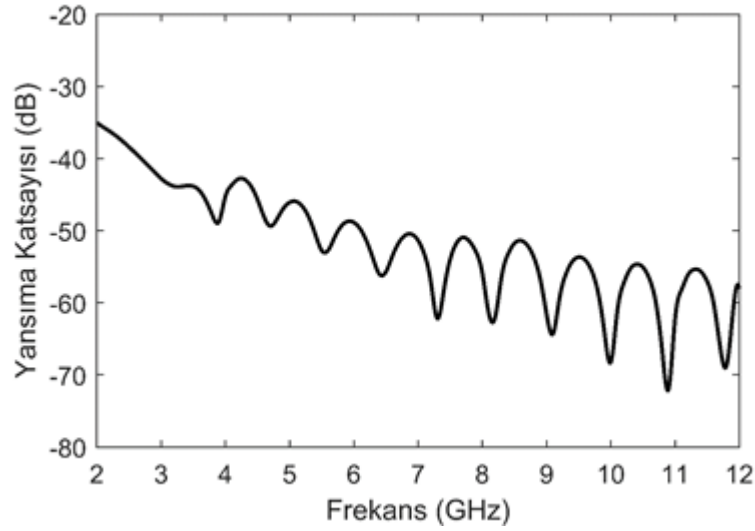
YMAD parabolik soğurucu yapı üzerine normal geliş açısı ile gelen düzlem EM dalga için TM modu yansımaya performansı sonuçları Şekil 3.19’da görülmektedir.

YMAD parabolik soğurucu yapı 2 GHz civarında yaklaşık -35 dB yansımaya performansına sahip iken 3.88 GHz’de yaklaşık -48.96 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Yansımaya performansının en iyi olduğu frekans değeri 10.88 GHz civarındadır. Bu noktada soğurucu yapıdan yaklaşık -72.08 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Frekans bandı boyunca yansımaya değerleri genel olarak gittikçe daha iyi değerler alan bir eğilimdedir. Band sonunda soğurucu yapının yansımaya değeri -58.04 dB olarak elde edilmiştir. Yansımaya katsayısıyla ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.18 : YMAD parabolik soğurucu yapının fiziksel boyutları.



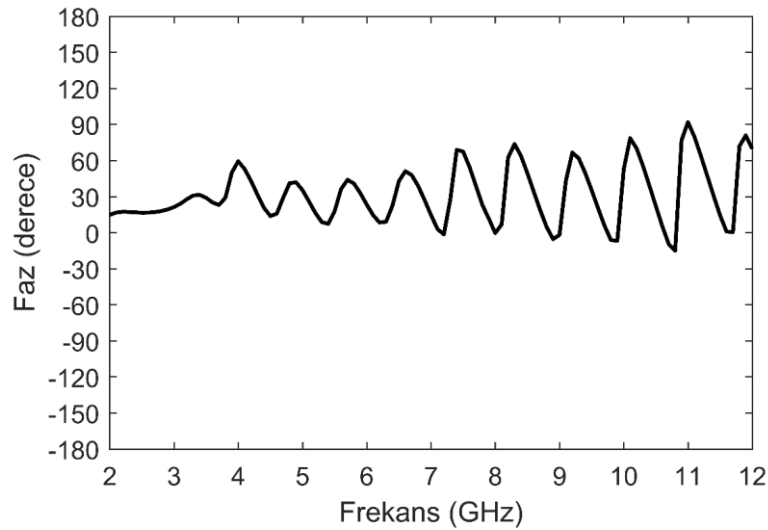


**Şekil 3.19 :** YMAS parabolik soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı.

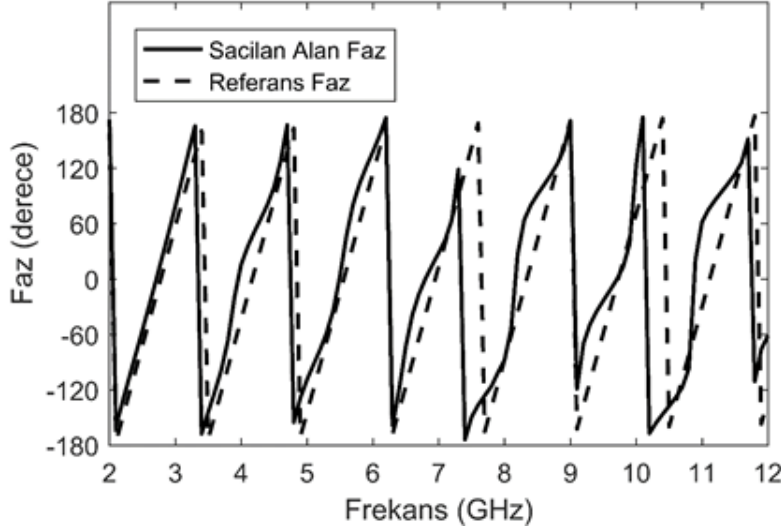
**Çizelge 3.7 :** YMAS parabolik soğurucu yansıma katsayısı değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	10.88	2	12
Yansıma katsayısı (dB)	-35	-72.08	-35	-58.04

Şekil 3.20’de YMAS parabolik soğurucu yapının faz referansı soğurucu yapının tepe noktası seçilerek elde edilmiş TM modu yansıma katsayısının fazı görülmektedir. Faz değeri 2 GHz civarında yaklaşık 15 derecedir. Faz band sonuna kadar dalgalı bir şekilde değişmeye devam etmiş ve band sonundaki 12 GHz frekansında fazın değeri yaklaşık 69.85 derece olarak elde edilmiştir.



**Şekil 3.20 :** YMAS parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).



**Şekil 3.21 :** YMAD parabolik soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).

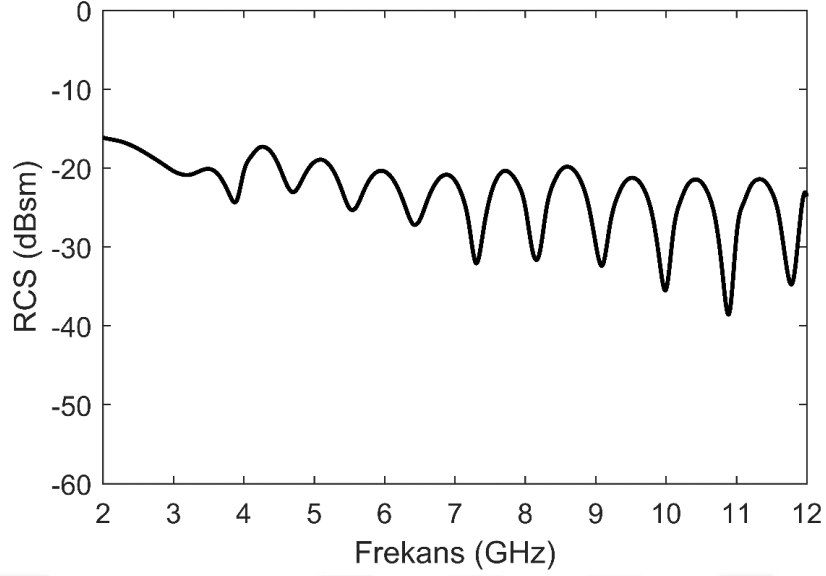
Düşük frekans değerlerinde baskın saçılma terimi soğurucu yapının tepe noktasından kaynaklandığı için fazın değeri 0 dereceye yakındır. Frekans arttıkça faz değerinin daha yüksek değerler almaya başlaması baskın saçılma teriminin soğurucu yapının tepe noktasından değil tabana yakın noktalarından kaynaklandığını ve saçılan EM dalganın çok sayıda yansımaya uğradığını göstermektedir. Şekil 3.21’de faz referansı olarak seçilen soğurucu yapının tepe noktasında, gelen EM dalganın fazı ve saçılan alanın fazı verilmiştir.

İki faz arasındaki farkın frekans arttıkça arttığı göze çarpmaktadır. Bu da saçılan EM dalganın çok sayıda yansımaya uğradığını ve saçılma merkezinin tepe noktasından daha aşağılarda olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.22’de YMAD parabolik soğurucu yapının TM modu RCS değişimi görülmektedir. RCS 2 GHz için yaklaşık -16.13 dBsm, 3.88 GHz frekansında -24.33 dBsm, 4.26 GHz noktasında -17.29 dBsm değerlerini almıştır. RCS değeri 10.88 GHz frekansında band içindeki en iyi değeri olan -38.49 dBsm değerini almıştır. Band sonundaki 12 GHz frekansında yaklaşık -23.6 dBsm RCS değeri elde edilmiştir. RCS ile ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8 :** YMAD parabolik soğurucu RCS değerleri.

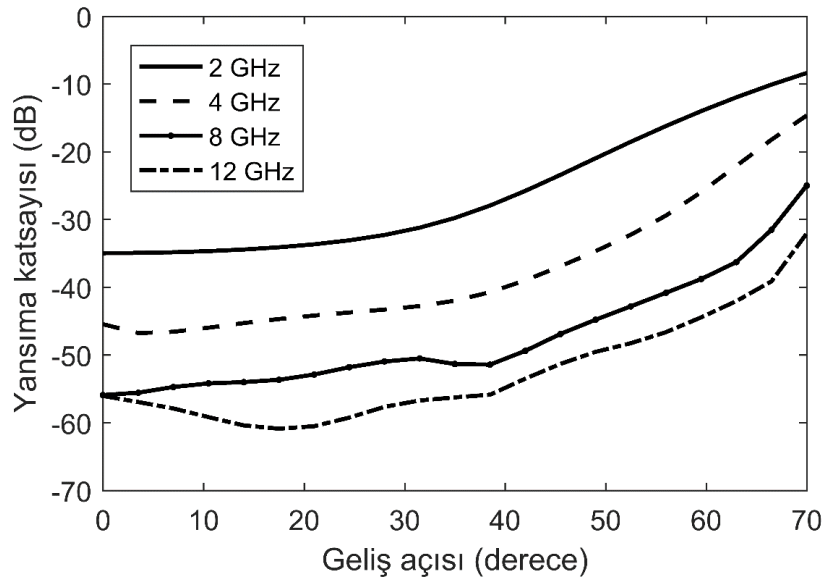
	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	10.88	2	12
RCS (dBsm)	-16.13	-38.49	-16.13	-23.6



**Şekil 3.22 :** YMAD parabolik soğurucu normal geliş TM modu RCS.

Şekil 3.23'te YMAD parabolik soğurucu yapının farklı geliş açıları için yansıma performansı görülmektedir. Soğurucu yapı üzerine gelen elektromanyetik dalga TM modlu 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerinde, 0-70 derece geliş açısı aralığında ve dik polarizasyonludur ( $\Phi=0$ ).

YMAD parabolik soğurucunun normal geliş durumu için 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerindeki yansıma katsayısı yaklaşık olarak sırasıyla -35 dB, -45.4 dB, -55.9 dB ve -56 dB değerlerine sahiptir.



**Şekil 3.23 :** YMAD parabolik soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri.

2 GHz için geliş açısı arttıkça yansımaya katsayısı değerinin 0 derece geliş açısı değerinden itibaren düzgün bir şekilde arttığı görülmektedir. Gelen EM dalga frekansının 4 GHz olduğu frekans değerinde 3.5 derece geliş açısı için yaklaşık -46.74 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Frekansın 12 GHz ve geliş açısının 17.5 derece olduğu durum için yaklaşık -60.85 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Farklı frekans ve geliş açısı değerleri için bazı önemli yansımaya katsayısı değerleri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

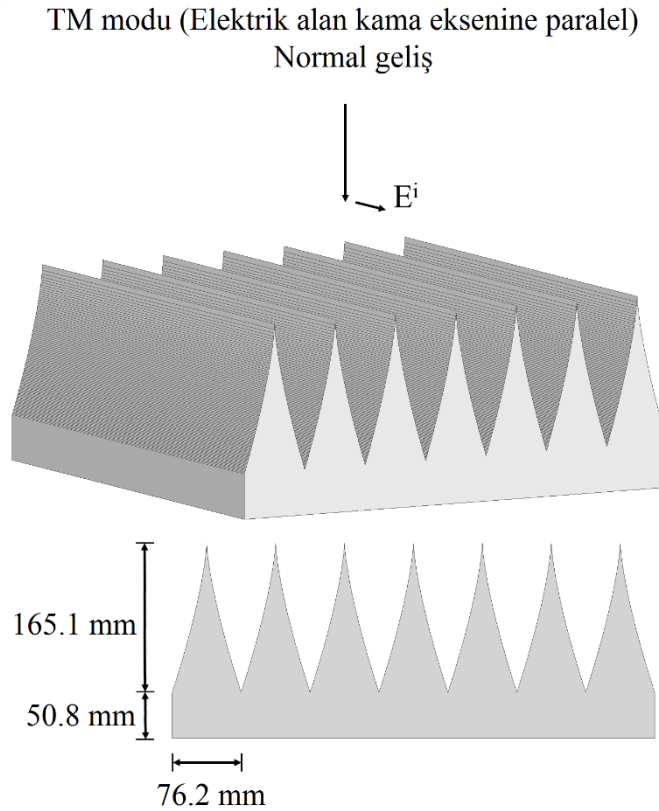
**Çizelge 3.9 :** YMAD parabolik soğurucu bistatik patern değerleri.

	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz
0 derece geliş	-35 dB	-45.4 dB	-55.9 dB	-56 dB
En iyi değer ve geliş açısı	-35 dB	-46.74 dB	-55.89 dB	-60.85 dB
70 derece geliş	-8.35 dB	-14.6 dB	-24.95 dB	-32 dB

Geliş açısının 70 derece değeri için yansımaya katsayısının yaklaşık olarak sırasıyla -8.35 dB, -14.6 dB, -24.95 dB ve -32 dB değerlerini aldığı görülmektedir.

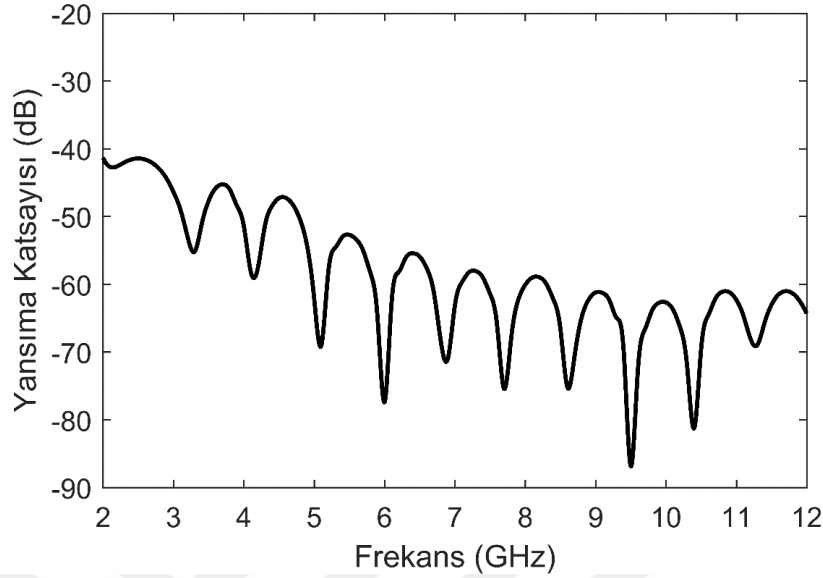
### 3.4.4 Güç fonksiyonu soğurucu

Şekil 3.24 güç fonksiyonu soğurucu yapının fiziksel boyutlarını göstermektedir.



**Şekil 3.24 :** Güç fonksiyonu soğurucu yapının fiziksel boyutları.

Şekil 3.25 güç fonksiyonu soğurucu yapı üzerine normal geliş açısı ile gelen düzlem EM dalga için TM modu yansıma performansı sonuçlarını göstermektedir.



**Şekil 3.25 :** Güç fonksiyonu soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı.

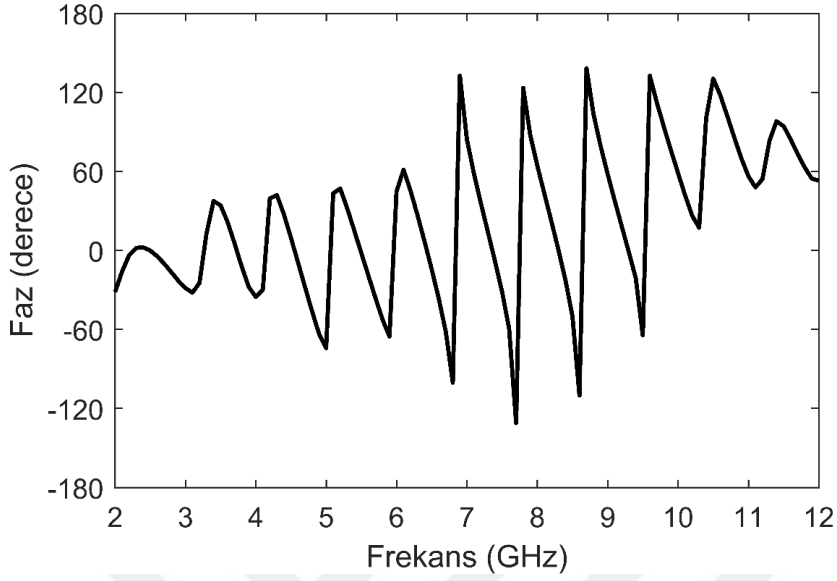
Güç fonksiyonu soğurucu yapı 2 GHz civarında yaklaşık -41.29 dB yansıma değerine, 3.28 GHz frekansında -55.23 dB yansıma değerine sahiptir. Yansıma katsayısı band boyunca dalgalı ancak gittikçe düşme eğilimli bir karakteristiğe sahiptir. Yansıma değeri 9.5 GHz civarında yaklaşık -86.84 dB olarak elde edilmiştir. Bu değer elde edilen en iyi yansıma değeridir. Band sonunda yaklaşık -64.3 dB ile oldukça iyi bir yansıma değerine ulaşılmıştır. Yansıma katsayısıyla ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.10'da verilmiştir.

**Çizelge 3.10 :** Güç fonksiyonu soğurucu yansıma katsayısı değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	9.5	2	12
Yansıma katsayısı (dB)	-41.29	-86.84	-41.3	-64.3

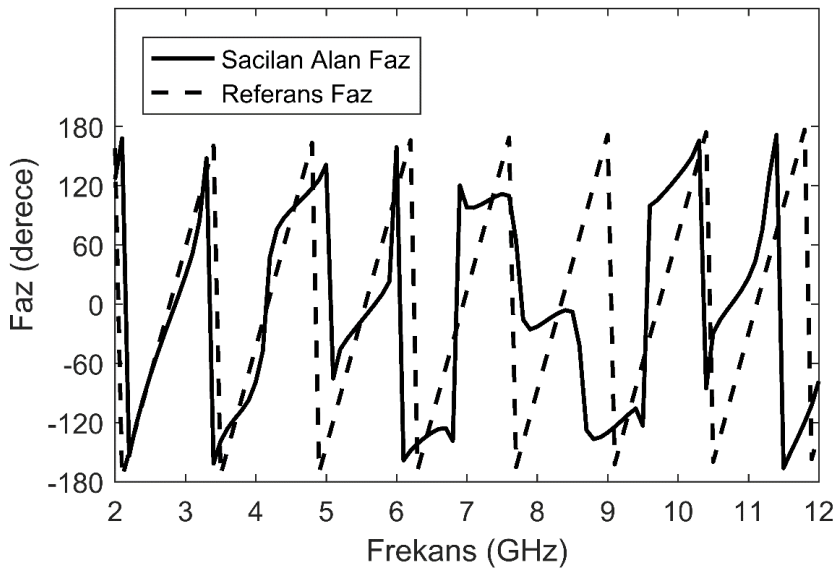
Şekil 3.26'da güç fonksiyonu soğurucu yapının faz referansı soğurucu yapının tepe noktası seçilerek elde edilmiş TM modu yansıma katsayısının fazı görülmektedir. Fazın 2 GHz civarında yaklaşık -31 derece olduğu 6.1 GHz frekansından sonra fazdaki dalgalanmanın arttığı görülmektedir. Frekansın 11 GHz civarında olduğu noktalarda faz değeri yaklaşık 60 derece civarında değişmektedir. Fazın band sonu olan 12 GHz frekans değerinde 53 derece olduğu görülmektedir. Fazdaki değişim baskın saçılmanın

farklı frekans değerlerinde farklı bölgelerden kaynaklandığını ve saçılan EM dalganın çok sayıda yansımaya uğradığını göstermektedir.



Şekil 3.26 : Güç fonksiyonu soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).

Şekil 3.27’de faz referansı olarak seçilen soğurucu yapının tepe noktasında gelen EM dalganın fazı ve saçılan alanın fazı verilmiştir. Özellikle yüksek frekanslarda iki faz arasında farkın belirgin şekilde arttığı göze çarpmaktadır. Bu da saçılan EM dalganın çok sayıda yansımaya uğradığını ve saçılma merkezinin değişken olduğunu göstermektedir.

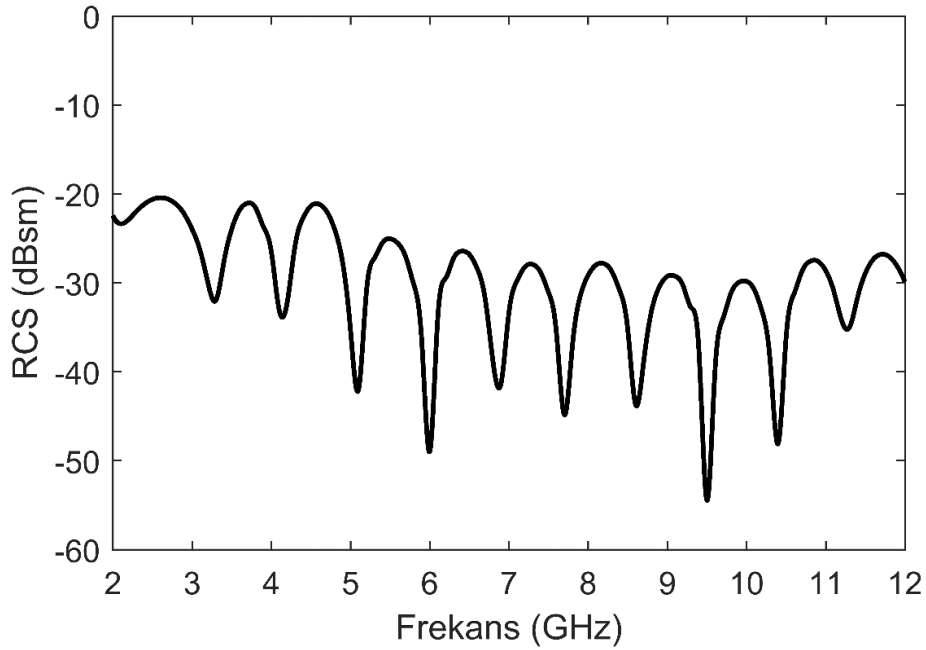


Şekil 3.27 : Güç fonksiyonu soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).

Şekil 3.28’de güç fonksiyonu soğurucu yapının TM modu RCS değişimi görülmektedir. RCS 2 GHz için yaklaşık -22.42 dBsm değerindedir. Frekansın 3.28 GHz değerinde yaklaşık -32.06 dBsm olarak elde edilmiştir. Band içindeki en iyi değer 9.5 GHz civarında yaklaşık -54.44 dBsm değeridir. Artan frekans değerlerinde RCS değerlerinde yansıma katsayısına paralel şekilde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Band sonundaki 12 GHz frekansında yaklaşık -29.87 dBsm RCS değeri elde edilmiştir. RCS ile ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.11’de verilmiştir.

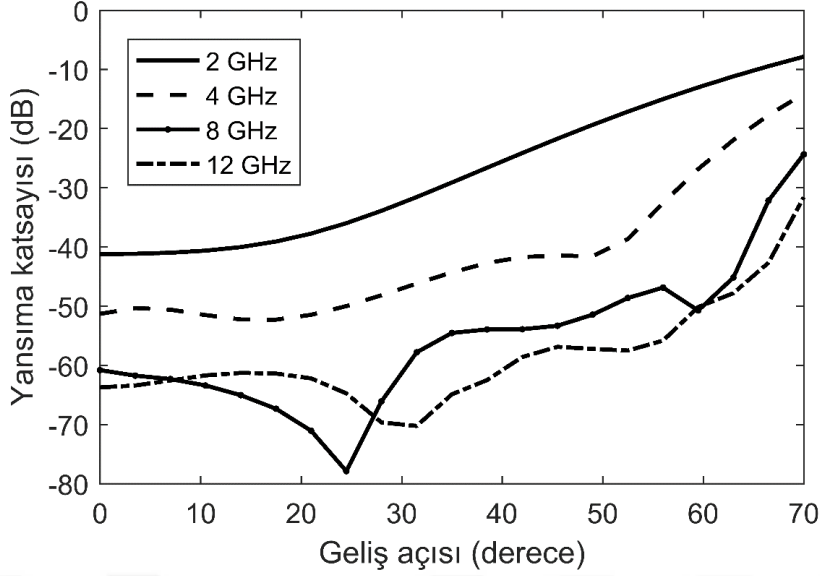
**Çizelge 3.11 : Güç fonksiyonu soğurucu RCS değerleri.**

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	9.5	2	12
RCS (dBsm)	-22.42	-54.44	-22.42	-29.87



**Şekil 3.28 : Güç fonksiyonu soğurucu normal geliş TM modu RCS.**

Şekil 3.29’da güç fonksiyonu soğurucu yapının farklı geliş açıları için yansıma performansı görülmektedir. Soğurucu yapı üzerine gelen elektromanyetik dalga TM modlu 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerinde, 0-70 derece geliş açısı aralığında ve dik polarizasyonludur ( $\Phi=0$ ).



**Şekil 3.29 :** Güç fonksiyonu soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri.

Güç fonksiyonu soğurucunun normal geliş durumu için 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerindeki yansımaya katsayısı yaklaşık olarak sırasıyla -41.2 dB, -51.3 dB, -63.7 dB ve -60.8 dB değerlerine sahiptir.

Gelen EM dalganın frekansının 4 GHz olduğu frekans değerinde 17.5 derece geliş açısı için yaklaşık -52.26 dB yansımaya değeri, 8 GHz olduğu frekans değerinde 31.5 derece geliş açısı için yaklaşık -70.22 dB yansımaya değeri ve 12 GHz olduğu frekans değerinde 24.5 derece geliş açısı için yaklaşık -77.86 dB yansımaya değeri elde edilmiştir. Farklı frekans ve geliş açısı değerleri için bazı önemli yansımaya katsayısı değerleri Çizelge 3.12’de verilmiştir.

**Çizelge 3.12 :** Güç fonksiyonu soğurucu bistatik patern değerleri.

	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz
0 derece geliş	-41.2 dB	-51.3 dB	-63.7 dB	-60.8 dB
En iyi değer ve geliş açısı	-41.2 dB	-52.26 dB	-70.22 dB	-77.86 dB
	0	17.5	31.5	24.5
70 derece geliş	-7.83 dB	-14.1 dB	-24.3 dB	-31.6 dB

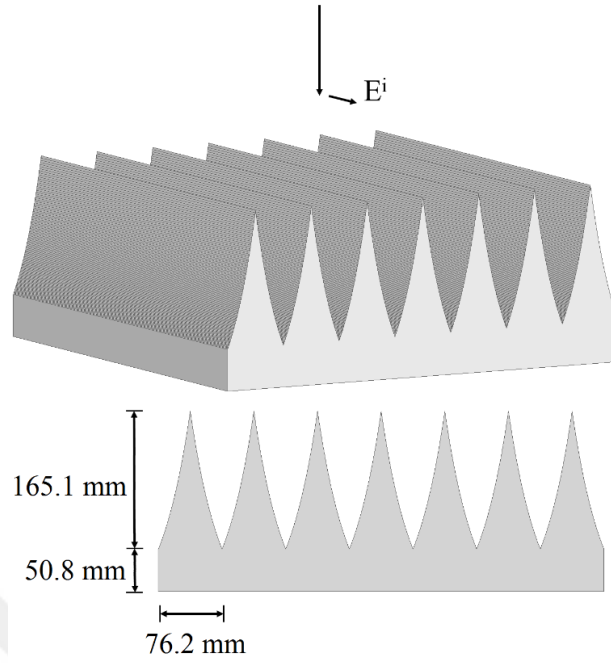
Geliş açısının 70 derece değeri için yansımaya katsayısının yaklaşık olarak sırasıyla -7.83 dB, -14.1 dB, -24.3 dB ve -31.6 dB değerlerini aldığı görülmektedir.

### 3.4.5 Üstel fonksiyon soğurucu

Şekil 3.30 üstel fonksiyon soğurucu yapının fiziksel boyutlarını göstermektedir.

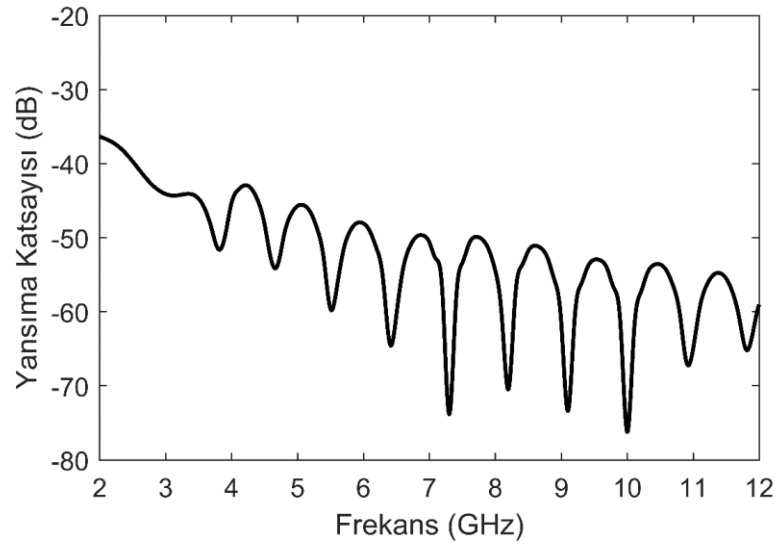


TM modu (Elektrik alan kama eksenine paralel)  
Normal geliş



**Şekil 3.30 :** Üstel fonksiyon soğurucu yapının fiziksel boyutları.

Şekil 3.31 üstel fonksiyon soğurucu yapı üzerine normal geliş açısı ile gelen düzlem EM dalga için TM modu yansımaya performans sonuçlarını göstermektedir.



**Şekil 3.31 :** Üstel fonksiyon soğurucu yapının normal geliş TM modu frekans cevabı.

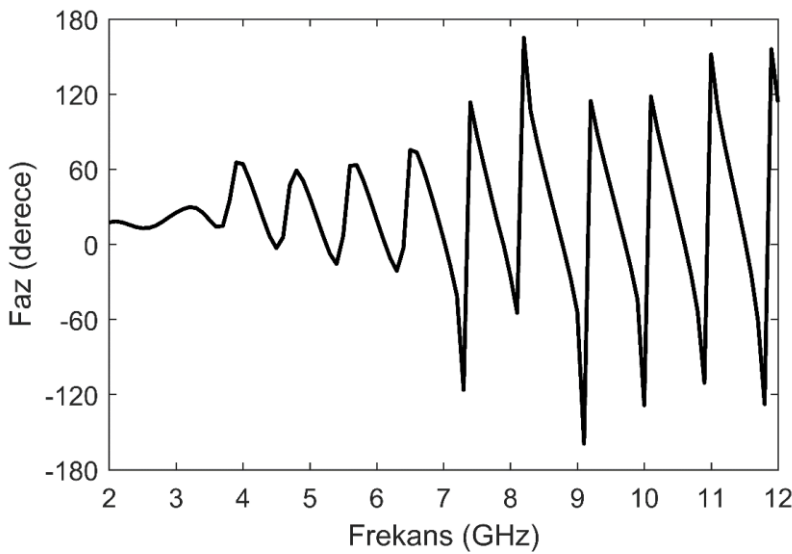
Üstel fonksiyon soğurucu yapı 2 GHz civarında yaklaşık -36.31 dB yansımaya performansına sahiptir ve yansımaya katsayısı 2 GHz'den 3.82 GHz'e kadar düzgün bir şekilde düşerek 3.82 GHz frekans noktasında yaklaşık -51.61 dB yansımaya değerine ulaşmıştır. Yansımaya katsayısı bu noktadan sonra bir miktar artmış ve 4.22 GHz

frekansında -42.9 dB değerini alarak dalgalı bir şekilde düşmeye devam etmiş ve band sonundaki 12 GHz frekans değerinde yaklaşık -58.99 dB gibi oldukça iyi bir yansımaya katsayısı değerine ulaşılmıştır. Band içindeki en düşük yansımaya katsayısı değeri 10 GHz frekansında -76.22 dB olarak elde edilmiştir. Yansımaya katsayısıyla ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.13'te verilmiştir.

**Çizelge 3.13 :** Üstel fonksiyon soğurucu yansımaya katsayısı değerleri.

Frekans (GHz)	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Yansımaya katsayısı (dB)	-36.31	-76.22	-36.31	-58.99

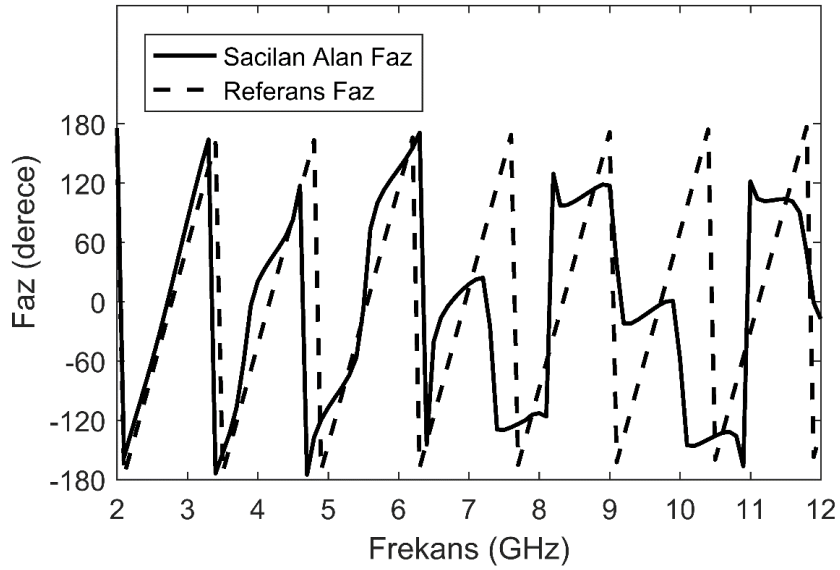
Şekil 3.32'de üstel fonksiyon soğurucu yapının faz referansı soğurucu yapının tepe noktası seçilerek elde edilmiş TM modu yansımaya katsayısının fazı görülmektedir. Fazın 2 GHz civarında yaklaşık 17.74 derece olduğu ve 3.7 GHz civarında 14.9 dBsm değerini aldığı görülmektedir. Faz değeri bu noktadan sonra 6.6GHz frekansına kadar dalgalanmaya devam etmiş ancak bu noktadan sonra band sonuna kadar değişimlerin daha büyük olduğu görülmektedir. Faz değeri 12 GHz frekansında yaklaşık 113.7 derece değerini almaktadır. Faz değişiminin 0 dereceye yakın olduğu düşük frekanslarda (3.7 GHz'e kadar olan frekans bölgesi) baskın saçılma teriminin soğurucu yapının tepe noktasından kaynaklandığı söylenebilir. Fazın çok fazla dalgalandığı diğer frekans bölgelerinde ise baskın saçılma teriminin değişken olduğu söylenebilir.



**Şekil 3.32 :** Üstel fonksiyon soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz).

Şekil 3.33’de faz referansı olarak seçilen soğurucu yapının tepe noktasında gelen EM dalganın fazı ve saçılan alanın fazı verilmiştir. İki faz arasında düşük frekanslar dışında farklılık olduğu söylenebilir. Baskın saçılmanın düşük frekanslarda tepe noktasından, diğer frekanslarda ise farklı frekanslarda farklı bölgelerden kaynaklandığı söylenebilir.

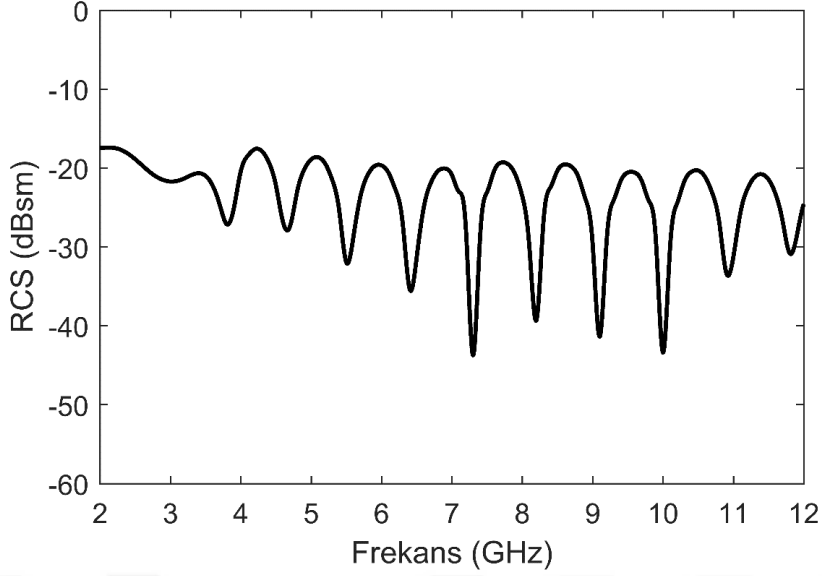
Şekil 3.34’te üstel fonksiyon soğurucu yapının TM modu RCS değişimi görülmektedir. RCS değeri 2 GHz frekansı için yaklaşık -17.44 dBsm olarak elde edilmiştir. RCS 3.82 GHz frekansına kadar düzgün bir şekilde azalmış ve bu frekans noktasında yaklaşık -27.12 dBsm değerini almıştır. RCS değeri 4.22 GHz frekansında biraz artarak -17.54 dBsm olarak elde edilmiştir. Bu frekans değerinden sonra RCS değeri band sonuna kadar dalgalı ama düzgün bir şekilde azalan eğilimdedir. Band içindeki en düşük RCS değeri 7.3 GHz civarında yaklaşık -43.7 dBsm olarak elde edilmiştir. Band sonundaki 12 GHz frekansında yaklaşık -24.55 dBsm RCS değeri elde edilmiştir. RCS ile ilgili bazı önemli değerler Çizelge 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.33 : Üstel fonksiyon soğurucu normal geliş TM modu frekans cevabı (faz karşılaştırma).

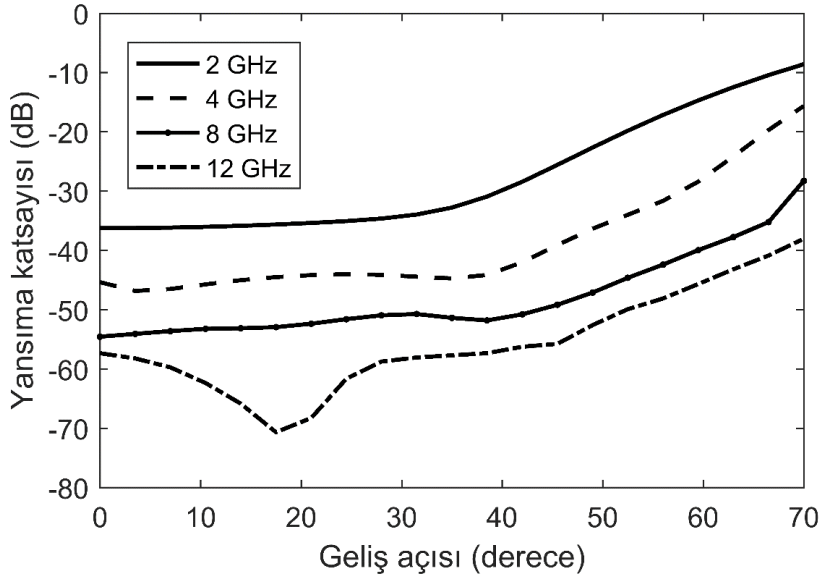
Çizelge 3.14 : Üstel fonksiyon soğurucu RCS değerleri.

	Band başı	En iyi değer	En kötü değer	Band sonu
Frekans (GHz)	2	7.3	2	12
RCS (dBsm)	-17.44	-43.7	-17.44	-24.55



**Şekil 3.34 :** Üstel fonksiyon soğurucu normal geliş TM modu RCS.

Şekil 3.35'te üstel fonksiyon soğurucu yapının farklı geliş açıları için yansımaya performansı görülmektedir. Soğurucu yapı üzerine gelen elektromanyetik dalga TM modlu 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerinde, 0-70 derece geliş açısı aralığında ve dik polarizasyonludur ( $\Phi=0$ ).



**Şekil 3.35 :** Üstel fonksiyon soğurucu 2, 4, 8, 12 GHz TM modu bistatik paternleri.

Üstel fonksiyon soğurucunun normal geliş durumu için 2, 4, 8, 12 GHz frekans değerlerindeki yansımaya katsayısı yaklaşık olarak sırasıyla -36.24 dB, -45.34 dB, -54.53 dB ve -57.32 dB değerlerindedir. Gelen EM dalga frekansının 4 GHz olduğu frekans değerinde 3.5 derece geliş açısı için

yaklaşık -46.8 dB, 12 GHz olduğu frekans değerinde 17.5 derece geliş açısı için -70.65 dB yansımaya değerleri elde edilmiştir. Farklı frekans ve geliş açısı değerleri için bazı önemli yansımaya katsayısı değerleri Çizelge 3.13'te verilmiştir.

**Çizelge 3.15 :** Üstel fonksiyon soğurucu bistatik patern değerleri.

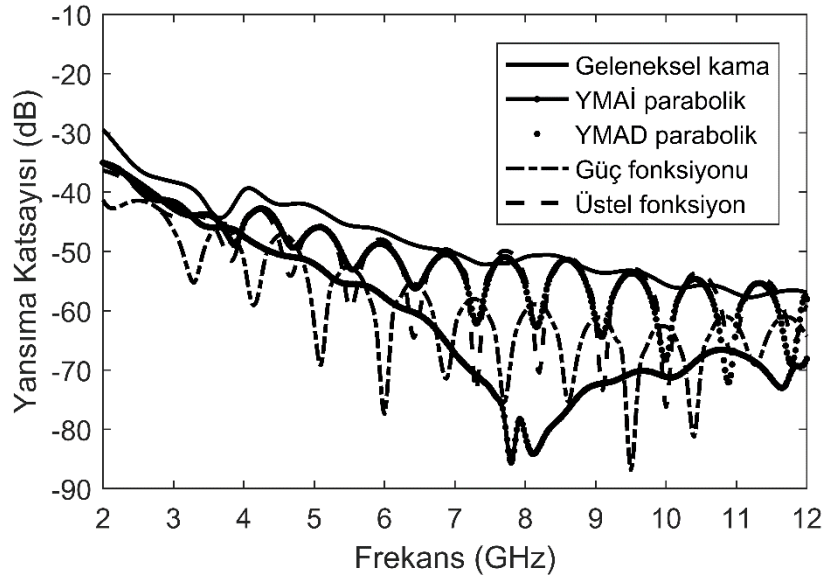
	2 GHz	4 GHz	8 GHz	12 GHz
0 derece geliş	-36.24 dB	-45.34 dB	-54.53 dB	-57.32 dB
En iyi değer ve geliş açısı	-36.24 dB	-46.8 dB	-54.53 dB	-70.65 dB
	0	3.5	0	17.5
70 derece geliş	-8.57 dB	-15.6 dB	-28.23 dB	-38 dB

Geliş açısının 70 derece değeri için yansımaya katsayısının yaklaşık olarak sırasıyla -8.57 dB, -15.6 dB, -28.23 dB ve -38 dB değerlerini aldığı görülmektedir.



#### 4. TARTIŞMA

Şekil 4.1 soğurucu yapıların TM modu yansıma performansı sonuçlarının karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 4.1 : Soğurucu yapıların frekans cevabı karşılaştırması.

Karşılaştırma sonuçlarına göre, band başında en iyi yansıma performansına sahip olan soğurucu -41.29 dB yansıma değeriyle güç fonksiyonu soğurucudur. Bu frekans değerinde en kötü performansa sahip soğurucu -29.4 dB yansıma değeri ile geleneksel kama soğurucudur. En iyi performanstan en kötü performansa doğru sırasıyla diğer soğurucular üstel fonksiyon, YMAİ, YMAD ve geleneksel kama soğurucular şeklinde sıralanmaktadır. Band başındaki yansıma değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Soğurucu yapıların 2 GHz için yansıma değerleri.

	Geleneksel kama	YMAİ parabolik	YMAD parabolik	Güç fonksiyonu	Üstel fonksiyon
Yansıma katsayısı (dB)	-29.4	-35	-35	-41.29	-36.3

Soğurucu yapıların band sonundaki yansıma performansları incelendiğinde en iyi performansa sahip soğurucunun -68.09 dB yansıma değeriyle YMAİ parabolik soğurucu olduğu görülmektedir. Bu frekans değerinde en kötü performansa sahip

soğurucu -56.95 dB yansımaya değeri ile geleneksel kama soğurucudur. Diğer soğurucu yapılar en iyi yansımaya değerinden en kötü yansımaya değerine göre güç, üstel, YMAD parabolik ve geleneksel kama soğurucular olarak verilebilir. Çizelge 4.2’de band sonu için yansımaya değerleri sayısal olarak verilmiştir.

**Çizelge 4.2 :** Soğurucu yapıların 12 GHz için yansımaya değerleri.

	Geleneksel kama	YMAİ parabolik	YMAD parabolik	Güç fonksiyonu	Üstel fonksiyon
Yansımaya katsayısı (dB)	-56.95	-68.09	-58.04	-64.3	-58.99

Band içindeki yansımaya performansları değerlendirildiğinde tüm soğurucu yapılar içinde en iyi performansa 9.5 GHz frekans değerinde -86.84 dB ile güç fonksiyonu soğurucunun sahip olduğu görülmektedir. Ancak YMAİ parabolik soğurucunun 7.8 GHz frekansındaki -85.59 dB yansımaya performansı değeri de güç fonksiyonunun yansımaya performansına yakın oldukça iyi bir yansımaya değeridir. Soğurucu yapıların sahip oldukları en iyi yansımaya değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Soğurucu yapıların en iyi yansımaya değerleri.

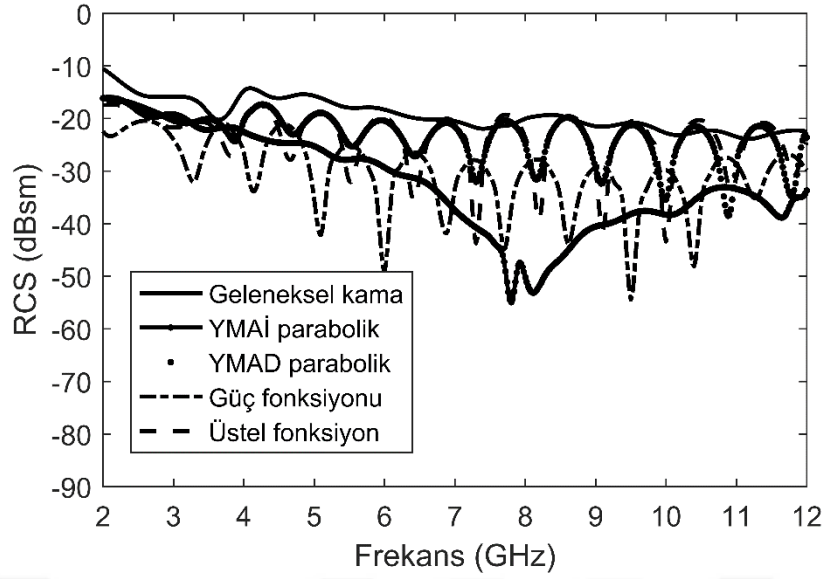
	Geleneksel kama	YMAİ parabolik	YMAD parabolik	Güç fonksiyonu	Üstel fonksiyon
Frekans (GHz)	11.2	7.8	10.88	9.5	10
Yansımaya katsayısı (dB)	-57.7	-85.59	-72.08	-86.84	-76.22

Şekil 4.2’de soğurucu yapıların TM modu RCS sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir. Verilen sonuçlara göre, band başında en iyi RCS değerine sahip olan soğurucu güç fonksiyonu soğurucudur. Güç fonksiyonu soğurucunun bu frekanstaki RCS değeri -22.42 dBsm olarak elde edilmiştir. Band başında en kötü performansa sahip geleneksel kama soğurucunun RCS değeri -10.54 dBsm’dir. Soğurucuların RCS değişimleri en iyi performanstan en kötü performansa doğru sırasıyla güç fonksiyonu, üstel fonksiyon, YMAİ, YMAD ve geleneksel kama soğurucular şeklinde sıralanmaktadır. Çizelge 4.4 band başındaki RCS değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 4.4 :** Soğurucu yapıların 2 GHz için RCS değerleri.

	Geleneksel kama	YMAİ parabolik	YMAD parabolik	Güç fonksiyonu	Üstel fonksiyon
RCS (dBsm)	-10.54	-16.13	-16.13	-22.42	-17.44





**Şekil 4.2 :** Soğurucu yapıların RCS değişimleri.

Band sonundaki RCS değerlerine göre en iyi performansa sahip soğurucu -33.66 dBsm RCS değeriyle YMAİ parabolik soğurucudur. Band sonundaki en kötü RCS performansına sahip soğurucu -22.51 dBsm RCS değeri ile geleneksel kama soğurucudur. Diğer soğurucu yapıların RCS performansı sıralaması en iyi RCS değerinden en kötü RCS değerine göre güç, üstel, YMAD parabolik ve geleneksel kama soğurucu şeklindedir. Çizelge 4.5’te band sonu için RCS değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.5 :** Soğurucu yapıların 12 GHz için RCS değerleri.

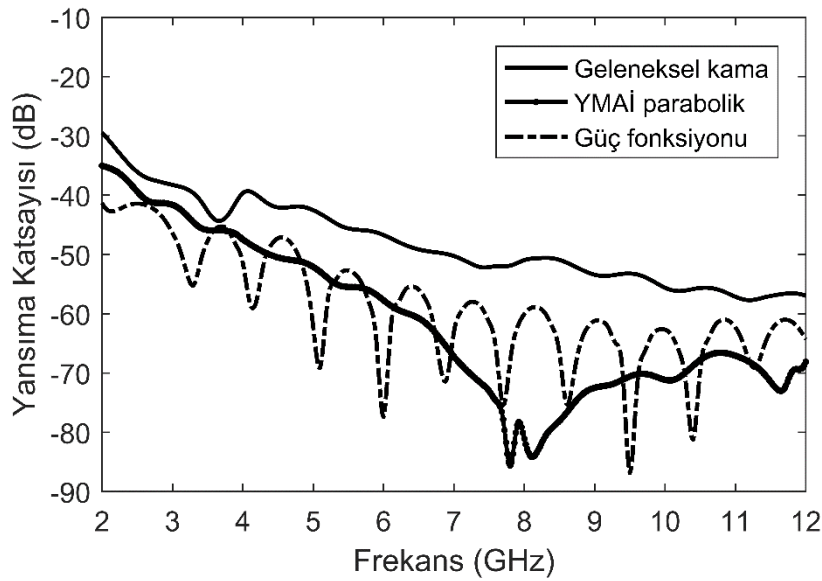
	Geleneksel kama	YMAİ parabolik	YMAD parabolik	Güç fonksiyonu	Üstel fonksiyon
RCS (dBsm)	-22.51	-33.66	-23.6	-29.87	-24.55

Band içindeki RCS performanslarının değerlendirilmesi sonucunda tüm soğurucu yapılar içinde en iyi RCS değerine 7.8 GHz frekans değerinde -54.9 dBsm ile YMAİ parabolik soğurucunun sahip olduğu görülmektedir. Güç fonksiyonu soğurucunun 9.5 GHz frekansındaki -54.44 dBsm RCS performansı değeri de YMAİ parabolik soğurucunun RCS performansına yakın oldukça iyi bir RCS değeridir. Soğurucu yapıların sahip oldukları en iyi RCS değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Elde edilen yansıma ve RCS sonuçlarının değerlendirilmesi göstermektedir ki geleneksel kama soğurucuya alternatif olarak optimize edilmiş içbükey soğurucular da oldukça iyi performansa sahip soğuruculardır. Özellikle YMAİ parabolik soğurucu ve güç fonksiyonu soğurucu dikkate değer yansıma performansına sahiptirler.

**Çizelge 4.6 :** Soğurucu yapıların en iyi RCS değerleri.

	Geleneksel kama	YMAİ parabolik	YMAD parabolik	Güç fonksiyonu	Üstel fonksiyon
Frekans (GHz)	11.2	7.8	10.88	9.5	10
RCS (dBsm)	-23.86	-54.9	-38.49	-54.44	-43.36

Şekil 4.3'te geleneksel kama soğurucu, YMAİ parabolik soğurucu ve güç fonksiyonu soğurucunun yansımaya performansları karşılaştırmayı daha iyi yapabilmek amacıyla verilmiştir.



**Şekil 4.3 :** En iyi performanslı iki soğurucunun ve kama soğurucunun yansımaya değerleri.

Geleneksel kama soğurucudan daha iyi yansımaya performansına sahip optimize edilmiş içbükey soğurucuların yansımaysız odalardaki EMI ve EMC testlerinde kullanılabileceği görülmektedir. Bu soğurucular hacimsel olarak aynı periyot ve yükseklikteki geleneksel kama soğurucudan daha az hacme sahip olduklarından daha az kayıplı dielektrik malzeme kullanılarak elde edilebilirler ve maliyet avantajı sağlayabilirler. Geleneksel kama soğurucuya eşdeğer düzeyde kayıp sağlayan içbükey soğurucu elde edilmek istenirse daha az yüksekliğe ve çok daha az hacme sahip soğurucular incelenebilir. Bu soğurucular maliyet avantajı yanında yansımaysız odanın kullanılabilir alanının artmasını da sağlayacaklardır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geometrileri optimizasyon tekniği kullanılarak optimize edilmiş içbükey tek periyodik kayıplı yapıların soğurma performansları incelenmiştir. Kayıplı periyodik yapıların analizleri için EM dalga saçılması ile ilgili etkili hesaplama araçlarından biri olan PMM yöntemi kullanılmıştır. PMM ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelenerek bir MATLAB program kodu geliştirilmiştir. MATLAB kodlarının daha hızlı, daha etkin ve daha geniş bantlı analizleri gerçekleştirebilmesi için, MATLAB programının vektör işlemleri yapma, matris tersi işlemlerini sayısal iterasyon işlemleri kullanarak daha hızlı elde etme gibi bazı özellikleri kullanılmıştır. PMM bağıntılarında da gerekli düzenlemeler yapılmış formülasyonda yer alan sonsuz toplamın daha hızlı yakınsaması sağlanmıştır. Bu amaçla normal sonsuz toplamdaki sıfır indisli ve pozitif indisli terimler üzerinden negatif indisli terimler kolayca toplama dahil edilerek çalışma zamanının normal geliş durumu için yaklaşık olarak yarıya indirilmesi sağlanmıştır. Empedans matrisinin hesaplanmasında daha fazla hesaplama zamanı gerektiren ve önceki çalışmalarda kullanılan dörtgen hücrenin bölünerek beş farklı bölge üzerinden çift katlı integrasyon yöntemi yerine üçgen hücrenin dönüştürülmesiyle elde edilen ve çok daha az çalışma zamanı ile çözüme ulaşabilen kare hücre eşdeğeri üzerinden tek bölge integrasyon yöntemi geliştirilmiştir.

Empedans geçişi ile yansıma performansı ilişkisinden yola çıkılarak geleneksel kama, dışbükey ve içbükey yüzey geometrisine sahip soğurucu yapıların yansıma performansları karşılaştırılmış ve içbükey yüzeylerin daha iyi performans sağladığı görülerek çok bilinen bazı içbükey fonksiyonlar kullanılarak soğurucu yapılar elde edilmiştir. İçbükey yüzey fonksiyonlarının parametreleri optimizasyon yöntemleri kullanılarak optimize edilmiş ve daha iyi yansıma performansına sahip soğurucu yapılar elde edilmeye çalışılmıştır.

Referans çalışmadaki soğurucu yapılardan biri MATLAB kodu ile analiz edilmiş ve referans çalışmada verilen sonuçlarla karşılaştırılarak programın elde ettiği sonuçların doğruluğu ispatlanmıştır. Optimizasyon yöntemleri ile elde edilen kama soğurucuya benzer olarak tekli periyodikliğe sahip parabolik fonksiyon, güç fonksiyonu, üstel

fonksiyon gibi içbükey fonksiyonlar temel alınarak tasarlanmış tekli periyodik soğurucu yapı tasarımlarının PMM hesaplamalarına ait sonuçlar sunulmuştur.

Analiz edilen bütün soğurucu yapıların aynı dielektrik özellik, kama periyodu ve yüksekliğine sahip olduğu kabul edilmiştir. Soğurucu yapıların analizinde gelen EM dalganın TM (enine manyetik) modu olması durumu dikkate alınmıştır. Sonsuz uzunluktaki ve sonsuz adet elemente sahip (sonsuz periyotlu) soğurucu yapıya ait yansıma katsayısı, faz, radar kesit alanı (RCS) ve bistatik patern grafikleri yansısız oda soğurma performansını belirlemek için PMM çözümlerinden elde edilmiştir. PMM hesaplamalarında 3.30 GHz saat frekansında çalışan her biri 4 çekirdekli 2 adet Xenon işlemciye (toplam 8 çekirdek), 48 GB rastgele erişimli belleğe (RAM) sahip 64-bit tabanlı bir bilgisayar kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, mevcut periyodik soğurucu yapılardan daha iyi performansa sahip soğurucu yapıları, soğurucu geometrisini optimize ederek ve analiz aracı olarak kullanılan PMM MATLAB kodlarının daha verimli, hızlı çalışmasını sağlayarak elde etmektir. Bu amaca ulaşıldığını kama soğurucudan daha iyi performans sağlayan parabolik soğurucu, güç fonksiyonu soğurucu ve üstel soğurucuya ait sonuçlar göstermektedir.

İlerleyen dönemde yapılacak çalışmalar arasında piramit soğurucuya benzer çift periyodik yapıların da bu çalışmada kullanılan soğurucu geometrisi optimizasyonuna benzer şekilde elde edilerek hem tek periyodik hem de çift periyodik yapıların fiziksel olarak gerçekleşmesi ve testlerinin yapılması sayılabilir. Ayrıca analizlerin yapılmasında kullanılan PMM kodlarının daha da verimli ve hızlı çalışmasını sağlayacak iyileştirmeler de ilerleyen dönemde yapılacaklar arasındadır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Hirose, K.** (2016). Electromagnetic wave absorber: Google Patents.
- [2] **Tong, X.C.** (2016). *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding*: CRC Press.
- [3] **Il Kim, D., D.H. Kim, and D.H. Choi.** (2007). Design of a super wide-band EM wave absorber for a general purpose anechoic chamber. *Current Applied Physics*, 7(5), 457-462. doi:10.1016/j.cap.2006.09.033
- [4] **Holloway, C.L. and E.F. Kuester.** (1996). Modeling semi-anechoic electromagnetic measurement chambers. *Ieee Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 38(1), 79-84. doi:Doi 10.1109/15.485700
- [5] **Kuester, E.F. and C.L. Holloway.** (1989). Improved Low-Frequency Performance of Pyramid-Cone Absorbers for Application in Semi-Anechoic Chambers. *Ieee 1989 National Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 394-399.
- [6] **Tang, W., R. Yang, and Y. Hao.** (2014). Compression of a pyramidal absorber using multiple discrete coordinate transformation. *Optics express*, 22(8), 9033-9047.
- [7] **Zahid, L., et al.** (2015). Performance of Sugarcane Bagasse and Rubber Tire Dust Microwave Absorber in Ku Band Frequency *Theory and Applications of Applied Electromagnetics* (pp. 207-214): Springer.
- [8] **Fallahi, A. and A. Enayati.** (2016). Modeling Pyramidal Absorbers Using the Fourier Modal Method and the Mode Matching Technique. *Ieee Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(3), 820-827.
- [9] **Azman, A., et al.** (2015). Study of Simulation Design Pyramidal Microwave Absorber with Different Relative Permittivity. *Journal of Convergence Information Technology*, 10(6), 20.
- [10] **Abdullah, H., et al.** (2016). Multilayer Performance of Green Biomass Coated Pyramidal Hollow Microwave Absorber *Advanced Computer and Communication Engineering Technology* (pp. 1175-1185): Springer.
- [11] **Shami, T., et al.** (2015). *Multicomponent lightweight ultra wide band electromagnetic absorbers for X band frequency region*. Paper presented at the 2015 Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS).
- [12] **Park, M.J. and S.S. Kim.** (2016). Design of Wide Bandwidth Pyramidal Microwave Absorbers Using Ferrite Composites with Broad Magnetic Loss Spectra. *Electronic Materials Letters*, 12(5), 610-614.

- [13] **Aoyagi, T., et al.** (2014). *Effects of incident directions on reflection coefficients of pyramidal electromagnetic wave absorber*. Paper presented at the Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC'14/Tokyo), 2014 International Symposium on.
- [14] **Enayati, A. and A. Fallahi.** (2015). Pyramidal Absorbers Investigation of Higher Orders of Diffraction. *ATMS 2015, Bangalore, India*.
- [15] **Erbas, C., T. Gunel, and S. Kent.** (2003). Optimization on wedge type absorbers via genetic algorithm. *2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Vols 1 and 2, Symposium Record*, 1255-1258. doi:Doi 10.1109/Icsmc2.2003.1429147
- [16] **Kent, S. and M. Kartal.** (2007). Dielectric absorber design for wide band-wide oblique incidence angle using genetic algorithm. *Aeu-International Journal of Electronics and Communications*, 61(6), 398-404. doi:10.1016/j.aeue.2006.08.003
- [17] **Kent, S. and M. Kartal.** (2008). Genetic algorithm approach on pyramidal dielectric absorbers. *International Journal of Rf and Microwave Computer-Aided Engineering*, 18(3), 286-294. doi:10.1002/mmce.20291
- [18] **Lee, J., M. Yoo, and S. Lim.** (2015). A Study of Ultra-Thin Single Layer Frequency Selective Surface Microwave Absorbers With Three Different Bandwidths Using Double Resonance. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 63(1), 221-230.
- [19] **Yang, C.-F. and W.D. Burnside.** (1992). *Periodic moment method solutions for scattering from arrays of lossy dielectric bodies*.
- [20] **Apaydin, G. and L. Sevgi.** (2015). A Novel Wedge Diffraction Modeling Using Method of Moments (MoM). *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 30(10), 1053-1058.
- [21] **Ozgun, O. and L. Sevgi.** (2012). Comparative Study of Analytical and Numerical Techniques in Modeling Electromagnetic Scattering from Single and Double Knife-Edge in 2D Ground Wave Propagation Problems. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 27(5), 376-388.
- [22] **Uslu, M.A. and L. Sevgi.** (2012). Matlab-Based Virtual Wedge Scattering Tool for the Comparison of High Frequency Asymptotics and FDTD Method. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 27(9), 697-705.
- [23] **Pometcu, L., et al.** (2014). *Straight wedge absorber geometry optimization for normal and oblique incidence*. Paper presented at the Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2014 Loughborough.
- [24] **Emerson, W.** (1973). Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 21(4), 484-490.
- [25] **Kuester, E.F. and C.L. Holloway.** (1994). A Low-Frequency Model for Wedge or Pyramid Absorber Arrays .1. Theory. *Ieee Transactions on*

*Electromagnetic Compatibility*, 36(4), 300-306. doi:Doi 10.1109/15.328859

- [26] **Duan, Y. and H. Guan.** (2016). *Microwave Absorbing Materials*: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.
- [27] **Neher, L.K.** (1953). Nonreflecting background for testing microwave equipment: Google Patents.
- [28] **Saville, P.** (2005). Review of radar absorbing materials: DTIC Document.
- [29] **Shadi, M. and K. Mohamadpour-Aghdam.** (2015). Modelling of Pyramidal Microwave Absorber with a Lossy Slab in 400-1600 MHz frequency range. *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering (Icee)*, 177-181.
- [30] **Yaman, M.D.** (2015). *Thin film coating of glass fabrics for radar absorbing composites*. İzmir Institute of Technology.
- [31] **Rudduck, R.C., W.D. Burnside, and C.-F. Yang.** (1993). Serrated electromagnetic absorber: Google Patents.
- [32] **Chatterton, P.A. and M.A. Houlden.** (1992). EMC-Electromagnetic theory to practical design. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 93, 17521.
- [33] **Costa, F. and A. Monorchio.** (2012). A Frequency Selective Radome With Wideband Absorbing Properties. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 60(6), 2740-2747. doi:10.1109/Tap.2012.2194640
- [34] **Pang, Y.Q., Y.J. Zhou, and J. Wang.** (2011). Equivalent circuit method analysis of the influence of frequency selective surface resistance on the frequency response of metamaterial absorbers. *Journal of Applied Physics*, 110(2). doi:Artn 023704 10.1063/1.3608169
- [35] **Shang, Y.P., Z.X. Shen, and S.Q. Xiao.** (2013). On the Design of Single-Layer Circuit Analog Absorber Using Double-Square-Loop Array. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 61(12), 6022-6029. doi:10.1109/Tap.2013.2280836
- [36] **Yoo, M. and S. Lim.** (2014). Polarization-Independent and Ultrawideband Metamaterial Absorber Using a Hexagonal Artificial Impedance Surface and a Resistor-Capacitor Layer. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 62(5), 2652-2658. doi:10.1109/Tap.2014.2308511
- [37] **Costa, F., A. Monorchio, and G. Manara.** (2016). Theory, design and perspectives of electromagnetic wave absorbers. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 5(2), 67-74.
- [38] **Fante, R.L. and M.T. McCormack.** (1988). Reflection Properties of the Salisbury Screen. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 36(10), 1443-1454. doi:Doi 10.1109/8.8632
- [39] **Salisbury, W.W.** (1952). Absorbent body for electromagnetic waves.
- [40] **Saville, P.** (2004). A Review of Optimisation Techniques for Layered Radar Materials Including the Genetic Algorithm: DTIC Document.
- [41] **Dutoit, L.J.** (1994). The Design of Jauman Absorbers. *Ieee Antennas and Propagation Magazine*, 36(6), 17-25. doi:Doi 10.1109/74.370526

- [42] **duToit, L.J. and J.H. Cloete.** (1996). Electric screen Jauman absorber design algorithms. *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44(12), 2238-2245. doi:Doi 10.1109/22.556452
- [43] **Kazemzadeh, A. and A. Karlsson.** (2010). Multilayered Wideband Absorbers for Oblique Angle of Incidence. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 58(11), 3637-3646. doi:10.1109/Tap.2010.2071366
- [44] **Munk, B.A., P. Munk, and J. Pryor.** (2007). On designing Jaumann and circuit analog absorbers (CA absorbers) for oblique angle of incidence. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 55(1), 186-193. doi:10.1109/Tap.2006.888395
- [45] **Alu, A., et al.** (2007). Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 55(1), 13-25. doi:10.1109/Tap.2006.888401
- [46] **Alu, A., et al.** (2007). Theory and simulations of a conformal omni-directional subwavelength metamaterial leaky-wave antenna. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 55(6), 1698-1708. doi:10.1109/Tap.2007.898615
- [47] **Bilotti, F., et al.** (2007). Equivalent-circuit models for the design of metamaterials based on artificial magnetic inclusions. *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(12), 2865-2873. doi:10.1109/Tmtt.2007.909611
- [48] **Lagarkov, A.N., V.N. Kisel, and V.N. Semenenko.** (2008). Wide-angle absorption by the use of a metamaterial plate. *Piers 2008 Hangzhou: Progress in Electromagnetics Research Symposium, Vols I and II, Proceedings*, 869-874.
- [49] **Ourir, A., A. de Lustrac, and J.M. Lourtioz.** (2006). All-metamaterial-based subwavelength cavities ( $\lambda/60$ ) for ultrathin directive antennas. *Applied Physics Letters*, 88(8). doi:Artn 084103 10.1063/1.2172740
- [50] **Eleftheriades, G.V., A.K. Iyer, and P.C. Kremer.** (2002). Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines. *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(12), 2702-2712. doi:10.1109/Tmtt.2002.805197
- [51] **Falcone, F., et al.** (2004). Cabinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials. *Physical Review Letters*, 93(19). doi:ARTN 197401 10.1103/PhysRevLett.93.197401
- [52] **Marques, R., et al.** (2002). Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic waveguides. *Physical Review Letters*, 89(18). doi:ARTN 183901 10.1103/PhysRevLett.89.183901
- [53] **Marques, R., F. Martin, and M. Sorolla.** (2008). Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications. *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications*, 1-315.



- [54] **Marques, R., F. Medina, and R. Ruffi-El-Idrissi.** (2002). Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials. *Physical Review B*, 65(14). doi:ARTN 144440 10.1103/PhysRevB.65.144440
- [55] **Pendry, J.B., et al.** (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084. doi:Doi 10.1109/22.798002
- [56] **Zhao, Q., et al.** (2009). Mie resonance-based dielectric metamaterials. *Materials Today*, 12(12), 60-69.
- [57] **Bilotti, F., L. Nucci, and L. Vegni.** (2006). An SRR based microwave absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(11), 2171-2175. doi:DOI 10.1002/mop.21891
- [58] **Gu, S., et al.** (2010). A broadband low-reflection metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics*, 108(6). doi:Artn 064913 10.1063/1.3485808
- [59] **Tao, H., et al.** (2010). A dual band terahertz metamaterial absorber. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 43(22). doi:Artn 225102 10.1088/0022-3727/43/22/225102
- [60] **Yang, G.H., et al.** (2014). Broadband polarization-insensitive absorber based on gradient structure metamaterial. *Journal of Applied Physics*, 115(17). doi:Artn 17e523 10.1063/1.4868090
- [61] **Landy, N.I., et al.** (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100(20). doi:ARTN 207402 10.1103/PhysRevLett.100.207402
- [62] **Huynen, I., et al.** (2008). Microwave absorbers based on foamed nanocomposites with graded concentration of carbon nanotubes. *2008 European Microwave Conference, Vols 1-3*, 1514-+.
- [63] **Iqbal, M.N., et al.** (2012). A Study of the Emc Performance of a Graded-Impedance, Microwave, Rice-Husk Absorber. *Progress in Electromagnetics Research-Pier*, 131, 19-44.
- [64] **Petrov, V.M. and V.V. Gagulin.** (2001). Microwave absorbing materials. *Inorganic Materials*, 37(2), 93-98. doi:Doi 10.1023/A:1004171120638
- [65] **Reinert, J., et al.** (2001). On the potential of graded-chiral Dallenbach absorbers. *Microwave and Optical Technology Letters*, 30(4), 254-257. doi:DOI 10.1002/mop.1283
- [66] **Iqbal, M.N., et al.** (2014). A Study of the Anechoic Performance of Rice Husk-Based, Geometrically Tapered, Hollow Absorbers. *International Journal of Antennas and Propagation*. doi:Artn 498767 10.1155/2014/498767
- [67] **Janaswamy, R.** (1992). Oblique Scattering from Lossy Periodic Surfaces with Application to Anechoic Chamber Absorbers. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 40(2), 162-169. doi:Doi 10.1109/8.127400
- [68] **Özgen, C.** (2012). *Development Of Multi-Layered Circuit Analog Radar Absorbing Structures*. Middle East Technical University.
- [69] **Severin, H.** (1956). Nonreflecting absorbers for microwave radiation. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 4(3), 385-392.

- [70] **Dash, G. and L. Ampyx.** (2005). How rf anechoic chambers work. *glendash.com*.
- [71] **Nornikman, H., et al.** (2009). Investigation of an Agricultural Waste as an Alternative Material for Microwave Absorbers. *Piers 2009 Moscow Vols I and II, Proceedings*, 1287-1291.
- [72] **Yang, C.F., W.D. Burnside, and R.C. Rudduck.** (1992). A Periodic Moment Method Solution for Tm Scattering from Lossy Dielectric Bodies with Application to Wedge Absorber. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 40(6), 652-660. doi:Doi 10.1109/8.144599
- [73] **Akinci, M.N. and M. Cayoren.** (2014). Microwave subsurface imaging of buried objects under a rough air-soil interface. *Remote Sensing Letters*, 5(8), 703-712. doi:10.1080/2150704x.2014.960609
- [74] **Altuncu, Y., A. Yapar, and I. Akduman.** (2006). On the scattering of electromagnetic waves by bodies buried in a half-space with locally rough interface. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6), 1435-1443. doi:10.1109/Tgrs.2006.870436
- [75] **Bilgin, E. and A. Yapar.** (2015). Electromagnetic Scattering by Radially Inhomogeneous Dielectric Spheres. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 63(6), 2677-2685. doi:10.1109/Tap.2015.2415856
- [76] **Guren, O., et al.** (2014). Surface impedance based microwave imaging method for breast cancer screening: contrast-enhanced scenario. *Physics in Medicine and Biology*, 59(19), 5725-5739. doi:10.1088/0031-9155/59/19/5725
- [77] **Rhodes, D.** (1953). On the theory of scattering by dielectric bodies. *Ohio State University Research Foundation (Antenna Laboratory), Engineering Report*, 475-1.
- [78] **Walther, K.** (1960). Reflection factor of gradual-transition absorbers for electromagnetic and acoustic waves. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 8(6), 608-621.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** İbrahim Çatalkaya  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** Bozova, 1971  
**Adres:** İstanbul Teknik Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Fakültesi  
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü,  
34469, Maslak/İstanbul  
**E-Posta:** catalkaya@itu.edu.tr  
**Lisans:** Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği,  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
**Yüksek Lisans:** Mühendislik Yönetimi, Marmara Üniversitesi

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

**Catalkaya I., Kent S.** 2017. An Optimized Microwave Absorber Geometry Based on Wedge Absorber. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal* - ... (Accepted).

**Catalkaya I., Kent S.** 2017. Designing Microwave Absorber Shape by Using Optimization. *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2017 8th International Conference, Istanbul, Turkey.* - ... (Accepted).

**Catalkaya I., Kent S.** 2017. Absorption Performance Investigating of Power Function Shaped Absorber. *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2017 8th International Conference, Istanbul, Turkey.* - ... (Accepted).

**Catalkaya I., Kent S.** 2016. Comparison of Medical Test Absorbers. *TIPTEKNO'16, Tıp Teknolojileri Kongresi, Antalya, Turkey.*

**Catalkaya I., Kent S.** 2016. Analysis of Biomaterials as Material of Microwave Absorbers. *BIOENG'16 IV. International Bioengineering Conference*, Istanbul, Turkey.

**Catalkaya I., Kent S.** 2013. Optimized geometry pyramidal absorber for normal incidence case. *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2013 6th International Conference*, Istanbul, Turkey.

**Catalkaya I., Kent S.** 2012. Analysis of multiple wedges electromagnetic wave absorbers. *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 26, pp. 1-9.

**Catalkaya I., Kent S.** 2012. Optimized Geometry Wedge Absorbers. *Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS*, Moscow, Russia.

**Kent S., Catalkaya I.** 2011. Effect of apex angle on absorption characteristic of pyramidal absorbers. *General Assembly and Scientific Symposium - URSI*, Istanbul, Turkey.

