

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTROMANYETİK GÖRÜNMEZLİK İÇİN  
PELERİN TASARIMI**

**MOHAMAD NOUR AHMAD**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTROMANYETİK GÖRÜNMEZLİK İÇİN**  
**PELERİN TASARIMI**

**MOHAMAD NOUR AHMAD**

**Prof. Dr. Gonca ÇAKIR**

**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Doç. Dr. Sibel ÇİMEN**

**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Dr. Öğr. Üyesi Sibel ÜNALDI**

**Jüri Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 02.09.2020**

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Bu tezin konusu olan elektromanyetik pelerinler bir nesneyi kapladıklarında o nesnenin elektromanyetik dalgalara karşı görünmezliğini sağlamaktadır. Karmaşık olan konu bu tezde kullanılan yöntemlerle basitlik kazanmıştır ve yüksek performanslı sonuçlar elde edilmiştir. Konuyla ilgili az sayıda Türkçe kaynak bulunduğu için bu tezin araştırmacılara yararlı bir kaynak olmasını temenni ederim.

Bu tez kapsamında yaptığım araştırmalarda kıymetli bilgisi ve yönlendirmesiyle bana hep yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Gonca Çakır'a sonuz teşekkürümü sunarım. Bana her daima ve her koşulda destek olan aileme minnet duygularımı beyan ederim.

Mayıs-2020

Mohamad Nour AHMAD

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELEr DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT .....	viii
GİRİŞ .....	1
1. TEMEL BİLİGİLER.....	3
1.1. Elektromanyetik Görünmezlik .....	3
1.2. Yama Antenler ile Pelerin Tasarımı.....	10
1.2.1. Yama antenler .....	11
1.2.2. Pelerin tasarımı.....	12
2. YÖNTEM VE GELİŞME .....	17
2.1. Yama Anten Birim Hücreler .....	17
2.2. Geniş Bantlı Yama Antenler .....	20
2.2.1. Geniş bantlı anten dizileri .....	20
2.2.2. Log-periyodik yama anten dizisi .....	22
2.3. Log-Periyodik Yama Anten Dizileri ile Pelerin Tasarımı .....	25
2.3.1. Log-periyodik yama anten dizisi ile birim hücre tasarımı .....	26
2.3.2. Log-periyodik yama anten dizisi ile silindirik pelerin tasarımı .....	28
2.4. Silindirik İletken Yüzeyler ile Pelerin Tasarımı .....	30
2.5. Log-Periyodik İletken Yüzeyler İle Pelerin Tasarımı .....	32
3. SİMÜLASYON BULGULARI .....	36
3.1. Log-Periyodik Pelerinin Horn Anten Işıma Örüntüsüne Etkisi .....	36
3.2. Pelerin Kalınlığını Arttırma .....	38
3.3. Silindirik Pelerinin Uzunluğunu Arttırma.....	39
3.4. Silindirik Pelerinin Yarıçapını Arttırma.....	40
3.5. Log-Periyodik Yapıda Yama Sayısının Değişmesi .....	41
3.6. Besleme Hattının Pelerin Çalışmasına Etkisi.....	44
3.7. Pelerin Şeklinin Değişmesi .....	45
4. DENEYSEL BULGULAR .....	47
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	53
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	54
ÖZGEÇMİŞ .....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	(a) Monostatik ve (b) bistatik RKA oluşma durumları .....	4
Şekil 1.2.	(a) Radar soğurucu malzeme ve (b) elektromanyetik pelerin .....	5
Şekil 1.3.	EP yapısı ve gizlenen nesnenin yerleşimi .....	5
Şekil 1.4.	İletim hattı ağlarından oluşan pelerin.....	7
Şekil 1.5.	Toplam saçılma kesit alanının pelerin performansını değerlendirmek için kullanımı .....	9
Şekil 1.6.	Konik iletken levhalarla EP tasarımı.....	9
Şekil 1.7.	Yüksek $\epsilon$ ve $\mu$ değerli ortamda geniş bantlı pelerin tasarımı ve simülasyon ortamı .....	10
Şekil 1.8.	Yama anten.....	11
Şekil 1.9.	Mikroşerit hat ile yama anteni beslemek için yöntemler: (a) ışımayan kenardan, (b) yama içine yapılan girinti ve (c) çeyrek dalga dönüştürücü .....	12
Şekil 1.10.	Yama anten ile pelerin tasarımı: (a) birim hücre ve (b) silindirik pelerin.....	13
Şekil 1.11.	S parametre analizi için port tanımları .....	13
Şekil 1.12.	Yama anten ile tasarlanan pelerinin çalışma sonuçları: (a) S parametreleri ve (b) bistatik saçılma genişliği .....	15
Şekil 1.13.	(a) horn anten önüne pelerin yerleştirme (b) serbest uzayda, iletken silindirikler ve pelerin yerleştirildiğinde elde edilen ışımaya örüntüleri .....	16
Şekil 2.1.	Tek yama anten ile pelerin tasarımı: (a) simülasyon ortamı (b) yamanın boyutları ve (c) S parametre sonuçları.....	18
Şekil 2.2.	Yama anten birim hücreli pelerinin simülasyon ortamı .....	19
Şekil 2.3.	Yama anten birim hücreli pelerinin S parametre sonuçları.....	19
Şekil 2.4.	Log-periyodik dipol anten dizisi .....	21
Şekil 2.5.	Log-periyodik dipol anten dizisinde ışımaya elemanlarını besleme yöntemleri (a) eş fazlı (b) 180 derece faz farkı .....	22
Şekil 2.6.	Log-periyodik yama anten dizisi (çeyrek dalga dönüştürücüsü ile empedans uyumu) besleme hattının: (a) tek tarafına (b) iki tarafına dizilmiş yama ışımaya elemanları.....	23
Şekil 2.7.	Log-periyodik yama anten dizisi (elektromanyetik bağlaşım).....	24
Şekil 2.8.	Log-periyodik yama anten dizisi (eş düzlemlili bağlaşım) .....	25
Şekil 2.9.	Log-periyodik birim hücre (eş düzlemlili bağlaşım).....	26
Şekil 2.10.	Log-periyodik yama anten birim hücre (eş düzlemlili bağlaşım) için S parametre sonuçları .....	28
Şekil 2.11.	Log-periyodik silindirik pelerin: silindirik pelerinin (a) yandan görüntüsü (b) üstten görüntüsü ve (c) simülasyon ortamı.....	28
Şekil 2.12.	Log-periyodik pelerin ve iletken silindir için S parametre sonucu .....	29
Şekil 2.13.	Log-periyodik pelerin ve iletken silindir için RKA sonucu.....	29
Şekil 2.14.	Silindirik iletken yüzey ile pelerin tasarımı: (a) simülasyon ortamı, (b) iletken yüzeyin genişliği ve (c) S parametre sonuçları .....	31

Şekil 2.15. İki tane geniş iletken yüzey ile pelerin tasarımı: (a) simülasyon ortamı, (b) iletken yüzeyin genişliği ve (c) S parametre sonuçları .....	32
Şekil 2.16. İki katmanlı log-periyodik yama anten dizisi: (a) üstten görünüm , (b) yan görünüm ve (c) S parametre sonucu .....	34
Şekil 2.17. LPYAP (a) simülasyon ortamı, (b) pelerinin ön taraftan, (c) pelerinin arka taraftan görünümünü ve (d) S parametre sonuçları.....	35
Şekil 3.1. Pelerinin horn anten önüne yerleştirilmesi (a) ve (b) horn antenin boyutları, (c) ve (d) pelerinin anten önüne yerleştirilmesi .....	37
Şekil 3.2. (a) 10 GHz ve (b) 11 GHz frekansları için X-bant horn antenin serbest uzay, önüne iletken silindir ve pelerin yerleştirildiğinde elde edilen ışınma örüntüleri .....	38
Şekil 3.3. Pelerin kalınlığına göre gelen dalgaların iletilme performansı .....	39
Şekil 3.4. Birden fazla log-periyodik dizi ile uzun pelerin tasarımı: (a) log-periyodik dizilerin yerleşimi ve (b) iki dizi arası mesafeye göre S parametre sonuçları.....	40
Şekil 3.5. Pelerin yarıçapı ile Yamaların L/W oranı ilişkisi: (a) simülasyon ortamı, (b) L/W = 12 için (c) L/W = 6 için pelerinin yan görüntüsü ve (d) S-parametre sonuçları .....	41
Şekil 3.6. Log-periyodik dizi (5 elemanlı): (a) dizinin üstten görünümü ve (b) S parametre sonuçları .....	42
Şekil 3.7. log-periyodik pelerin (5 elemanlı, $h_p = 1$ mm): (a) simülasyon ortamı ve (b) S-parametre sonuçları.....	43
Şekil 3.8. Log-periyodik dizinin kalınlığı $h_p = 2,5$ mm yapıldığında elde edilen S11 sonucu .....	43
Şekil 3.9. 5 elemanlı log-periyodik pelerinin S-parametre sonuçları ( $h_p = 2,5$ mm).....	44
Şekil 3.10. Besleme hattının etkisi (S parametre sonuçları).....	45
Şekil 3.11. Kare kesitli prizma pelerin: (a) simülasyon modeli, (b) pelerinin ön taraftan, (c) üstten görünümü ve (d) S parametre sonuçları .....	46
Şekil 4.1. Üretime uygun LPYAP ile bölüm 2.5’de tasarlanan LPYAP’ın S parametreleri .....	48
Şekil 4.2. Üretilen LPYAP .....	49
Şekil 4.3. 10 GHz için horn anten ışınma örüntüsü ölçümü.....	50
Şekil 4.4. 11 GHz için horn anten ışınma örüntüsü ölçümü.....	50

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Log-periyodik birim hücre tasarım parametreleri .....	27
Tablo 2.2. İki katmanlı log-periyodik yama anten dizisi tasarım parametreleri.....	33
Tablo 3.1. Beş elemanlı ve iki katmanlı log-periyodik dizi tasarımında kullanılan parametreler.....	42
Tablo 4.1. Üretime uygun LPYAP tasarım parametreleri .....	47



## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$f$	: Dalga frekansı (GHz)
$h$	: Yalıtkan alt tabaka kalınlığı (mm)
$L$	: Yalıtkan alt tabaka uzunluğu (mm)
$L_f$	: Besleme hattı uzunluğu (mm)
$L_p$	: Yama uzunluğu (mm)
$r$	: Yarıçap küresel koordinat sistemi (m)
$r'$	: Yarıçap pelerin içi küresel koordinat sistemi (m)
$S_{11}$	: 1. porttaki gerilim yansıma katsayısı
$S_{21}$	: 1. porttan 2. port yönünde gerilim kazanç katsayısı
$W$	: Yalıtkan alt tabaka genişliği (mm)
$W_f$	: Besleme hattı genişliği (mm)
$W_p$	: Yama genişliği (mm)
$\epsilon_r$	: Bağlı dielektrik sabiti
$\theta$	: Enlem küresel koordinat sistemi (rad)
$\theta'$	: Enlem pelerin içi küresel koordinat sistemi (rad)
$\mu_r$	: Bağlı manyetik geçirgenlik
$\sigma_{dif}$	: Diferansiyel saçılma kesit alanı
$\sigma_{tot}$	: Toplam saçılma kesit alanı
$\tau$	: Log-periyodik oran
$\phi$	: Boylam küresel koordinat sistemi (rad)
$\phi'$	: Boylam pelerin içi küresel koordinat sistemi (rad)

### Kısaltmalar

BW	: Band Width (Bant Genişliği)
EM	: Elektromanyetik
EP	: Elektromanyetik Pelerin
RKA	: Radar Kesit Alanı
SKA	: Saçılma Kesit Alanı
YABH	: Yama Anten Birim Hücre
SİYP	: Silindirik İletken Yüzey Pelerin
LPYAP	: Log-Periyodik Yama Anten Pelerin
LPYDP	: Log-Periyodik Yama Dizisi Pelerin
OA	: Open Add Space (Açık Boşluk Ekleme)
PVC	: PolyVinyl Chloride (PoliVinil Klorür)
RL	: Return Loss (Geri Dönüş Kaybı)
S	: Saçılma parametreleri
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)



## ELEKTROMANYETİK GÖRÜNMEZLİK İÇİN PELERİN TASARIMI

### ÖZET

Elektromanyetik görünmezlik konusu birçok sivil ve askeri uygulamada ilgi çekmektedir. Askeri uygulamalarda daha ziyade radara karşı görünmezlik ön plandadır ve radardan gönderilen elektromanyetik dalgaların hedefe çarptıktan sonra tekrar radara doğru saçılmaması için, hedef soğurucu tabakalarla kaplanır ya da dalganın başka bir yöne doğru yansımaları sağlayacak geometriler kullanılır. Bu tip uygulamalarda radara karşı görünmezliğin tanımı hedefin Radar Kesit Alanı (RKA) ile yapılır ve RKA'nın düşürülmesi için değişik teknikler uygulanır. Bir başka görünmezlik türü ise, radar ya da haberleşme anteninden gelen elektromanyetik dalgaların "*hedef yokmuş gibi*" hedefin etrafından dolanarak yoluna devam etmesidir. Bu tip uygulamalar için tasarlanan yapılara literatürde "Elektromanyetik Pelerin Yapıları" (Electromagnetic Cloaking Structures) ismi verilmiştir. Elektromanyetik pelerinler kapladıkları cismin üzerine gelen elektromanyetik dalgaların saçılmasını azaltıp dalgaların yayılma yönünde iletilmesini sağlamaktadır. Elektromanyetik Pelerinlerin dezavantajları pelerin kaplı cisim üzerinden iletilen dalgaların faz bozulmasına uğraması ve bant genişliklerinin dar olmasıdır. Bu tezde geniş bantlı elektromanyetik pelerin tasarımı hedeflenmiştir. Bunu gerçekleştirmek için log-periyodik anten dizisi, yama anten formunda kullanılarak pelerin tasarımı yapılmıştır. Log-periyodik yama anten dizisi tasarımı için birden fazla yöntem bulunmaktadır. Pelerin tasarımında yama antenlerin bir katmanda ve besleme iletim hattının farklı bir katmanda olduğu iki katmanlı yöntem kullanıldı. Tasarlanan log-periyodik yama anten dizisi bir silindir oluşturacak şekilde bükülerek pelerin tasarımı tamamlandı. Elde edilen bant genişliği %40 olup, literatürdeki diğer elektromanyetik pelerinlere kıyasla çok daha iyi bir performans göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektromanyetik Görünmezlik, Elektromanyetik Pelerin, Log-Periyodik Anten Dizileri, Soğurucu Tabakalar, Yama Antenler.

## CLOAK DESIGN FOR ELECTROMAGNETIC INVISIBILITY

### ABSTRACT

The electromagnetic invisibility topic is of interest to many civil and military applications. In military applications, invisibility to radar is more relevant, to make electromagnetic waves sent from radar don't scatter again toward radar after hitting a target, the target is covered with absorber layers or it uses geometries that make incident waves reflecting to another direction. In this type of application invisibility against radar is defined using Radar Cross Section (RCS) and various techniques are applied to minimize RCS. Another type of invisibility occurs when electromagnetic waves transmitted from radar or telecommunication antenna follow the vicinity of the target object and continue propagation "*as there is no target*". Designing structures for such applications are called in the literature "Electromagnetic Cloaking Structures". Electromagnetic cloak coverage of an object minimizes the scattering of incident electromagnetic waves while it transmits incident waves in the propagation direction. Disadvantages of electromagnetic cloaks are that incident waves which transmitted over cloak covered object are phase distorted and they have a narrow bandwidth. In this thesis, it is aimed to design a wideband electromagnetic cloak. Log-periodic antenna arrays are used in the form of patch antenna to achieve this aim. There are several methods to design a log-periodic patch antenna array. Two layered method in which patches are laid on a layer and feed line laid on another layer is used to design the cloak. After bending the designed log-periodic antenna array to make a cylinder, cloak design is completed. The resulted bandwidth is 40%, comparing it to other electromagnetic cloaks in literature this work's result demonstrates much better performance.

**Keywords:** Electromagnetic Invisibility, Electromagnetic Cloak, Log-Periodic Antenna Arrays, Absorbing Layers, Patch Antennas.

## GİRİŞ

Bir kaynaktan elektromanyetik dalgalar yayıldığında farklı elektriksel özelliklere sahip ortamlar ile karşılaşacaktır ve yansımalar oluşacaktır. EM dalgaların yansımaları uygulamaya bağlı bazen istenen bazen istemeyen bir olaydır. Radar sistemlerinde gönderilen EM dalgaların hedef nesneden yansımaları istenir. Haberleşme sistemlerinde A noktasından B noktasına gönderilen sinyaller yansımaya uğradığında girişim gibi olaylar meydana geldiğinden gönderilen bilgi işaretlerinin bozulmasına neden olur ve yansımalar istenilmez.

Elektromanyetik görünmezlik bir nesneye gelen EM dalgaların geri yansımalarını azaltmayı hedefler. EM görünmezliği gerçekleştirme uygulama alanına göre değişir. Askeri uygulamalarda hedefin radara görünürlüğü Radar Kesit Alanı (RKA) ile belirlenir ve görünmezlik için yapılması gereken bu değeri azaltmaktır. Bunun için radar soğurucu malzemeler kullanılır.

Elektromanyetik Pelerinler (EP) literatürdeki elektromanyetik görünmezliği gerçekleştirme yöntemlerinden birisidir. EP'ler içyapıları nedeniyle gelen dalgaları yansımaya olmadan yayıldıkları yönde iletirler ve pelerinlerin içinde radar soğurucu malzemeler gibi dalgalar zayıflatılmaz. EP içinde ilerleyen dalgalar dışarıya iletildiğinde pelerinlerin dışında paralel olarak ilerleyen dalgalar ile aynı fazda olması gerekmektedir. Bu nedenle gizlenmesi istenen hedef nesneyi kapladıklarında gelen EM dalgaları hedef nesne yokmuş gibi yayılım yönünde ilerlemeye devam ederler çünkü pelerinlerin içinde zayıflama ya da faz bozulması olmadığından gelen dalgaların özellikleri değişmemektedir.

EM pelerinlerin tasarımı için gerekli teori Pendry ve diğerleri tarafından [1]'de anlatılmıştır. Kaynak [1]'deki teoriye göre karşılaşılan en büyük problem serbest uzayda gelen dalgaların faz bozulmasına uğramadan geniş bantlı pelerinlerin tasarlamadır. Bu çalışma esas alınarak EM pelerinlerin tasarımı için birçok yöntem önerilmiştir.

Önerilen yöntemlerin bazıları isteğe bağlı boyutlarda nesnelere gizlemek için uygun değildir, bazı yöntemler pratikte uygulaması zor olan kalın pelin yapıları önermiştir ve bazıları ince pelin önermiştir ama dar frekans bantlıdır. Bu yöntemlerin hepsinin ortak yanı faz bozulmasının kaçınılmaz olmasıdır.

Bu tezde ince ve geniş bantlı pelin tasarımı hedeflenmiştir. Bunu gerçekleştirmek için log-periyodik yama anten dizileri kullan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle göre pelinini tasarlamak ve bant genişliğini belirlemek literatürdeki diğer yöntemlere göre oldukça kolay ve kullanışlıdır. Yöntemin sağladığı tasarım esnekliği istenilen uzunluk ve genişlikte pelin tasarlamaya imkan vermektedir. Elde edilen sonuçlar bu tezdeki tasarımın literatürdeki diğer yöntemlere göre frekans bant genişliğinde ciddi bir artış gerçekleştirdiğini göstermektedir.

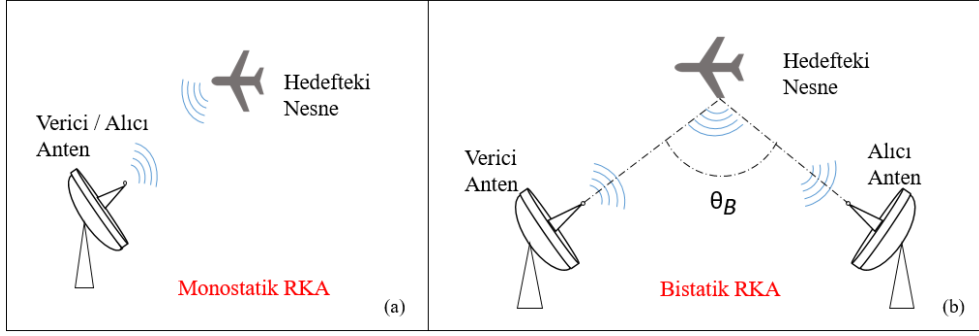
Bu tezde yapılan tüm simülasyonlar CST Microwave Studio programı ile gerçekleştirilmiştir.

## 1. TEMEL BİLGİLER

Bu tezde pelerin kelimesi EP anlamında sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde elektromanyetik pelerin tasarımını konu alan birçok yöntem mevcuttur. EP tasarım yöntemlerinin geneli karmaşık yapılıdır ve pratik kullanım için uygun değildir. Bu bölümde Elektromanyetik Görünmezlik alt başlığıyla EP tasarımıyla ilgili literatür bilgisi verilmektedir, önerilen yöntemlerin bant genişliği ile gizlenecek nesne boyutları incelenmektedir. Mikrodalga devrelerinde mikroşerit yapılar tasarım ve üretim açısından kolaylık sağlamaktadır, bu nedenle yama antenler ve mikroşerit hatlar içeren yöntemler EP tasarımını kolaylaştırmaktadır. Yama antenlerle pelerin tasarımı bu tezdeki çalışmaların temelini oluşturmaktadır, bu yöntemle ilgili literatür bilgileri bu bölümün Yama Antenler ile Pelerin Tasarımı alt başlığı ile verilmektedir.

### 1.1. Elektromanyetik Görünmezlik

Bağıl elektrik veya manyetik geçirgenliği bulunduğu ortamdan farklı olan bir nesnenin üzerine elektromanyetik dalgalar geldiğinde dalgaların geri yansımaya veya birçok farklı yönde saçılmasına neden olacaktır. Böyle bir nesnenin yaydığı elektromanyetik güç ile belirli bir yönden nesneye gelen elektromanyetik dalgaların güç yoğunluğu arasındaki oran Radar Kesit Alanı (RKA) olarak bilinir ve birimi  $m^2$ 'dir. Nesneye gönderilen dalgalar ve nesneden yansıyan dalgaların ölçümü (alımı) aynı yönde ise bu durumda monostatik RKA bulunmuş olur. Bunun için verici ve alıcı antenin aynı anten olması gerekir veya nesnenin uzaklığı ve nesnenin boyutuna göre aynı konumda iki anten olabilir. Eğer nesneye gönderilen dalgalar ile nesneden yansıyan dalgaların ölçümü aynı yönde değilse bu durumda bistatik RKA bulunmuş olur. Bunun için verici ve alıcı antenin nesneye göre farklı konumlarda olması gerekir. Bistatik RKA'ya geometrik açıdan bakıldığında radar sistemindeki her bir antenin nesne ile oluşturduğu hayali doğrulardan bir açı oluşturulduğunda bu açı bistatik RKA açısı  $\theta_B$  olarak bilinir ve  $\theta_B = 0^\circ$  için monostatik RKA durumu oluşur. Monostatik ve bistatik RKA oluşma durumları Şekil 1.1'de gösterilmektedir.

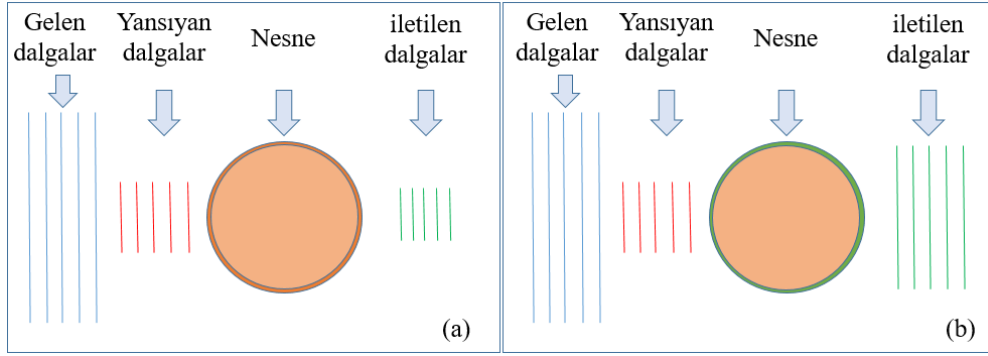


Şekil 1.1. (a) Monostatik ve (b) bistatik RKA oluşma durumları

Radar bir nesneyi tespit etmek için nesneden yansıyan dalgaların güç yoğunluğundan yararlanır. Hedef nesneden yansıyan dalga güç yoğunluğu radarın alıcı anteni yönünde ne kadar büyük değerde ise hedef nesne radar için o kadar görünürdür.

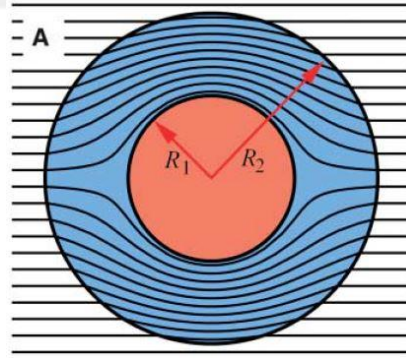
Bir nesnenin elektromanyetik dalgalara görünmez olması bu nesnenin monostatik veya bistatik RKA değerinin çok düşük olmasını gerektirir. Radar soğurucu malzemelerin temel amacı kapladıkları nesnenin RKA değerini azaltmaktır. RKA değerini azaltmayı nesneye gelen dalgaları soğurucu malzemenin içinde sönmüleyerek gerçekleştirir bu sayede nesneden alıcı antenlere yansıma yoluyla giden dalgaların güç yoğunluğu düşürülür. Radar soğurucu malzemeler gelen dalgaları kendi içinde zayıflattığı için bir ışık kaynağı ile aydınlatılan nesnenin arkasında nasıl gölge oluşuyorsa aynı şekilde gelen dalgaların yayılma yönüne göre bu malzeme ile kaplanan nesnenin arkasında kalan bölgede elektromanyetik dalgaların olmadığı gölge bölgesi oluşur. Böylece nesnenin arkasındaki gölge bölgesinde konumlanan alıcılar tarafından bulunmasına neden olur (bu şekil çalışan bir Radar sisteminde verici antenden alıcı antene iletilen dalgaların zayıflamasından arada bir nesnenin var olup olmadığı anlaşılır).

Elektromanyetik Pelerinler kapladıkları bir nesneye doğru gelen düzlem dalgaların yansımalarını azaltıp dalgaları Radar soğurucu malzemeler gibi kendi içinde zayıflatmak yerine gelen dalgaların yayılım yönünde iletilmesini sağlarlar. Bu sayede hem yansımaları azaltır hem de gölge bölgesi oluşturmazlar ve görünmezliği daha iyi sağlarlar. Şekil 1.2’de Radar soğurucu malzemeler ile elektromanyetik pelerinlerin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 1.2. (a) Radar soğurucu malzeme ve (b) elektromanyetik pelerin

Kaynak [1]'de elektromanyetik pelerin içyapısı için bir koordinat dönüşümü önerilmiştir. EP'yi tanımlayan bölgenin içindeki koordinat sistemi ile EP'yi çevreleyen ortamın koordinat sisteminde yazılan Maxwell denklemleri arasında bir bağıntı bulunmaktadır. Her iki ortamdaki dielektrik katsayısı  $\epsilon$  ve manyetik geçirgenlik katsayısı  $\mu$  arasında koordinat sistemindeki her bir eksen için ölçekleme bulunmaktadır. Şekil 1.3'te gizlenecek nesne  $R < R_1$  bölgesinde bulunan küre ve pelerin  $R_1 < R < R_2$  bölgesindeki küre yapısı ile gösterilmiştir, gelen elektromanyetik dalgalar güç akışı ışınları ile gösterilmiştir.



Şekil 1.3. EP yapısı ve gizlenen nesnenin yerleşimi [1]

Şekilde görüldüğü gibi elektromanyetik dalgaların güç akışı gizlenecek nesneye ulaşmadan EP bölgesinde bir akışkan gibi nesnenin çevresinde ilerleyerek iletilmektedir. Eğer EP ve gizlenecek nesnenin bulunduğu ortam boşluk olarak alınırsa EP bölgesindeki dielektrik katsayısı  $\epsilon'$  ve manyetik geçirgenlik katsayısı  $\mu'$ 'nin sağlaması gereken değerler [1]'de aşağıdaki gibi verilmiştir,

$$\varepsilon'_{r'} = \mu'_{r'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \frac{(r' - R_1)^2}{r'^2} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon'_{\theta'} = \mu'_{\theta'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon'_{\phi'} = \mu'_{\phi'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \quad (1.3)$$

Burada  $\varepsilon'_{r'}$ ,  $\mu'_{r'}$ ,  $\varepsilon'_{\theta'}$ ,  $\mu'_{\theta'}$ ,  $\varepsilon'_{\phi'}$  ve  $\mu'_{\phi'}$  EP bölgesindeki parametrelerdir. EP ve EP'yi çevreleyen ortamda farklı küresel koordinatlar kullanılmıştır bu iki koordinat sistemi arasındaki bağıntılar aşağıdadır

$$r' = R_1 + r(R_2 - R_1) / R_2 \quad (1.4)$$

$$\theta' = \theta, \quad \phi' = \phi \quad (1.5)$$

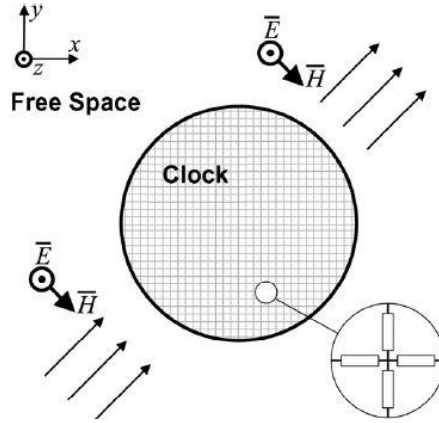
Burada  $r$ ,  $\theta$  ve  $\phi$  pelerin dışında kalan bölgedeki koordinat sisteminin değişkenleri ve  $r'$ ,  $\theta'$  ve  $\phi'$  pelerin içindeki koordinat sisteminin değişkenleridir. Elektromanyetik dalgaların bir malzeme içindeki faz hızı boşluktaki faz hızından daha yüksek olabilir ama malzeme içindeki grup hızı boşluktaki faz hızından daha yüksek olamaz. Herhangi bir malzemenin elektromanyetik özellikleri tek tonlu harmonik sinyaller için incelendiğinde faz hızı incelenir. Eğer malzemenin özellikleri geniş bantlı bir sinyal için incelenecek ise faz hızı ve grup hızının her ikisine bakılmalıdır.

EP bölgesindeki elektromanyetik dalgalar nesnenin etrafında ilerlerken normalden daha fazla mesafe kat edeceğinden EP'nin içinde ve dışında kalan dalgalar arasında faz bozukluğu olmaması için EP'nin içindeki dalgaların hızı EP'yi çevreleyen ortamdaki dalga hızından fazla olması gerekir. Bu nedenle Denklem (1.1)'e bakıldığında EP bölgesinde  $\varepsilon'_{r'} = \mu'_{r'} < 1$  değerindedir. Dağıtıcı (dispersif) olmayan bir malzemede faz hızı ile grup hızı aynı değerdedir, eğer EP'yi çevreleyen ortam boşluk ise grup hızı boşluktaki faz hızından daha fazla olmayacağı için pelerine gelen sinyallerin fazı bozulacaktır ve mükemmel EP tasarlanamayacaktır. Bu nedenle pelerin içindeki faz hızının serbest uzaydaki ışık hızından daha yüksek olması için dağıtıcı malzemeler kullanılması gereklidir. Dağıtıcı malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleri frekans bağımlı olduğundan pelerin tasarımı ancak tek tonlu sinyaller için veya dar



frekans bantlı sinyaller için mümkün olacaktır. Böylece geniş bantlı tasarımların zorluğu ve geniş bantlı tasarımlar yapılacak ise faz bozukluklarının kaçınılmaz olduğu anlaşılmaktadır.

Kaynak [2]'de iletim hatları ile ağ yapısı oluşturularak bu yapının içinde bulunan nesnelerin gizlenmesi hedeflenmiştir ve oluşturulan ağ yapısının tümü pelerin işlevi görmektedir. Pelerini çevreleyen ortamdaki dalga yayılımını tanımlayan faz hızı, faz sabiti ve sönümlenme sabiti iletim hatlarının oluşturduğu ağ yapısında elde edilmiştir. Ek olarak iletim hattı ağlarıyla oluşturulan pelerin yapısının içinde dalga yayılımının izotropik olması hedeflenmiştir. Bu pelerin yapısına gelen elektromanyetik düzlem dalgaları iletim hatlarında kılavuzlanarak iletilmiştir. Gelen dalgaların yansımaması için EP yapısı ile onu çevreleyen ortam arasında empedans uyumunu sağlayacak bir geçiş katmanı yerleştirilmiştir. Şekil 1.4'te iletim hattı ağlarından oluşan pelerin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.4. İletim hattı ağlarından oluşan pelerin [2]

Şekil 1.4'ten görüldüğü üzere iletim hatları 2 boyutlu periyodik ızgara şeklinde birbirine bağlanmıştır. 2 boyutlu ızgara yapılarının üst üste yerleştirilmesiyle (her bir ızgaradaki iletim hatları arasındaki boşluklar üst üste gelecek şekilde) pelerin oluşturulmuştur. Anlatılan pelerin yapısında seri empedans ve paralel admitans içeren yüklü iletim hatları ve hiç birini içermeyen yüksüz iletim hatlarının kullanımı incelenmiştir. Pelerini çevreleyen ortam hava olduğunda, paralel kapasitif yüklü iletim hatlardaki dalga faz hızının havadaki faz hızına eşlenebildiği anlatılmıştır, ancak grup hızı havadaki ışık hızından daha düşük değerdedir bu nedenle dar bant pelerin tasarımı için önerilmiştir. Diğer taraftan yüksüz hatta empedans uyumluluğu daha iyi

sağlanmıştır, grup hızı ile faz hızı pelerinin içerisinde aynı değerdedir bu nedenle basitlik açısından ve yüklü yapıya göre geniş bantlı pelerin tasarlamak için önerilmiştir. Dalgaların pelerin içerisinde izotropik yayılabilmesi için ızgara yapısı içindeki iletim hattı periyodları dalga boyundan daha küçük değerde alınmıştır. Bu pelerin tasarımının en belirgin dezavantajı gizlenecek nesnenin ızgara yapısındaki boşlukların büyüklüğüyle kısıtlı olmasıdır. Ayrıca pelerinin içinde yayılıp tekrar hava ortamına iletilen dalgalar ile havada yayılan dalgalar arasında faz farkı olmaması için yüklü hat kullanılması gerekir bu da pelerinin dar bantlı olmasına neden olur.

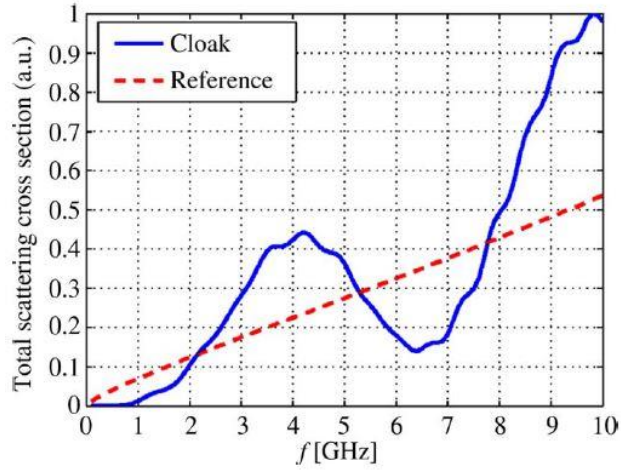
Kaynak [2]'de bir nesnenin tüm yönlerde yaydığı elektromanyetik güç ile nesneye gelen dalgaların güç yoğunluğu arasındaki oran toplam Saçılma Kesit Alanı (toplam SKA) adıyla tanımlanmıştır. Diferansiyel SKA  $\sigma_{dif}$  aşağıdaki gibi tanımlanmıştır

$$\sigma_{dif} = \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{S_{sc}}{S_{inc}} \quad (1.6)$$

Burada R gözlem noktası ile nesne arasındaki mesafe,  $S_{inc}$  nesneye gelen düzlem dalganın güç yoğunluğu ve  $S_{sc}$  nesneden saçılan dalgaların güç yoğunluğudur. Diferansiyel SKA  $\sigma_{dif}$  değişkeninin tüm açılar için integralinin alınmasıyla toplam SKA  $\sigma_{tot}$  aşağıdaki gibi elde edilmiştir,

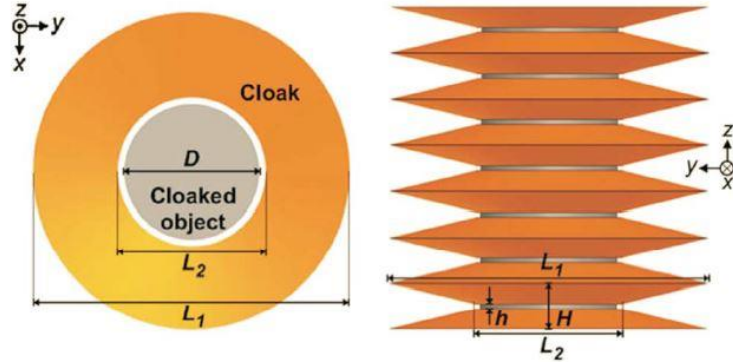
$$\sigma_{tot} = \int \sigma_{dif} d\Omega \quad (1.7)$$

Bu kaynakta pelerinin çalışma performansını incelemek için toplam SKA kullanılmıştır. Gizlenmesi hedeflenen nesnenin toplam SKA'sıyla ile pelerin ile kaplı olduğu durumdaki toplam SKA'sı EP'nin çalışma frekans bandında karşılaştırıldığında pelerinin saçılma kesitinin daha az olduğu kaynaktan alınan aşağıdaki Şekil 1.5'te gösterilmektedir (bu pelerin 1 GHz civarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır).



Şekil 1.5. Toplam saçılma kesit alanının pelerin performansını değerlendirmek için kullanımı [2]

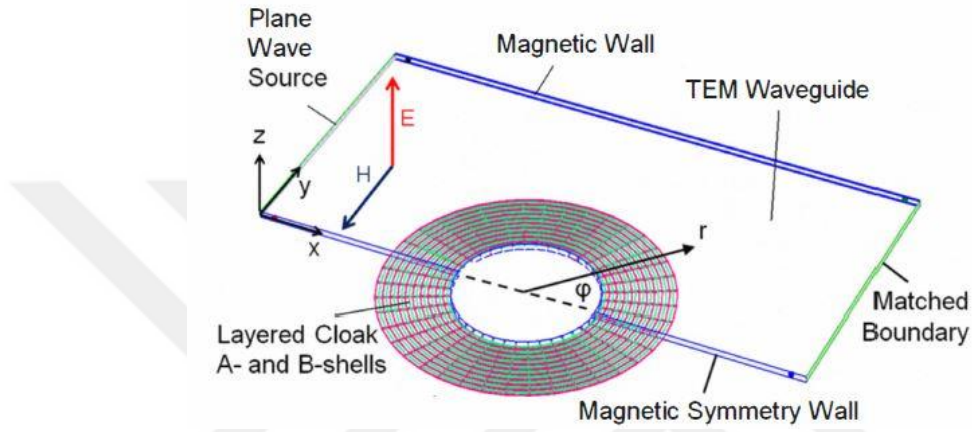
Kaynak [3]'te gizlenecek hedef nesne bir iletken silindiridir. İletken silindiri gizlemek için silindiri çevreleyen üst üste dizilmiş koni şeklinde iletken plakalar kullanılarak pelerin tasarlanmıştır. Bu tasarımda koni plakalar dalga kılavuzu gibi çalışıp gelen elektromanyetik dalgaları gizlenecek nesnenin çevresinde ilerletip dalgaların yayılım yönünde iletimini sağlamaktadır. Bu pelerin yapısı Şekil 1.6'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Konik iletken levhalarla EP tasarımı [3]

Kaynak [1]'deki teori pelerini çevreleyen ortam hava olursa geniş bantlı tasarımın mümkün olmadığı sonucunu veriyordu. Kaynak [1]'deki teoriye göre tasarlanan bir pelerinin geniş bantlı geçici sinyallere verdiği tepkiyi incelemek için [4]'te yüksek dielektrik katsayısı  $\epsilon$  ve yüksek manyetik  $\mu$  geçirgenliğe sahip bir ortamda EP tasarlanmıştır. Bu tasarımda EP'nin bulunduğu ortamın elektriksel ve manyetik özelliklerinden dolayı dağıtıcı malzemeler kullanılmamıştır. Tasarım silindirik

koordinatlar kullanılarak yapılmıştır. EP bölgesindeki  $\epsilon'$  ve  $\mu'$  değerlerindeki anizotropiyi sağlamak zor olduğundan iki farklı silindirik kabuk tipinden (A ve B tipi kabuklar) eş merkezli beş tane silindirik pelerin oluşturmak için yerleştirilmiştir. Simülasyonu gerçekleştirmek için EP yapısı manyetik yan duvarları olan paralel plaka dalga kılavuzuna yerleştirilmiştir. Simülasyon ortamı ve EP tasarımı Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Yüksek  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerli ortamda geniş bantlı pelerin tasarımı ve simülasyon ortamı [4]

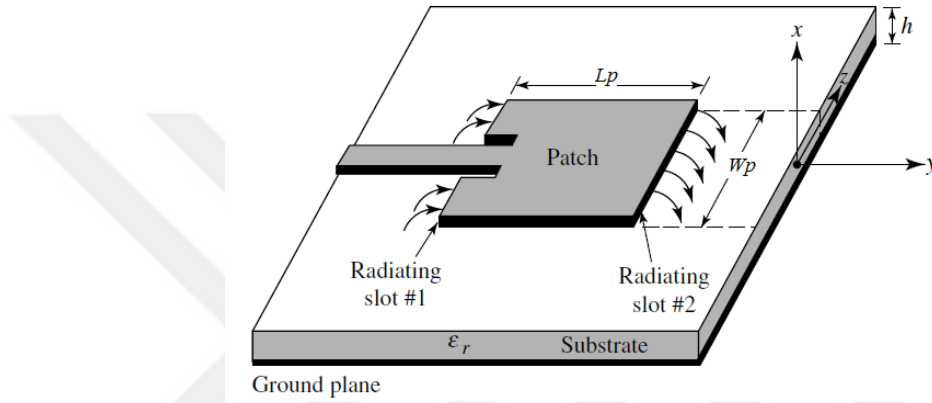
Paralel plaka dalga kılavuzunun girişine bir port ve çıkışına bir port tanımlanıp S parametresi hesaplatılmıştır. Elde edilen S parametre sonuçları pelerin bulunduğu ortamda geniş bantlı çalıştığı göstermektedir. Bu tasarımın dezavantaj elde edilen sonuçların hava veya boşluk ortamında geçersiz olmasıdır. Bu çalışma kaynak [1]'deki teorinin yüksek dielektrik katsayısı  $\epsilon$  ve yüksek manyetik  $\mu$  geçirgenliğe sahip ortamlarda geçerliliğini test ettiği için burada anlatıldı.

## 1.2. Yama Antenler ile Pelerin Tasarımı

Yama antenlerin çalışma prensibi ve besleme yöntemlerini anlatan temel bilgiler bu bölümün Yama Antenler alt başlığıyla verilmektedir. Gerekli bilgiler verildikten sonra literatürde pelerin tasarımı için yama antenler kullanan çalışmaların bazıları Pelerin Tasarımı alt başlığıyla verilmektedir.

### 1.2.1. Yama antenler

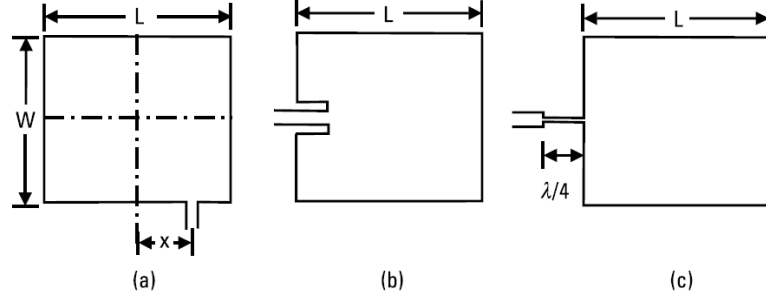
Yama antenler küçük boyutları nedeni ile birçok uygulamada kullanılmaktadır. Yama anten üç kısımdan oluşmaktadır bunlar: iletken Toprak düzlemi, Toprak düzleminin  $h$  kadar üstünde bulunan iletken yama ve aradaki boşluğu dolduran yalıtkan alt tabakadır. İletken yama dikdörtgen, dairesel ve yarım daire gibi birçok şekilde olabilir. Şekil 1.8’de yama anten, yamanın genişliği  $W_p$ , uzunluğu  $L_p$ , alt tabakanın bağlı dielektrik katsayısı  $\epsilon_r$  ve kalınlığı  $h$  gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Yama anten [5]

Yama antenin çalışma şeklini açıklamak için iletim hattı modeli ve boşluk modeli kullanılmaktadır. İletim hattı modeli yama antenin istenilen çalışma frekansında tasarımı için gerekli eşitlikleri verir. Boşluk modeli yama antenin ışımaya örüntüsünü elde etmek için kullanılır. Boşluk modeli yama anteni iki yarık anten gibi ele alır buradaki yarık antenler yamanın genişliğini temsil eden kenarda bulunurlar ve aralarında  $L$  kadar mesafe bulunur. Şekil 1.8’de ışıyan yarıklar adıyla gösterilmiştir (Radiating slot #1 ve #2). Elde edilen analitik eşitliklere göre yama anten enine ışımaya çalışmaktadır (Şekil 1.8’e göre  $x$  eksenine doğru ışımaya). Yama antenleri beslemek için birçok yöntem mevcuttur. Mikroşerit hat ve koaksiyel hat ile besleme en yaygın yöntemlerdir. Yama antenlerin ışıyan yarıklı kenarlardaki giriş empedansı yüksek olduğundan bu iki yarık arasında bulunan ve empedansı besleme hattının öz empedansına eşit olan bir noktadan antene besleme yapılmalıdır veya antenin ışıyan yarıklı kenarı ve besleme hattı arasında çeyrek dalga dönüştürücü kullanarak empedansı uyumu sağlanabilir. Şekil 1.8’de görülen mikroşerit hatlı beslemede, hattın yamanın içine doğru girmesindeki neden empedans uyumunu sağlamaktır. Mikroşerit hatlı besleme için başka bir yöntem mikroşerit hattı ışımayan kenar boyunca empedans

uyumunu sağlayacak bir nokta bularak o noktaya bağlamaktır böylece yamanın şekli bozulmamış olur (şeklin bozulmaması tasarım aşamasında belirlenen yama antenin ışımaya frekansındaki kaymanın en az değerde olduğu anlamına gelmektedir). Şekil 1.9'da anlatılan üç besleme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Mikroşerit hat ile yama anteni beslemek için yöntemler: (a) ışımayan kenardan, (b) yama içine yapılan girinti ve (c) çeyrek dalga dönüştürücü [6]

Yama anten tasarlama adımları ve antenin çalışma modelleri [5,6]'da detaylıca anlatılmaktadır. Alt tabakanın kalınlığı  $h$ 'yi arttırmak yamanın çalışma frekansının azalmasına neden olmaktadır. Çünkü kalınlık değeri arttıkça yamanın kenarlarında saçaklanan alanlar oluşturur bu fazladan alanlar yamanın elektriksel boyunun artmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak antenin yönlülüğünü azaltmaktadır ve empedans bant genişliğini arttırmaktadır. Dar bant genişliği yama antenlerin en büyük dezavantajdır bant genişliğini alt tabaka genişliğinin artmasıyla arttırmak faydalı görünse de antenin ışımaya verimliliğini azalmaktadır (antenin ışımaya verimliliği antenin ışımaya yaydığı güç ile antenin besleme gücü arasındaki orandır). Yama antenin birçok parametreye göre detaylı analizi [6]'da yapılmıştır.

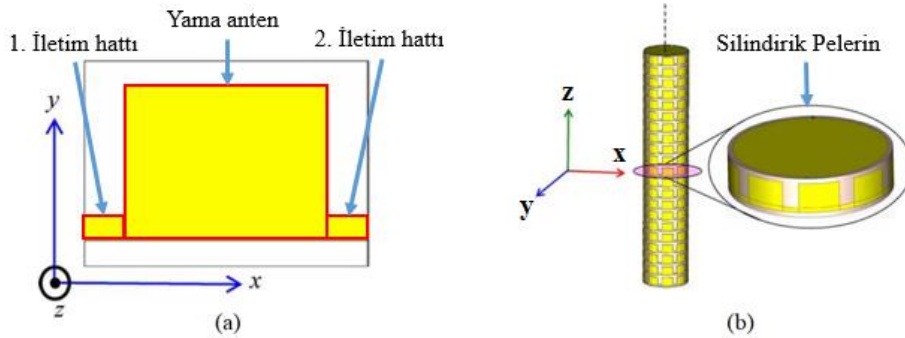
### 1.2.2. Pelerin tasarımı

Kaynak [7]'de EP tasarımı için yama antenler içeren birim hücreler kullanılmıştır. Birim hücrenin çalışma frekans bandı belirlendiğinde bu birim hücrelerden oluşturulacak pelerin çalışma frekansı ve frekans bandı belirlenmiş oluyor. Her bir birim hücre aşağıdaki bileşenlerden oluşturulmuştur,

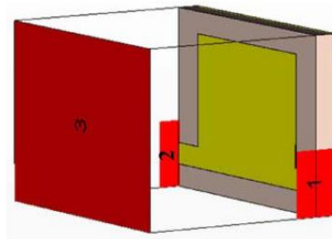
- Yama anten
- Yama anteni Şekil 1.9a'daki gibi ışımayan kenardan besleyen birinci mikroşerit iletim hattı

- Antenin diğer ışımayan kenarına bağlı ikinci mikroşerit iletim hattı. Bu hat antenden gelen dalgalar ile birinci iletim hattından gelen ama antende ışımayan dalgaları bitişik birim hücrelere taşımaktadır

Birinci ve ikinci iletim hattının genişliği eşit değerde seçildiğinde yama antenle empedans uyumunu sağlayan besleme noktaları ışıyan kenarlardan eşit uzaklıkta olacaktır. Ayrıca iletim hatlarının böyle seçilmesi nedeniyle her iki iletim hattından antene besleme verilmekte ve antenden gelen dalgalar diğer birim hücrelere iletilmektedir. Silindir oluşturmak için birim hücreler yan yana yerleştirilmiştir. Birim hücrelerin hizalanması, her bir birim hücrenin birinci iletim hattı yanındaki hücrenin ikinci iletim hattına bağlanacak şekilde gerçekleşmiştir. Birim hücreler hizalandıktan sonra bükülerek silindirik pelerin oluşturulmuştur. Gizlenmesi hedeflenen nesne büyük ise bu pelerinden üst üste birkaç tane dizilerek daha uzun bir pelerin oluşturmak mümkündür. Bu durumdan pelerinin performansı etkilenmemektedir. Şekil 1.10'da birim hücre yapısı ve pelerin gösterilmektedir. Kaynak [7]'de pelerinin iletim ve yansıma frekansı bandını belirlemek için S parametreleri kullanılmıştır. Birim hücrenin S parametre analizini simülasyon ortamında gerçekleştirmek için Şekil 1.11'de kırmızı kareler ile gösterilen portlar tanımlanmıştır.



Şekil 1.10. Yama anten ile pelerin tasarımı: (a) birim hücre ve (b) silindirik pelerin [7]



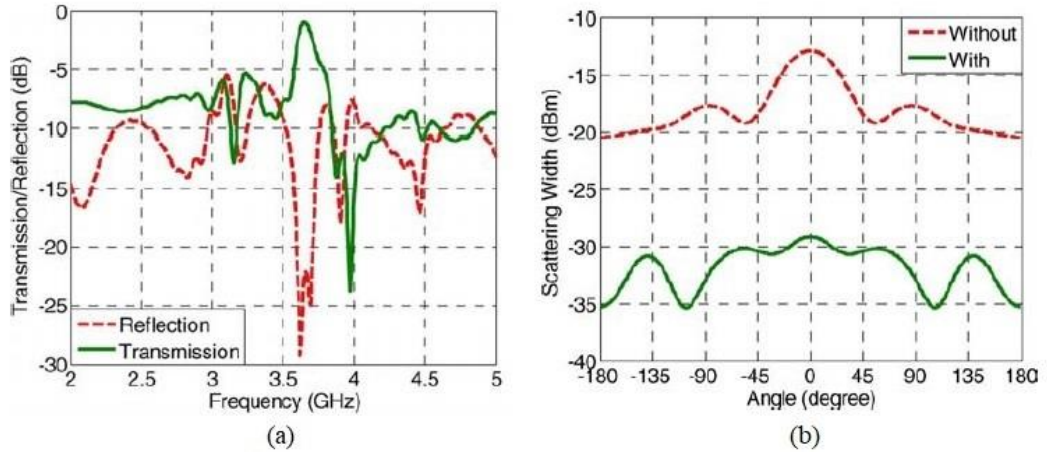
Şekil 1.11. S parametre analizi için port tanımları

Birim hücrenin çalıştığı frekans bandında yama antene port 1'den giriş olarak verilen dalgalar antenden port 3'e doğru ışımalıdır, port 1'e geri yansıma az olmalıdır ve frekans değeri antenin çalışma bandı dışında kalan dalgalar ışımadığı için port 2'ye iletilmelidir [7]'de birim hücrenin çalışma bandı bu şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca uzak noktalardan gelen dalgaların benzetimi için tanımlanan port 3'ten yama antene gelen dalgalar çalışma frekansında geri yansımamalıdır. Bu gereksinimler matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$|S_{33}| \rightarrow 0, |S_{21}| \rightarrow 1, |S_{31}| \rightarrow 1 \text{ veya } |S_{32}| \rightarrow 1 \quad (1.8)$$

Kaynak [7]'de pelerin çalışma performansını incelemek için S parametre simülasyonu yapılmıştır. Aynı eksen üzerinde karşı karşıya yerleştirilmiş iki adet port (port 1 ve port 2) tanımlanmıştır. Bu ekseni ifade etmek için Şekil 1.10b'de x-ekseni seçilmiştir ve portlar ile pelerin arasında 200 mm mesafe bırakılmıştır, y-ekseni yönünde pelerin ile simülasyon sınırı arasında 50 mm mesafe bırakılmıştır. Bu iki eksenin her iki yönünde OA (Open Add Space) sınır koşulu tanımlanmıştır. Simülasyonda pelerin periyodik olarak tekrarlanması için z-ekseninin her iki yönünde  $E_t = 0$  sınır koşulu tanımlanmıştır. Birinci porttan besleme verildikten sonra iki değer ölçülmüştür: birincisi pelerin gelen dalgaları karşı porta iletimi ve ikincisi pelerine gelen dalgaların besleme portuna doğru geri yansıması. Tasarlanan silindirik yapının pelerin olarak çalışması için  $|S_{11}| \rightarrow 0, |S_{21}| \rightarrow 1$  olmalıdır (besleme girişinin port 1'den verildiği varsayımı ile). Dolayısıyla yukarıdaki simülasyon düzeninde pelerin çalıştığı frekans bandında iletimin yükselip yansımanın azalması gerekmektedir. Ek olarak pelerin ile kaplı iletken silindirin ve pelerinsiz iletken silindirin hem S parametreleri hem de bistatik saçılma genişlikleri karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Kaynak [7]'de çalışma frekansı 3,63 GHz olan pelerin tasarımı yapılmıştır elde edilen S parametreleri ve bistatik saçılma genişlikleri Şekil 1.12'de gösterilmektedir.





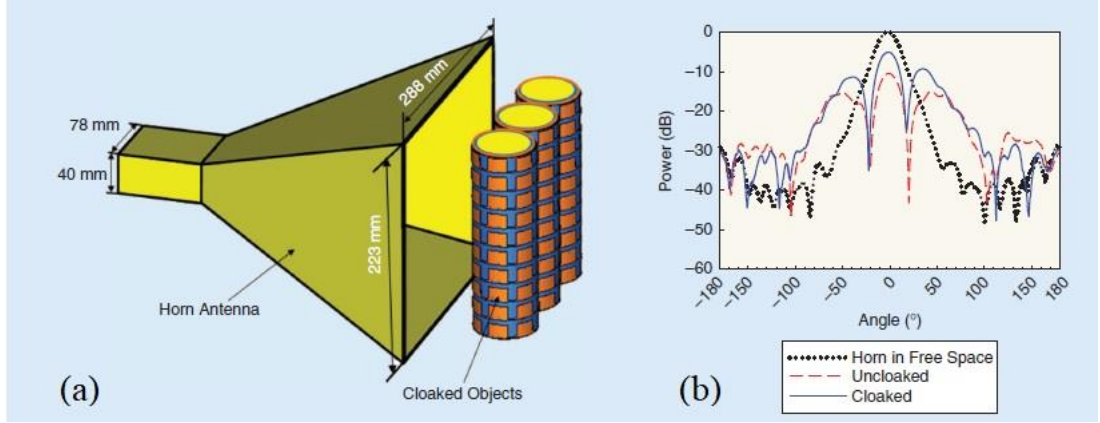
Şekil 1.12. Yama anten ile tasarlanan pelerin çalışma sonuçları: (a) S parametreleri ve (b) bistatik saçılma genişliği [7]

Bu yöntemin pelerin tasarımı için en büyük avantajı diğer yöntemler göre pelerin kalınlığının az olması ve birim hücreler kullanarak istenilen frekansta tasarımın kolay olmasıdır bununla birlikte bant genişliğinin dar olması bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Kaynak [7]'deki tasarım yöntemine bu tezde YABH (Yama Anten Birim Hücre) kısaltmasıyla atıf yapılacaktır

Kaynak [8]'de YABH yöntemiyle pelerin tasarlanmıştır. Bu çalışmada bir antenin önüne pelerin yerleştirildiğinde pelerin anten ışınma örüntüsüne etkisi incelenmiştir. Bunun için horn anten kullanılarak üç tür ölçüm sonucu elde edilmiştir;

- Horn antenin ışınma örüntüsü
- Horn antenin önüne iletken silindir yerleştirildiğinde elde edilen ışınma örüntüsü
- Horn antenin önüne önceki durumda kullanılan silindir ile aynı boy ve çapa sahip pelerin ile kaplı iletken silindir yerleştirildiğinde elde edilen ışınma örüntüsü.

Pelerin ile kaplı iletken silindirin horn anten önüne yerleştirilmesi ve elde edilen ışınma örüntülerini karşılaştıran grafik Şekil 1.13'te gösterilmektedir.



Şekil 1.13. (a) horn anten önüne pelerin yerleştirme (b) serbest uzayda, iletken silindirler ve pelerin yerleştirildiğinde elde edilen ışınma örüntüleri[8]

Karşılaştırma grafiğinde görüldüğü gibi horn antenin önüne iletken silindirler yerleştirme ışınma örüntüsündeki ana lob değerinin düşmesine ve yan lob değerlerinin artmasına neden olmaktadır özetle horn antenin ışınma örüntüsünü bozmaktadır. Horn antenin önüne pelerin ile kaplı iletken silindir yerleştirildiğinde ana lob değerinde artış görülmektedir bunun sebebi pelerin gelen dalgaları ileriye doğru iletmesidir.

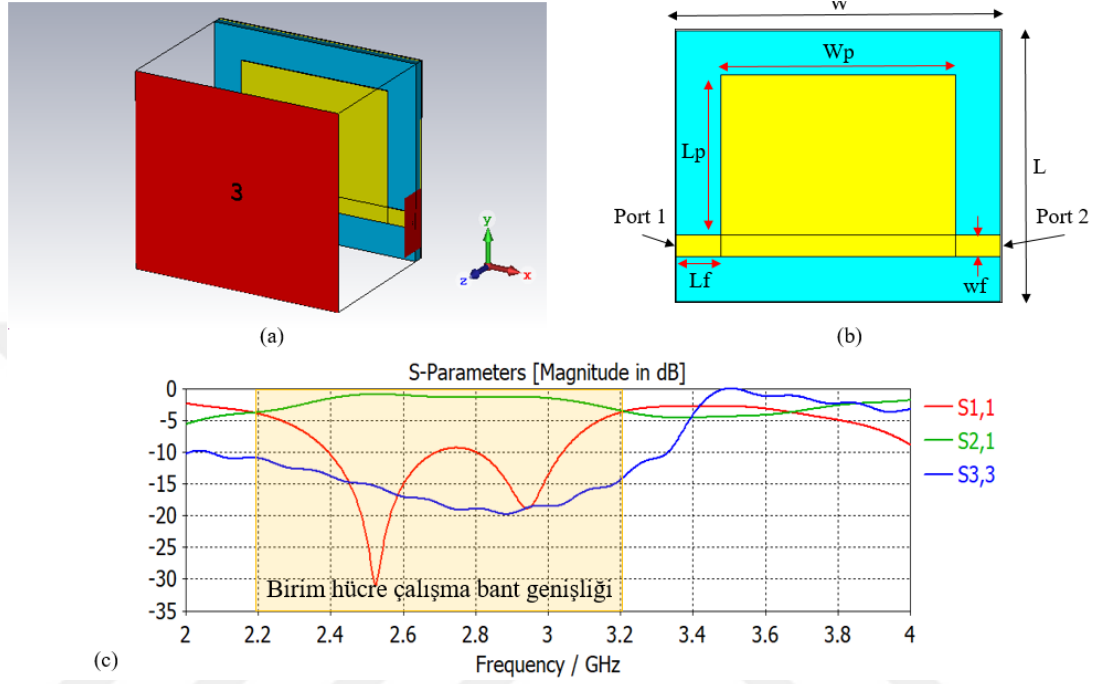
## 2. YÖNTEM VE GELİŞME

Elektromanyetik pelerinlerin frekans bant genişliğinin dar olması, geniş bantlı geçici sinyallere maruz kaldıklarında pelerini işlevsiz kılacak bir problemdir. Bu probleme çözüm üretmek için ilk önce [7]'deki tasarımda kullanılan alt tabaka yerine farklı elektriksel geçirgenlik katsayısına sahip alt tabaka kullanarak YABH yöntemiyle uygulama yapıldı ve [7]'dekine benzer sonuçlar elde edildi. YABH yöntemindeki birim hücrede tek yama anten kullanma yerine log-periyodik yama anten dizisi kullanarak bant genişliğini artırma hedeflendi ama elde edilen sonuçlar tasarlanan yapının çalışma bandı için belirlenen frekans aralığında pelerin yerine radar soğurucu malzeme olarak çalıştığını gösterdi. Böylece [7]'deki teörinin sadece tek yama antenli birim hücreler için geçerli olduğu anlaşıldı. YABH yöntemiyle pelerin tasarlandığında yama antenler yerine, yamaların genişliğine eşit genişlikte, yalıtkan alt tabakanın üstüne silindirik yapıyı tamamen çevreleyen iletken yüzey yerleştirildiğinde, elde edilen yapının YABH ile aynı işlevi gördüğü tespit edildi. Bu iletken yüzeylerden alt alta farklı genişlikler yerleştirildiğinde frekans bandının değiştiği ve genişlediği görüldü. Bu dizilişle geniş bantlı pelerin tasarlamak için log-periyodik yama anten tasarım yöntemi kullanıldı ve iletkenlerin genişlikleri arasındaki bağıntı log-periyodik yapıldı. Sonuç olarak hedeflenen geniş bantlı pelerin elde edildi. Burada özetle anlatılanlar bu bölümün alt başlıklarında detaylıca anlatılmaktadır.

### 2.1. Yama Anten Birim Hücreler

Kaynak [7]'deki YABH uygulamasında, birim hücre tasarımında kullanılan alt tabakanın bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 9,9$  değerindedir. Bağıl dielektrik sabitinin farklı değerler aldığı ve pelerinlerin farklı çaplarda olduğu durumlarda yöntemin geçerliliğinin test etmek amacıyla 3 GHz civarındaki frekans bandında çalışacak birim hücre tasarımı yapıldı. Tasarlanan birim hücrede yama anten uzunluğu  $L_p = 24,38$  mm, genişliği  $W_p = 31,62$  mm, alt tabaka kalınlığı  $h = 2$  mm, bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 4$  (PVC malzeme), toprak düzlem uzunluğu  $L = 36,38$  mm ve genişliği  $W = 43,62$  mm değerindedir. Yama antene bağlanan birinci ve ikinci iletim hattı aynı uzunlukta  $L_f =$

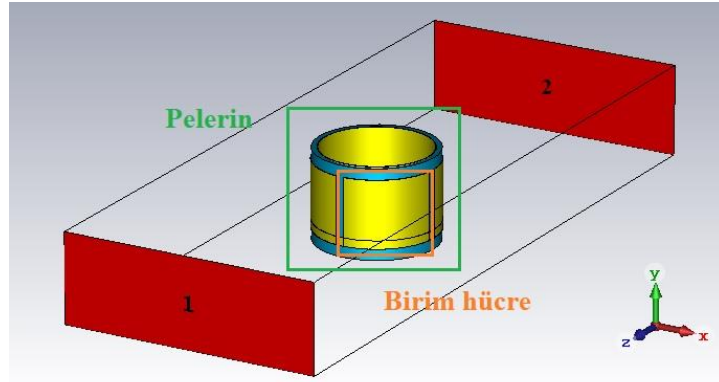
6 mm ve aynı genişliktedir  $w_f = 2$  mm. Yama anteni tasarlamak için gerekli parametreler (yama genişlik ve uzunluk hesaplaması) [5]'ten faydalanarak hesaplandı. Şekil 2.1'de tasarlanan birim hücre ve S parametre analizi için tanımlanan portlar ve elde edilen S parametreleri gösterilmektedir.



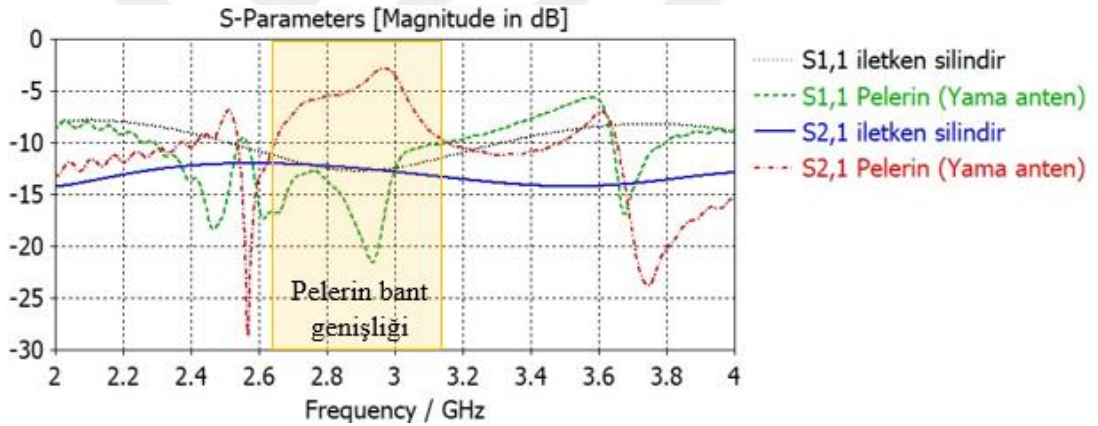
Şekil 2.1. Tek yama anten ile pelerin tasarımı: (a) simülasyon ortamı (b) yamanın boyutları ve (c) S parametre sonuçları

Şekil 2.1c'deki  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametrelerine göre tasarım aşamasında belirlenen çalışma frekans bandında (bu bant genişliği 3 GHz civarındadır ayrıca birim hücre için çalışma frekans bandının tanımı bölüm 1.2.2 yapılmıştır) port 1'den port 2'ye dalgaların iletimi artmakta olup port 1'e geri yansımaya azalmaktadır.  $S_{33}$  parametresine göre çalışma frekansında antene gelen dalgalar anten tarafından port 1 ve port 2'ye iletiildiği için port 3'e geri yansımaya azalmaktadır. Böylece tasarlanan birim hücrenin bölüm 1.2.2'de anlatılan temel bilgilere göre pelerin tasarlamak için uygun olduğu anlaşıldı. Yarıçapı  $R = 20$  mm olan içi boş iletken silindirin (gizlenmesi hedeflenen nesne bu iletken silindirin içine yerleştirilmektedir) dört birim hücre ile çevrenmesi sonucunda pelerin tasarımı tamamlandı. Burada silindirin çevresine mümkün olan en fazla sayıda birim hücre yerleştirmek için  $L_f < 3$  mm alındı çünkü [7]'ye göre iletim hattı uzunluğunun yama anten ve birim hücre performansına etkisi ihmal edilebilir seviyede azdır. Simülasyonda sınır koşulları: x-ekseninin her iki yönündeki sınır koşulu OA tipindedir ve OA sınır ile pelerin arası mesafe 25 mm'dir, z-ekseninin her iki yönünde

OA sınır ile pelerin arası mesafe 100 mm'dir ve y-ekseninin her iki yönünde sınır koşulu  $E_t = 0$  alındı. Şekil 2.2'de tasarlanan silindirik pelerin ve simülasyon için tanımlanan port 1 ve port 2 gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yama anten birim hücreli pelerin simülasyon ortamı



Şekil 2.3. Yama anten birim hücreli pelerin S parametre sonuçları

Şekil 2.3'te pelerin ve pelerin ile aynı çap ve uzunluğa sahip ama pelerin kaplı olmayan iletken silindirin S parametreleri gösterilmektedir. Pelerin S<sub>21</sub> parametresinin kendi S<sub>11</sub> parametresinden daha yüksek değerde olduğu frekans aralığı ile pelerin S<sub>21</sub> parametresinin iletken silindirin S<sub>21</sub> parametresinden en az 1 dB daha yüksek olduğu frekans aralığının kesişimi bu tezde pelerin çalışma bant genişliğini ifade etmede kullanılmaktadır. Pelerin ve iletken silindirin S<sub>21</sub> parametresi karşılaştırıldığında 2,9 GHz civarında pelerin S<sub>21</sub> parametresi iletken silindirinkinden yaklaşık 10 dB daha fazla olduğu görülmektedir bu fazlalık pelerin gelen dalgaları yaydıkları yönde ileriye doğru ilettiğini göstermektedir. Pelerin çalışma bant genişliği  $BW = \%19$  civarındadır. Birim hücre ve pelerin çalışma frekans bandı incelendiğinde bir

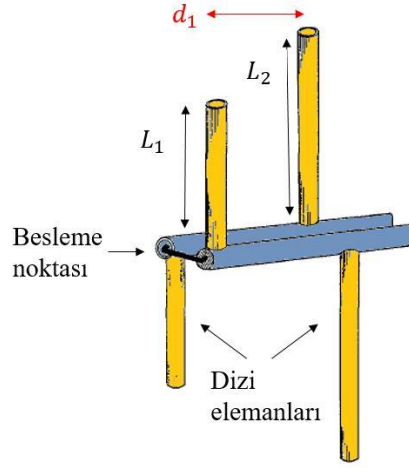
örtüşme görülmektedir ve her iki simülasyonda çalışma frekansında iletim artmakta ve yansıma azalmaktadır.

## **2.2. Geniş Bantlı Yama Antenler**

Geniş bantlı pelerin tasarımını gerçekleştirmek için birim hücrede dar bantlı tek bir yama anten yerine kullanılacak geniş bantlı yama antenler ve anten dizileri araştırıldı. Pelerin gizleyeceği nesne içi boş iletken silindirin içine yerleştirdiğinde nesnenin elektromanyetik özellikleri, elektromanyetik dalgalar iletken silindirin içine giremeyeceğinden, pelerin çalışma performansını etkilemeyecektir. Bu nedenle pelerin hep iletken silindiri kaplayacak şekilde tasarlanmaktadır. Tek elemanlı geniş bantlı yama antenlerde genellikle iletken toprak düzlemi bulunmadığından iletken silindiri kaplamak için uygun değildir bu nedenle geniş bantlı yama anten dizileri araştırıldı.

### **2.2.1. Geniş bantlı anten dizileri**

Dizi antenler tek bir ışın elemanı kullanılarak elde edilemeyen yüksek kazançlı ışın örüntüsü veya geniş frekans bandı gibi özellikleri sağlamaktadır. Dipol antenlerde bant genişliğini arttırmak için Log-Periyodik anten dizileri çokça kullanılmaktadır [9]. Log-periyodik dizilerde ışın elemanları aynı düzlemde yerleştirilir (eş düzlem) ve merkez frekansları farklı olduğundan farklı boyutlarda olurlar. Buradaki amaç ardışık elemanların frekanslarını yakın değerlerde seçmektir. Dizinin tümüne gelen dalgaların frekansı değiştikçe rezonansa giren elemanlar değişecektir. Ardışık elemanların frekansı yakın olduğundan bu geçişler yumuşak olacaktır (başka bir şekilde anlatılması gerekirse iki ardışık elemanın merkez frekansı yakın olduğundan bu ikisinin frekans bantları ortada örtüşecektir). Böylece gelen dalgaların frekansı  $i$ 'inci elemanda rezonansa neden olduğunda eğer frekans biraz artarsa  $i$ 'inci ve  $i+1$ 'inci elemanların ikisi de frekans bantlarına göre belli oranda rezonansa girecektir. Eğer frekans biraz daha artarsa  $i$ 'inci eleman rezonansa girmeyecektir ve  $i+1$ 'inci eleman rezonansa olacaktır. Sonuç olarak iki ışın elemanının merkez frekansları arasındaki frekans bandında log-periyodik anten dizisine gelen dalgalar geri yansımayacaktır. Log periyodik dipol anten dizisi Şekil 2.4'te gösterilmektedir (bu görselde dizi elemanları çapraz beslenmektedir).



Şekil 2.4. Log-periyodik dipol anten dizisi [9]

Log-periyodik dizilerde ardışık ışıma elemanlarının frekansları arasında bağıntı aşağıdaki gibidir,

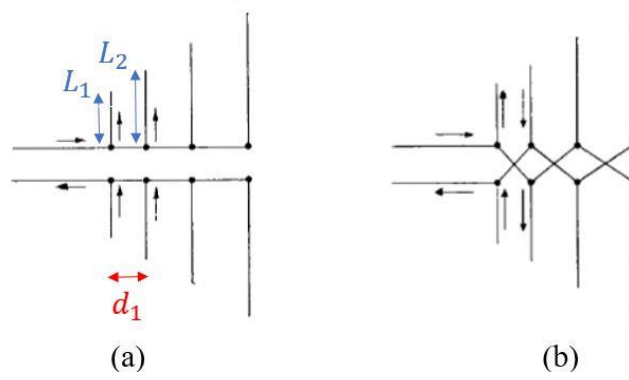
$$\tau = \frac{f_i}{f_{i+1}}, \quad f_i > f_{i+1} \quad (2.1)$$

Yarım dalga boyu dipol anten dizide ışıma elemanı olarak kullanıldığında 0'ıncı elemanın boyu  $L$  ve frekansı  $f$  seçilirse  $i$ 'inci elemanın boyu  $L \times \tau^i$  ve frekansı  $f \times \tau^{-i}$  olur. Her bir ışıma elemanı çevresinden etkilendiği için çevresi de  $\tau$  ile ölçeklenmelidir bu nedenle elemanlar arasındaki mesafe  $d_i$  yine  $\tau$  ile ölçeklenmektedir ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\tau = \frac{d_{i+1}}{d_i} = \frac{L_{i+1}}{L_i}, \quad L_{i+1} > L_i, \quad d_{i+1} > d_i \quad (2.2)$$

Eğer Log-periyodik dizinin en büyük ışıma elemanı sonsuz uzunluğa yakınsar ve en küçük ışıma elemanı sifıra yakınsarsa idealde sonsuz bant genişliğine sahip bir dizi elde edilebilir. Bu mümkün olmadığından dizinin bant genişliği en küçük ve en büyük ışıma elemanlarının frekanslarına göre belirlenmektedir. Log-periyodik dizilerde elemanları besleme yöntemi önemlidir. Dizi giriş beslemesi küçük elemanların tarafından yapılmalıdır. Dizide ışıma elemanı olan her bir dipol anten iki parçadan oluşmaktadır bu iki parçanın beslemesi eş fazlı olursa log-periyodik dizi, dizi düzlemine dik yönde ışıma yapar ve giriş beslemesi yönünde ışıma sifıra yakınsar.

Eğer her bir dipolun iki parçası  $180^\circ$  faz farkı ile beslenirse, dizinin ışıması giriş beslemesi yönünde olacaktır. Bu iki besleme yöntemi Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Log-periyodik dipol anten dizisinde ışıma elemanlarını besleme yöntemleri (a) eş fazlı (b) 180 derece faz farkı [9]

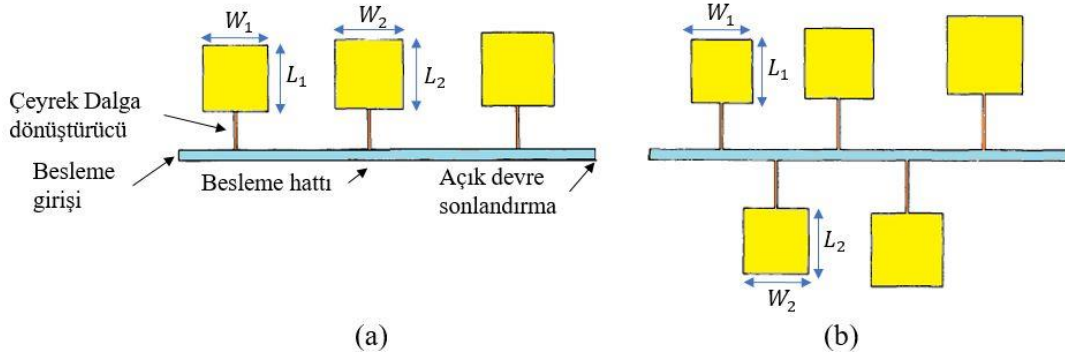
Log-periyodik dipol anten dizileri ile ilgili detaylı bilgiler [5,9]'da bulunmaktadır.

### 2.2.2. Log-periyodik yama anten dizisi

Log-periyodik anten dizisinde ışıma elemanı olarak yama anten kullanıldığında, dipol anten kullanıldığı durumdaki gibi bant genişliği artmaktadır. Yama anten kullanıldığında iki ardışık yama ışıma elemanının frekansları arasında Denklem (2.1)'de tanımlanan  $\tau$  oranı bulunmaktadır. Yama antenin merkez çalışma frekansı (en düşük frekanslı mod uyarımı için) yamanın en büyük boyutu ile belirlendiğinden (L veya W olabilir) ardışık elemanların bu boyutu arasında Denklem (2.2)'deki gibi  $\tau$  oranı bulunmaktadır. Log-periyodik diziyi oluşturan yama antenleri beslemek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Burada üç yöntem anlatılacaktır.

Birinci yöntem [10]'da anlatılmıştır. Log-periyodik dizi, mikroşerit ana besleme hattı ve hattın bir tarafına ya da iki tarafına sıralı bir şekilde yerleştirilen yama antenlerden oluşturulmuştur. Besleme girişi hattın yüksek frekanslı ışıma elemanı tarafından verilmiştir. Hattın diğer tarafı açık devre bırakılmıştır. Yama anten ışıma elemanlarıyla log-periyodik dizi tasarımı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.





Şekil 2.6. Log-periyodik yama anten dizisi (çeyrek dalga dönüştürücüsü ile empedans uyumu) besleme hattının: (a) tek tarafına (b) iki tarafına dizilmiş yama ışıma elemanları [10]

En yüksek merkez frekansa sahip yama anten ışıma elemanı ana besleme hattının giriş tarafındadır. Yama ışıma elemanlarının frekansı azalıp yama boyutları arttıkça hattın açık devre tarafına doğru sırayla yerleştirilmiştir. Her bir yama ışıma elemanının genişliği ve uzunluğu aynı değerde seçilerek yamanın merkez çalışma frekansında birden fazla modun uyarımı engellenmektedir. Işıma elemanları arasındaki mesafeler  $\tau$  ile orantılı alınmıştır. Kaynak [10]'da önerilen başka bir yöntemde bu mesafeler (her bir ışıma elemanı ile ana besleme hattının açık devre tarafı arasındaki mesafe) ışıma elemanının çalıştığı merkez dalga boyunun yarım katları değerindedir. Işıma elemanı ile besleme hattının açık devre tarafı arasındaki mesafe  $x_i$ 'nin sağlanması gereken koşul aşağıdaki gibi yazılabilir,

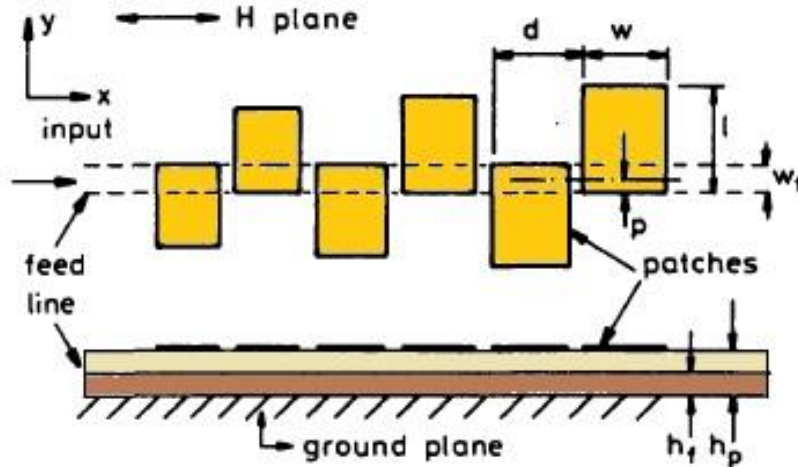
$$x_i = \frac{m \lambda}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

Buradaki dalga boyu havadaki dalga boyu değildir mikroşerit hattın efektif dielektrik sabitine göre hesaplanan dalga boyudur. Yarım dalga boyu katlarını seçme nedeni hattın açık ucuna giden dalgalar geri yansıdığına, her bir yamaya besleme hattının girişinden direkt gelen dalgalar ile aynı fazda olması içindir. Işıma elemanları ve ana besleme hattı arasında empedans uyumu için çeyrek dalga dönüştürücü kullanılmıştır. Kaynak [10]'da verilen tasarımda 3 GHz merkez frekansında  $n = 5$  adet ışıma elemanı ve  $\tau = f_i/f_{i+1} = 0,95$ ,  $f_i < f_{i+1}$  seçildiğinde  $VSWR \leq 2,6$  için elde edilen yüzdelik bant genişliği %22 değerindedir.

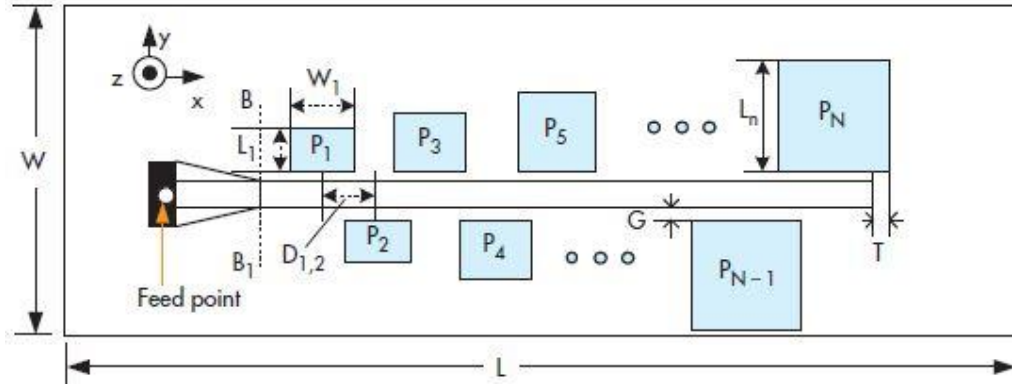
İkinci yöntem [11]'de anlatılmıştır. Bu yöntemde yama ışıma elemanları birinci yöntemdeki gibi sıralanır. Birinci yöntemden farkı besleme için kullanılan iletim

hattının ışıma elemanları ile bağlantı şeklidir. Bu yöntemde iletim hattı ve yamalar farklı düzlemlerdir. Üst düzlemde yama anten ışıma elemanları bulunurken orta düzlemde iletim hattı bulunmaktadır. Toprak düzlemi bu iki düzlemin altında kalmaktadır. Besleme iletim hattının yamalar ile bağlantısı elektromanyetik bağlaşım ile gerçekleşir. Bu bağlaşımı gerçekleştirmek için üst düzlemdeki yama uzunluğu  $L_i$ 'nin bir kısmı ( $2p$  değerinde) orta düzlemdeki iletim hattının üstünde bulunmaktadır böylece üstten bakıldığında her bir yamanın  $L_i \times 2p$  kadar alanı iletim hattı ile kesişmektedir. Bu besleme yöntemi Şekil 2.7'de gösterilmektedir (bu görselde  $l$  yama uzunluğu,  $w$  yama genişliği,  $d$  ardışık iki yamanın sol kenarları arası mesafe ve  $w_f$  besleme hattının genişliğidir).

Şekil 2.7'den anlaşılacağı üzere  $p$  ile  $h_p$  değerleri besleme hattı ile yamalar arasındaki bağlaşımı etkilemektedir.  $p$  değeri azaldıkça bağlaşım azalmaktadır bununla birlikte yüksek bağlaşım değerleri kaynakta verilen  $|S_{11}| = |S_{21}| - 1$  eşitliğine göre besleme hattı girişinde dalgaların yansımaları arttıracaktır (burada port 1 besleme hattı girişi ve port 2 besleme hattı ve yama antenler arasındaki porttur). Kaynakta verilen tasarımda yama anten sayısı  $n = 36$  ve  $\tau = l_{i+1}/l_i = 1.05$ ,  $l_i < l_{i+1}$  seçildiğinde elde edilen bant genişliği  $BW = 16 - 4 = 12$  GHz değerindedir.



Şekil 2.7. Log-periyodik yama anten dizisi (elektromanyetik bağlaşım)[11]



Şekil 2.8. Log-periyodik yama anten dizisi (eş düzlemlı bağlaşım)[12]

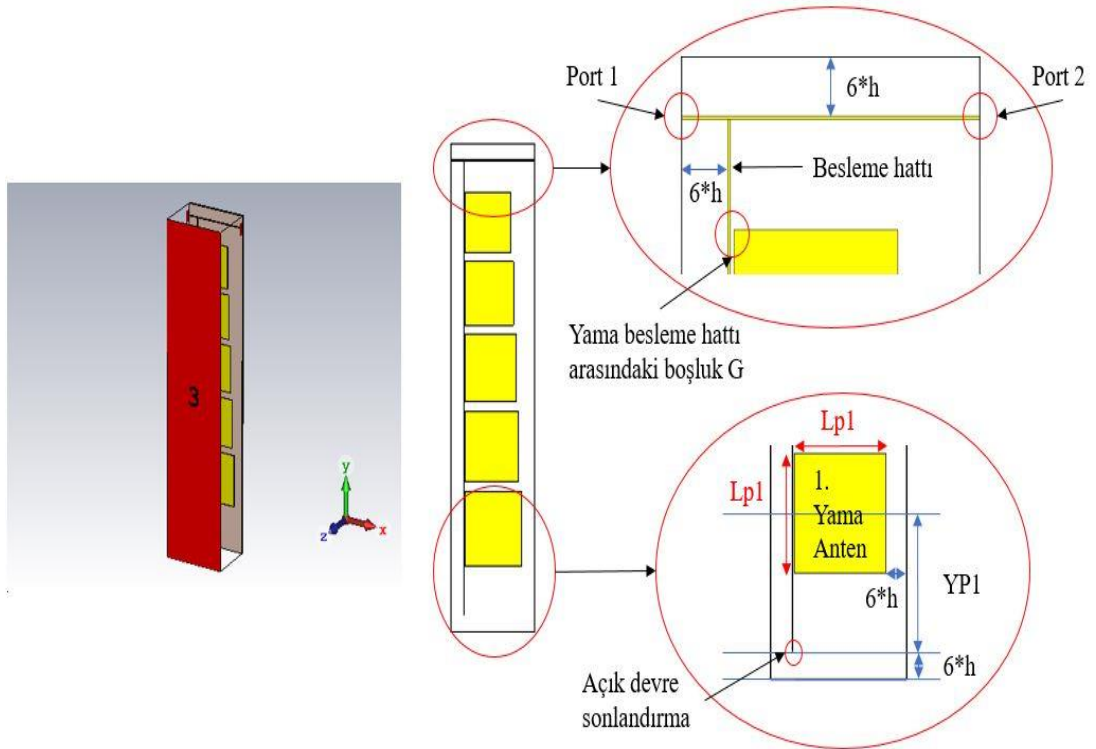
Üçüncü yöntem kaynak [12]'de anlatılmıştır. Bu yöntemde yama ışıma elemanları birinci yöntemdeki gibi sıralanmıştır. Birinci ve ikinci yöntemden farkı yamalar ile besleme hattı arasındaki bağlantının aynı düzlemde kapasitif bağlaşım ile sağlanmasıdır. Mikroşerit besleme hattı ile yama ışıma elemanları aynı düzlemde yerleştirilmiştir. Her bir yama ile besleme hattı arasında  $G$  değerinde bağlaşım aralığı vardır.  $G$  değerinin artması bağlaşımı arttırmaktadır ama belli bir değerden sonra bağlaşım tekrar azalmaktadır bu nedenle optimum  $G$  değeri parametrik analiz ile bulunmuştur. İletim hattının sonlandırması açık devredir ve  $T$  parametresi, dizideki en büyük ışıma elemanının besleme hattının sonu yönündeki kenarı ile hattın sonu arasındaki mesafedir.  $T$  parametresi pozitif (büyük ışıma elemanının kenarından hat sonunun yönünde) veya negatif değer almaktadır. Pozitif olduğunda kayıpsız kapasitif yük gibi davranır.  $T$  parametresi giriş empedansını özellikle düşük frekanslarda etkilemektedir. Şekil 2.8'de bu yöntemde göre tasarlanan log-periyodik yama anten dizisi gösterilmektedir.

### 2.3. Log-Periyodik Yama Anten Dizileri ile Pelerin Tasarımı

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi [7]'de önerilen YABH yönteminde önce birim hücre tasarlanmaktadır. İstenilen  $S$  parametre değerlerini elde ettikten sonra birim hücreler silindir oluşturacak şekilde bükülmektedir ve pelerin tasarımı tamamlanmaktadır. Bu bölümde Log-Periyodik yama anten dizisi içeren birim hücrelerle EP tasarımı hedeflenmiştir.

### 2.3.1. Log-periyodik yama anten dizisi ile birim hücre tasarımı

Bölüm 2.2.2’de anlatılan üçüncü yöntemde yamaların besleme hattının tek tarafına yerleştirilmesiyle birim hücre tasarımı yapıldı. Birim hücre tasarımında bu yöntemin seçilme nedeni birim hücreleri mümkün olan en küçük alana sığdırmaktır. Çünkü sınırlı uzunlukta yarıçapa sahip silindirik pelerin oluşturulduğunda, pelerin gizleme performansının gelen dalga yönüne bağımlı olmaması istenmektedir. Bunu gerçekleştirmek için silindirin yan yüzeyini kaplayacak birim hücrelerin en fazla sayıda olması gerekmektedir. Port 1 ve port 2’yi tanımlamak için yama antenleri besleyen ana besleme hattına giriş yönünden bağlanan ve ana besleme hattına dik olan yeni bir mikroşerit iletim hattı tanımlandı. Yeni hattın bir tarafı port 1 diğer tarafı port 2 olarak tanımlandı. Port 3 tek yama antenli birim hücrede olduğu gibi anten dizisinin üstünde yer almaktadır yönü anten dizisine doğrudur. Ardışık iki yama arasındaki mesafe yüksek frekanslı yamanın yarım dalga boyu kadar alındı. Birinci yama (en düşük frekanslı yama anten) ile besleme hattının açık devre ucu arasındaki mesafe birinci yamanın merkez frekansına tekabül eden dalga boyunun yarı değerindedir. Şekil 2.9’da tasarlanan birim hücre gösterilmektedir.

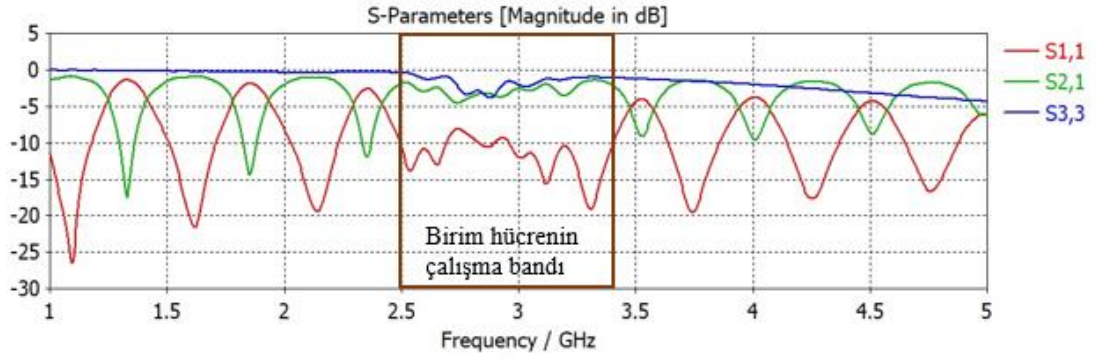


Şekil 2.9. Log-periyodik birim hücre (eş düzlemlili bağlaşım)

Tablo 2.1. Log-periyodik birim hücre tasarım parametreleri

Parametre	Açıklaması	Değeri
Lp1	1. yamanın uzunluğu	26,80 mm
Lp2	2. yamanın uzunluğu	25,08 mm
Lp3	3. yamanın uzunluğu	24,16 mm
Lp4	4. yamanın uzunluğu	22,91 mm
Lp5	5. yamanın uzunluğu	21,78 mm
h	Alt tabaka kalınlığı	1,00 mm
$\epsilon_r$	Bağıl dielektrik sabiti (FR-4)	4,3
Wf	İletim hatlarının genişliği	0,3 mm
YP1	Açık devre ile birinci yama merkezi arasındaki mesafe	31 mm
G	Besleme hattı ve yamalar arasındaki boşluk mesafesi	0,5 mm
$\tau$	Log-periyodik oran	0,95

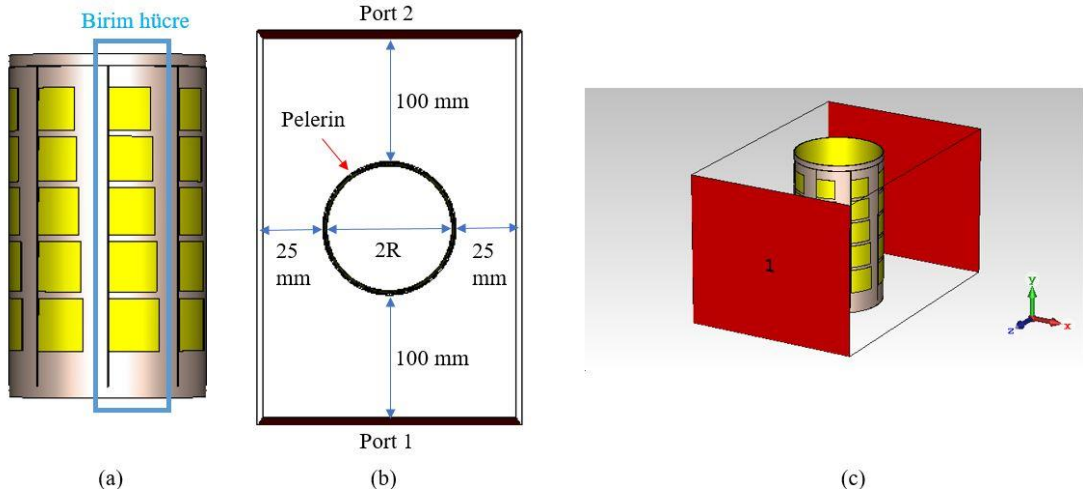
Tablo 2.1’de tasarımda kullanılan parametreler açıklama ve değerleri ile birlikte gösterilmektedir. Tablo 2.1’deki parametreler bu anten dizisinin 2,68 GHz ile 3,32 GHz arasında çalışması için ayarlandı. Kullanılan  $\tau = f_i/f_{i+1} = 0.95$ ,  $f_i < f_{i+1}$  oranına göre yama antenlerin frekansları en düşük frekanstan (en büyük yama anten) en yüksek frekansa sırayla 2,68 GHz, 2,82GHz, 2,97 GHz, 3,13GHz ve 3,29 GHz değerindedir. YP1 değeri yarım dalga boyu katlarında alınmadı bunun yerine parametrik analiz sonucunda  $S_{11}$  parametresine göre en büyük empedans bant genişliğini veren değer kullanıldı. Şekil 2.10’da S parametre simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Bu grafikte  $RL \leq 8$  dB için yüzdeler bant genişliği %32,3’tür. Çalışma bandında  $S_{11}$  değeri azalıp  $S_{21}$  değeri artmaktadır ve  $S_{33}$  değerindeki azalma dış çevreden gelen dalgaların anten tarafından alındığını göstermektedir. Bölüm 1.2.2’de anlatılan bilgilere göre bu birim hücrenin pelerin olarak çalışması için gerekli koşulları sağlanmıştır.



Şekil 2.10. Log-periyodik yama anten birim hücre (eş düzlemlili bağlaşım) için S parametre sonuçları

### 2.3.2. Log-periyodik yama anten dizisi ile silindirik pelerin tasarımı

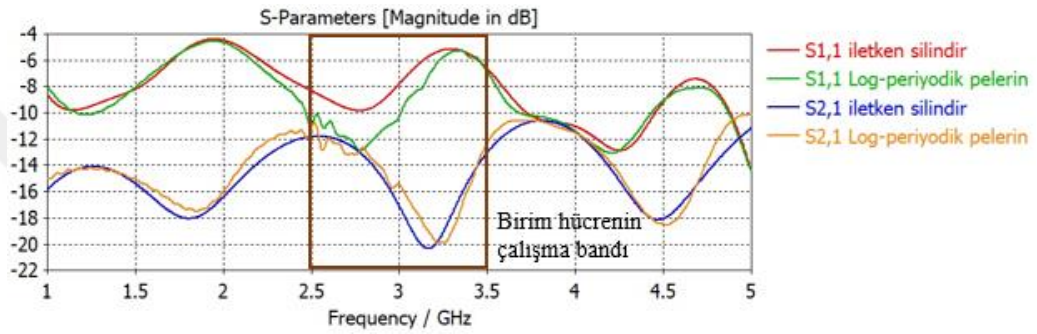
Önceki bölümde tasarlanan log-periyodik birim hücreden 8 tane yan yana dizilip yarıçapı  $R = 50$  mm olan silindirik pelerini oluşturmak için büküldü. Simülasyon için iki port tanımlandı ve z-ekseni boyunca yerleştirildi giriş port 1'den verildi. Sınır koşulları x-eksenin iki yönünde (pozitif x ve negatif x yönünde) OA seçildi, pelerin ile sınır arasındaki mesafe 25 mm değerindedir. Sınır koşulları z-eksenin iki yönünde OA seçildi, pelerin ile sınır arasındaki mesafe 100 mm değerindedir ve y-eksenin iki yönünde  $E_t = 0$  seçildi. Şekil 2.11'de tasarlanan pelerin ve simülasyon ortamı gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Log-periyodik silindirik pelerin: silindirik pelerin (a) yandan görüntüsü (b) üstten görüntüsü ve (c) simülasyon ortamı

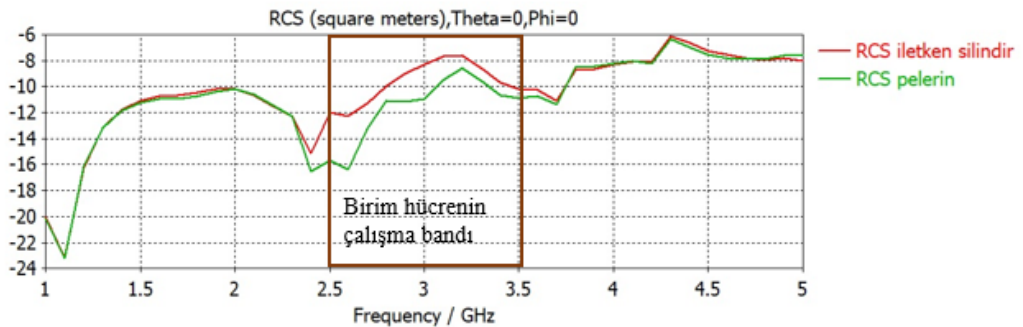
Şekil 2.12'de pelerin, pelerin ile aynı boyutta ve aynı sınır koşullarında simülasyonu yapılan iletken silindir için S parametre sonuçları gösterilmektedir. Pelerin iletken

silindire göre yansımayı ( $S_{11}$ ) azalttığı ama iletimde ( $S_{21}$ ) çok az fark olduğu grafikten görülmektedir. Bu pelerin yapısı, dalgaların yayılma yönünde iletilmesinde hiç bir iyileşme sağlamamıştır ve dolayısıyla pelerin olarak çalışmamaktadır. Böylece [7]'de anlatılan YABH pelerin tasarım yönteminin sadece tek yama ışıma elemanına sahip birim hücrelerde geçerli olduğu ve daha karmaşık birim hücrelerde geçerli olmadığı anlaşıldı. Şekil 2.12'deki sonuçlara göre pelerin olması gereken yapının birim hücre çalışma bandında iletken silindire göre yansımayı azaltması bu yapının radar soğurucu malzeme gibi çalıştığını göstermektedir.



Şekil 2.12. Log-periyodik pelerin ve iletken silindir için S parametre sonucu

Bu yapının RKA değerini azaltıp azaltmadığını incelemek için RKA simülasyonu yapıldı. Şekil 2.11c'deki simülasyon ortamında yapılan değişiklikler şöyledir: port 1 ve port 2 kaldırıldı, elektrik alan vektörü y-ekseninde kutuplu negatif z-ekseni yönünde yayılan düzlem dalgalar eklendi, sınır koşulları tüm yönlerde OA yapıldı ve pelerin yapısı ve sınırlar arasındaki mesafeler programın varsayılanı yapıldı. Pelerin ve iletken silindir için  $\theta = 0^\circ$  ve  $\phi = 0^\circ$  yönündeki (düzlem dalgaların geliş yönündeki) maksimum RKA değerleri Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere pelerin yapısı birim hücre çalışma bandında iletken silindire göre monostatik RKA'yı azaltmakta olup radar soğurucu malzeme gibi çalışmaktadır.

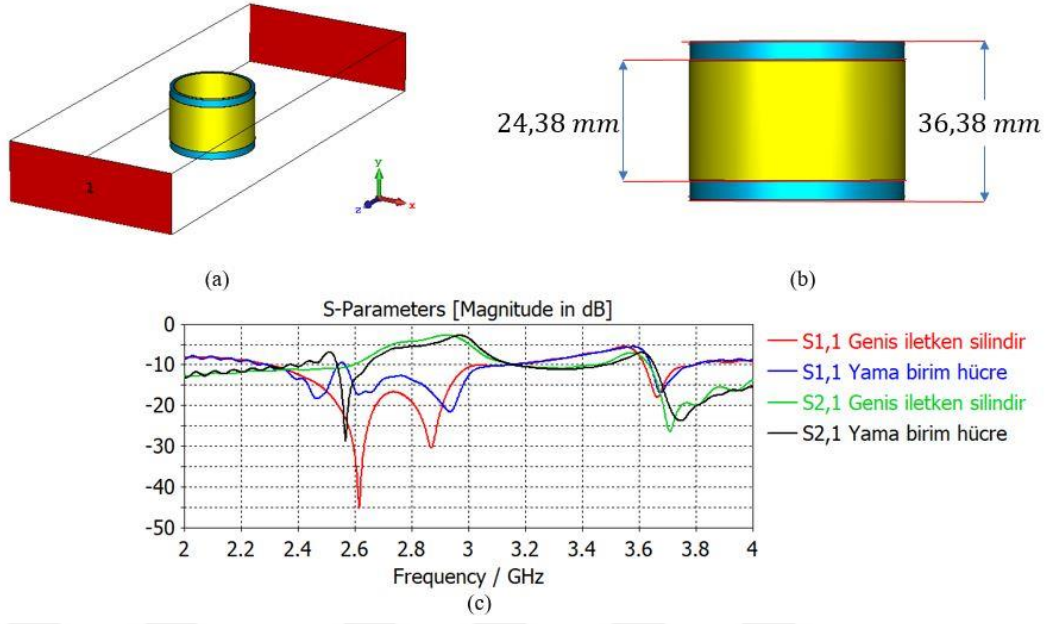


Şekil 2.13. Log-periyodik pelerin ve iletken silindir için RKA sonucu

#### 2.4. Silindirik İletken Yüzeyler ile Pelerin Tasarımı

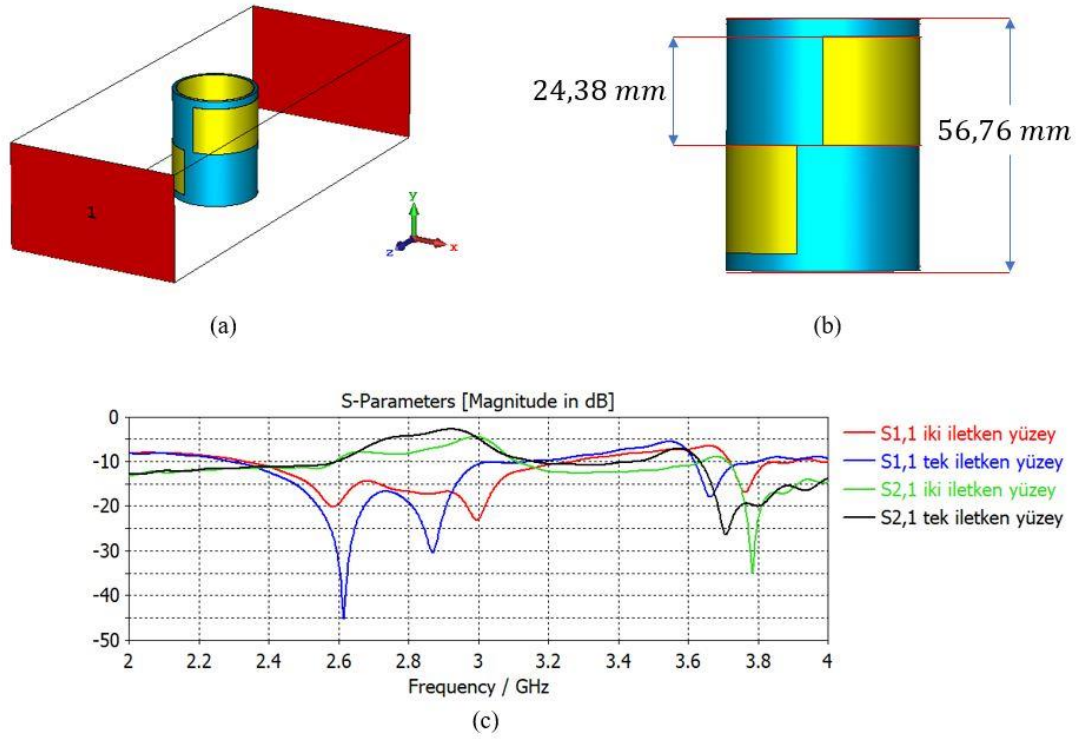
Bölüm 2.1’de içinde tek yama anten bulunan birim hücreler ile pelerin tasarımı yapıldığında birim hücrenin içinde yama antene bağlanan iki iletim hattının uzunlukları antenin çalışma performansını etkilememektedir. Bu nedenle birim hücre silindirik oluşturmak için büküldüğünde, iletim hatlarının boyları  $L_f < 3$  mm alınmıştır.  $L_f = 0$  mm alındığında bu iletim hattı ortadan kaldırılıp iki bitişik birim hücredeki yamalar birbiri ile bağlanmaktadır. Böylece aynı pelerin yapısında birim hücrelerdeki yama antenlerin yerine, silindirik pelerini çevreleyen ve yamaların uzunluğu  $L_p$  ile aynı genişliğe sahip bir iletken yerleştirildi. Bu şekilde tasarlanan pelerin yapısı bu tezde Silindirik İletken Yüzey Pelerin (SİYP) olarak adlandırıldı. Bölüm 2.1’deki simülasyon ortamının aynısı kullanılarak yeni pelerin yapısının S parametre simülasyonu yapıldı. Şekil 2.14’te sonuçlar gösterilmektedir. Bu yapının pelerin olarak çalışmasının nedeni gelen dalgaların, iletken yüzeyin genişliğine bağlı rezonansa giren yüzey akımları oluşturmasından kaynaklıdır, yüzey akımlarının oluşması gelen dalgaların iletken yüzeyi takip ederek pelerinin arkasına doğru ilerlemesine neden olmaktadır. Şekil 2.14c’de gösterilen SİYP ve YABH yöntemlerinin sonuçları karşılaştırıldığında SİYP yönteminde S parametrelerinin frekans ekseninde çok az değerde sola doğru kaydığı görülmektedir. Frekanstaki sola kayma saçaklanan elektrik alanların artmasına bağlı iletken yüzeyin efektif elektriksel genişliğinin artması nedeniyle oluşmaktadır. Çalışma frekansındaki farklılık az olduğu için pratik uygulamalarda SİYP yöntemindeki iletken yüzeyin genişliği aynı frekansta çalışan yama antenin uzunluk değerinde seçilebilir.  $S_{21}$  parametresine bakıldığında her iki yöntemde dalgaların yayılım yönünde iletilmesinde benzerlik görülmektedir.  $S_{11}$  parametresine göre SİYP yöntemi yansımayı azaltmada daha iyi performans sergilemektedir.





Şekil 2.14. Silindirik iletken yüzey ile pelerin tasarımı: (a) simülasyon ortamı, (b) iletken yüzeyin genişliği ve (c) S parametre sonuçları

Bu tasarımın çalışma sınırlarını anlamak için SİYP yöntemindeki iletken yüzey silindirik pelerin çevresinin tamamı yerine yarısını kaplayacak şekilde yerleştirildi (birinci iletken yüzey). Silindirik pelerinin boyu bu iletken yüzeyden iki taneyi sığacak şekilde arttırıldı. Silindirik pelerinin diğer yarısı birinci iletken yüzeye bağlı olmayan başka bir iletken ile kaplandı (ikinci iletken yüzey). Bu iki iletken aynı yalıtkan alt tabakanın üstüne yerleştirildi ama ikincisi y-eksenine göre birincisinin altındadır. Bu tasarım ve S parametre simülasyon sonuçları Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Sonuçlarda iki iletken yüzeyli yapının tek iletken yüzeyli yapıya göre, dalgaları yayılım yönünde iletme ve yansımayı azaltma açısından performansında düşüş olduğu ama pelerin olarak çalıştığı (tasarım aşamasında hedeflenen 3 GHz çalışma frekansında) görülmektedir.



Şekil 2.15. İki tane geniş iletken yüzey ile pelerin tasarımı: (a) simülasyon ortamı, (b) iletken yüzeyin genişliği ve (c) S parametre sonuçları

Son yöntemde iletken genişlikleri farklı seçildiğinde bant genişliğinde değişiklik olmaktadır. Birbirinden farklı genişlik değerleri alan iletken yüzeyler ile geniş bantlı pelerin tasarlamak için iletken genişlikleri arasındaki bağıntı log-periyodik yapıldı. İletkenlerin SIYP yöntemindeki gibi pelerin özelliğini koruması için iletken yüzeylerin birbirine bağlı olamaması gerekmektedir. Dolayısıyla iletken yüzeyler ile log-periyodik anten tasarlama aşamasında, iletken yüzeylere bağlanacak besleme hattının bu yüzeylerin bulunduğu düzlemden farklı bir düzlemde olması gerekmektedir. Bölüm 2.2.2’de anlatılan ikinci yöntem bu hedefi gerçekleştirmek için uygundur.

## 2.5. Log-Periyodik İletken Yüzeyler İle Pelerin Tasarımı

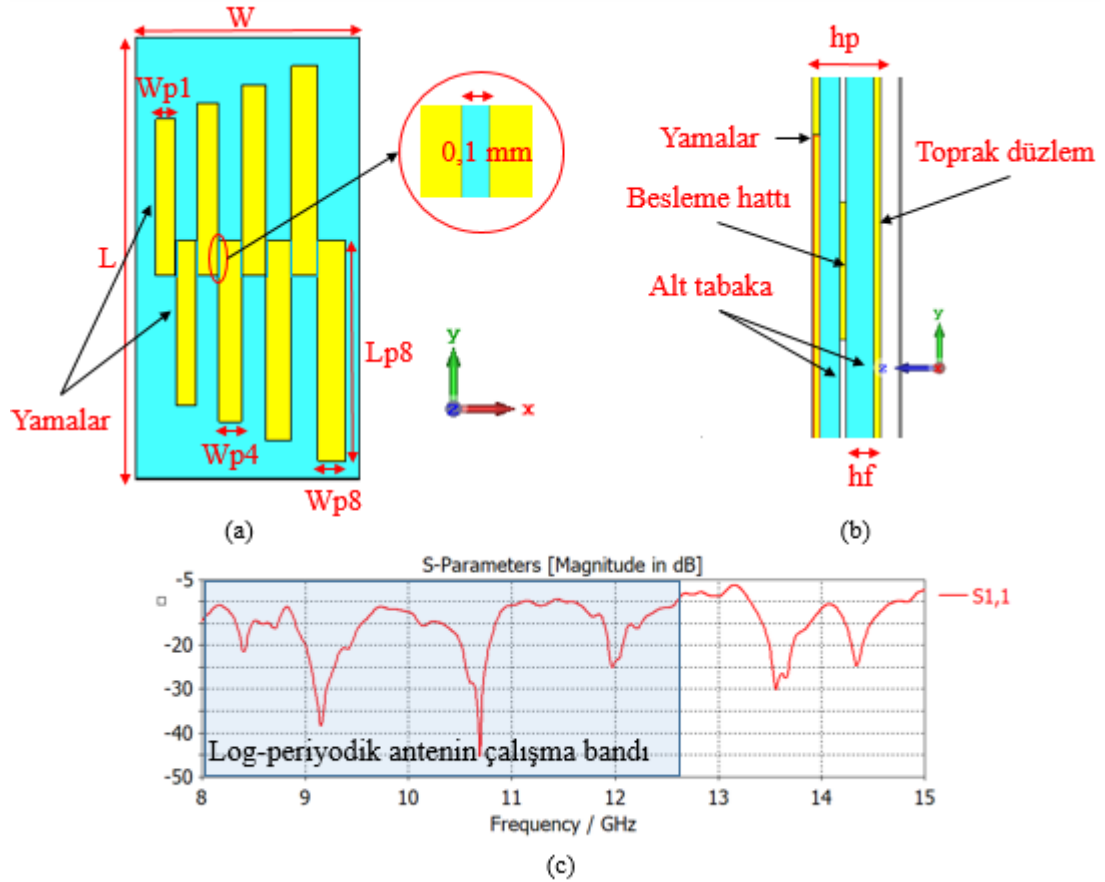
Yama antenlerde (dikdörtgen yamalar) en düşük rezonans frekansı (en düşük frekanslı mod uyarımı) yamanın en büyük boyutuna göre belirlenmektedir (örnek olarak genişlik  $W_p$  uzunluk  $L_p$ ’den daha büyük ise rezonans frekansı genişliğe göre belirlenmektedir). Yama antenin küçük boyutu için ve antenin her iki boyutun katları için sırayla daha yüksek frekanslarda rezonans gerçekleşmektedir. Örnek olarak bir yama anten, uzunluğuna göre 2 GHz’de rezonansa girip ışımaya başlarsa 4 GHz civarında tekrar rezonansa girip ışımaya başlayacaktır. Bu bölümde tasarlanan log-

periyodik dizideki yama antenlerin uzunlukları genişliklerinin 8 katı değerindedir. Yama antenin, uzunluğuna göre 8.inci rezonansa gireceği frekans ile genişliğine göre 1.inci rezonans frekansı aynı veya çok yakın değerde olacaktır böylece yama antenlerin genişliklerine göre frekans değerleri belirlenip tasarım yapıldığında uzunluklarına göre aynı frekanslarda rezonans olacaktır. Log-periyodik dizi tasarımı iki katmanlı yapıldı ve alt tabaka malzemesi PVC ( $\epsilon_r \cong 4$ ) seçildi. Yama antenlerin genişlikleri besleme hattı yönüne paralel ve uzunlukları besleme hattı yönüne dik yerleştirildi. Yama antenler arası log-periyodik oran yama genişliğine göre hesaplandı. Anten dizisinin tasarım parametreleri Tablo 2.2'de verilmektedir. Yama uzunlukları genişliklerin 8 katı olduğundan sadece genişlik değerleri verildi.

Tablo 2.2. İki katmanlı log-periyodik yama anten dizisi tasarım parametreleri

Parametre	Açıklaması	Değeri
Wp1	1. yamanın genişliği	4,50 mm
Wp2	2. yamanın genişliği	4,72 mm
Wp3	3. yamanın genişliği	4,96 mm
Wp4	4. yamanın genişliği	5,20 mm
Wp5	5. yamanın genişliği	5,46 mm
Wp6	6. yamanın genişliği	5,74 mm
Wp7	7. yamanın genişliği	6,03 mm
Wp8	8. yamanın genişliği	6,33 mm
hp	Yamaların olduğu düzlem ile toprak düzlem arası alt tabaka kalınlığı	1,6 mm
hf	Besleme hattının olduğu düzlem ile toprak düzlem arası alt tabaka kalınlığı	0,8 mm
$\epsilon_r$	Bağlı dielektrik sabiti (PVC)	4
Wf	Besleme iletim hattının genişliği	4 mm
Lf	Besleme iletim hattının uzunluğu	50,43 mm
P	Yamalar ile besleme hattının kesiştiği uzunluk değeri	4 mm
$\tau = W_{i+1}/W_i$	Log-periyodik oran	1,05
L	Log-periyodik anten dizisinin uzunluğu	101,30 mm
W	Log-periyodik anten dizisinin genişliği	50,43 mm
d	Bitişik iki yama arasındaki mesafe	0,1 mm

Şekil 2.16’da tasarlanan anten dizisi ve  $S_{11}$  sonucu gösterilmektedir. Log-periyodik diziye giriş, besleme hattının en yüksek frekanslı yama anten tarafındaki ucundan verildi ve  $S_{11}$  parametresini elde etmek için besleme hattına gerekli port tanımı yapıldı. Şekil 2.16c’de anten dizisinin 8 GHz ile 12,5 GHz arasında geniş bantlı çalıştığı görülmektedir. Tasarlanan anten dizisinin SİYP yöntemiyle çalışması için bükülerek silindir oluşturması gerekmektedir. Log-periyodik dizinin bükülme yönüne yamaların uzunluğu denk gelmektedir, bu nedenle yama uzunlukları genişlik değerlerinin katlarında seçildi. Tasarlanan pelerin yarıçapı  $R = 15$  mm değerindedir. Simülasyon ortamındaki sınır koşulları ve pelerin ile sınırlar arasındaki mesafeler Şekil 2.11b ve Şekil 2.11c’deki gibidir. Şekil 2.17’de geniş bantlı log-periyodik pelerin tasarımı ve S parametre sonuçları gösterilmektedir. Simülasyon ortamında port 1’in karşısına pelerin yapısındaki ana besleme hattının bulunduğu kısım yerleştirildi böylece port 1’den gelen dalgalar tüm yama antenleri etkilemektedir ve pelerin en iyi seviyede çalışmaktadır.



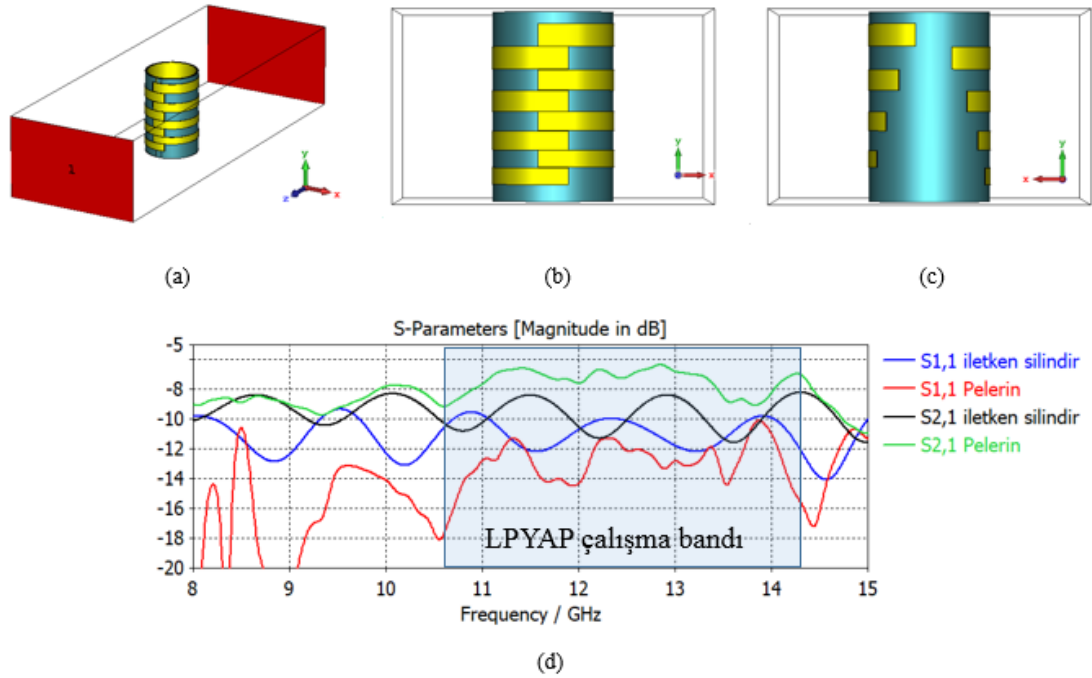
Şekil 2.16. İki katmanlı log-periyodik yama anten dizisi: (a) üstten görünüm , (b) yan görünüm ve (c) S parametre sonucu

Şekil 2.17d’de karşılaştırma amaçlı pelerin ve pelerin ile aynı boyutta, pelerin kaplı olmayan iletken silindirin S parametreleri gösterilmektedir. Pelerin S<sub>21</sub> parametresinin kendi S<sub>11</sub> parametresinden daha yüksek değerde olduğu frekans aralığı ile pelerin S<sub>21</sub> parametresinin iletken silindirin S<sub>21</sub> parametresinden en az 1 dB daha yüksek değerde olduğu frekans aralığının kesişimi pelerin çalışma bant genişliğini ifade etmektedir. Bu tanıma göre Şekil 2.17’de gösterilen pelerin 10,5 GHz ile 14 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Yüzdelerik bant genişliği,

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{\frac{f_2 + f_1}{2}} \approx \%30 \quad (2.4)$$

$$BW = \frac{14,2 \text{ GHz} - 10,5 \text{ GHz}}{\frac{14,2 \text{ GHz} + 10,5 \text{ GHz}}{2}} \approx \%30$$

Denklem (2.4)’te f<sub>2</sub> pelerin çalıştığı en yüksek frekans ve f<sub>1</sub> pelerin çalıştığı en düşük frekans değeridir. Bu bant genişliğini veren pelerin kalınlığı 1,6 mm’dir ve literatürdeki diğer yöntemlerin bant genişliğine göre daha yüksek değerdedir. Bu bölümde anlatılan pelerin tasarım yöntemine tezin sonraki bölümlerinde Log-Periyodik Yama Anten Pelerin (LPYAP) kısaltmasıyla atıf yapılacaktır.



Şekil 2.17. LPYAP (a) simülasyon ortamı, (b) pelerin ön taraftan, (c) pelerin arka taraftan görünümü ve (d) S parametre sonuçları

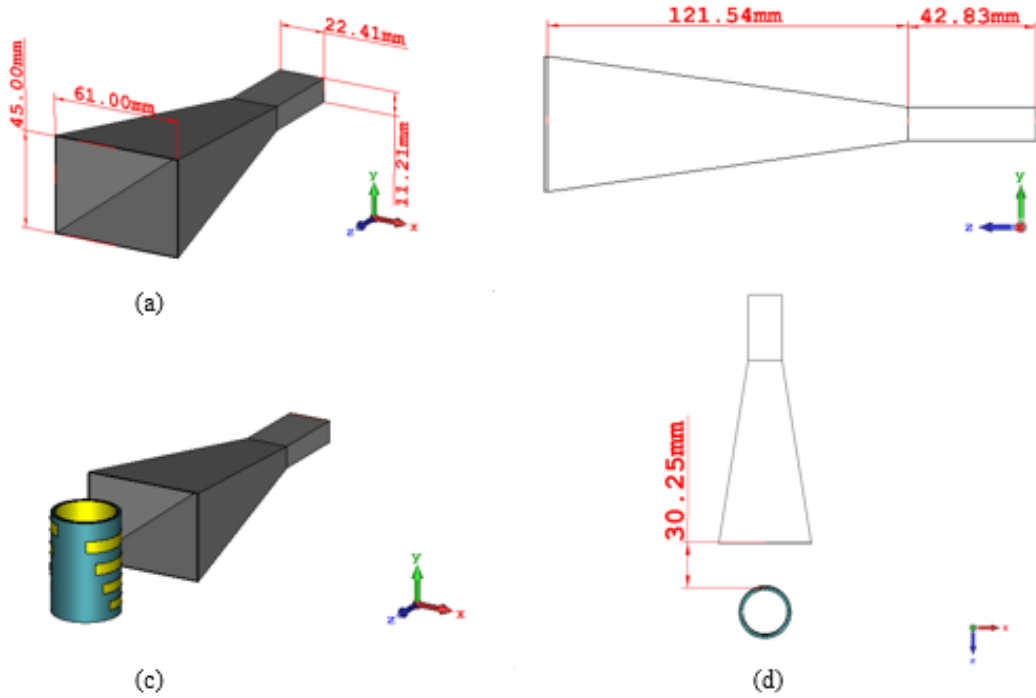
### 3. SİMÜLASYON BULGULARI

LPYAP tasarımında kullanılan parametreleri değiştirmenin pelerin çalışma performansına etkileri bu bölümde incelenmektedir. LPYAP yönteminde bant genişliğini iyileştirme hedeflenmişti, pelerinin ilettiği ve pelerinin çevresinde yayılan dalgalar arasındaki faz bozukluğu için iyileştirme yapılmamıştı. Bu nedenle simülasyon ortamında LPYAP horn antenin önüne yerleştirildiğinde antenin ışınma örüntüsü bozulmaktadır ama iletken silindire göre antenden yayılan dalgaları daha iyi iletmektedir. Pelerindeki yalıtkan alt tabakanın kalınlığını arttırma yüzey dalgaları oluşturduğu için pelerinin iletim seviyesini iyileştirmektedir. Gizlenecek nesnenin boyutları pelerin boyutlarından büyük olduğu durumlar için pelerinin uzunluk ve yarıçapını arttırma bant genişliğini etkilememektedir. Log-periyodik dizideki yama anten sayısının değişmesiyle bant genişliği değişmektedir ama LPYAP yöntemi geniş bantlı olma özelliğini korumaktadır. Log-periyodik anten dizisinden besleme hattı kaldırıldığında pelerinin bant genişliği en büyük ve en küçük iletken yüzeyin rezonans frekanslarına göre belirlenmektedir böylece pelerin tasarımı için anten tasarımı gerekmemektedir. LPYAP için silindirik şekil kullanma yerine karesel prizma şekli kullanıldığında, LPYAP yöntemi silindirden farklı şekiller için de geçerliliğini korumaktadır. Yukarıdaki bulgular bu bölümde detaylıca anlatılmaktadır. Pelerinin çalışmasını incelemek için kullanılan grafiklerin genelinde sadece  $S_{21}$  parametresi gösterildi çünkü Şekil 2.17d'ye bakıldığında LPYAP'ın çalışma bandının tümünde pelerinin  $S_{11}$  parametresi  $S_{21}$  parametresinden daha düşük değerdedir ve bölüm 2.1'deki bant genişliği tanıma göre pelerinin  $S_{11}$  parametresi bant genişliğini etkilememektedir.

#### 3.1. Log-Periyodik Pelerinin Horn Anten Işınma Örüntüsüne Etkisi

Bölüm 1.1'de yapılan pelerin tanımına göre, pelerin ile kaplı bir nesneye gelen elektromanyetik dalgaların “nesne yokmuş gibi” yayılım yönünde ilerlemesi gerekmektedir. Bu tanıma göre bir antenin önüne pelerin yerleştirilirse antenin ışınma örüntüsünü bozmaması gerekir. Serbest uzay ortamında çalışan pelerinlere gelen

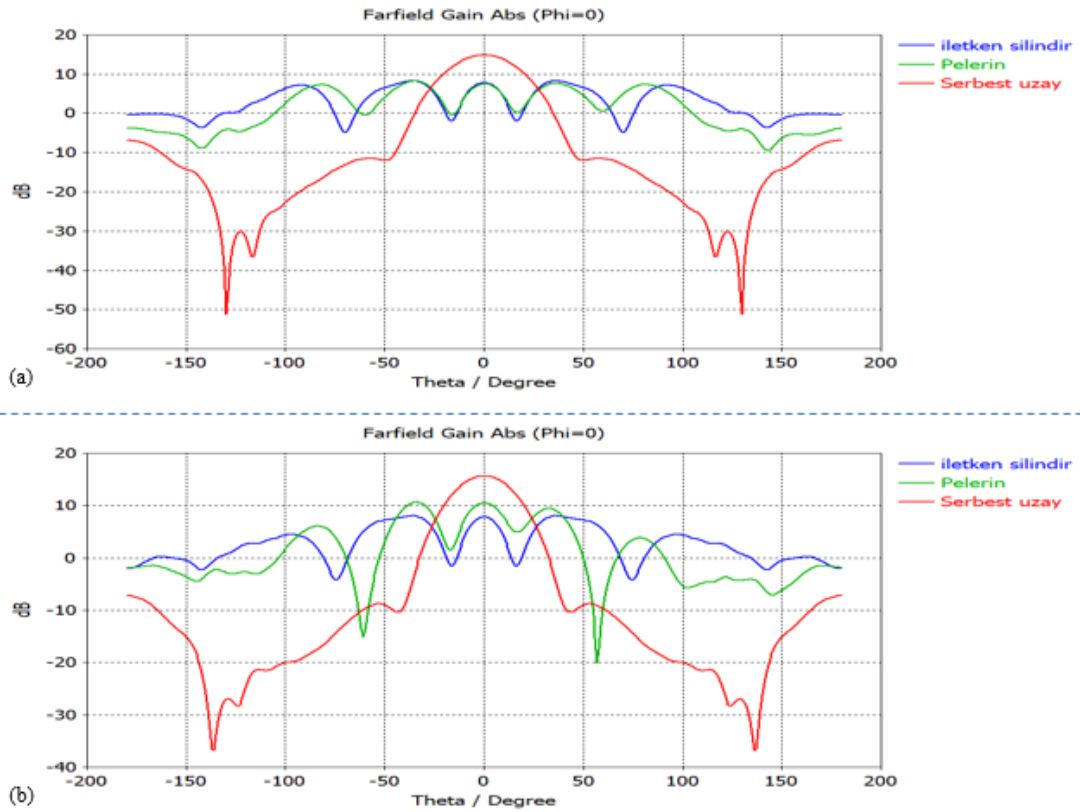
dalgalar pelerini aşıp geçtikten sonra, dalgalarda faz bozulması oluşmaktadır. Bu nedenle “nesne yokmuş gibi” tanımı tamamen gerçekleşmeyecektir bunun yerine saf iletkeni göre pelerinler daha iyi iletim performansı göstermektedir. Kaynak [8]’de pelerin ve iletken silindirin horn anten ışınma örüntüsüne etkisi incelenmiştir. Pelerin ışınma örüntüsünün şeklini koruyamamıştır ama iletken silindire göre antenin ana lobunu daha iyi iletmiştir (Şekil 1.13b’de gösterilmektedir). Bölüm 2.5’te tasarlanan geniş bantlı pelerin performansını değerlendirmek amacıyla benzer bir simülasyon yapmak için ticari bir x-bant horn antenin simülasyon modeli tasarlandı (bu pelerin simülasyonu 8-15 GHz aralığında yapıldığı için x-bant anten uygun görüldü). Horn antenin açıklığı ile pelerin antene doğru bakan yüzü (pelerin yapısındaki silindirin yan yüzünde besleme hattının olduğu taraf) arasındaki mesafe 30 mm’dir. Şekil 3.1’de kullanılan antenin boyutları ve anten ile pelerin yerleşimi gösterilmektedir. Simülasyon ortamı için tüm yönlerdeki sınır koşulları OA yapıldı ve mesafeler CST MWS programının varsayılanı yapıldı.



Şekil 3.1. Pelerin horn anten önüne yerleştirilmesi (a) ve (b) horn antenin boyutları, (c) ve (d) pelerin anten önüne yerleştirilmesi

Şekil 3.2’de  $f = 10$  GHz ve  $f = 11$  GHz frekanslarının her biri için üç ışınma örüntüsü gösterilmektedir. Işınma örüntülerinin birincisi horn antenin önünde hiç bir şey olmadığı durum (Serbest uzay), ikincisi horn antenin önüne pelerin yerleştirildiği

durum ve üçüncüsü horn antenin önüne iletken silindirin yerleştirildiği durum içindir.  $f = 10$  GHz’de ana loba bakıldığında pelerin ile iletken silindir arasında fark olmadığı görülüyor.  $f = 11$  GHz’de pelerinin iletken silindire göre ana lobu daha iyi iletmediği görülmektedir. Bunun nedenini anlamak için Şekil 2.17d’ye bakıldığında iletken silindir ile pelerinin  $S_{21}$  parametresi arasındaki farkın,  $f = 10$  GHz ve  $f = 11$  GHz frekanslarında aynı değerde olmadığı görülmektedir  $f = 10$  GHz’deki fark 0,6 dB değerindeyken  $f = 11$  GHz’deki fark 2,6 dB değerindedir. Sonuç olarak iletken silindir ile pelerinin  $S_{21}$  parametresi arasındaki fark büyüdükçe pelerinin daha iyi çalıştığı ışınma örüntüleriyle görülmüş oldu.



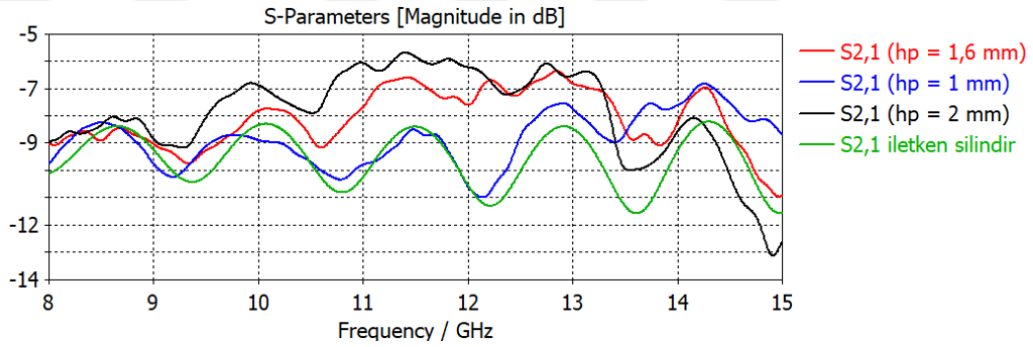
Şekil 3.2. (a) 10 GHz ve (b) 11 GHz frekansları için X-bant horn antenin serbest uzay, önüne iletken silindir ve pelerin yerleştirildiğinde elde edilen ışınma örüntüleri

### 3.2. Pelerin Kalınlığını Arttırma

Temel bilgiler bölümünde yama antenin yalıtkan alt tabaka kalınlığı arttığında empedans bant genişliğinin arttığı anlatılmıştı. Kalınlığın artması [6]’ya göre yüzey dalgalarının oluşmasına neden olmaktadır. LPYAP yönteminde pelerini oluşturan log-periyodik iletken yüzeyler, pelerine gelen dalgaların pelerin yüzeyini takip etmesine



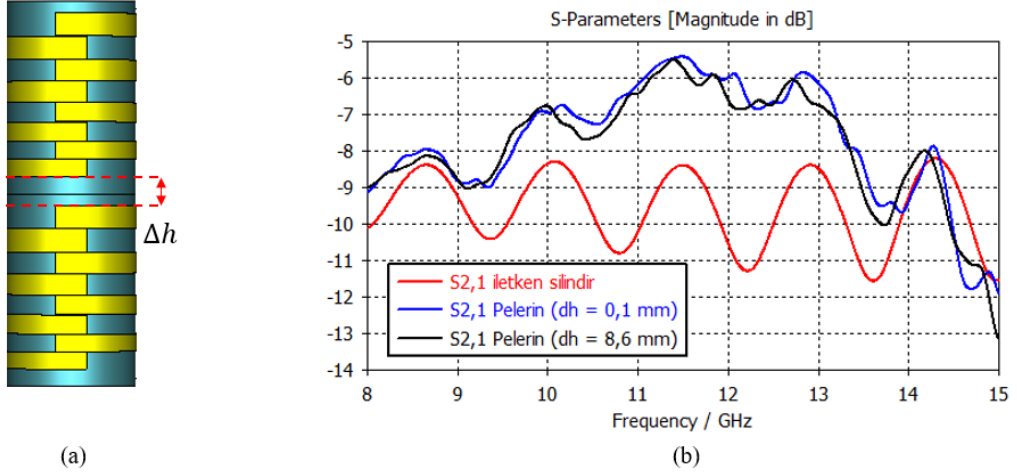
neden olmaktadır, böylece gelen dalgalar pelerinin ön tarafından arka tarafına iletilmektedir. Bu nedenle alt tabaka kalınlığının artmasıyla oluşacak yüzey dalgaları pelerinin çalışmasını destekleyecektir. Bölüm 2.5’deki LPYAP yöntemiyle tasarlanan pelerinin her iki yalıtkan katmanın (yamaların bulunduğu düzlem ile besleme hattı arasındaki katman ve besleme hattı ile toprak düzlem arasındaki katman) kalınlığı sırasıyla  $h_p = 1 \text{ mm}$ ,  $1,6 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm}$  ve  $h_f = 0,5 \text{ mm}$ ,  $1 \text{ mm}$ ,  $1,5 \text{ mm}$  yapıldı. Simülasyon ortamı bölüm 2.5’teki simülasyon ortamı ile aynıdır. S parametre sonuçları Şekil 3.3’te gösterilmektedir. Elde edilen  $S_{21}$  parametrelerine bakıldığında kalınlık arttıkça pelerine gelen dalgaların iletimi arttığı görülmektedir. İletimin artma nedeni oluşan yüzey dalgalarıdır. Denklem (2.4)’e göre yüzdelik bant genişliği  $BW = \%40$  değerindedir.



Şekil 3.3. Pelerin kalınlığına göre gelen dalgaların iletilme performansı

### 3.3. Silindirik Pelerinin Uzunluğunu Arttırma

Gizlenmesi hedeflenen nesnelerin boyutları uygulamaya göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle bölüm 3.2’de tasarlanan  $h_p = 2 \text{ mm}$  pelerinin uzun nesnelere kaplaması için pelerin yapısının üst üste tekrarlanması yeterli olacaktır. Bu tekrarlanmada iki bitişik LPYAP arasındaki mesafe  $\Delta h$  arttıkça iletimde bir miktar düşüş olmaktadır bu nedenle log-periyodik yapıların yakın olması gerekmektedir ama bu yakınlık için kritik bir değer yoktur. Simülasyon ortamı ve sınırlar bölüm 2.5’teki gibidir. Şekil 3.4’te pelerini oluşturan iki bitişik log-periyodik dizinin yerleştirilmesi ve  $\Delta h = 0,1 \text{ mm}$  ve  $\Delta h = 8,6 \text{ mm}$  için  $S_{21}$  sonuçları gösterilmektedir.  $S_{21}$  sonuçları  $\Delta h$  değerinin çok kritik olmadığı göstermektedir.

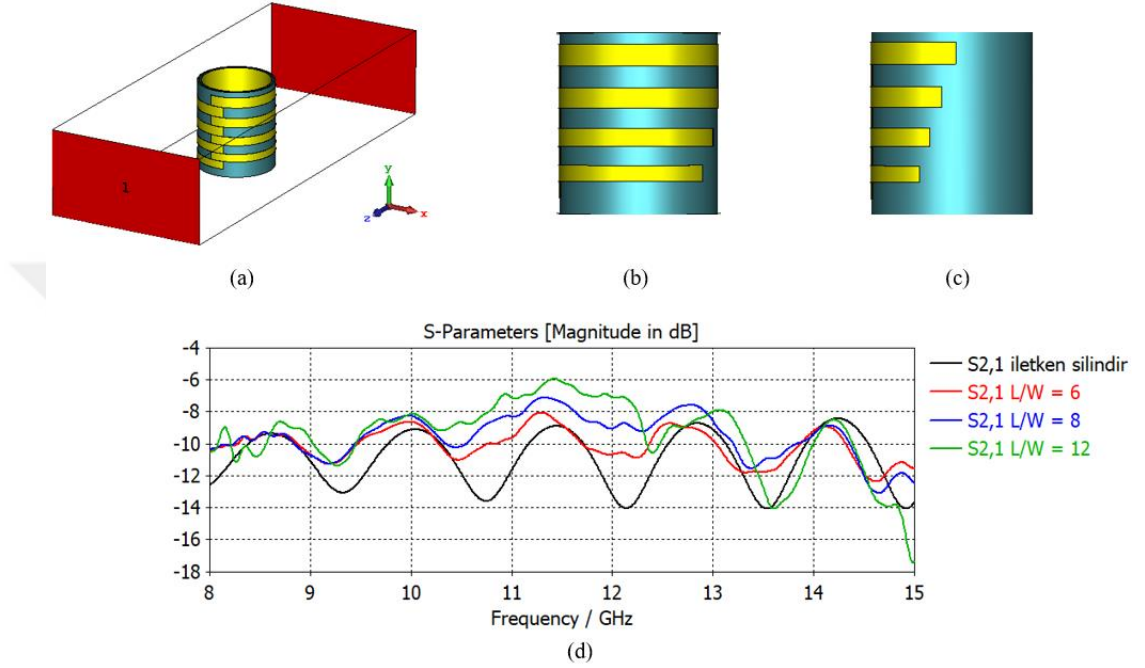


Şekil 3.4. Birden fazla log-periyodik dizi ile uzun pelerin tasarımı: (a) log-periyodik dizilerin yerleşimi ve (b) iki dizi arası mesafeye göre S parametre sonuçları

### 3.4. Silindirik Pelerinin Yarıçapını Arttırma

LPYAP yönteminde iletken yüzeylerin oluşturduğu yama antenlerin uzunluğu genişliğinin katları değerindedir. Silindirik pelerin oluşturulurken iletken yüzeylerin uzun olması nedeniyle, her bir yama anten silindirin ön yüzünün yarısından başlayıp arka yüzünün bir kısmını kaplamaktadır. Pelerinin ön yüzünde bitişik yamalar birbirlerine yakın olduğu için besleme hattıyla olan kapasitif bağlaşıma ek olarak aynı düzlemde olan bitişik yamalar arasında mesafenin kısalığından dolayı kapasitif bağlaşım olmaktadır. Log-periyodik dizideki her bir yama anten arka yüze uzanırken bitişiginde olan yamalar ile pelerinin arka yüzünde tekrar bir kapasitif bağlaşıma neden olmamalıdır. Dizideki yamaların alabileceği en büyük uzunluk değeri bu koşul ile sınırlıdır. Çünkü tekrar bir bağlaşımin olması yamaların rezonans frekansını etkileyecektir. Eğer yama antenlerin uzunlukları yeterli olan değerden büyük seçilirse uzun yamalar arkadan birbirleriyle kapasitif bağlaşıma girecek ve yama antenlerin rezonansını etkileyecektir. Tam tersi olursa, eğer yamaların uzunluğu yeterli olan değerden kısa seçilirse bu durumda gelen dalgalar pelerinin arka tarafına iletilmeyecektir ve yüksek frekanslı yamalar diğer yamalara nazaran daha kısa olduğundan bu frekanslardaki iletim düşecektir. Log-periyodik dizideki yama antenler için yeterli uzunluk değeri, en düşük frekanslı antenin bitişigindeki antenle pelerinin arka yüzünde kapasitif bağlaşım yapmadığı ve en yüksek frekanslı antenin uzunluğu pelerinin arka yüzüne doğru bükülmesine izin verdiğinde elde edilir. Bu durumu göstermek için bölüm 2.5'te tasarlanan pelerinin  $h_p$  ile R parametrelerinde  $h_p = 2$  mm

ve  $R = 20$  mm olacak şekilde değişiklik yapıldı. Yama uzunlukları genişliklerinin sırasıyla  $L/W = 12$  kat, 8 kat ve 6 katı olduğu durumlarda simülasyon yapıldı. Simülasyon ortamı ve sınırlar bölüm 2.5'teki gibidir. Şekil 3.5'te Simülasyon ortamı,  $L/W = 12$  ve  $L/W = 6$  durumları için pelerinin pozitif x-ekseni yönündeki yan görüntüsü ve  $S_{21}$  sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Pelerin yarıçapı ile Yamaların  $L/W$  oranı ilişkisi: (a) simülasyon ortamı, (b)  $L/W = 12$  için (c)  $L/W = 6$  için pelerinin yan görüntüsü ve (d) S-parametre sonuçları

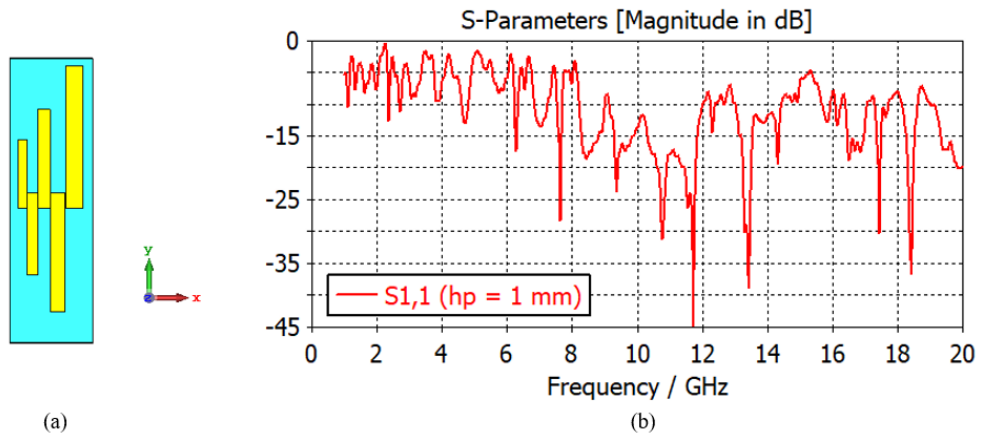
$S_{21}$  sonuçları  $L/W$  değeri arttıkça iletimin arttığını göstermektedir. Bu pelerin çalıştığı frekans bandı önceki tasarımlara benzer aralıktadır (çünkü kullanılan log-periyodik yapı ve yama genişlikleri aynı değerdedir). Buna rağmen  $L/W = 6$  olduğu durumda çalışma bandının bazı değerlerinde pelerin  $S_{21}$  değeri iletken silindirin değerine eşittir ve hatta 13 GHz civarında iletken silindirin  $S_{21}$  değerinden daha düşüktür. Bunun durum  $L/W = 6$  durumunda gelen dalgaların iletken yüzeyleri pelerin arka yüzüne kadar takip edememesinden kaynaklıdır.

### 3.5. Log-Periyodik Yapıda Yama Sayısının Değişmesi

LPYAP yöntemindeki log-periyodik dizinin yama anten sayısını değiştirerek yeni bir tasarım yapıldı. Yeni tasarımda log-periyodik dizi 5 adet yama antenden oluşmaktadır.

Tablo 3.1. Beş elemanlı ve iki katmanlı log-periyodik dizi tasarımında kullanılan parametreler

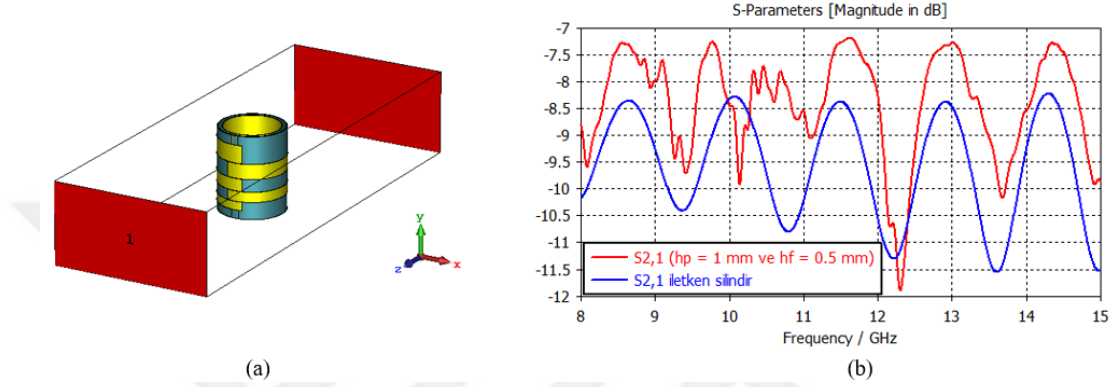
Parametre	Açıklaması	Değeri
Wp1	1. yamanın genişliği	4,50 mm
Wp2	2. yamanın genişliği	5,40 mm
Wp3	3. yamanın genişliği	6,48 mm
Wp4	4. yamanın genişliği	7,77 mm
Wp5	5. yamanın genişliği	9,33 mm
hp	Yamaların olduğu düzlem ile toprak düzlem arası alt tabaka kalınlığı	1,00 mm
hf	Besleme hattının olduğu düzlem ile toprak düzlem arası alt tabaka kalınlığı	0,50 mm
$\epsilon_r$	Bağıl dielektrik sabiti (PVC)	4,00
Wf	İletim hatlarının genişliği	4,00 mm
P	Yamalar ile besleme hattının kesiştiği uzunluk değeri	4,00 mm
$\tau = W_{i+1}/W_i$	Log-periyodik oran	1,20
L	Log-periyodik anten dizisinin uzunluğu	149,28 mm
W	Log-periyodik anten dizisinin genişliği	43,34 mm
d	Bitişik iki yama arasındaki mesafe	0,1 mm



Şekil 3.6. Log-periyodik dizi (5 elemanlı): (a) dizinin üstten görünümü ve (b) S parametre sonuçları

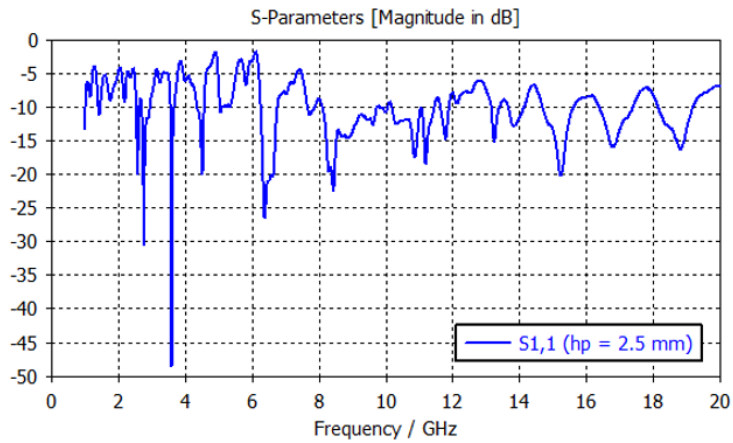
Dizi tasarımında kullanılan parametreler Tablo 3.1'de verilmektedir. Bu anten kullanılarak tasarlanan pelerinin yarıçapı  $R = 15$  mm ve yamaların uzunluğu genişliklerinin 8 katıdır. Şekil 3.6b'deki  $S_{11}$  sonuçlarına göre tasarlanan anten dizisi

$RL \leq -10$  dB için 8,2 GHz ile 12 GHz arasında çalışmaktadır. Bu dizi bükülerek pelerin oluşturulduğunda elde edilen  $S_{21}$  sonucu Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Silindirik yapının  $S_{21}$  parametresi iletken silindirin  $S_{21}$  parametresiyle karşılaştırıldığında, log-periyodik dizinin anten olarak çalışmasına rağmen silindirik yapı geniş bantlı pelerin olarak çalışmamaktadır çünkü pelerinin  $S_{21}$  parametresi iletkeninkine göre 1 dB’den yüksek olduğu geniş bir frekans aralığı yoktur.



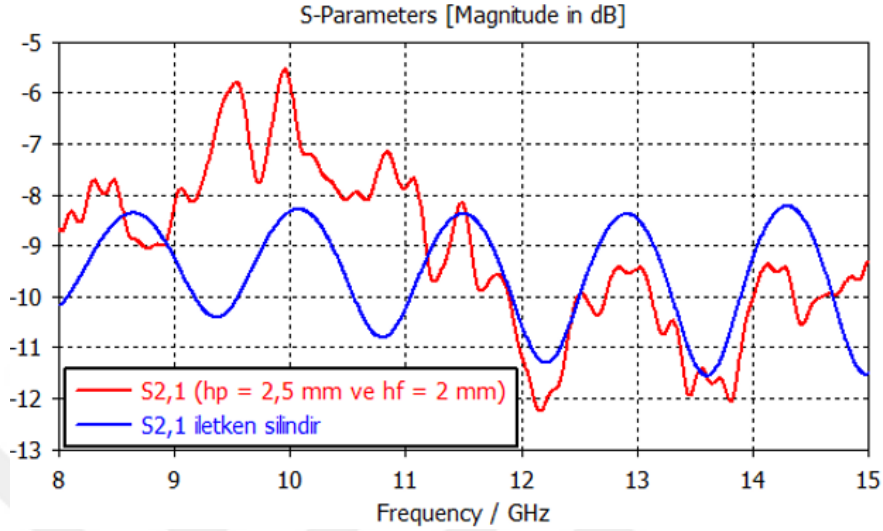
Şekil 3.7. Log-periyodik pelerin (5 elemanlı,  $hp = 1$  mm): (a) simülasyon ortamı ve (b) S-parametre sonuçları

Alt tabaka yüksekliği  $hp$  değerini arttırmanın dalga iletimini arttıracığı önceden anlatılmıştı. Bu nedenle anten tasarımı daha kalın alt tabaka ile tekrar yapıldı  $hp = 2,5$  mm ve  $hf = 2$  mm değerinde seçildi. Elde edilen  $S_{11}$  sonucuna göre anten 8 GHz ile 11,4 GHz arasında çalışmaktadır. Şekil 3.8’de  $S_{11}$  sonucu gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Log-periyodik dizinin kalınlığı  $hp = 2,5$  mm yapıldığında elde edilen  $S_{11}$  sonucu

Şekil 3.9’da bu anten yapısı ile tasarlanan pelerin S<sub>21</sub> sonucu gösterilmektedir. İletken silindirin S<sub>21</sub> parametresi ile karşılaştırıldığında yeni tasarım 9 GHz ile 11,1 GHz arasında iletimi arttırdığı için pelerin olarak çalışmaktadır.

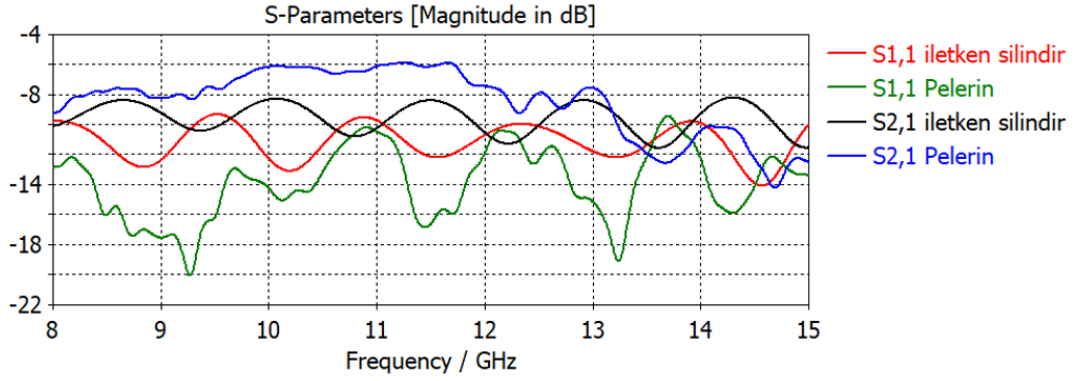


Şekil 3.9. 5 elemanlı log-periyodik pelerin S-parametre sonuçları (hp = 2,5 mm)

Böylece uzun yama antenler ile tasarlanan her log-periyodik anten dizisinin pelerin olarak çalışmayacağı görülmüş oldu. Böyle bir problemle karşılaşıldığında çözüm için yapılması gereken alt tabaka kalınlığını tekrar belirlemektir. Sonuç olarak farklı  $\tau$  değerleri ve farklı yama sayısı için LPYAP yönteminin geçerli olduğu görülmüştür.

### 3.6. Besleme Hattının Pelerin Çalışmasına Etkisi

Bölüm 3.5’te 5 elemanlı log-periyodik dizi  $h_p = 1$  mm için anten olarak çalışmıştı ama pelerin olarak çalışmamıştı. Log-periyodik dizinin anten olarak çalışması pelerin olarak çalışması için yeterli değildir. Pelerin tasarımı için log-periyodik dizinin anten olarak çalışmasının gerekli olup olmadığı bu bölümde tartışılmaktadır. Besleme hattı, girişi alıp yamalara ilettiğinde ve yama antenlerden gelen geri yansıma az olduğunda log-periyodik dizi anten olarak çalışıyor, dolayısıyla besleme hattı dizinin anten gibi çalışmasına neden olmaktadır. Ama pelerin yapısında besleme hattının gelen dalgaları yayılım yönünde iletme gibi bir fonksiyonu olmadığından, besleme hattını kaldırmanın pelerin çalışma performansını nasıl etkileyeceğini anlamak için bölüm 3.2’deki pelerin yapısından besleme hattı kaldırıldı. Besleme hattının olmadığı tasarımın S parametre sonuçları Şekil 3.10’da gösterilmektedir.

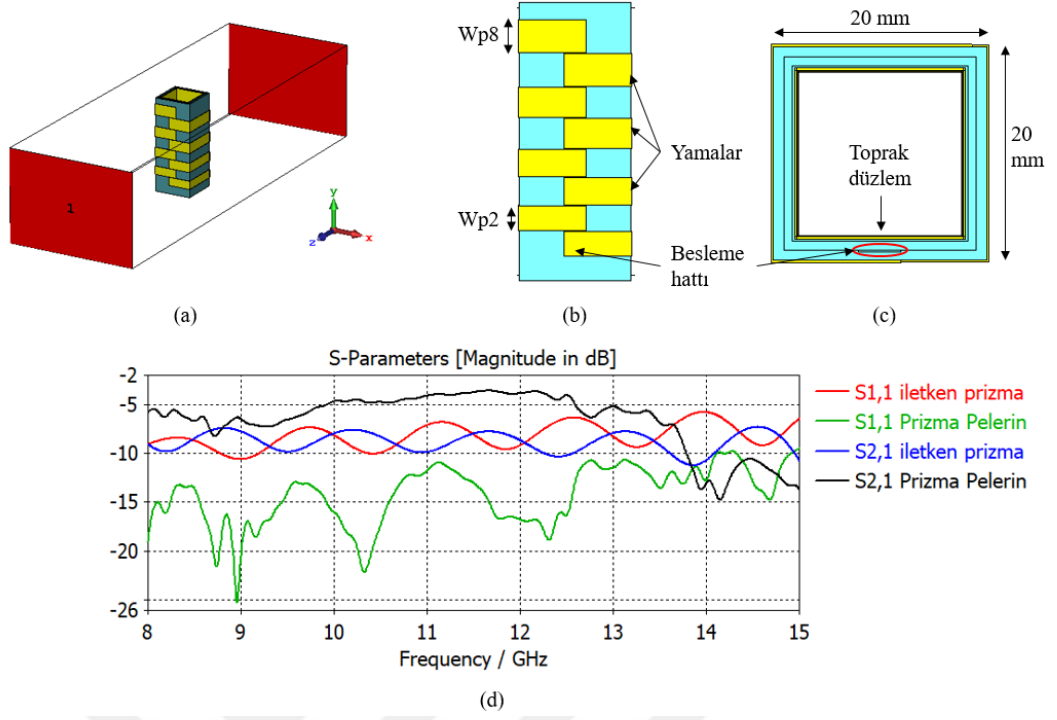


Şekil 3.10. Besleme hattının etkisi (S parametre sonuçları)

Tablo 2.2’de en büyük yamanın genişliği  $Wp1 = 4,5$  mm, merkez frekansı  $f1 = 12,4$  GHz ve en büyük yamanın genişliği  $Wp8 = 6,3$  mm, merkez frekansı  $f8 = 9,2$  GHz’dir.  $S_{21}$  sonuçlarına bakılırsa 9,2-12,4 GHz bandında yeni tasarım pelerin olarak çalışmaktadır. Böylece besleme hattının gerekli olmadığı anlaşıldı. Ek olarak pelerin tasarımına anten tasarımıyla başlamaya gerek kalmamıştır. İstenilen frekans bandında çalışacak pelerini tasarlamak için en yüksek ve en düşük frekansta çalışacak yamaların genişlik ve uzunlukları belirlendikten sonra ara frekanslarda çalışacak yamaların log-periyodik seçilmesi yeterlidir. Bu yöntemte tezin sonraki bölümlerinde Log-Periyodik Yama Dizisi Pelerin (LPYDP) kısaltmasıyla atıf yapılacaktır.

### 3.7. Pelerin Şeklinin Değişmesi

Şimdiye kadar bu tezde anlatılan tüm çalışmalarda silindirik pelerin tasarlandı. Bu bölümde kare prizma şekilde pelerin tasarlandı. Tasarımda bölüm 3.2’deki parametreler kullanıldı. Prizma uzunluğu silindirin uzunluğuyla aynı değerdedir. Farklı olan parametreler: R yarıçapı yerine karenin kenar uzunluğu (toprak düzlemini oluşturan tabakaya göre)  $LL = 16$  mm’dir. Şekil 3.11’de tasarlanan prizma pelerin ve S parametre sonuçları gösterilmektedir.  $S_{21}$  sonuçlarına bakıldığında prizma pelerinin  $S_{21}$  değeri, aynı uzunluk ve aynı kesite sahip pelerinle kaplı olmayan iletken prizmanın  $S_{21}$  değerinden daha yüksektir. Böylece LPYAP yönteminin sadece silindirik yapılarla ile kısıtlı olmadığı görüldü.



Şekil 3.11. Kare kesitli prizma pelerin: (a) simülasyon modeli, (b) pelerinin ön taraftan, (c) üstten görünümü ve (d) S parametre sonuçları



#### 4. DENEYSEL BULGULAR

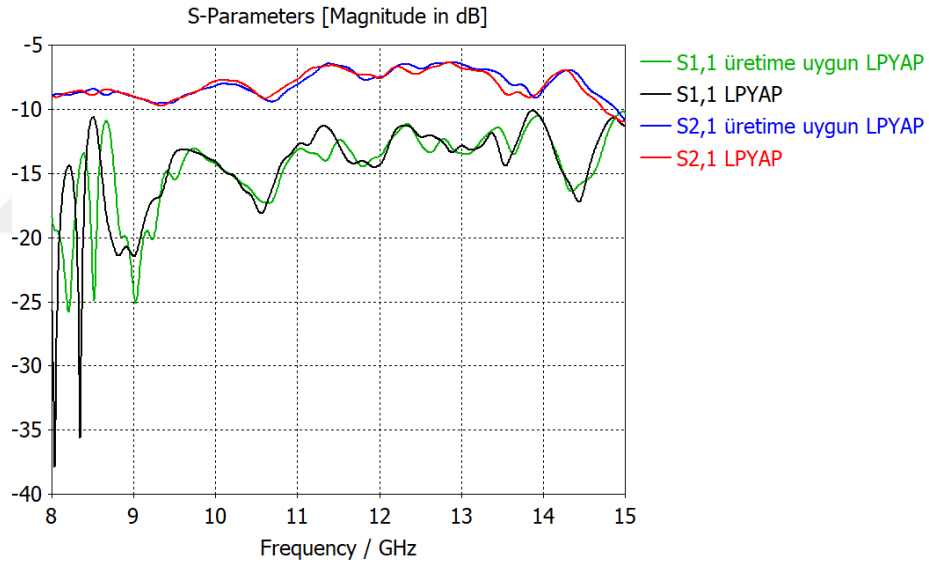
Bu bölümde LPYAP'ın üretimi ve elde edilen ölçüm sonuçları anlatılmaktadır. Bölüm 2.5'te tasarlanan LPYAP'ın üretimini kolaylaştırmak için yama anten genişliklerinde değişiklik yapıldı. Tablo 2.2'ye bakıldığında bu genişlik değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. LPYAP ilk aşamada elle üretildiği için genişlik değerleri arasında tekrarlama ve 0,5 mm'lik farklar yapılarak Tablo 2.2'deki verilere mümkün olan en yakın değerler seçildi. Yama antenlerin uzunlukları Tablo 2.2'deki ilgili yama genişliklerinin 8 katı değerindedir. Dolayısıyla üretim için yapılan tasarımda yama uzunlukları ve genişlikleri arasında bir bağlantı yoktur, sadece yama uzunlukları arasında log-periyodik bağıntı mevcuttur. Tablo 4.1'de üretime uygun LPYAP tasarımı için kullanılan parametrelerin değerleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Üretime uygun LPYAP tasarım parametreleri

Parametre	Açıklaması	Değeri
Wp1	1. yamanın genişliği	4,50 mm
Wp2	2. yamanın genişliği	4,50 mm
Wp3	3. yamanın genişliği	5,00 mm
Wp4	4. yamanın genişliği	5,00 mm
Wp5	5. yamanın genişliği	5,50 mm
Wp6	6. yamanın genişliği	5,50 mm
Wp7	7. yamanın genişliği	6,00 mm
Wp8	8. yamanın genişliği	6,00 mm
Lp1	1. yamanın uzunluğu	36,00 mm
Lp2	2. yamanın uzunluğu	37,76 mm
Lp3	3. yamanın uzunluğu	39,68 mm
Lp4	4. yamanın uzunluğu	41,60 mm
Lp5	5. yamanın uzunluğu	43,68 mm
Lp6	6. yamanın uzunluğu	45,92 mm
Lp7	7. yamanın uzunluğu	48,24 mm
Lp8	8. yamanın uzunluğu	50,64 mm

Tablo 4.2. (Devam) Üretime uygun LPYAP tasarım parametreleri

Parametre	Açıklaması	Değeri
hp	Yamaların olduğu düzlem ile toprak düzlem arası alt tabaka kalınlığı	1,6 mm
hf	Besleme hattının olduğu düzlem ile toprak düzlem arası alt tabaka kalınlığı	0,8 mm
$\epsilon_r$	Bağlı dielektrik sabiti (PVC)	4
Wf	Besleme iletim hattının genişliği	4 mm
P	Yamalar ile besleme hattının kesiştiği uzunluk değeri	4 mm
$\tau = W_{i+1}/W_i$	Log-periyodik oran	1,05
L	Log-periyodik anten dizisinin uzunluğu	101,30 mm
W	Log-periyodik anten dizisinin genişliği	50,43 mm
d	Bitişik iki yama arasındaki mesafe	0,1 mm



Şekil 4.1. Üretime uygun LPYAP ile bölüm 2.5’de tasarlanan LPYAP’ın S parametreleri

Şekil 4.1’de S parametre simülasyon sonuçları verilmektedir.  $S_{21}$  sonuçları üretime uygun LPYAP tasarımının pelerin olarak çalıştığını göstermektedir ve bölüm 2.5’te tasarlanan LPYAP’ın bant genişliğiyle bezer aralıktadır çünkü yama uzunlukları eşit değerdedir. Simülasyon ortamında yeni pelerinin çalışır durumda olduğu görüldükten sonra üretimi yapıldı. Yalıtkan alt tabakanın iki katmanını üretmek için 0,27 mm kalınlığında PVC levhalar kullanıldı. Besleme hattı ile toprak düzlem arasındaki ilk katmanı üretmek için PVC levhalardan 3 adet üst üste yerleştirildi ve silindir

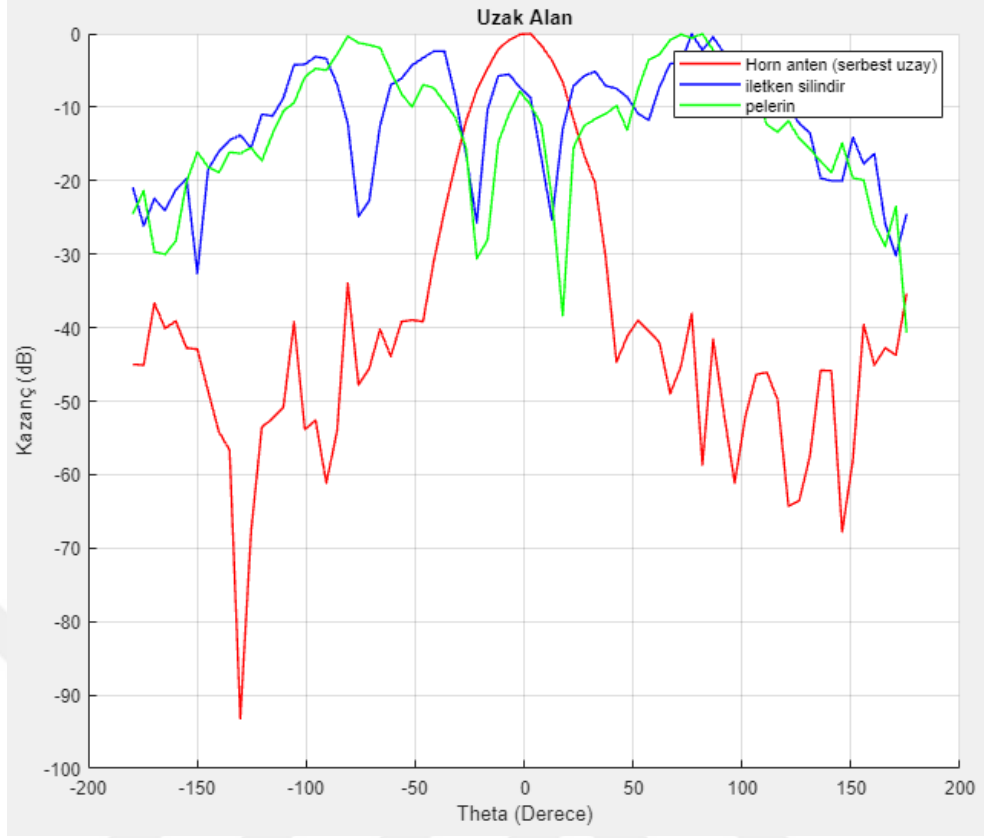
oluşturmak için büküldü. Toprak düzlem için silindirin iç yüzüne bakır bant yerleştirildi. İlk katmanın üstünde bulunan besleme hattı bakır bant ile üretildi. İkinci yalıtkan katman için 3 adet PVC levha besleme hattının üzerine yerleştirildi ve silindiri çevreleyecek şekilde büküldü. Tablo 4.1'deki değerlere göre bakır bant kullanılarak yama antenler tasarlandı ve besleme hattının üzerine P ve d parametreleri dikkate alınarak yerleştirildi. Şekil 4.2'de üretilen pelerin gösterilmektedir.



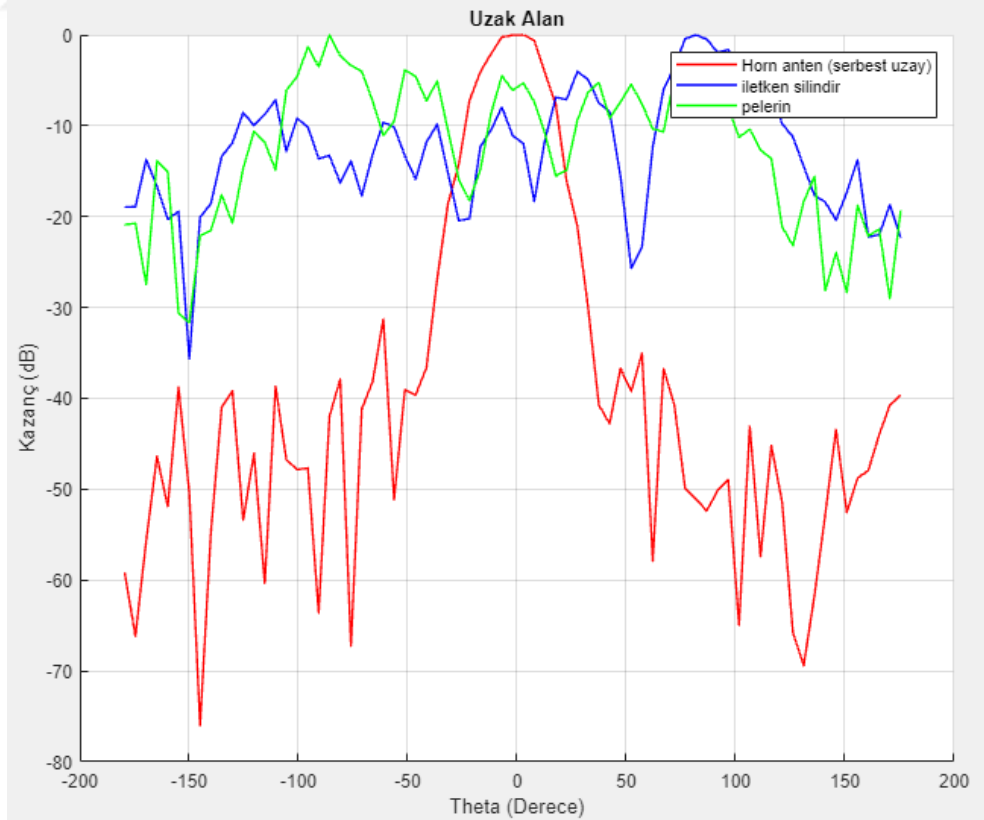
Şekil 4.2. Üretilen LPYAP

Pelerin horn anten ışınma örüntüsüne etkisi incelemek için bölüm 3.1'deki simülasyon yönteminin pratiği yapıldı. Şekil 4.2'deki pelerin ve pelerine eşit uzunluk ve yarıçapa sahip iletken silindir, x-bant horn anten önüne 3 cm mesafeyle yerleştirildi. Ölçümler Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü Mikrodalga ve Anten Laboratuvarındaki yansız odada gerçekleştirildi.

Elde edilen ölçümler 10 GHz için Şekil 4.3'te ve 11 GHz için Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Şekil 4.3'e bakıldığında pelerin iletken silindire göre ana lobu iletimi daha düşüktür. Şekil 4.4'te pelerin ana lobu iletken silindire göre daha iyi iletmektedir. Bu sonuçlar bölüm 3.1'de elde edilen simülasyon sonuçlarıyla uyumludur ve üretilen pelerin doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.3. 10 GHz için horn anten ışınma örüntüsü ölçümü



Şekil 4.4. 11 GHz için horn anten ışınma örüntüsü ölçümü

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde geniş bantlı pelerin tasarlamak için üç yöntem üzerine çalışıldı. İlk yöntemde log-periyodik yama anten dizisi ile birim hücre tasarlandı. Elde edilen  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  ve  $S_{33}$  parametre sonuçları birim hücrenin pelerin tasarımı için uygunluğunu gösterdi. Bu birim hücreden 8 tane kullanılarak silindirik pelerin tasarlandı ama elde edilen  $S_{21}$  sonuçlarında, iletken silindire göre iletimde artış olmadığı için bu yapının pelerin olarak çalışmadığı anlaşıldı. Diğer taraftan  $S_{11}$  sonuçları yansımada azalma olduğunu gösterdi. Bu nedenle RKA analizi yapıldı ve tasarım aşamasında belirlenen birim hücre çalışma bandında 2,5 GHz ile 3,4 GHz frekans aralığında iletken silindire göre RKA'yı azalttığı görüldü.

Tek yama antenli birim hücrelerde yama genişliğinin frekans bandına etkisi incelenirken bu genişliğin pelerin iletim bandını çok az etkilediği görüldü. Bu nedenle yama antenli birim hücreler yerine yamaların genişliğine eşit genişlikte, silindirik pelerini çevreleyen tek parça bir iletken kullanıldı ve elde edilen sonuçlar yeni tasarımın pelerin olarak çalıştığını gösterdi. Bu yöntem SİYP kısaltmasıyla adlandırıldı. Böylece dar bantlı pelerin tasarımı için yama anten kullanmanın gerekli olmadığı anlaşıldı. SİYP yönteminde gelen dalgalar yama yerine kullanılan iletkenin yüzeyini takip ederek pelerin arka tarafına iletilmektedir bu nedenle SİYP pelerin olarak çalışmaktadır. SİYP yapısındaki iletken, silindirik pelerin tüm çevresini kaplamaktadır. Bu iletken ikiye bölünüp her biri silindirin bir yarısını çevreleyecek şekilde alt alta yerleştirildi. Elde edilen sonuçlar iki iletkenli yapının pelerin olarak çalıştığını gösterdi.

Bu tezde önerilen ikinci yöntemde, SİYP yöntemini temel alarak geniş bantlı pelerin tasarlamak için, silindir yan yüzünün bir kısmını kaplayan, log-periyodik anten dizisi oluşturacak şekilde, alt alta dizilmiş iletken yüzeyler (yama antenler) kullanıldı. Elde edilen  $S_{21}$  sonuçları pelerin çalıştığı frekans aralığıyla log-periyodik anten dizisinin çalıştığı frekans aralığının uyumlu olduğu gösterdi. Böylece kalınlığı 1,6mm ve

yüzdeler bant genişliği %30 olan geniş bantlı pelerin tasarımı tamamlanmış oldu ve bu yöntem LPYAP kısaltmasıyla adlandırıldı.

Yapılan çeşitli simülasyonlar LPYAP yönteminin farklı genişlik, uzunluk, yama sayısı ve fiziksel şekilde tasarım yapmak için uygun olduğunu gösterdi. LPYAP bant genişliği kalınlığın artmasıyla artmaktadır ve  $h_p = 2$  mm için %40'lik bant genişliği elde edilmiştir.

Bu tezde önerilen üçüncü yöntemde tasarım aşamasında frekans bandını daha iyi belirlemek için LPYAP anten dizisindeki besleme hattı kaldırıldı. Besleme hattının kaldırılması, pelerin frekans bandının en yüksek ve en düşük frekanslı iletken yamalar ile belirlenmesini sağladı ve bu yöntem LPYDP kısaltmasıyla adlandırıldı. LPYDP ile istenilen frekans aralığında pelerin tasarımı, yama anten frekans hesaplamaları kullanılarak çok basit bir şekilde yapılmaktadır.

Bu tezdeki teorik bilgileri test etmek için LPYAP üretildi. Üretilen LPYAP horn anten önüne yerleştirilerek antenin ışına örüntüsüne etkisi incelendi. Elde edilen ölçümler sonucunda, üretilen pelerin iletken silindirik yapılaraya göre ışına örüntüsünü daha az bozduğu görüldü. Ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ikisinin uyumlu olduğu görüldü.

Bu tezde önerilen LPYAP ve LPYDP pelerin tasarım yöntemleri literatürdeki yöntemlere göre bant genişliğini belirlemede kolaylık sunmaktadır ve ince pelerin tasarımına imkan vermektedir. Elde edilen bant genişliği literatürdeki çalışmalara göre daha büyüktür.

Pelerin neden olduğu faz bozulmalarını iyileştirme ve iletim seviyesi daha fazla arttırıp yansımayı azaltmayı hedefleyen çalışmalar önermekteyiz.

## KAYNAKLAR

- [1] Pendry J. B., Schurig D., Smith D. R., Controlling Electromagnetic Fields, *Science*, 2006, **312**(5781), 1780-1782.
- [2] Alitalo P., Luukkonen O., Jylhä L., Venermo J., Tretyakov S.A., Transmission-Line Networks Cloaking Objects From Electromagnetic Fields, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 2008, **56**(2), 416-424.
- [3] Alitalo P., Tretyakov S.A., Broadband Electromagnetic Cloaking Realized With Transmission-Line and Waveguiding Structures, *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(10), 1646-1659.
- [4] Hoefer W., Park G., Li E., Time Domain Study of Electromagnetic Cloaks for Wideband Invisibility under Transient Illumination, *IMS Anaheim*, CA, 23-28 May 2010
- [5] Balanis C.A., *Antenna Theory*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.
- [6] Kumar G., Ray K. P., *Broadband Microstrip Antennas*, Artech House, Norwood MA, 2003.
- [7] Wang J., Qu S., Xu Z., Ma H., Zhang J., Li Y., Wang X., Super-Thin Cloaks Based on Microwave Networks, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 2013; **61**(2), 748-754.
- [8] Rao P., Balakrishna I., Sherlin B.J., Radiation Blockage Reduction in Antennas Using Radio-Frequency Cloaks, *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2018, **60**(3), 91-100.
- [9] ISBELL D. E., Log Periodic Dipole Arrays, *IRE Transactions On Antennas And Propagation*, 1960, **8**(3), 260-267
- [10] Pues H., Bogaers J., Pieck R., Van de Capelle A., Wideband Quasi-Log-Periodic Microstrip Antenna, *IEE PROC*, 1981, **128**(3), 159-163.
- [11] Hall P. S., Multioctave Bandwidth Log-Periodic Microstrip Antenna Array. *IEE Proceedings*, 1986, **133**(2), 127-136.
- [12] Geng Y., Ma R., Chen B., Zhang W., Single Microstrip Layer Holds UWB Log-Periodic Antenna, *Microwaves & RF*, 2015, **54**(4), 106-112.

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Ahmad M. N.**, Çakır G., Log-Periyodik Anten Dizisi İle Radar Soğurucu Malzeme Tasarımı, *ICAR*, Bolu, Türkiye, 20-22 Temmuz 2020.
- [2] **Ahmad M. N.**, Urhan O., Anık E., Kumluk S., Kapasitif Araç Kapı Kontrol Panelinde Frekans Tarama Yönteminin Kullanılması, *IMSMATEC'20*, Türkiye, 24-26 Haziran 2020.





## ÖZGEÇMİŞ

1996 yılında Suriye'nin Halep ilinde doğdu. Lise öğrenimini Al-Maary Fen Lisesinde tamamladı. 2014 yılında eğitim görmeye başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2018 yılında fakülte birinciliği derecesiyle mezun oldu. 2018 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir. 2018'den beri EVSTEK bilişim firmasında gömülü sistemler ve işaret işleme alanlarında çalışmaktadır.

