

**Güvenlik Görüntüleme Uygulamaları İçin Frekans Taramalı  
Silindirik Substrat Tümleşik Dalga Kılavuzu (STDK) Yarık  
Dizi Anteni Geliştirilmesi**

**Proje No: 111R001**

Prof. Dr. Özlem AYDIN ÇİVİ  
Ömer BAYRAKTAR  
Orçun KİRİŞ

EYLÜL 2013  
ANKARA

## ÖNSÖZ

111R001 projesi kapsamında, güvenlik görüntüleme sistemlerinde kullanılabilir, K bant, frekans taramalı, silindirik substrat tümleşik dalga kılavuzu (SSTDK) üzerine açılmış yürüyen dalga yarık anten dizisi geliştirilmiştir. Yarıkli substrat tümleşik dalga kılavuzlarının silindirin çevresine sarıldığı bu anten yapısı, bilgimiz dahilinde, literatürde ilk kez bu projede gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerin benzetim sonuçlarıyla uyduğu ve anten huzmesinin frekansla tarama yaptığı gösterilmiştir.

Bu proje, TÜBİTAK tarafından, 1001 projesi ve aynı zamanda COST IC1102 – VISTA (COST Action on Versatile, Integrated, and Signal-aware Technologies for Antennas) projesine katılım kapsamında, desteklenmiştir. Proje yürütücüsü bu COST aksiyonunun çalışmalarına ve yönetim kurulu toplantılarına, iki Türkiye delegesinden biri olarak katılmıştır. COST proje toplantılarına katılım ve İstanbul'da düzenlenen COST VISTA yönetim kurulu toplantısı ve çalıştayını, COST IC1102 - VISTA projesi tarafından karşılanmıştır.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
TABLO LİSTESİ .....	IV
ŞEKİL LİSTESİ .....	V
ÖZ.....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1. GİRİŞ .....	1
2. YARIKLI SSTDK DİZİ YAPISI VE TASARIMI .....	4
2.1. Giriş .....	4
2.2. STDK Tasarım ve Üretimi .....	5
2.2.1. Mikroşerit İletim Hattından STDK'ya Geçiş Yapısı .....	7
2.3. SSTDK Karakteristiği .....	7
2.4. SSTDK Üzerinde Tek Boylamsal Yarık Modeli .....	8
2.4.1. STDK Üzerindeki Tek Yarığın Üretim ve Ölçüm Sonuçları .....	11
2.5. Elliot Tasarım Yöntemi .....	11
2.6. Yarıklı SSTDK Tasarımı ve Optimizasyonu .....	14
2.6.1. 1 x 16 Yarıklı SSTDK Dizisi Üretim ve Ölçüm Sonuçları .....	17
3. STDK GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIM ÇALIŞMALARI VE ÜRETİM SONUÇLARI.....	21
3.1. Giriş .....	21
3.2. 1 x 2 Y-Bağlantı Güç Bölücü .....	22
3.3. 1 x 2 T-Bağlantı Güç Bölücü .....	23
3.4. 1 x 4 T & Y-Bağlantı Güç Bölücü .....	25
3.5. 1 x 4 Y & Y-Bağlantı Güç Bölücü .....	26
3.6. 1 x 4 T & Y-Bağlantı Güç Bölücü .....	28
4. 4 x 16 YARIKLI SSTDK DİZİSİ ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI .....	30
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE GELECEK ÇALIŞMALAR .....	34
6. REFERANSLAR .....	35
EK. PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR VE TEZLER .....	38

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 1.</b> 3. durum için SSTDK üzerinde tasarlanan 1 x 16 yarık dizisinin yarık pozisyonları ve uzunlukları. ....	16
<b>Tablo 2.</b> SSTDK üzerinde optimize edilmiş 1 x 16 yarık dizisinin yarık pozisyonları ve uzunlukları. ...	17
<b>Tablo 3.</b> 1 x 16 STDK dizisinin HPBW ve çapraz polarizasyonlarının ölçüm ve benzetim sonuçları...	20
<b>Tablo 4.</b> 4 x 16 STDK dizisinin HPBW ve Çapraz polarizasyonlarının ölçüm ve benzetim sonuçları..	32

## ŞEKİL LİSTESİ

<b>Şekil 1.</b> Silindir üzerine yerleştirilmiş STDK yarık dizi anten.....	1
<b>Şekil 2.</b> Yürüyen dalga yarıklı SSTDK dizisi. <b>(a)</b> Kesit görünüm. <b>(b)</b> Üstten görünüm.....	4
<b>Şekil 3.</b> STDK yapısı.....	5
<b>Şekil 4.</b> <b>(a)</b> STDK yapısı ( $L = 2$ cm). <b>(b)</b> $S_{11}$ & <b>(c)</b> $S_{21}$ parametreleri sonuçları.....	6
<b>Şekil 5.</b> <b>(a)</b> STDK yapısı ( $L = 10$ cm). <b>(b)</b> $S_{11}$ & <b>(c)</b> $S_{21}$ parametreleri sonuçları.....	6
<b>Şekil 6.</b> Mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı.....	7
<b>Şekil 7.</b> Benzetim ve kapalı formdaki formüller ile bulunan iletim katsayılarının karşılaştırılması.....	8
<b>Şekil 8.</b> <b>(a)</b> SSTDK üzerinde bulunan tek boylamsal yarığın devre modeli. <b>(b)</b> Paralel admitansın ABCD parametreleri.....	8
<b>Şekil 9.</b> TRL standartları. <b>(a)</b> Geçiş (Thru), <b>(b)</b> yansıma (Reflect) ve <b>(c)</b> hat (Line) standartları.....	9
<b>Şekil 10.</b> $R = 10$ cm için STDK üzerindeki tek yarığın ABCD-parametreleri: <b>(a)</b> & <b>(b)</b> A ve D-parametreleri. <b>(c)</b> & <b>(d)</b> B-parametreleri. <b>(e)</b> & <b>(f)</b> C-parametreleri (yarığın paralel öz-admitansı).10	10
<b>Şekil 11.</b> Mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı ( $L = 2$ cm) üzerinde tek yarık.....	11
<b>Şekil 12.</b> Mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı ( $L = 2$ cm) üzerinde tek yarığın. <b>(a)</b> $S_{11}$ & <b>(b)</b> $S_{21}$ sonuçları.....	11
<b>Şekil 13.</b> Yürüyen dalga yarıklı dalga kılavuzunun devre modeli.....	12
<b>Şekil 14.</b> Anten elemanlarının pozisyonlarının düzlemsel izdüşümlerinin alınarak Taylor dağılımının örneklenmesi.....	15
<b>Şekil 15.</b> <b>(a)</b> 3 farklı durum için yarık aralıkları grafiği ve <b>(b)</b> silindirik yüzeydeki yarıklar için oluşturulmuş ışınım örüntüsü yazılımı ile hesaplanmış SSTDK ( $R = 10$ cm) üzerindeki $1 \times 16$ yarık dizisinin 25 GHz'deki ışınım örüntüsü grafikleri.....	15
<b>Şekil 16.</b> 3. durum için SSTDK üzerinde tasarlanan $1 \times 16$ yarık dizisinin <b>(a)</b> $S_{11}$ & <b>(b)</b> $S_{21}$ benzetim sonuçları.....	16
<b>Şekil 17.</b> <b>(a)</b> Elliot yöntemi ile 3. durum için tasarlanmış ve optimize edilmiş iki farklı $1 \times 16$ yarık dizisinin ışınım güçlerinin karşılaştırılması. <b>(b)</b> Optimize edilmiş SSTDK üzerindeki $1 \times 16$ yarık dizisinin H-düzlemindeki ışınım örüntüsü benzetimleri.....	17
<b>Şekil 18.</b> <b>(a)</b> STDK üzerinde $1 \times 16$ yarık dizisi. $1 \times 16$ Yarıklı STDK dizisinin <b>(b)</b> $S_{11}$ ve <b>(c)</b> $S_{21}$ sonuçları.....	18
<b>Şekil 19.</b> $1 \times 16$ yarıklı SSTDK dizisinin ölçüm düzeneği ( $R = 10$ cm). ....	18
<b>Şekil 20.</b> $1 \times 16$ yarıklı SSTDK dizisinin ışınım örüntüsü sonuçları ( $R = 10$ cm). <b>(a)</b> 24 GHz, <b>(b)</b> 24.5 GHz, <b>(c)</b> 25 GHz, <b>(d)</b> 25.5 GHz & <b>(e)</b> 26 GHz. <b>(f)</b> $1 \times 16$ yarıklı SSTDK ( $R = 10$ cm) dizisinin ışınım örüntülerinin ana huzmelerinin karşılaştırılması.....	19
<b>Şekil 21.</b> $1 \times 16$ Yarıklı STDK dizisinin <b>(a)</b> kazanç ve <b>(b)</b> verim sonuçları.....	20
<b>Şekil 22.</b> Temel Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> 25 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi <b>(b)</b> S parametreleri benzetim sonucu.....	22
<b>Şekil 23.</b> Temel Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.....	22
<b>Şekil 24.</b> Temel Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> üretim fotoğrafı <b>(b)</b> $S_{11}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması <b>(c)</b> $S_{21}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması.....	23
<b>Şekil 25.</b> Temel T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> 25 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi <b>(b)</b> S parametreleri benzetim sonucu.....	23
<b>Şekil 26.</b> Temel T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.....	24
<b>Şekil 27.</b> Temel T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> üretim fotoğrafı <b>(b)</b> $S_{11}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması <b>(c)</b> $S_{21}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması.....	24
<b>Şekil 28.</b> T & T-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> 25 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi <b>(b)</b> S parametreleri benzetim sonucu.....	25
<b>Şekil 29.</b> T & T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.....	25
<b>Şekil 30.</b> T & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> üretim fotoğrafı <b>(b)</b> $S_{11}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması <b>(c)</b> $S_{21}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması.....	26

<b>Şekil 31.</b> Y & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç Bölücü <b>(a)</b> Elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi <b>(b)</b> S parametreleri benzetim sonucu.....	27
<b>Şekil 32.</b> Y & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.....	27
<b>Şekil 33.</b> Y & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> üretim fotoğrafı <b>(b)</b> $S_{11}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması <b>(c)</b> $S_{21}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması.....	27
<b>Şekil 34.</b> T & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi <b>(b)</b> S parametreleri benzetim sonucu.....	28
<b>Şekil 35.</b> T & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.....	28
<b>Şekil 36.</b> T & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü üretim fotoğrafı.....	29
<b>Şekil 37.</b> T & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü <b>(a)</b> $S_{11}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması <b>(b)</b> $S_{21}$ ölçüm ve benzetim karşılaştırması.....	29
<b>Şekil 38.</b> <b>(a)</b> STDK üzerinde 4 x 16 yarık dizisi. <b>(b)</b> & <b>(c)</b> Yarıklı STDK'nın S parametresi sonuçları..	30
<b>Şekil 39.</b> 4 x 16 yarıklı STDK dizisinin ölçüm düzeneği (R = 10 cm).....	31
<b>Şekil 40.</b> 4 x 16 yarıklı SSTDK dizisinin ışınım örüntüsü sonuçları (R = 10 cm). <b>(a)</b> 24 GHz & <b>(b)</b> 24.5 GHz. ....	31
<b>Şekil 41.</b> 4 x 16 yarıklı SSTDK dizisinin ışınım örüntüsü sonuçları (R = 10 cm). <b>(a)</b> 25 GHz, <b>(b)</b> 25.5 GHz & <b>(c)</b> 26 GHz. <b>(d)</b> 4 x 16 yarıklı SSTDK (R = 10 cm) dizisinin ışınım örüntülerinin ana huzmelerinin karşılaştırılması.....	32
<b>Şekil 42.</b> 4 x 16 yarıklı STDK dizisinin <b>(a)</b> kazanç ve <b>(b)</b> verim sonuçları. ....	33

## ÖZ

Bu projede, güvenlik görüntüleme sistemlerinde kullanılacak, K bant, frekans taramalı, silindirik substrat tümleşik dalga kılavuzu (SSTDK) üzerine açılmış yürüyen dalga yarık anten dizisi tasarlanmış ve üretilmiştir. Böyle bir anten çok sayıda kişinin girip çıktığı binaların giriş alanını tarayacak şekilde yerleştirilerek, binaya girenlerin üzerlerinde güvenliği tehdit edebilecek silah vb. aletler gizlenmişse, herkesi tek tek taramadan geçirmeden, bu aletlerin bulunmasını sağlayan görüntüleme sistemlerinde kullanılabilir.

Yarıklı substrat tümleşik dalga kılavuzlarının silindirin çevresine sarıldığı bu anten yapısı, bilginiz dahilinde, literatürde ilk kez bu projede gerçekleştirilmiştir. Elliot tasarım yöntemi kullanılarak, SSTDK üzerinde 1 x 16 yürüyen dalga boylamsal yarık dizisi tasarlanmıştır. Yarıkların silindirin çevresi boyunca yerleştirilmelerinden kaynaklanan farklı uzaysal faz kayma miktarlarını engellemek amacı ile yarık elemanları arasındaki mesafeler uygun şekilde ayarlanmıştır. Böylece dar bir huzme elde edilmiştir. Üç farklı yarık pozisyonu dizilim şekli için üç ayrı grup yarık mesafeleri hesaplanmıştır. Böylece üç farklı tasarım yapılmış ve en düşük SLL (yan huzme seviyesi) değerine sahip yapı seçilmiştir. Tasarlanan 1 x 16 yarık dizisi, ışınım güç bandını arttırmak amacı ile optimize edilmiştir. Her biri optimize edilmiş 1 x 16 yarık dizisi içeren 4 adet SSTDK dizisi oluşturularak 4 x 16 yarık dizisi elde edilmiştir. 4 x 16 yarık dizisini beslemek amacı ile substrat tümleşik dalga kılavuzu (STDK) güç bölücü yapıları ve mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapıları incelenmiştir. 1 x 4 STDK güç bölücü yapısı tasarlanmış ve 4 x 16 yarıklı SSTDK dizisini beslemek için kullanılmıştır. Anten dizisi, baskı devre kartı (PCB) üretim süreci ile ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında üretilmiş ve yankısız odada ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre frekansın 24 GHz ile 26 GHz arasında değiştirilmesi sonucunda, H-düzleminde yaklaşık 10° ana huzme taraması elde edilmiştir.

Bu proje süresince delik içi kaplama dahil baskı devre yöntemleriyle STDK yapılarının üretimi konusunda deneyim kazanılmıştır.

Proje kapsamında yapılan çalışmalardan iki uluslararası konferans bildirisi yayınlanmış, bir makale değerlendirilmek üzere IEEE Antennas and Propagation dergisine gönderilmiştir. Proje bursiyerlerinden Ömer Bayraktar'ın doktora tezinin, Orçun Kiriş'in yüksek lisans tezinin önemli bir kısmı bu projede yaptıkları çalışmalardan oluşmaktadır. Proje kapsamında COST IC1102-VISTA toplantılarına katılmış; proje çalışmaları bu toplantılarda sunulmuştur. COST aksiyonunun yılda iki kez düzenlenen yönetim kurulu ve çalışma grupları çalıştayının üçüncüsü, Eylül 2012 tarihinde diğer Türkiye delegesi Sabancı Üniversitesinden Prof. Dr. İbrahim Tekin'le birlikte, İstanbul'da başarıyla düzenlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey Uyumlu Anten Dizileri, Yarıklı Dalga Kılavuzu Anteni, Substrat Tümüleşik Dalga Kılavuzu Anteni, Substrat Tümüleşik Dalga Kılavuzu Güç Bölücü

## ABSTRACT

In this project, K band, frequency scanning, traveling wave slot array on cylindrical substrate integrated waveguide (CSIW) is designed and manufactured for security imaging applications. This antenna can be placed on the walls of the entrance hall or hallway of public buildings to determine concealed weapons on people to avoid personal security scanners that may result in long queues.

According to the author's knowledge, the antenna structure where the slotted substrate integrated waveguides are conformed to a cylindrical surface in the circumferential direction is studied for the first time in this project in the literature. A 1 x 16 traveling wave longitudinal slot array on CSIW is designed at 25 GHz using Elliot's design procedure. The spacing between each slot element is adjusted properly to compensate different spatial phase delays of the elements due to conformal placement of the slots in the circumferential direction of the cylinder and hence a narrow beam antenna array is obtained. Three different set of element spacing are obtained for three different slot offset alternation arrangements. Hence, three different designs are carried out and the one that gives minimum SLL is chosen. The designed 1 x 16 slot array is optimized to increase the radiated power bandwidth. A 4 x 16 slot array on CSIW is formed by using 4 CSIW array each having 1 x 16 optimized slot array. In order to feed 4 x 16 slot array, SIW power divider structures and microstrip line to SIW transition structures are examined. 1 x 4 SIW power divider structure is formed and used to feed 4 x 16 slotted CSIW array. The array is manufactured using printed circuit board (PCB) process at the METU Electrical and Electronics Engineering department laboratories and the antenna is measured in anechoic chamber. About 10° frequency steering in the H-plane is obtained when the frequency is steered between 24 GHz and 26 GHz.

During the project, experience is gained in the fabrication of SIW structures with printed circuit board technology including via hole plating.

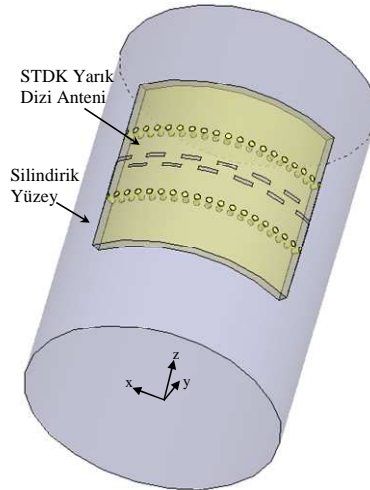
Using the studies carried out within the scope of the project, two international conference papers are published and one journal paper is submitted to IEEE Antennas and Propagation magazine for the evaluation and revision. Significant parts of the doctoral thesis of Ömer Bayraktar and master thesis of Orçun Kiriş, who are the project scholarship holders, are composed of the works in this project. Within the scope of this project, COST IC1102-VISTA meetings are attended and project works are presented at these meetings. In conjunction with Prof. Dr. İbrahim Tekin who is another Turkey delegate from Sabancı University, the third Management Committee/Working Group Meeting and Workshop, which is one of the COST Actions organized two times per year, is successfully organized in September 2012 in İstanbul.

**Keywords:** Conformal Arrays, Slotted Waveguide Array, Substrate Integrated Waveguide Antenna, Substrate Integrated Waveguide Power Divider.



# 1. Giriş

Proje kapsamında halka açık yerlerde veya hava alanı, terminal gibi çok sayıda kişinin uğradığı alanlarda, insanların silah, kesici alet gibi güvenliği tehdit eden cisimleri taşıyıp taşımadığının belirlenebilmesi amacı ile oluşturulan güvenlik görüntüleme sistemlerinde kullanılacak bir anten dizisi tasarlanıp üretilmesi amaçlanmıştır. Duvar, köşe, direk gibi sık rastlanan yapılara kolaylıkla monte edilebilecek silindirik yüzey üzerine yerleştirilmiş yüzey uyumlu bir anten dizisi uygun görülmüştür. Bu amaç ile kullanılacak anten dizileri arasında, sahip olduğu bazı avantajlardan dolayı yarıklı dalga kılavuzu dizileri veya mikroşerit anten dizileri sayılabilir. Yarıklı dalga kılavuzu antenleri yüksek güç taşıma kapasitesi, düşük kayıp ve yüksek yalıtım gibi avantajlarından dolayı birçok uygulamada kullanılmaktadır. Yüzey uyumlu anten uygulamaları düşünüldüğünde mikroşerit antenlerin düşük hacim ve ağırlığa sahip olmaları, yüzeye yerleştirilmelerinde avantaj sağlamaktadır. Mikroşerit antenlerin üretim maliyetlerinin düşük olması geniş yüzeylerin kaplanmasında avantajı arttırmaktadır. Özellikle esnek taban malzemesi kullanılarak yapılan mikroşerit antenler birçok farklı yüzeye kolayca yerleştirilebilir. Fakat yüzey uyumlu anten uygulamalarında her biri ayrı ayrı beslenen mikroşerit yama antenlerde olduğu gibi besleme devrelerinin karmaşıklığı üretimi zorlaştırmaktadır (Josefsson, 2006). Bu problem mikroşerit hat veya şerit hat kullanılarak bütün antenlerin seri beslenmesi ile giderilebilir, fakat mikroşerit hatların ışınım kayıpları ve şerit hattın yalıtım sorunları başlıca karşılaşılan sorunlardır. Dalga kılavuzları ile yapılan besleme devrelerinde ışınım kayıpları ve bağlaşım (coupling) problemleri bulunmamaktadır. Ayrıca yarıklı dalga kılavuzu anteninde yarık anten elemanları gücü dalga kılavuzundan alır ve dizinin ışınımı sadece dalga kılavuzunun beslenmesi ile gerçekleştirilir. Literatürde, bu problemlerin çözümü için, mikroşerit yapıların ve dalga kılavuzlarının avantajlarını bir arada sunan substrat tümleşik dalga kılavuzu (STDK) yapısı önerilmiştir (Hirokawa, 1998), (Deslandes, 2001). Önerilen bu yapı mikroşerit teknolojisi kullanılarak, taban malzeme içinde bir dalga kılavuzu oluşturmaya olanak tanır. STDK, içinde bulunan taban malzemesinden dolayı taban kayıplarına sahip olsa da, mikroşerit ve dalga kılavuzu teknolojisinin çoğu avantajına sahiptir. STDK yapıları diğer mikroşerit devre elemanları ile aynı düzlemde tek parça olarak baskı devre kartı teknolojisi (PCB) ile üretilebilirler. Böylece dalga kılavuzu beslemelerinde, özellikle milimetre dalga frekanslarında yüksek kayıplara sebep olan karmaşık ve büyük geçiş yapılarının kullanımını önlerler. STDK yapıları esnek taban malzemesi kullanılarak üretildiğinde yüzey uyumlu anten uygulamalarında rahatça kullanılabilirler. Bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda, yarıklı STDK dizlerinin ve dizi beslemesinde kullanılan STDK güç bölücü yapılarının yüzey uyumlu anten uygulamaları için uygun yapılar olduğu anlaşılmaktadır. Bu projede de bu yapı tercih edilmiş ve yarıklı STDK anteni, bilgimiz dahilinde literatürde ilk kez, Şekil 1'de görüldüğü gibi, silindirin çevresine sarılacak şekilde silindirik yüzeyine yerleştirilerek frekans taramalı bir anten geliştirilmiştir.



**Şekil 1.** Silindir üzerine yerleştirilmiş STDK yarık dizi anten.

Literatürde sunulmuş çoğu yüzey uyumlu dalga kılavuzu dizilerinde STDK yerine normal dalga kılavuzları kullanılmıştır (Westerman, 1983; Liu, 2012; Fan, 1997; Traille, 2007). Bu çalışmalarda kullanılan dalga kılavuzları, genellikle dalga kılavuzunun silindirik eksenini boyunca uzandığı, sektörel kesit alanlı dalga kılavuzlarıdır. Bu çalışmalardan birinde, geliştirilen analitik tasarım adımları ile yüzey uyumlu substrat dolgulu 6x9 yarıkli sektörel dalga kılavuzu anteni 9.34 GHz'de tasarlanmıştır (Westerman, 1983). Diğer bir yarıkli sektörel dalga kılavuzunda, dalga kılavuzunun dar duvarlarına açılan yarıklar ile oluşturulan dizide, -13 dB yan huzme seviyesi (SLL) ile antenin optik eksenine göre 84°ye ışınım yapan ana huzme yönü elde edilmiştir (Liu, 2012). Başka bir çalışmada, moment metodu (MoM) kullanılarak yüzey uyumlu yarıkli sektörel dalga kılavuzunun radar kesit alanı hesaplanmış ancak dizi üretilmemiştir (Fan, 1997). Diğer bir çalışmada ise, dalga kılavuzlarının dar duvarlarına açılan yarık dizisi Ku bantta tasarlanmış ve bu antenlerin uç uca eklenmesi ile elde edilen çok yüzü düzlemsel antenler ile yanca düzleminde 360° tarama sağlanmıştır (Traille, 2007).

Literatürde sunulan yarıkli STDK dizileri ise genellikle düzlemsel uygulamalar için tasarlanmıştır (Xu, 2008; Liu, 2009; Lai, 2009; Xu, 2009; Djerafi, 2012; Hosseininejad, 2013; Nasimuddin, 2013); yarıkli STDK dizileri ile yüzey uyumlu anten dizisi çalışmaları az miktardadır (Cheng, 2009; Cheng, 2008; Cheng, 2013). Esnek taban malzemesi kullanılarak 79 GHz'de bir yarıkli dizi anten tasarlanmış ve üretilmiştir (Cheng, 2009). Ancak tasarım düzlemsel antenin ışınımı göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Başka bir yüzey uyumlu anten çalışmasında 7 girişli Rotman lens kullanılarak beslenen yarıkli 9 düzlemsel STDK dizisinden oluşan çok huzmeli anten yapısı kullanılmıştır (Cheng, 2008). 5 adet çok huzmeli düzlemsel STDK anten dizisi, eğimli bir yüzeye yerleştirilerek tarama açısı genişletilmiştir. Fakat antenler düzlemsel olarak tasarlandığı için eğimli yüzeyin anten parametrelerine etkisi tasarımda hesaba katılmamıştır. Diğer bir çalışmada, silindirik yüzey üzerinde, silindirik eksenini boyunca yerleştirilmiş yarıkli STDK anten dizisi, silindirik yüzey etkilerini hesaba katacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir (Cheng, 2013). Ölçülen antende 35 GHz'de E-düzleminde 38° yan huzme seviyesine sahip yelpaze huzme elde edilmiştir.

Dalga kılavuzu güç bölücüleri; çoklayıcılar, bağdaştırıcılar ve anten besleyicileri gibi birçok uygulamada ihtiyaç duyulan önemli yapılardır. Bu bölücü tiplerinin araya girme kaybı düşük, kalite faktörü ise yüksektir ve yüksek güç kapasitesi bakımından yüksek performansa sahiptirler. Fakat dikdörtgen dalga kılavuzu bileşenlerinin nispeten daha yüksek üretim maliyetine sahip olması, düzlemsel devrelerle tümleştirme işlemi için karmaşık ve hantal geçiş yapılarına ihtiyaç duyulması güç kaybını artırmakta, geleneksel yapıların kullanımını elverişsiz, zor ve pahalı bir hale getirmektedir. Bu olumsuz yönleri ortadan kaldırmak için substrat tümleşik dalga kılavuzu (STDK) ile tasarlanmış güç bölücü yapıları geliştirilmiştir. STDK teknolojisi kullanımı, yüksek performanslı dikdörtgen dalga kılavuzları ile düzlemsel devrelerin birleştirilmesinde standart baskı devre kartı yöntemini doğrudan uygulanabilir hale getirmiş, kolay entegre edilebilme ve yüzey monteleme gibi avantajlar sağlamıştır.

Bu proje kapsamında, 4 yarıkli substrat tümleşik dalga kılavuzunun silindirin çevresinde yaklaşık 90 derecelik bir yay boyunca sarıldığı bir anten yapısı, 1x4 güç bölücü ve mikroşerit hat-STDK geçiş yapısı tasarlanmış ve hepsi entegre bir şekilde üretilerek 4x16 elemanlı K bant frekans taramalı bir anten gerçekleştirilmiştir. Elliot tasarım yöntemi kullanılarak, SSTDK üzerinde 1 x 16 yürüyen dalga boylamsal yarık dizisi tasarlanmıştır. Yarıkların silindirin çevresi boyunca yerleştirilmelerinden kaynaklanan farklı uzaysal faz kayma miktarlarını engellemek amacı ile yarık elemanları arasındaki mesafeler uygun şekilde ayarlanmıştır. Böylece dar bir huzme elde edilmiştir. Üç farklı yarık pozisyonu dizilim şekli için üç ayrı grup yarık mesafeleri hesaplanmıştır. Böylece üç farklı tasarım yapılmış ve en dar HPBW (yarı güç huzme genişliği) değerine sahip yapı seçilmiştir. Tasarlanan 1 x 16 yarık dizisi, ışınım güç bandını arttırmak amacı ile optimize edilmiştir. Bu yapının tasarımı Bölüm 2'de anlatılmıştır.

Proje kapsamında tasarlanıp üretilen dizi anten yapısını beslemek amacıyla, bir giriş dört çıkış terminaline sahip (1 x 4), dörde bölen STDK güç bölücü yapısına ihtiyaç duyulmuş, bu tip güç bölücülerin tasarımı üzerine araştırma-geliştirme çalışması yapılmış, literatürdeki çeşitli güç bölücü tasarımları incelenmiştir. Farklı yapılarda güç bölücü tasarımları ve üretimleri yapılmış; ölçüm sonuçlarıyla benzetim sonuçlarının tutarlı olduğu gösterilmiştir. Tasarlanan bu yapılardan 1 x 4 T ve Y

bağlantı yapısı geliştirilen 4 x 16 antende kullanılmıştır. Tasarlanan substrat tümleşik dalga kılavuzu (STDK) güç bölücü yapıları Bölüm 3'te verilmiştir.

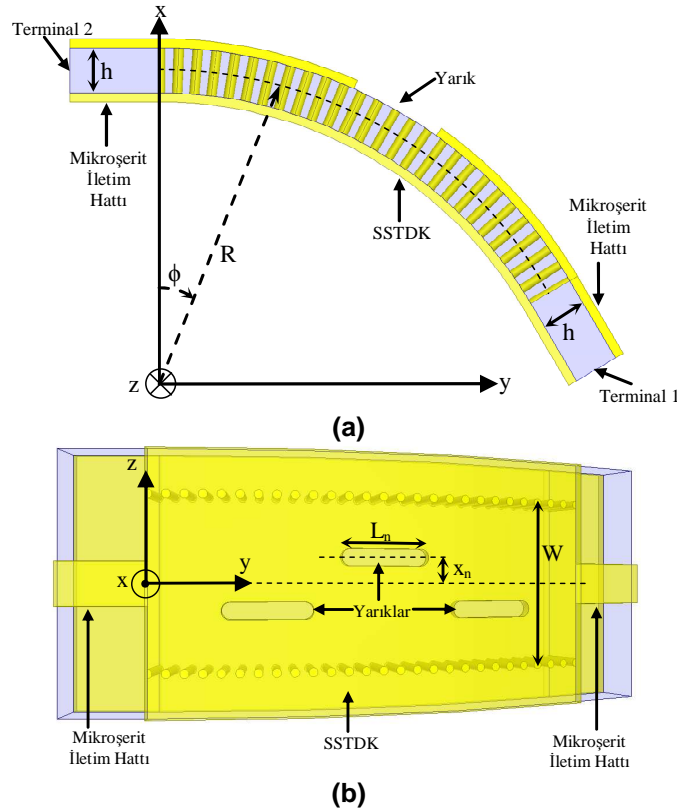
Her biri optimize edilmiş 1 x 16 yarık dizisi içeren 4 adet SSTDK dizisi oluşturularak 4 x 16 yarık dizisi elde edilmiştir. Anten dizisi, baskı devre kartı (PCB) üretim süreci ile ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında üretilmiş ve yankısız odada ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre frekansın 24 GHz ile 26 GHz arasında değiştirilmesi sonucunda, H-düzleminde yaklaşık 10° ana huzme taraması elde edilmiştir. 4x16'lık dizinin ölçüm sonuçları, bu sonuçların benzetimlerle karşılaştırılması Bölüm 4'te sunulmuştur.

Bölüm 5'te ise genel olarak proje sonuçları değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar özetlenmiştir.

## 2. Yarıklı SSTDK Dizi Yapısı ve Tasarımı

### 2.1. Giriş

Yarıklı silindirik STDK (SSTDK) anteni, proje kapsamında tasarlanan yarıklı STDK yapısının Şekil 2'de gösterildiği gibi R yarıçaplı silindirik bir düzleme yüzey uyumlu olarak yerleştirilmesi ile elde edilir. SSTDK yapısı  $h = 0.5$  mm kalınlığında Rogers 3003 ( $\epsilon_r = 3$ ,  $\tan\delta = 0.0013$  @ 10 GHz) taban malzemesi kullanılarak tasarlanmıştır. Yarıklar SSTDK yapısının geniş duvarına boylamsal olarak açılmıştır. SSTDK yapısı Terminal 1'den beslenmiş ve Terminal 2 uyumlu yük ile sonlandırılarak yürüyen dalga yarık dizisi elde edilmiştir. Bu yapının literatürde yüzey uyumlu anten dizileri için incelenen yarıklı STDK dizilerinden farkı SSTDK yapısının silindirik yüzeyin çevresine sarılacak şekilde yerleştirilmiş olmasıdır. Böylece yanca düzleminde (xy-düzleminde) frekansın değiştirilmesi ile ana huzme taraması sağlanmıştır. Yükseliş düzleminde huzme taraması, z-yönünde SSTDK dizisi oluşturularak ve her bir SSTDK'ya bağlanan faz kaydırıcılar yardımı ile sağlanabilir. Bu çalışmada yükseliş düzleminde tarama yapılmamış ve z-yönünde oluşturulan 4 elemanlı SSTDK dizisi güç bölücüler yardımı ile eş fazlı olarak beslenmiştir. Yanca düzleminde huzmeyi döndürmek için kullanılan frekans taraması ile faz kaydırıcı yapımı, anten ve faz kaydırıcıların birleştirilmesi gibi üretimde zorluklara ve maliyete sebep olan adımlar önlenmiştir. Çalışma bandı olarak, güvenlik görüntüleme uygulamalarında sıkça kullanılan K bantta 24-26 GHz aralığı seçilmiştir. 4 elemanlı SSTDK dizisinin her bir elemanında 1 x 16 boylamsal yarık dizisi bulunmaktadır. Tasarlanan yarıklı SSTDK dizisi 1 x 4 güç bölücü ile beslenmiştir. Özdeş SSTDK elemanların kullanılması sonucu dizide bulunan her bir SSTDK elemanından aynı miktar faz kayması elde edilmektedir ve bu durumdan faydalanılarak uyumlu yük tarafında aynı güç bölücü güç toplayıcı olarak kullanılmıştır. Güç toplayıcının sonuna uyumlu yük yerleştirilerek yürüyen dalga yarıklı SSTDK dizisi elde edilmiştir.



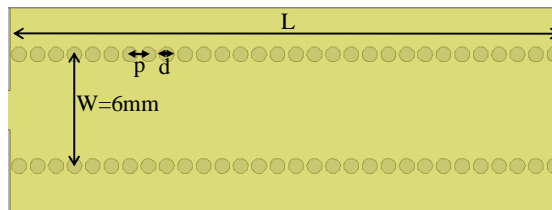
Şekil 2. Yürüyen dalga yarıklı SSTDK dizisi. (a) Kesit görünüm. (b) Üstten görünüm.

Taban malzemesi kullanımı üzerine yapılan çalışmalar kapsamında Rogers 3003 ( $\epsilon_r=3$ ,  $\tan\delta=0.0013$  @10GHz) malzemesi kullanımının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bir diğer uygun seçenek olarak görünen Rogers 4003 malzemesi, seçilen malzemeye yakın özelliklerde bir malzeme olmakla birlikte, üretim ve ölçüm sürecinde oluşan bükülmeler sırasında ince mikroserit hatlarda kırılmalar olduğu fark edilmiştir. Seçilen Rogers 3003 malzemesi çok daha esnek ve eğip bükülen kırılmalar daha az olmaktadır.

Yarıklı SSTDK dizisinde kullanılan yapıların boyutları, üretim olanakları ve elektriksel performans göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. SSTDK yapısının genişliği, 25 GHz'de istenmeyen huzmeleri (grating lobe) engellemek ve SSTDK yapısı için sadece ana modun ilerlemesini sağlamak amacı ile  $W = 6$  mm olarak belirlenmiştir. Kullanılan sıralı deliklerde büyük delik çapı gereksiz yer kaplamakta, ancak deliklerin çok küçük seçilmesi üretimde açılmayan deliklere veya delik içinin elektro kaplama esnasında iyi kaplanamamasına yol açmaktadır. Delik periyodunun fazla olması, delikler arasında elektromanyetik sızıntıyı çok artırarak kayıplara sebep olmaktadır. Deliklerin oluşturulması esnasında delikler delinirken kırılma, dağılma olmaması ve yapının zarar görmemesi için periyodun belirli bir limitin üstünde olması gerekmektedir. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda delik çapı 0.8 mm ve periyodu 1 mm olarak belirlenmiştir. STDK üzerine açılan yarıkların genişliğinin fazla olması elektriksel bantı arttırmaktadır. Fakat geniş yarıklar, SSTDK yapısında ilerleyen ana modun yapısını bozmaktadır. Ayrıca tasarımda kullanılan Elliot yönteminde formüller yarıkların yeterince dar olduğu kabul edilerek çıkarılmıştır (Elliott, 1983). Bu nedenlerle, üretim koşulları da göz önünde bulundurularak yarıkların genişliği 0.25 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 2'de  $n$  numaralı yarıklar için yarıkların pozisyonları ve uzunlukları  $x_n$  ve  $L_n$  olarak ifade edilmiştir. Yarıkların uzunlukları PCB üretiminde kazıma işleminden kaynaklanan kenarların yuvarlanma etkisini hesaba katacak şekilde belirlenmiştir. Yarıkların pozisyonları ve uzunlukları ışınım örüntüsü ve giriş geriye dönüş kaybı performansları göz önünde bulundurularak Elliot tasarım yöntemi ile belirlenmiştir (Elliott, 1983). Öncelikle Kısım 2.2'de kullanılan dalga kılavuzunun tasarımı ve üretilmiş farklı uzunluklardaki STDK yapıları sunulmuştur. Daha sonra SSTDK iletim katsayısının hesaplanması Kısım 2.3'de; tek yarıkların modelinin belirlenmesi ise Kısım 2.4'de sunulmuştur. Kısım 2.5'de Elliot tasarım yöntemi özetlenmiştir. Yarıklı SSTDK dizisinin tasarım ayrıntıları ise Kısım 2.6'da sunulmuştur.

## 2.2. STDK Tasarım ve Üretimi

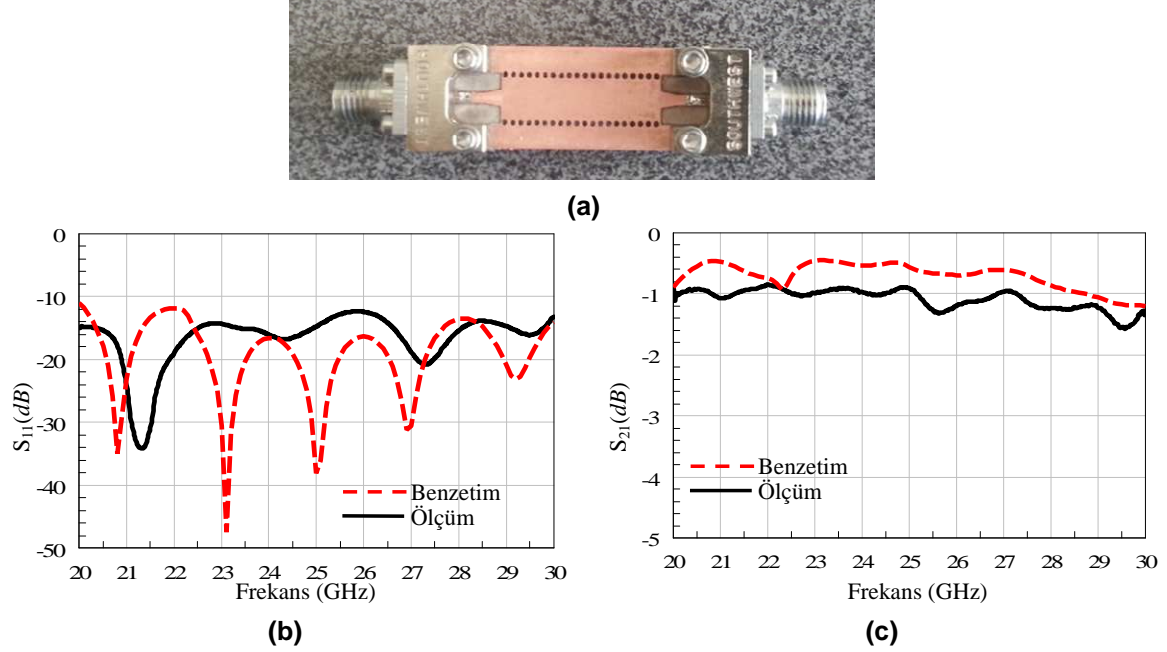
STDK yapısı Şekil 3'te belirtildiği gibi iki yüzeyinde metal bulunan taban malzemenin içine metal dolgulu deliklerin periyodik bir şekilde yerleştirilmesinden oluşur. Deliklerin sıralı bir şekilde dizilmesindeki amaç standart dalga kılavuzlarındaki yan duvarları elde etmektir. Ancak deliklerin aralarındaki boşluklardan dolayı oluşan elektromanyetik sızıntılar standart dalga kılavuzlarındaki ideal durumu elde etmeyi engeller. Bu amaç ile delik çapları ( $d$ ) ve periyodu ( $p$ ) uygun şekilde seçilerek elektromanyetik sızıntılar azaltılır. İki delik sırası arasında bulunan mesafe ( $W$ ), STDK yapısının genişliğini, taban malzemenin kalınlığı ise STDK yapısının yüksekliğini oluşturur. STDK yapısının yüksekliği, aynı taban malzeme ile doldurulmuş standart dalga kılavuzundaki yükseklik ile aynıdır. Ancak STDK genişliği, deliklerdeki elektromanyetik sızıntılardan dolayı standart dalga kılavuzundaki genişliğe eşit değildir. Literatürde, STDK genişliği, delik çapları ve periyodu kullanılarak ana modun iletim katsayısı açısından eşdeğer bir standart dalga kılavuzu genişliği bulunabilir (Yan, 2004). Eşdeğer dalga kılavuzunda bulunan kesim frekansı ve yüksek mertebeli modun oluşum frekansları



Şekil 3. STDK yapısı.

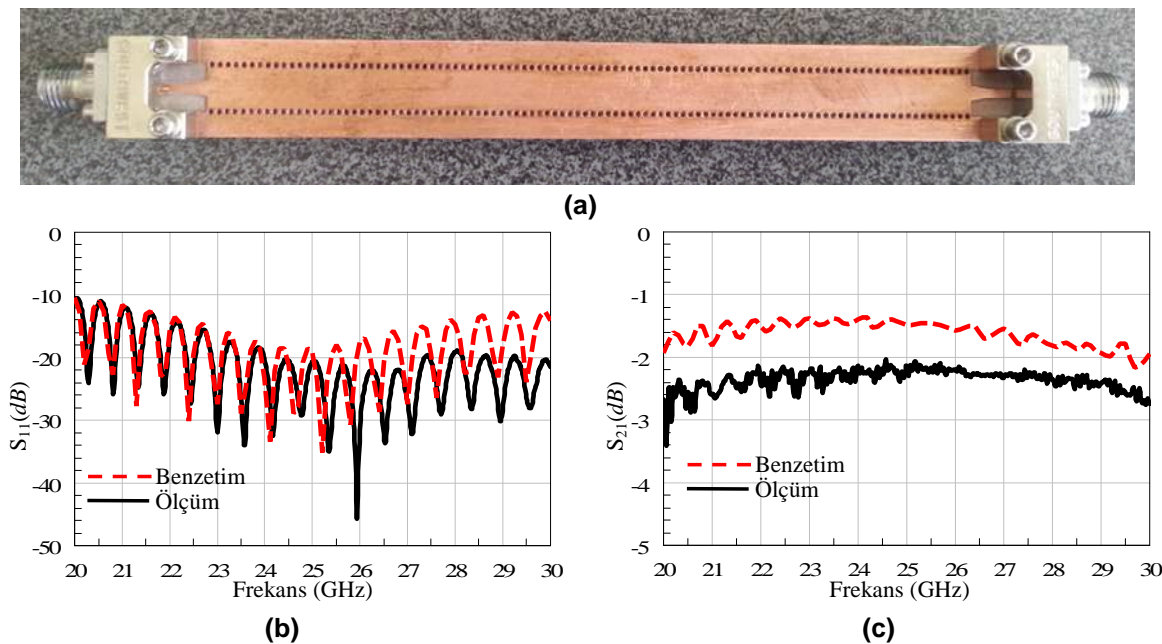
STDK yapısı için de geçerlidir. Bu durumdan faydalanılarak Şekil 3'te şekli verilen, 0.5 mm kalınlığındaki Rogers 3003 taban malzeme üzerinde tasarlanmış STDK'nın genişliği, 25 GHz etrafında sadece ana modun oluşmasını sağlayacak şekilde  $W = 6$  mm olarak belirlenmiştir. Delik çapı  $d = 0.8$  mm ve periyodu  $p = 1$  mm'dir.

STDK yapısı standart baskı devre kartı (PCB) teknolojisi kullanılarak üretilebilir. Üretimde öncelikle delikler oluşturulur. Ardından elektro-kaplama ile deliklerin içleri bakır ile doldurulur. Yarıklar ve STDK



Şekil 4. (a) STDK yapısı ( $L = 2$  cm). (b)  $S_{11}$  & (c)  $S_{21}$  parametreleri sonuçları.

yapısını beslemede kullanılacak mikroşerit iletim hattı, besleme yarığı, eş düzlemsel dalga kılavuzu, vb. gibi devre elemanları oluşturulur. Kartta bulunan farklı STDK devre elemanlarının kesme işlemi ile birbirinden ayrılmasından sonra STDK yapıları elde edilir.

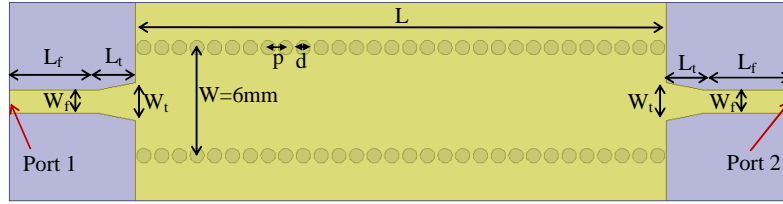


Şekil 5. (a) STDK yapısı ( $L = 10$  cm). (b)  $S_{11}$  & (c)  $S_{21}$  parametreleri sonuçları.

Baskı devre kartı (PCB) üretim süreci ile üretilen  $L=2$  cm ve  $L=10$  cm uzunluğundaki STDK yapıları sırası ile Şekil 4 (a) ve Şekil 5 (a)'da gösterilmiştir. STDK yapıları, mikroşerit iletim hatları ile beslenmiştir. Mikroşerit iletim hatlarına bağlanan konektörler yardımı ile STDK yapıları Network Analizör kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 4 (b) ve (c)'de  $L=2$  cm uzunluğundaki STDK yapısının S parametresi ölçümleri benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Konektör etkilerinin hesaba katıldığı benzetimler ölçümler ile uyum içerisindedir. Ölçümlerde geriye dönüş kaybı 20-30 GHz aralığında 10dB'den iyidir. Ölçülen araya girme kaybı 25 GHz'de 0.91 dB'dir. Benzetimlerde ise araya girme kaybı 25 GHz'de 0.57 dB olarak hesaplanmıştır. Bu değer ölçümlere oldukça yakındır. Şekil 5 (b) ve (c)'de  $L=2$  cm uzunluğundaki STDK yapısının konektörlü benzetimleri, ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Özellikle  $S_{11}$  parametreleri olmak üzere, benzetim sonuçlarının ölçümler ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir. 25 GHz'de ölçülen ve benzetimlerde hesaplanan araya girme kaybı sırası ile 2.13 dB ve 1.48 dB'dir.

### 2.2.1. Mikroşerit İletim Hattından STDK'ya Geçiş Yapısı

Anten dizisinde ve güç bölücü yapılarında kullanılmak üzere 0.5 mm kalınlığında Rogers 3003 taban malzemesi kullanılarak mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan geçiş yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir. Yapıda delik çapı ve periyodu sırası ile 0.8mm ve 1mm'dir. Geçiş yapısında  $L_f$  uzunluğundaki 50  $\Omega$  iletim hattının genişliği  $W_f=1.25$  mm'dir. Geçiş kısmında mikroşerit iletim hattının genişliği doğrusal olarak  $L_t=2.1$  mm uzunluğu boyunca  $W_t=2.1$  mm genişliğine çıkartılmıştır.

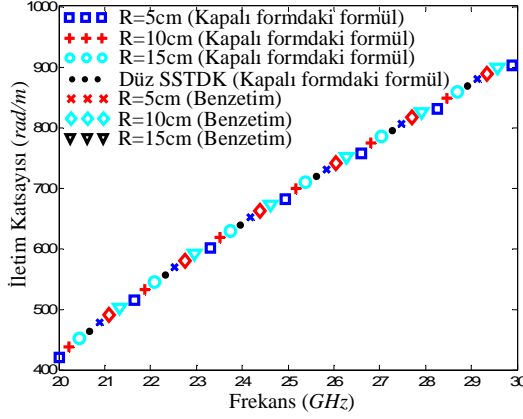


Şekil 6. Mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı.

Şekil 4 (a) ve Şekil 5 (a)'da gösterilen sırası ile  $L=2$  cm ve  $L=10$  cm STDK uzunluğuna sahip STDK yapılarında, tasarlanan mikroşerit iletim hattı geçiş yapıları kullanılmıştır. Kullanılan geçiş yapılarında mikroşerit hat uzunluğu  $L_f=4$  mm'dir. Şekil 4 (c) ve Şekil 5 (c)'de gösterilen farklı STDK uzunluklarına sahip geçiş yapılarının ölçülen araya girme kayıpları kullanılarak STDK içindeki kayıplar 25 GHz'de 0.153 dB/cm olarak belirlenmiştir. 25 GHz'de  $L_f=4$  mm için geçiş yapısının kaybı, tek geçişte 0.3dB'dir. STDK yapısında kayıpları taban malzeme kayıpları ve bakır kayıpları oluşturmaktadır. Geçiş yapısında ise taban malzemesi kayıpları ve bakır kayıplarına ek olarak ışınım kayıpları da vardır. Eş düzlemsel dalga kılavuzundan STDK'ya geçiş kullanılarak veya STDK'yı prob ile besleyerek ışınım kayıpları azaltılıp önlenebilir.

### 2.3. SSTDK Karakteristiği

Dizi tasarımında kullanılan SSTDK yapısının geniş duvarını  $W=6$  mm olarak seçilmesi ile yaklaşık 16-32 GHz arasında SSTDK içinde sadece ana modun ilerlemesi ve diğer modların sönümlenmesi sağlanmıştır. Ana modun iletim katsayısı, tasarımda eleman fazlarının belirlenmesinde ve elemanlar arasındaki mesafelerin dar ana huzme elde etmek için optimize edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca Elliot yönteminde yarı pozisyonlarının ve uzunluklarının belirlenmesi esnasında iletim katsayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Ana modun iletim katsayısı elektromanyetik benzetimler yardımı ile veya literatürde verilen kapalı formdaki formüller ile hesaplanabilir (Lewin, 1977). Ancak kapalı formdaki formüller normal dalga kılavuzlarının silindirik üzerine sarılarak yerleştirildiği durum için belirtilmiştir. Bu formülleri SSTDK yapısında kullanmak amacı ile öncelikle düz STDK yapısının elektriksel olarak

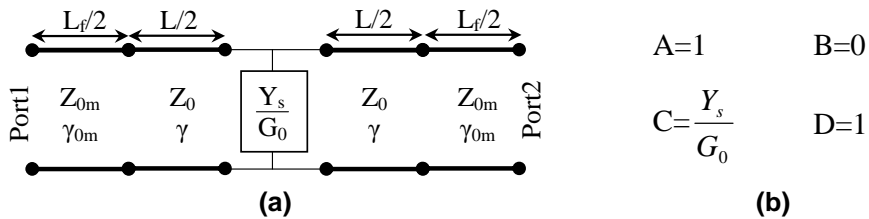


Şekil 7. Benzetim ve kapalı formdaki formüller ile bulunan iletim katsayılarının karşılaştırılması.

eşdeğeri olan normal dalga kılavuzu boyutları hesaplanmıştır. Eşdeğer dalga kılavuzu, STDK ile aynı taban malzemesine ve  $h=0.5$  mm yüksekliğine sahiptir. Tek fark, dalga kılavuzunun genişliğidir. STDK'da 6mm olarak seçilen genişlik değeri (Yan, 2004)'te belirtilen formüller yardımı ile eşdeğer dalga kılavuzunda 5.34 mm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan eşdeğer genişlik değeri ve (Lewin, 1977)'de belirtilen kapalı formdaki formüller kullanılarak SSTDK içerisinde ana modun iletim katsayısı değerleri silindirik yüzeyin değişik yarıçap değerleri ve düz STDK durumu için hesaplanmıştır. SSTDK yapısının Ansys HFSS yazılımı ile benzetimleri yapılmış ve benzetimler yardımı ile iletim katsayıları hesaplanmıştır. Benzetimler ve kapalı formdaki formüller ile hesaplanan iletim katsayısı değerleri Şekil 7'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda benzetimlerin ve kapalı formdaki formüllerin uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yarıçap değerinin 5 cm ile 15 cm arasında değiştirilerek yapılan hesaplamalarda düz durumdaki iletim katsayısı değerlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Silindirik ile düz durumlarda iletim katsayılarındaki farkın artmasını sağlayacak değerler 5 cm yarıçap değerinden küçük değerlerdir. Yarıkların rezonans uzunluklarının 25 GHz'de 4 mm olduğu düşünüldüğünde, 5 cm yarıçap değerinden küçük silindirik yüzeyleri kullanılabilecek eleman sayısını kısıtlayarak dizi tasarımında uygun ışınım örüntüsü kriterlerini sağlamakta zorluklara sebep olabilir. Bu sebepten 5 cm'den büyük yarıçap değerleri incelenmiştir.

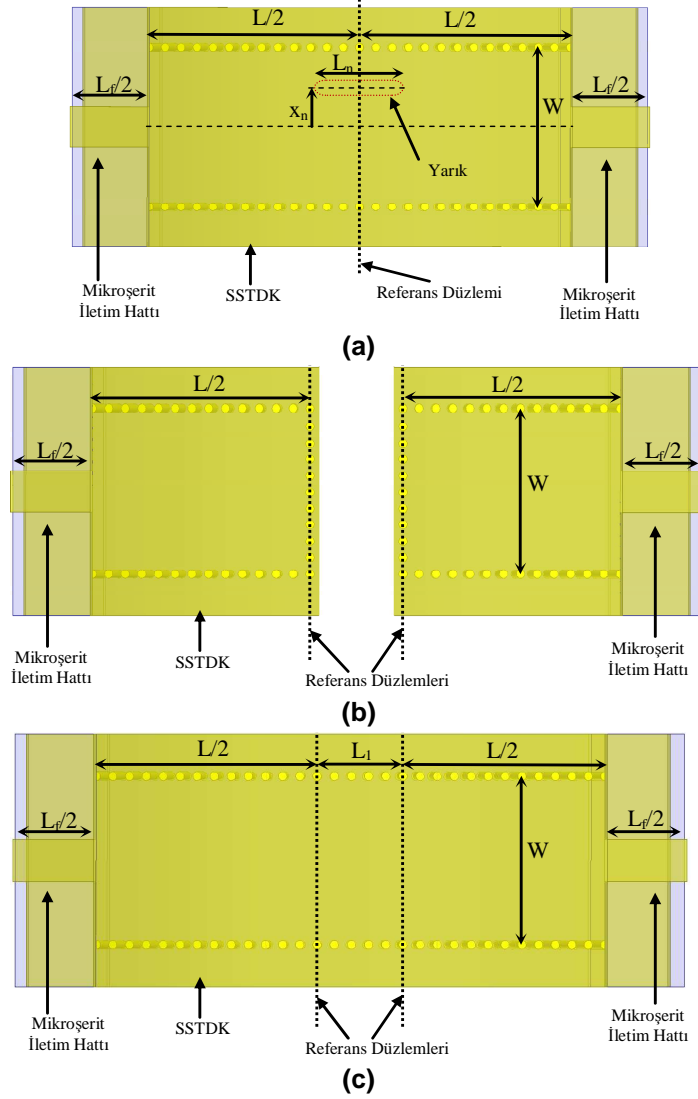
## 2.4. SSTDK Üzerinde Tek Boylamsal Yarık Modeli

Elliot tasarım adımlarında yarık pozisyonlarının ve uzunluklarının belirlenmesinde tek yarık modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Düz dalga kılavuzunda bulunan tek boylamsal yarık, paralel admitans olarak modellenir (Elliot, 2003). STDK ve SSTDK yapılarında ana modun ilerleme yönüne dik olan kesit alanların aynı olması ve yarık uzunluklarının dalga boyuna göre küçük olması sonucunda, SSTDK üzerinde bulunan tek boylamsal yarığın devre modeli Şekil 8 (a)'da gösterildiği gibi paralel admitans olarak kabul edilebilir. Şekil 9 (a)'da belirtilen geçiş (Thru) standardında tek yarığın pozisyonu sanal olarak belirtilmiştir. Yapıda tek yarık bulunmasından dolayı diğer yarıklar ile bağlaşım etkileri hesaba katılmamıştır ve bu nedenle devre modelinde bulunan paralel admitansa yarık öz-admitansı,  $Y_s$ , denmektedir. Devre modelinde, mikroşerit iletim hattındaki iletim katsayısı,  $\gamma_{0m}$ , SSTDK



Şekil 8. (a) SSTDK üzerinde bulunan tek boylamsal yarığın devre modeli. (b) Paralel admitansın ABCD parametreleri.

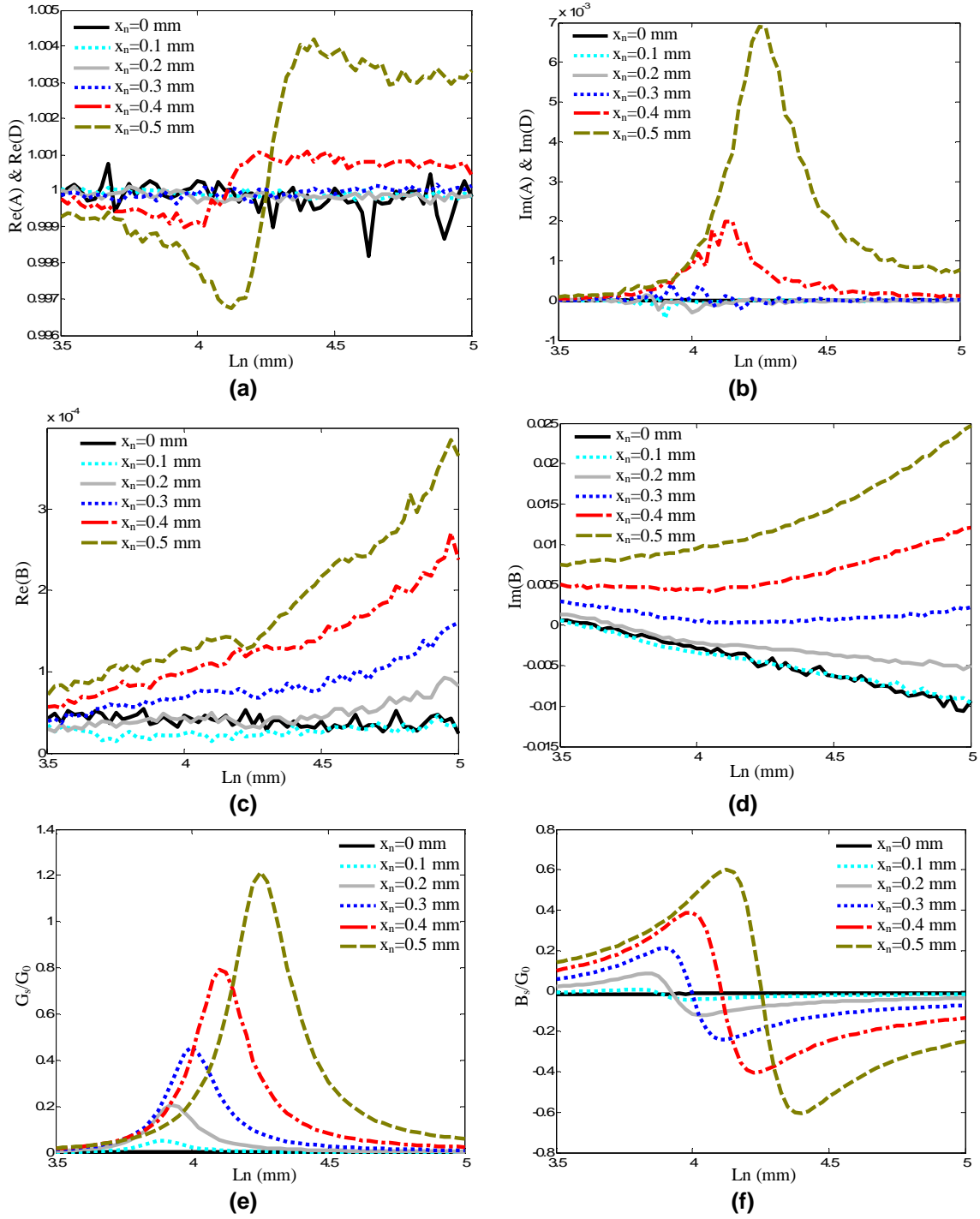




**Şekil 9.** TRL standartları. (a) Geçiş (Thru), (b) yansıma (Reflect) ve (c) hat (Line) standartları.

yapısındaki iletim katsayısı,  $\gamma$ , ve bu yapılarıdaki karakteristik empedanslar  $Z_{0m}$ ,  $Z_0$  da belirtilmiştir. Devre modelinde yarık öz-admitansı, SSTDK yapısının karakteristik iletkenliğine ( $G_0 = 1/Z_0$ ) göre normalize edilmiştir.

Şekil 8 (a)'da belirtilen paralel admitans modelinin SSTDK üzerindeki tek yarığı modellediğini ispatlamak için benzetimler ile yarığın ABCD parametrelerinin bulunması ve bu parametrelerin Şekil 8 (b)'de belirtilen paralel admitansın devre teorisi kullanılarak çıkartılmış ABCD parametrelerine eşdeğer olduğunun gösterilmesi gerekmektedir. Bu işlem sonucunda ayrıca devre modelindeki öz-admitans değeri,  $Y_s$  belirlenmiş olur. Yarığın ABCD parametrelerinin benzetimler ile belirlenebilmesi için Şekil 9'da belirtilen geçiş-yansıma-hat (Thru-Reflect-Line - TRL) standartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu standartlar literatürde TRL standartları olarak bilinir. TRL standartları kullanılarak mikroşerit iletim hattından SSTDK yapısına olan geçiş etkileri ve  $L/2$  uzunluğundaki SSTDK yapılarının etkileri çıkartılarak referans düzleminde bulunan yarığın ABCD parametreleri bulunur. Silindir yarıçapı  $R=10\text{cm}$  alınmış ve Şekil 9 (a)'da belirtilen geçiş yapısına tek yarık eklenerek, değişik yarık pozisyonları ve rezonans frekansı civarında değişik yarık uzunlukları için yapının Ansys HFSS benzetimleri 25 GHz'de yapılmıştır. Şekil 9'da belirtilen TRL yapılarının ayrıca benzetimleri gerçekleştirilmiş ve tek yarığın ABCD parametreleri bulunmuştur. 0mm ile 0.5 mm yarık pozisyonları arasındaki değerler için yapılan benzetimlerde, Şekil 10 (a) ve (b)'de gösterilen A ve D-



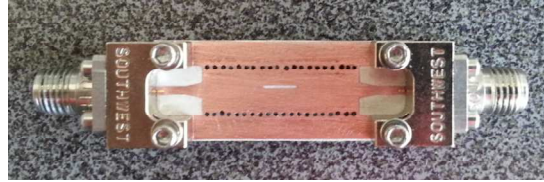
**Şekil 10.**  $R = 10$  cm için STDK üzerindeki tek yarığın ABCD-parametreleri: (a)& (b) A ve D-parametreleri. (c) & (d) B-parametreleri. (e) & (f) C-parametreleri (yarığın paralel öz-admitansı).

parametrelerinin 1'e, Şekil 10 (b) ve (c)'de gösterilen B-parametrelerinin ise 0'a oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 8 (b)'de belirtilen paralel admitansın ABCD parametreleri ile eşdeğerdir. Böylece SSTDK üzerinde bulunan boylamsal yarığın paralel admitans olarak modellenebileceği gösterilmiştir ve benzetimlerden elde edilen C-parametreleri normalize yarığın öz-admitans değerini ( $Y_s/G_0$ ) vermektedir. Yarığın paralel öz-admitans değerinin reel,  $G_s$ , ve sanal,  $B_s$ , kısımlarının karakteristik iletkenliğe,  $G_0$ , göre normalize edilmiş değerleri Şekil 10 (e) ve (f)'de gösterildiği gibidir.

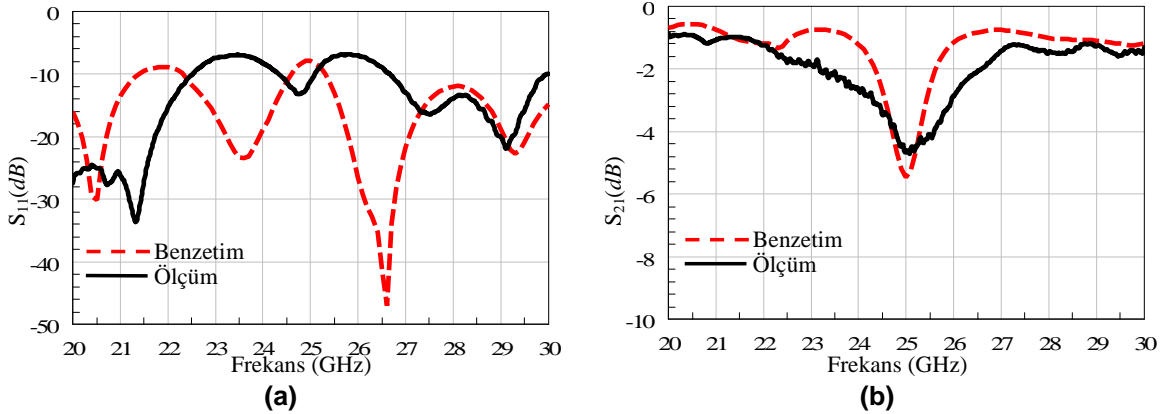
Şekil 10 (f)'den anlaşılacağı gibi yarığın rezonans uzunluğu, yarık pozisyonu ile değişmektedir (Bayraktar, 2012a; Bayraktar, 2012b). Şekil 10 (e)'de rezonans civarındaki tepe değer, yarık pozisyonu ile artan bir karakter göstermektedir. Bu grafikler kullanılarak (Elliot, 2003)'te belirtildiği gibi karakterizasyon polinomları türetilir. Karakterizasyon polinomları, Şekil 10 (e) ve (f)'de gösterilen grafiklerin yardımı ile polinom katsayılarının belirlenmesi sonucu elde edilirler. Bu polinomlar, Elliot tasarım yönteminde, yarık pozisyonlarının 0mm ile 0.5mm arasında benzetimleri yapılmamış değerlerdeki yarık öz-admitansının hesaplanmasında kullanılır.

#### 2.4.1. STDK Üzerindeki Tek Yarığın Üretim ve Ölçüm Sonuçları

Şekil 4 (a)'da gösterilen 2 cm uzunluğundaki STDK'nın üzerinde  $x_n = 0.5$  mm offset yarık pozisyonu ve  $L_n = 4.3423$  mm yarık uzunluğuna sahip tek yarıklı STDK üretilmiştir. Üretilen yapı Şekil 11'de gösterilmiştir. Yapının ölçülen  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametreleri sırası ile Şekil 12 (a) ve (b)'de benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Benzetimlerde konektörlerin etkisi hesaba katılmıştır. Benzetimler ile ölçümler arasında iyi bir uyum gözlenmiştir. Şekil 4 (b)'de -10 dB'nin altında olan  $S_{11}$  değerleri yarığın etkisi ile Şekil 12 (b)'de -10 dB'nin üzerine çıkmıştır. Yarığın, paralel admitans değerinin uyumu arttırmak için tasarlanmadığı düşünüldüğünde bu artış olağan bir durumdur.



Şekil 11. Mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı ( $L = 2$  cm) üzerinde tek yarık.



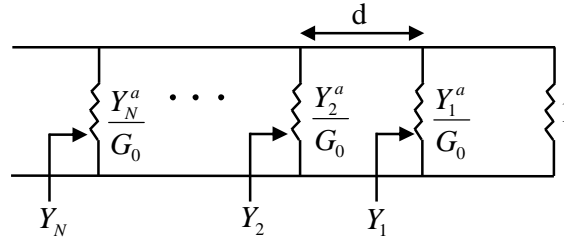
Şekil 12. Mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı ( $L = 2$  cm) üzerinde tek yarığın. (a)  $S_{11}$  & (b)  $S_{21}$  sonuçları.

## 2.5. Elliot Tasarım Yöntemi

Elliot tasarım yöntemi kullanılarak duran dalga ve yürüyen dalga yarıklı dalga kılavuzu tasarımları yapılabilir. Duran dalga tasarımında yarık dizisinin sonu kısa devre veya açık devre ile sonlandırılır. Böylece sondaki yansımadan dolayı dalga kılavuzu içinde iki yöne ilerleyen ana mod, dolayısıyla duran dalga oluşur. Duran dalga tasarımlarında yarıklar arasındaki mesafe tasarım frekansına göre yarım dalga boyu ( $\lambda/2$ ) olarak seçilir. Böylece ardışık yarıklar arasında  $180^\circ$  faz farkı oluşur. Yarıkların  $+x_n$  veya  $-x_n$  yönünde konumlandırılması iki durum arasında  $180^\circ$  faz farkına sebep olur. Tasarımda ardışık yarıklar farklı yönlerde konumlandırılarak yarım dalga boyu mesafeden kaynaklanan  $180^\circ$  faz

farkı ortadan kaldırılır. Yürüyen dalga tasarımında ise yarık dizisi uyumlu yük ile sonlandırılır ve bunun sonucunda dalga kılavuzu içerisinde tek yönde ilerleyen ana mod elde edilir. Yürüyen dalga tasarımında yarıkların aralarındaki mesafe genellikle giriş geriye dönüş kaybını azaltmak için değiştirilir. Yarıklar arasındaki mesafe ve yarık pozisyonları, yarık dizisindeki faz dağılımını etkileyerek ışınım örüntüsünü etkiler. Dalga kılavuzunun geniş kenarına açılan düz yarıklı tasarımlarda genellikle ardışık yarık pozisyonları merkeze göre farklı taraflardadır ve aralarındaki mesafeler sabittir. Fakat uygun ışınım örüntülerini elde etmek amacı ile yarıklar arasındaki mesafeler ve yarığın merkeze göre pozisyonu değiştirilebilir. Proje kapsamında, yürüyen dalga yarıklı SSTDK incelendiği için bu kısımda yürüyen dalga yarıklı dalga kılavuzu tasarımından bahsedilmiştir.

Yürüyen dalga yarıklı dalga kılavuzunun devre modeli Şekil 13'te gösterilmiştir.  $N$ , bir dalga kılavuzunda bulunan toplam yarık sayısıdır. Devre modelinde yarıklar paralel aktif yarık admitansları ( $Y_n^a$ ) olarak ifade edilmiştir. Aktif yarık admitansları, yarık öz-admitansından farklı olarak yarıklar arasındaki bağlaşım etkilerini içerir. Tasarım denklemleri (Elliott, 1983)'te belirtilen iki ana denklemden oluşur. Bu denklemler (1) ve (2)'de belirtilmiştir. (1) ve (2)'de belirtilen  $K_1$  ve  $f_n$  fonksiyonları (3) ve (4)'te ifade edilmiştir. Denklemlerde bulunan  $a$  ve  $b$  değişkenleri dalga kılavuzunun genişlik ve yüksekliğini,  $\lambda$ ,  $\beta_{10}$ ,  $\eta$ ,  $k$  değişkenleri ise sırası ile dalga kılavuzundaki dalga boyu, faz sabiti, yalın empedans ve dalga numarasıdır. Boşluktaki dalga numarası  $k_0$ , dalga kılavuzundaki karakteristik iletkenlik  $G_0$  ve yarık pozisyonu  $x_n$  olarak ifade edilmiştir. Denklemlerdeki  $l_n$  değişkeni yarık uzunluğunun ( $L_n$ ) yarı değeridir.  $V_n^s$  ve  $V_n$  değişkenleri sırası ile yarığın merkezindeki karmaşık yarık voltajı ve karmaşık ana mod voltajıdır. İki yarığın aktif admitansları arasındaki ilişki (1) kullanılarak (5)'te gösterildiği gibi ifade edilebilir.  $n$ 'inci yarıktan görülen toplam admitans (6)'da, karmaşık mod voltajları arasındaki ilişki ise (7)'de belirtilmiştir. (6) ve (7) kullanılarak, (5) numaralı denklem ardışık yarıkların arasındaki aktif admitans ilişkisini verecek şekilde (8)'de gösterildiği gibi yeniden yazılabilir.



Şekil 13. Yürüyen dalga yarıklı dalga kılavuzunun devre modeli.

$$\frac{Y_n^a}{G_0} = K_1 f_n \frac{V_n^s}{V_n} \quad (1)$$

$$\frac{Y_n^a}{G_0} = \frac{2f_n^2(x_n, l_n)}{\frac{2f_n^2(x_n, l_n)}{\frac{Y_s}{G_0}(x_n, l_n)} + j(\beta_{10}/k)(k_0 b)(a/\lambda)^3 \sum_{m=1}^N \frac{V_m^s}{V_n^s} g_{nm}(x_m, l_m, x_n, l_n)} \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{1}{j(a/\lambda)} \sqrt{\frac{2(k/k_0)}{\eta G_0 (\beta_{10}/k)(ka)(kb)}} \quad (3)$$

$$f_n = \frac{(\pi/2kl_n)\cos(\beta_{10}l_n)}{(\pi/2kl_n)^2 - (\beta_{10}/k)^2} \sin\left(\frac{\pi x_n}{a}\right) \quad (4)$$

$$\frac{Y_n^a(x_n, l_n)}{Y_m^a(x_m, l_m)} = \frac{f_n V_n^s V_m}{f_m V_m^s V_n} \quad (5)$$

$$Y_n = Y_n^a + \frac{Y_{n-1} \cos(\beta_{10} d) + j \sin(\beta_{10} d)}{\cos(\beta_{10} d) + j Y_{n-1} \sin(\beta_{10} d)} \quad (6)$$

$$V_n = V_{n-1} [\cos(\beta_{10} d) + j Y_{n-1} \sin(\beta_{10} d)] \quad (7)$$

$$\frac{Y_n^a}{f_n(x_n, l_n)} = \frac{Y_{n-1}^a}{f_{n-1}(x_{n-1}, l_{n-1})} \frac{V_n^s / V_{n-1}^s}{\cos(\beta_{10} d) + j Y_{n-1} \sin(\beta_{10} d)} \quad (8)$$

Tasarım adımları şu şekildedir:

- Yarıklar aralıkları,  $d$ , ana huzme yönü, istenmeyen huzmeleri (grating lobe) engelleme gibi ışınım örüntüsü kriterleri göz önünde bulundurularak belirlenir. Eleman aralıkları yeterince büyük seçilmezse yüksek bağlaşım etkileri tasarıma olanak tanımaz.
- Yarıkların voltaj oranlarının mutlak değerleri ( $\left| \frac{V_m^s}{V_n^s} \right|$ ), SLL gibi ışınım örüntüsü istekleri göz önünde bulundurularak belirlenir. Yarıkların voltajlarının fazları, eleman aralıkları ve yarıkların pozisyonları yardımı ile hesaplanarak, bağlaşım hesapları ve (8) gibi ihtiyaç duyulan denklemlerde kullanılmalıdır.
- Bütün yarıkların pozisyonları ve uzunlukları sırası ile 0'a ve rezonans yarıkların uzunluğuna eşitlenerek yarıkların bağlaşım,  $g_{mn}$ , hesaplanır.
- Birinci yarıkların pozisyonu,  $x_1$ , için bir değer belirlenir. Bu değer tasarımda diğer yarıkların pozisyonlarını ve uyumlu yük aktarılan güç miktarını etkileyecektir.
- Birinci yarıkların uzunluğu,  $l_1$ , (2)'nin sanal kısmını yok edecek şekilde belirlenir. Birinci yarıkların pozisyonu ve uzunluğu kullanılarak birinci yarıkların öz-admitansı ( $\frac{Y_s}{G_0}(x_1, l_1)$ ) bulunur ve aktif yarıkların admitansı ( $\frac{Y_1^a}{f_1(x_1, l_1)}$ ), yine (2) kullanılarak belirlenir. Ardından (6) kullanılarak  $Y_1$  bulunur.  $\frac{Y_2^a}{f_2(x_2, l_2)}$  ifadesi, (8) yardımı ile belirlenir.
- İkinci yarıkların pozisyonu ve uzunluk değerleri ( $x_2, l_2$ ) değiştirilerek (2) yardımı ile bir önceki adımda belirlenen ile aynı  $\frac{Y_2^a}{f_2(x_2, l_2)}$  değeri bulunur. Böylece ( $x_2, l_2$ ) değerleri belirlenmiş olur.
- Bu adımlar bütün ( $x_N, l_N$ ) değerleri bulununcaya kadar tekrarlanır.
- Hesaplanan yeni yarıkların pozisyonları ve uzunlukları ile bağlaşım,  $g_{mn}$ , tekrar hesaplanır. Yeni bağlaşım değerleri ile yukarıdaki adımlar tekrarlanır ve yarıkların pozisyonları ve uzunlukları tekrar hesaplanır. Bir önceki döngüde hesaplanan yarıkların pozisyonu ve uzunlukları ile en son hesaplananlar arasındaki fark belirli bir eşğin altına indiğinde döngü sonlandırılır.

- Eğer hesaplanan  $Y_N$  yeterince az geriye dönüş kaybını sağlamaz ise yarık aralıkları veya eleman sayısı değiştirilerek tasarım adımları tekrarlanır.
- $n$ 'inci yarıktaki harcanan güç seviyesi (9)'da belirtilmiştir.
- Yarıklarda harcanan güç seviyeleri kullanılarak uyumlu yüke iletilen güç seviyesi (10)'daki gibi hesaplanır.
- Eğer uyumlu yüke iletilen güç seviyesi istenilen değerden fazla ise ilk yarık pozisyonunu değeri artırılmalı ve tasarım adımları tekrarlanmalıdır.

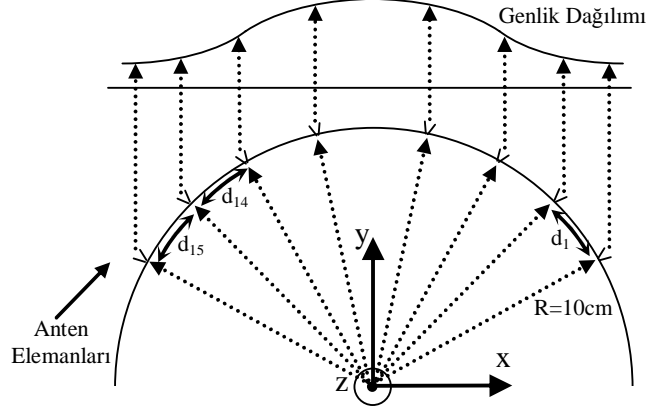
$$P_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left( V_n V_n^* \left( \frac{Y_n^a}{G_0} \right) \right) \quad (9)$$

$$P_L = \frac{\frac{1}{2} V_1 V_1^*}{\frac{1}{2} V_1 V_1^* + \sum_{n=1}^N P_n} \quad (10)$$

## 2.6. Yarıklı SSTDK Tasarımı ve Optimizasyonu

SSTDK üzerinde 1 x 16 yürüyen dalga yarık dizisi silindirik yarıçapının 10cm olduğu durum için 25 GHz'de Elliot yöntemi ile tasarlanmıştır. Tasarımda yarıkların voltaj değerlerinin büyüklüğü ( $|V_n^s|$ ), yarık pozisyonlarının Şekil 14'te gösterildiği gibi +y-yönüne doğru bir düzlem üzerine izdüşümlerinin alınarak, -20 dB SLL Taylor dağılımının örneklenmesi ile elde edilmiştir. Böylece düşük SLL elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 14'te gösterilen dizide yürüyen dalga, Şekil 2'de belirtilen dizi gibi  $-\hat{a}_\phi$  yönünde ilerlemektedir ve Şekil 14'teki dizide  $d_1$  yarık aralığına sahip birinci yarık uyumlu yüke en yakın anten elemanıdır. İstenilen Taylor dağılımını sağlayacak yarık pozisyonlarının ve uzunluklarının Elliot yöntemi ile tasarlanmasından önce yarık elemanları arasındaki mesafelerin ( $d_n$ ,  $n=1,2,\dots,15$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Bu mesafeler, 25 GHz'de ana huzmeyi Şekil 14'te belirtilen +y yönüne doğru yönlendirmek amacıyla tasarlanır. Dizi elemanları arasındaki mesafelerin tasarlanması sonucunda, dizi elemanlarının izdüşümü mesafelerinin farklı olmasından kaynaklanan faz farkları giderilir ve ana huzmede küçük HPBW değerleri elde edilir. Dizi elemanları arasında eşit mesafeler kullanılarak, -40 dB SLL Taylor dağılımı ile -30 dB'nin altında SLL değerine sahip dizi tasarlanmıştır (Bayraktar, 2013). Ancak bu dizide HPBW değeri büyük olup 25 GHz'de 22.5°'dir. Yarıklı dalga kılavuzlarının sınırlı çalışma bandına sahip olduğu düşünülürse büyük HPBW değerleriyle frekans taramasını gözlemlemek zordur. Şekil 14'teki dizide küçük HPBW değerleri elde etmek amacıyla dizi elemanları arasındaki mesafelerin belirlenmesinde üç farklı yöntem kullanılabilir. İlk durumda bütün yarıklar merkeze göre aynı taraftadır. İkinci durumda ardışık yarıkların pozisyonları Şekil 2'de gösterildiği gibi merkeze göre farklı taraflardadır. Üçüncü durumda ise dizideki herhangi bir yarığın pozisyonu merkeze göre hem pozitif ( $+x_n$ ) hem de negatif ( $-x_n$ ) olacak şekilde yarık mesafesi  $d_{n-1}$  belirlenir. Belirlenen bu yarık mesafelerinden hangisi en küçük yarık mesafesini sağlıyorsa o duruma karşılık gelen yarık pozisyonu seçilir. Yarıklar arasındaki mesafelerin küçük tutulması sonucunda Taylor dağılımı daha sık örneklenir ve beklenen ışınım örüntüsüne daha yakın değerler elde edilir. Üç durum için de, tasarımda kullanılacak minimum yarık mesafesi değerleri vardır. Minimum yarık mesafeleri kullanılarak yapılan tasarımda, ortalama en az yarık mesafeleri elde edilir ve bu da ışınım örüntüsünde istenilene daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlar. Minimum yarık mesafesi değerinin altına inildiğinde bağlaşımlı etkilerinin artması sonucunda Elliot yönteminde (2)'nin sanal kısmını yok edecek yarık uzunluğu değerleri bulunamaz ve bu şekilde bir tasarım yapılamaz. Yarık mesafelerinin tasarımında izin verilen minimum yarık aralık değeri azaltılarak bütün yarık mesafeleri hesaplanır ve ardından Elliot tasarım yöntemi uygulanır. Bu işlem Elliot tasarım yöntemi bağlaşımlı etkilerinden dolayı

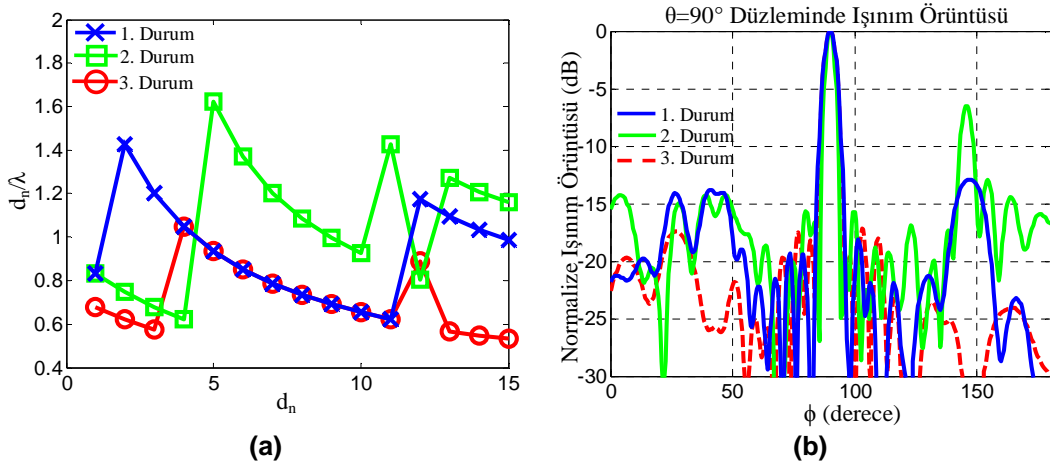
işlevini yitirene kadar sürdürülür ve minimum yarık aralığı bulunur. Üç durum için birbirine yakın minimum yarık aralığı değerleri bulunmuş ve bu minimum yarık aralığı değerleri kullanılarak bütün yarık mesafeleri hesaplanmıştır. Hesaplanan yarık mesafelerinin dizideki yarık elemanlarına göre dağılımı Şekil 15 (a)'da belirtilmiştir.



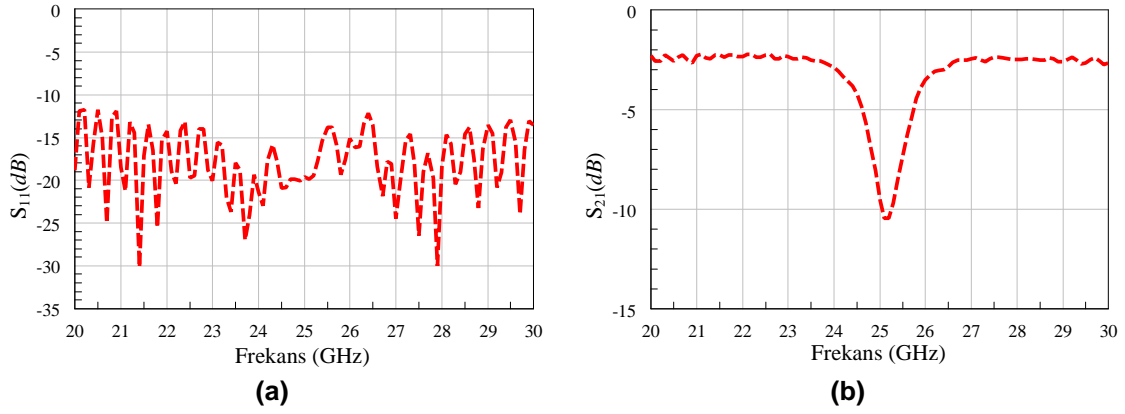
**Şekil 14.** Anten elemanlarının pozisyonlarının düzlemsel izdüşümlerinin alınarak Taylor dağılımının örnekleme.

Silindirik yüzeydeki yarıklar için oluşturulmuş ve yarıkların eleman faktörünün etkisini içeren ışınım örüntüsü yazılımı ile üç farklı durum için ışınım örüntüleri 25 GHz'de hesaplanmıştır. Hesaplamalarda bütün yarık pozisyonlarının aynı ve merkeze yakın olduğu düşünülmüştür. Ayrıca hesaplamalarda bütün yarıkların uzunlukları aynı olup 25 GHz'deki rezonans yarık uzunluğuna eşittir. Şekil 14'te gösterilen koordinatlara göre  $\theta = 90^\circ$  düzleminde hesaplanan H-düzleminde ışınım örüntüleri Şekil 15 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 15 (b)'deki ışınım örüntülerinden anlaşılacağı gibi -20 dB SLL elde edilememiştir. Şekil 15 (a)'da ortalama olarak 3. durumda elemanlar arasındaki mesafeler en azdır. Bunun sonucunda Şekil 15 (b)'de en az SLL elde edilmiştir. 3. durumda elde edilen ışınım örüntüsü grafiği çoğu uygulama için yeterli SLL değerine sahiptir. Bu nedenle, 3. durumdaki yarık pozisyonu dizilimi seçilmiştir.

Elliot yönteminde Taylor dağılımı sağlayan yarık pozisyonlarını ve uzunluklarını elde ettikten sonra, geriye dönüş kaybı hesaplamaları yapılır. Bu hesaplamalar yeterli miktarda geriye dönüş kaybı vermezse, tasarımda elemanlar arasındaki mesafe değiştirilmelidir. Ancak elemanlar arasındaki mesafeler küçük HPBW değeri bulmak için tasarlanmıştır ve kolayca değiştirilemezler. Geriye dönüş



**Şekil 15.** (a) 3 farklı durum için yarık aralıkları grafiği ve (b) silindirik yüzeydeki yarıklar için oluşturulmuş ışınım örüntüsü yazılımı ile hesaplanmış SSTDK ( $R = 10$  cm) üzerindeki  $1 \times 16$  yarık dizisinin 25 GHz'deki ışınım örüntüsü grafikleri.



**Şekil 16.** 3. durum için SSTDK üzerinde tasarlanan 1 x 16 yarık dizisinin (a)  $S_{11}$  & (b)  $S_{21}$  benzetim sonuçları.

kaybını düşürmek için ilk elemanın yarık pozisyonu değiştirilip tasarım yeniden yapılabilir. Ancak ilk elemanın yarık pozisyonu, uyumlu yüke iletilen güç seviyesini kontrol eder. İyi geriye dönüş kaybı değerleri elde etmek amacı ile elemanlar arasındaki mesafeleri değiştirmek daha mantıklıdır. Bu amaç ile elemanlar arasındaki minimum tasarım mesafesi artırılarak elemanlar arasındaki mesafeler küçük HPBW elde etmek amacı ile tekrar tasarlanır ve yeni eleman aralıkları ile Elliot tasarımı yapılarak giriş geriye dönüş kaybı hesaplanır. İyi geriye dönüş kayıpları elde edilene kadar elemanlar arasındaki minimum tasarım mesafesi artırılır. Diğer bir yöntem ise eleman sayısını değiştirmektir. Eleman sayıları ışınım örüntüsünü çok etkilemeyecek şekilde istenilen geriye dönüş kaybı değeri elde edilene kadar değiştirilir. Bu yöntem uygun sonuçlar elde etmek amacı ile bir önceki yöntem ile birlikte uygulanabilir.

Elliot tasarımı ile SSTDK yapısı üzerinde 25 GHz'de yarık dizisi tasarlanmıştır. Tasarım daha önce bahsedilen üç farklı yarık pozisyonu dizilimi için gerçekleştirilmiştir. Elliot tasarımında yarıklar arasındaki bağlaşım, yarıkların düz dalga kılavuzunda bulunduğu durum için hesaplanmıştır. Bu hesaplama  $8.33\lambda_0$  silindirik yarıçapı düşünülüğünde iyi bir yakınsamadır (Ertürk, 2004). Üç farklı durum için yapılan tasarımlarda, eleman sayısının 16 seçilmesi halinde, yarıklar arasındaki minimum mesafenin geriye dönüş kaybını düşürmek için artırılmasına ihtiyaç duymadan bütün durumlar için iyi geriye dönüş kaybı değerleri elde edilmiştir. 25 GHz'de 16 yarık elemanı kullanılarak Elliot yöntemi ile yapılan tasarımda 25 GHz'de 1., 2. ve 3. durum için sırası ile yaklaşık -15 dB, -21 dB ve -18 dB geriye dönüş kaybı değerleri elde edilmiştir. 2. durum daha iyi geriye dönüş kaybı değeri verse de, 3. durum için Şekil 15 (b)'de gösterilen SLL seviyesinin daha düşük olması ve 3. durumun geriye dönüş kaybının kabul edilebilir seviyelerde olması sonucunda, SSTDK ( $R = 10$  cm) üzerinde 25 GHz'de 3. durum için gerçekleştirilen 1 x 16 yarık dizisi tasarımı seçilmiştir. Seçilen tasarımın yarık pozisyonları ve uzunlukları Tablo 1'de belirtilmiştir. Seçilen dizinin Ansys HFSS yardımı ile benzetimleri yapılmış ve benzetim sonuçları Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 16 (a)'da 25 GHz'de benzetimler ile bulunan  $S_{11}$  değeri -19.7 dB civarında olum Elliot tasarımında bulunan -18 dB değerine oldukça yakındır. Şekil 16 (b)'de ışınım sonucunda 25 GHz'de  $S_{21}$  değerinde azalma meydana gelmiştir.

Seçilen 1 x 16 yarık dizisinde, 24 GHz - 26 GHz arasında ışınım güç bandını arttırmak amacı ile Ansys HFSS benzetimleri kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyonda yarık pozisyonları

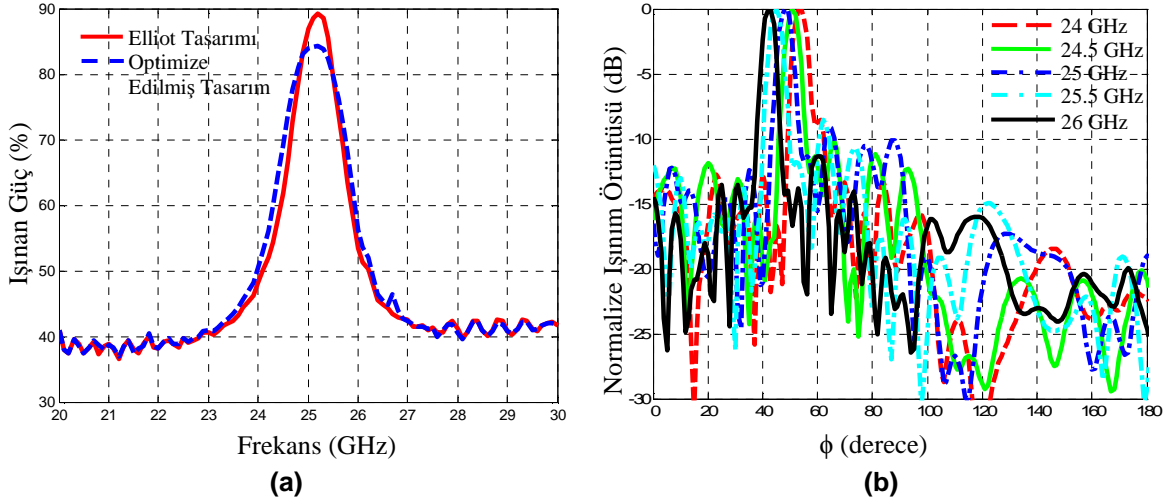
**Tablo 1.** 3. durum için SSTDK üzerinde tasarlanan 1 x 16 yarık dizisinin yarık pozisyonları ve uzunlukları.

Eleman #	1	2	3	4	5	6	7	8
Yarık Pozisyonu	-0.250	-0.290	-0.176	-0.164	-0.161	0.223	0.232	0.204
Yarık Uzunluğu (mm)	4.012	4.066	4.006	3.954	3.939	4.009	3.986	3.960
Eleman #	9	10	11	12	13	14	15	16
Yarık Pozisyonu	0.179	0.164	0.153	0.118	0.078	0.058	-0.087	0.055
Yarık Uzunluğu (mm)	3.953	3.952	3.953	3.956	3.906	3.908	3.924	3.932



**Tablo 2.** SSTDK üzerinde optimize edilmiş 1 x 16 yarık dizisinin yarık pozisyonları ve uzunlukları.

Eleman #	1	2	3	4	5	6	7	8
Yarık Pozisyonu	-0.250	-0.290	-0.176	-0.164	-0.161	0.223	0.232	0.204
Yarık Uzunluğu (mm)	3.941	4.047	3.956	4.154	3.900	4.040	4.122	3.890
Eleman #	9	10	11	12	13	14	15	16
Yarık Pozisyonu	0.179	0.164	0.153	0.118	0.078	0.058	-0.087	0.055
Yarık Uzunluğu (mm)	3.997	4.138	3.829	3.909	3.989	4.103	4.119	3.801



**Şekil 17.** (a) Elliot yöntemi ile 3. durum için tasarlanmış ve optimize edilmiş iki farklı 1 x 16 yarık dizisinin ışınım güçlerinin karşılaştırılması. (b) Optimize edilmiş SSTDK üzerindeki 1 x 16 yarık dizisinin H-düzlemindeki ışınım örüntüsü benzetimleri.

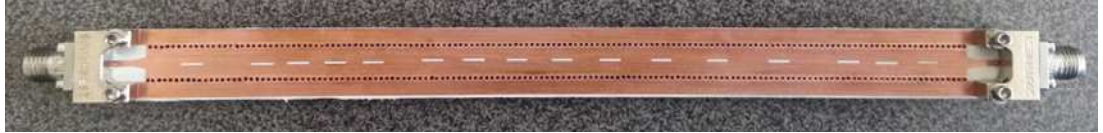
sabit tutulup yarık uzunlukları değiştirilmiştir. Optimize edilmiş yarık uzunlukları, yarık pozisyonları ile birlikte Tablo 2'de listelenmiştir. Optimize edilmiş 1 x 16 dizinin ışınım güç grafiği, optimize edilmeden önceki hali ile Şekil 17 (a)'da karşılaştırılmıştır. Şekil 17 (a)'da gösterildiği gibi optimizasyon sonucunda %70 ışınım güç bandında yaklaşık 200 MHz artış elde edilmiştir. Optimize edilmiş dizinin Şekil 17 (b)'de gösterilen H-düzlemi ışınım örüntülerine bakıldığında SLL'nin optimizasyon sonucunda -10 dB civarına çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 14'de yarık elemanları +y yönüne ışınım yapacak şekilde simetrik olarak dizilmiştir. Optimize edilmiş dizi benzetimlerinde ise uyumlu yüke en yakın olan ilk yarık elemanı  $\phi = 4.57^\circ$ 'ye, son yarık elemanı  $\phi = 80.57^\circ$ 'ye konumlandırılmıştır. Bu nedenle Şekil 15 (b) ve Şekil 17 (b)'de 25 GHz için gösterilen ışınım örüntüsü grafiklerinde ana huzme yönleri farklıdır. Optimize edilmiş dizide -10 dB SLL kabul edilebilir seviyededir ve bu nedenle her biri optimize edilmiş 1 x 16 yarık dizisi içeren 4 adet SSTDK dizisi oluşturularak 4 x 16 yürüyen yarık dizisi elde edilmiştir.

### 2.6.1. 1 x 16 Yarıklı SSTDK Dizisi Üretim ve Ölçüm Sonuçları

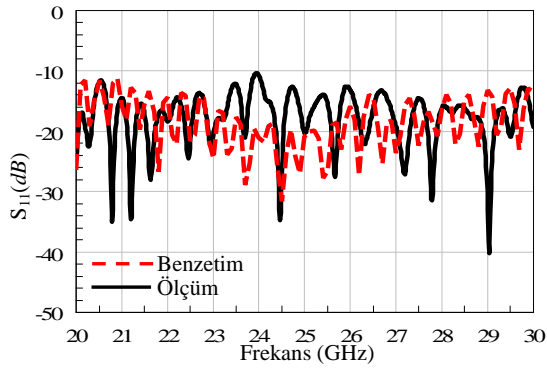
Elliot tasarım yöntemi ile tasarlanmış ve optimize edilmiş, Tablo 2'de yarık pozisyonları ve uzunlukları belirtilen 1 x 16 yarık dizisi PCB üretim süreci ile üretilmiştir. Üretilen yarıklı STDK dizisi Şekil 18 (a)'da gösterilmiştir. Dizinin ölçülen  $S_{11}$  ve  $S_{21}$ -parametresi sonuçları sırası ile Şekil 18 (b) ve (c)'de benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Konektör etkilerinin hesaba katıldığı benzetim sonuçlarının ölçümler ile uyum içinde olduğu gözlenmektedir. Yapının geriye dönüş kaybı 20-30 GHz bandında -10 dB'nin altındadır. Ölçüm ve benzetimlerde  $S_{11}$  değeri yaklaşık -20 dB'dir.

Üretilen 1 x 16 yarıklı STDK dizisinin ışınım örüntüleri, Şekil 19'da gösterilen ölçüm düzeneği kullanılarak yankısız odada 24-26 GHz arasında 0.5 GHz'lik frekans aralıkları ile ölçülmüştür. Ölçümler 1°lik açı adımları ile gerçekleştirilmiştir. Ölçülen H-düzlemi ışınım örüntüleri Şekil 20'de

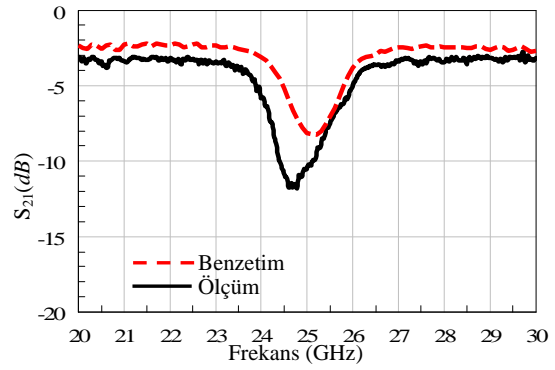
benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 20 (a), (b), (c), (d) ve (e)'de sırası ile 24, 24.5, 25, 25.5 ve 26 GHz frekanslarından alınan ölçümler benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 20 (f)'de ise ana huzme pozisyonları karşılaştırılmıştır. Şekil 20'de benzetimler ile ölçümler arasında oldukça iyi uyum elde edilmiştir. Frekansın 24 GHz ile 26 GHz arasında değiştirilmesi sonucunda, ana huzmede H-düzleminde yaklaşık  $10^\circ$  ana huzme taraması sağlanmıştır. Şekil 20 (f)'de benzetimler ile ölçümler arasında ana huzme pozisyonlarındaki fark en fazla  $1^\circ$ 'dir. Ölçümlerin  $1^\circ$ 'lik adımlar ile yapıldığı düşünülürse bu fark ölçüm hatası olarak kabul edilebilir. Işınım örüntülerinin HPBW değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan HPBW değerleri ölçülen çapraz polarizasyon seviyeleri ile birlikte Tablo 3'te listelenmiştir. Tablo 3'ten anlaşılacağı gibi ölçümler benzetimler ile uyum içindedir.



(a)



(b)

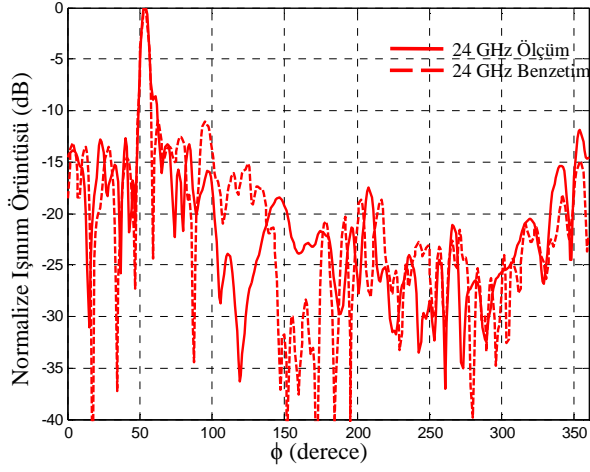


(c)

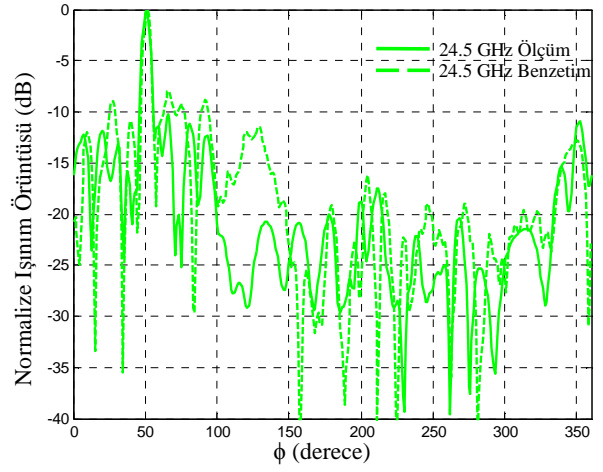
**Şekil 18.** (a) STDK üzerinde 1 x 16 yarıklı dizisi. 1 x 16 Yarıklı STDK dizisinin (b)  $S_{11}$  ve (c)  $S_{21}$  sonuçları.



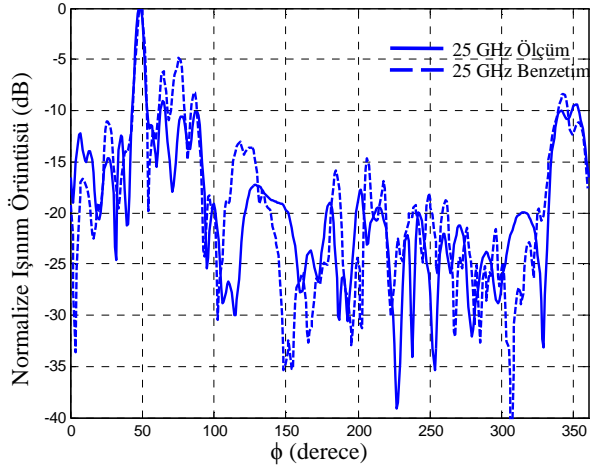
**Şekil 19.** 1 x 16 yarıklı SSTDK dizisinin ölçüm düzeneği ( $R = 10$  cm).



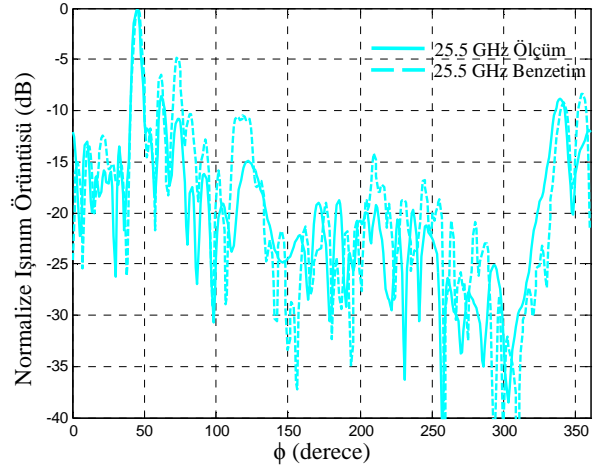
(a)



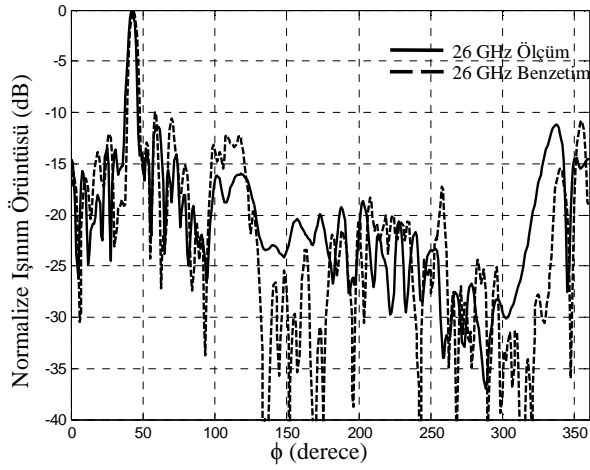
(b)



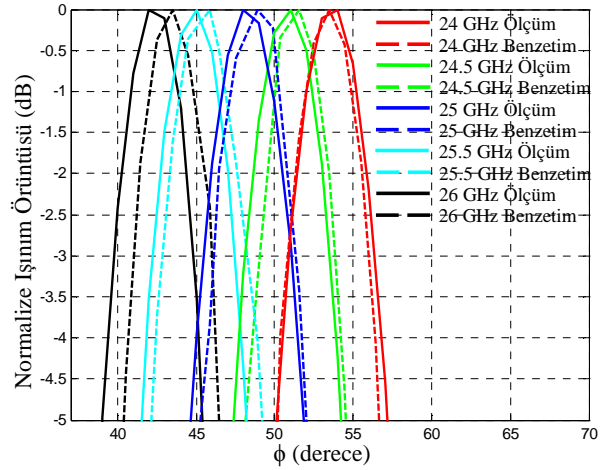
(c)



(d)



(e)



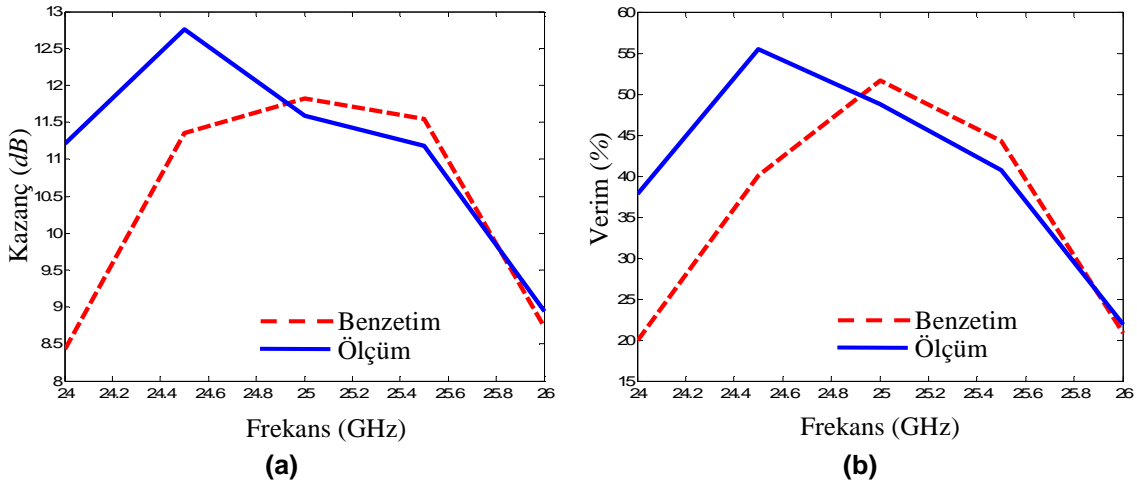
(f)

**Şekil 20.**  $1 \times 16$  yarıkli SSTDK dizisinin ışınım örüntüsü sonuçları ( $R = 10$  cm). (a) 24 GHz, (b) 24.5 GHz, (c) 25 GHz, (d) 25.5 GHz & (e) 26 GHz. (f)  $1 \times 16$  yarıkli SSTDK ( $R = 10$  cm) dizisinin ışınım örüntülerinin ana huzmelerinin karşılaştırılması.

**Tablo 3.** 1 x 16 STDK dizisinin HPBW ve çapraz polarizasyonlarının ölçüm ve benzetim sonuçları.

Frekans (GHz)	HPBW (Ölçüm)	HPBW (Benzetim)	Çapraz-polarizasyon (Ölçüm)	Çapraz-polarizasyon (Benzetim)
24 GHz	5°	5°	-20.63 dB	-19.65 dB
24.5 GHz	5.36°	5.18°	-20.13 dB	-23.00 dB
25 GHz	5.19°	5.59°	-20.21 dB	-22.81 dB
25.5 GHz	4.85°	5.36°	-17.37 dB	-22.72 dB
26 GHz	5.15°	5.47°	-13.46 dB	-18.65 dB

1 x 16 yarık dizisinin kazanç değerleri 24 -26 GHz arasında 0.5 GHz adımlar ile standart kazançlı anten kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 20'de ölçümler ile benzetimler arasında gözlenen iyi uyum sebebi ile benzetimden elde edilen yön seçicilik değerleri verim ölçüm hesaplarında kullanılmıştır. Ölçülen kazanç ve verimlilik değerleri Şekil 21 (a) ve (b)'de benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen ve benzetimlerden elde edilen kazanç değerleri 25 GHz'de sırası yaklaşık 11.58 dB ve 11.8 dB'dir. Bu değerler birbirine oldukça yakındır.



**Şekil 21.** 1 x 16 Yarıklı STDK dizisinin (a) kazanç ve (b) verim sonuçları.

### 3. STDK Güç Bölücü Tasarım Çalışmaları ve Üretim Sonuçları

#### 3.1. Giriş

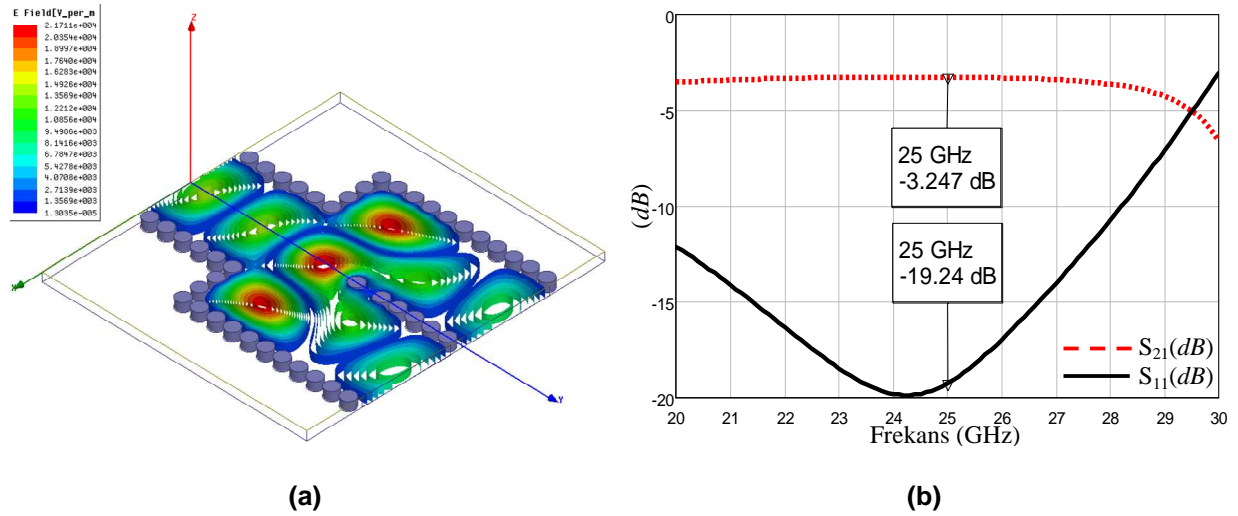
Dalga kılavuzu teknolojisinde, geleneksel ikiye bölen (1 x 2) güç bölücü tasarımları; T-Bağlantı ve Y-Bağlantı olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır. STDK teknolojisinde de geleneksel dalga kılavuzu teknolojisindeki güç bölücü tasarım şekilleri uygunlaştırılarak kullanılabilir (Germain, 2003), (Li, 2010). Literatürde STDK ile tasarlanmış güç bölücülerden bir tanesi, 82-99 GHz frekans aralığında çalışan ve ikiye bölen T-Bağlantı güç bölücüdür (Chen, 2010). Çalışmadan elde edilen sonuçlarda, çalışılan frekans bandında -15 dB dönüş kaybı ( $S_{11}$ ) ve her iki çıkış terminalinde de yaklaşık -3 dB araya girme kaybı ( $S_{21}$ ,  $S_{31}$ ) olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölücü tasarımında STDK kullanımı, geleneksel dalga kılavuzu yapısı ile tasarlanan benzer işlevli yapıya göre boyutları yaklaşık % 50 küçültmüştür. Bir diğer çalışmada, 22-26 GHz frekans bandında çalışan Y-Bağlantı güç bölücü, STDK hibrit bağdaştırıcı ile kullanılmıştır (Xu, 2005). Çalışmadan elde edilen sonuçlarda  $S_{11}$  ve  $S_{22}$  merkez frekansında -20 dB'nin altında ve band içinde en çok 15 dB civarındadır. Yapılan tasarımda, terminaler arasında iyi bir yalıtım olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin  $S_{53}=-37$  dB ve diğer parametreler de istenen teorik değerlere uygunluk göstermektedir. Diğer bir çalışmada, her iki geleneksel yöntem de çalışılmış, 25.7-33 GHz frekans aralığında çalışan T-Bağlantı, ikiye bölen güç bölücü ve 23.8-32 GHz frekans aralığında çalışan Y-Bağlantı, ikiye bölen güç bölücü tasarlanmıştır (Zou, 2011a). İki tasarımda da belirtilen frekans aralıklarında yaklaşık -3 dB  $S_{21}$  ve  $S_{31}$ , -20 dB'nin altında  $S_{11}$  değerleri elde edilmiştir. Bir diğer uygunlaştırılmış yapı ise STDK ve yarım mod substrat tümleşik dalga kılavuzu (YMSTDK) güç bölücü yapısı ile birleştirilmiş, 8.6–12.2 GHz frekans aralığında çalışan, dörde bölen ve -15 dB geri dönüş kaybı olan bir Y-Bağlantı güç bölücü tasarlanmıştır (Zou, 2011b). Benzer özelliklerdeki STDK güç bölücü yapısıyla kıyaslandığında, YMSTDK ile birleştirilen yapı, toplam alanda yaklaşık %50 küçülme sağlamıştır. Bunlara ek olarak, literatürde T-Bağlantı ve Y-Bağlantı tasarım tipini birleştirerek tasarlanmış STDK güç bölücüler de mevcuttur. Bunlardan bir tanesi 8-12 GHz aralığında çalışan, sekize bölen STDK güç bölücüdür (Kazemi, 2011). Bu tasarımın en dikkat çekici özelliği; band boyunca, araya girme kaybının 0.6 dB'den az olmasıdır.  $\pm 4^\circ$ 'den az faz ve  $\pm 0.9$  dB'den az genlik dengesizliği bulunmaktadır. Bu güç bölücü yapısının benzer bir uygulaması, 10 GHz'de çalışan bir Vivaldi anten dizisini (belirgin ölçüde düşük bir besleme kaybına sahiptir) besleme işleminde kullanılmıştır (Kazemi, 2012). Bir diğer çalışmada 10.25-12 GHz frekans aralığında, -15 dB'den daha az dönüş kaybı değeri ile çalışan, on altıya bölen STDK güç bölücü sunulmuştur (Hao, 2006). Ayrıca bu bölücüde  $S_{i1}(i=2,\dots,17)$  değerleri yaklaşık olarak -14.5 dB  $\pm$  0.5 dB olarak ölçülmüştür. STDK kullanımının diğer bir avantajı da, düzlemsel olmasından dolayı çoklu kat yüzey tümleşik olarak kullanabilmesidir. Çoklu kat yüzey tümleşik uygulamalarda, aynı işlevli tek yüzeyli yapıya göre, kullanılan toplam alandan ciddi ölçüde tasarruf edilmektedir (Xie, 2011; Eom, 2009; Mohammadi, 2011). Diğer bir güç bölücü tasarım yöntemi, çoklu mod girişim çoğaltımına dayanan STDK güç bölücü yapısıdır. Bu yapıda tek mod bir giriş dalgası, çoklu mod girişim çoğaltımı ile yapı içerisinde çoklu mod bir dalgaya çevrilip çıkış uçlarına iletilir. Literatürde bu tasarım yöntemiyle yapılmış, 25 GHz altıya bölen ve her çıkış terminalinde yaklaşık -9 dB araya girme kaybı değeri ile çalışan güç bölücü tasarımı mevcuttur (Yang, 2008). Bir diğer güç bölücü tasarım yöntemi ise merkez çevre doğrultulu, merkez beslemeli STDK güç bölücü tasarımıdır. Bu tip STDK güç bölücülerde, daire şeklindeki bölücü, merkezindeki terminalden beslenir. Merkezden çevreye doğru yerleştirilmiş manyetik yalıtım yapıları ile çevre üzerine yerleştirilmiş, merkezden eşit uzaklıktaki çıkış uçlarından bölünmüş güç alınır. Literatürdeki merkez çevre doğrultulu, merkez beslemeli STDK güç bölücü tasarımlarından biri, C band aralığında çalışan, sekize bölen güç bölücü tasarımıdır (Song, 2008). Benzer bir diğer uygulamada ise, dörde bölen bir YMSTDK güç bölücü tasarımı gerçekleştirilmiştir (Yu, 2011).

4x16 SSTDK dizisini beslemek amacı ile 1 x 4 güç bölücü devrelere ihtiyaç vardır. Bu güç bölücülerini oluşturmak amacı ile STDK güç bölücüler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Güç bölücülerin üretimi ve ölçümü aşamasında mikroserit iletim hattından STDK yapısına geçiş gereksiniminden dolayı, tasarlanan yapılarda yansımaları azaltmak amacı ile geçiş yapıları ilave

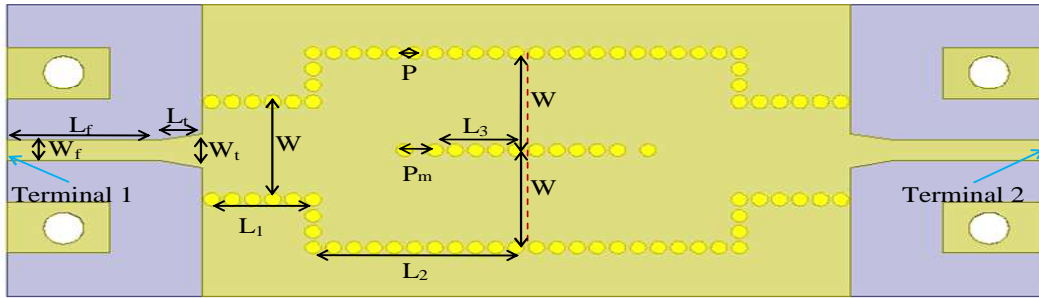
edilmiştir. Bunun yanı sıra, çok sayıda ve birbirine çok yakın mesafelerde bulunan çıkış terminalinin konektör kullanılarak ölçülmesinin getirdiği güçlükten dolayı, yapılar sırt sırta (back-to-back) ekli halde tasarlanarak üretilmiş ve ölçülmüştür. Tasarım parametrelerini gösteren şekillerdeki tüm yapılar kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen yerlerden itibaren simetrik ve aynı değerlere sahiptir.

### 3.2. 1 x 2 Y-Bağlantı Güç Bölücü

Ansys HFSS benzetim programı kullanılarak, bir temel ikiye bölen Y-Bağlantı STDK güç bölücü yapısı (Garmain, 2003; Hao, 2006) tasarlanmıştır. Şekil 22 (a)'da 25 GHz frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi ve Şekil 22 (b)'de benzetim sonucu görülmektedir.

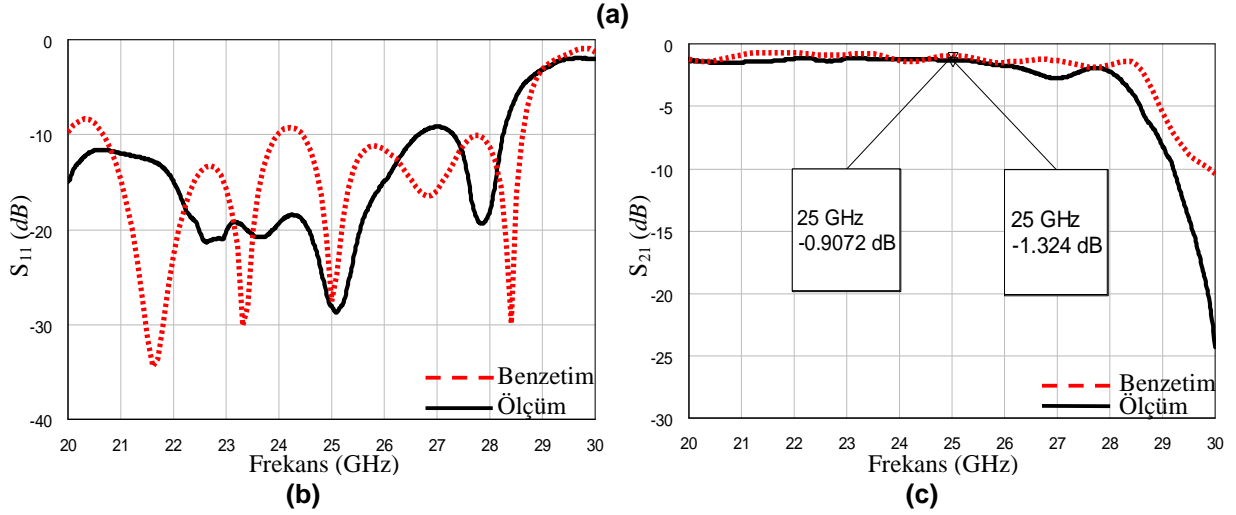
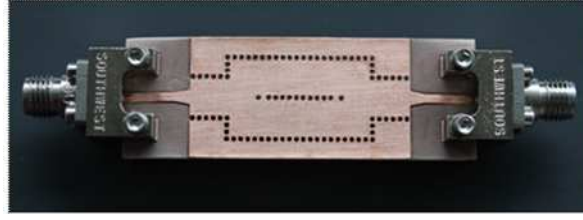


**Şekil 22.** Temel Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a) 25 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi (b) S parametreleri benzetim sonucu.



**Şekil 23.** Temel Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.

Şekil 23'te görüleceği üzere, geçiş yapısı parametrelerinin genişliği  $W_f=2.1\text{mm}$ , uzunluğu  $L_f=2.1\text{mm}$  ve  $50\Omega$  karakteristik empedansa sahip mikroşerit iletim hatlarının uzunluğu  $L_f=7.5\text{mm}$ , genişliği  $W_f=1.25\text{mm}$ 'dir. Yapı  $0.5\text{mm}$  kalınlıkta Rogers 3003 ( $\epsilon_r=3$ ,  $\tan\delta=0.0013 @ 10\text{GHz}$ ) taban malzemesine,  $0.8\text{mm}$  çapında ve  $P=1\text{mm}$ ,  $P_m=1.5$  periyodunda, içi metal doldurulmuş eş özellikli deliklere (via) sahiptir. STDK'nun genişliği  $W=6\text{mm}$  olup,  $L_1=5\text{mm}$ ,  $L_2=11\text{mm}$ ,  $L_3=4\text{mm}$  uzunluklarına sahiptir.

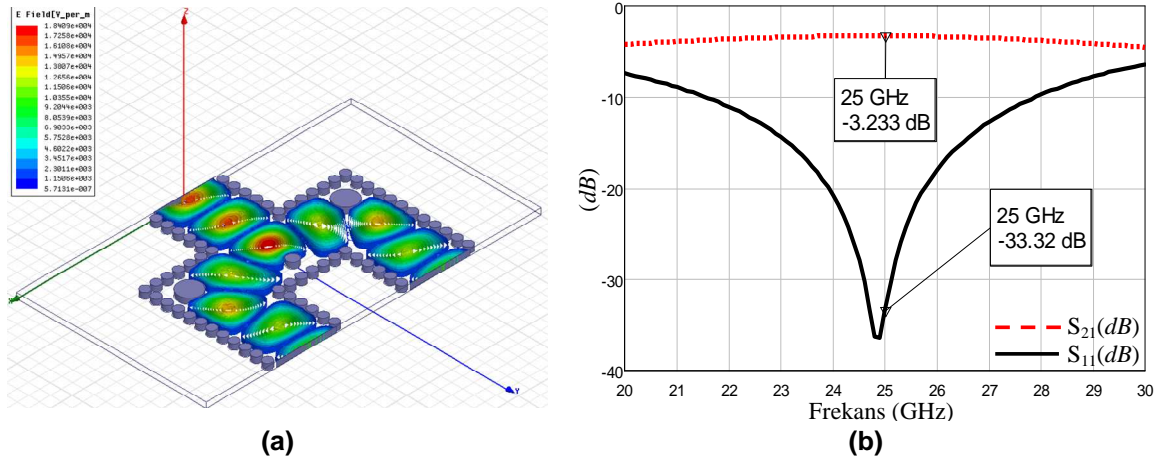


**Şekil 24.** Temel Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a) üretim fotoğrafı (b)  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması (c)  $S_{21}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması.

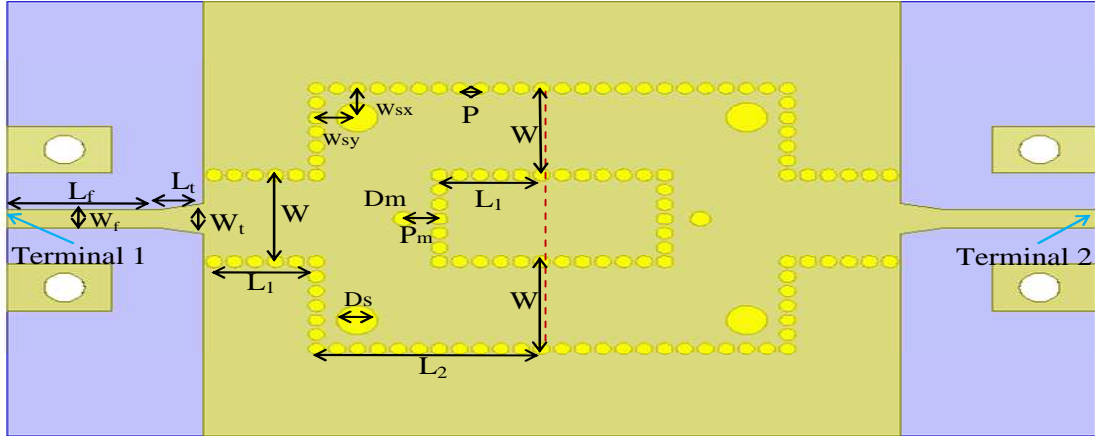
Şekil 24 (a)'da, üretilen güç bölücünün fotoğrafı görülmektedir. Şekil 24 (b) ve (c)'de görülen, Temel Y-Bağlantı İkiye Bölen STDK Güç Bölücü yapısının  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması sonuçları incelendiğinde, tasarlanan yapı ile üretilen yapının geçiş ve dönüş kaybı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Benzetim ve ölçüm sonuçları arasındaki farkın bu kadar az olması, tasarlanan güç bölücü yapısının 25 GHz frekansında çalışmaya uygun olduğunu göstermektedir.

### 3.3. 1 x 2 T-Bağlantı Güç Bölücü

Ansys HFSS benzetim programı kullanılarak, bir temel ikiye bölen T-Bağlantı STDK güç bölücü yapısı (Germain, 2003; Hao, 2006) tasarlanmıştır. Şekil 25 (a)'da 25 GHz frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi ve Şekil 25 (b)'de S parametresi benzetim sonucu görülmektedir.

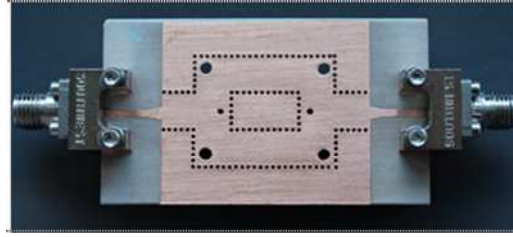


**Şekil 25.** Temel T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a) 25 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi (b) S parametreleri benzetim sonucu.

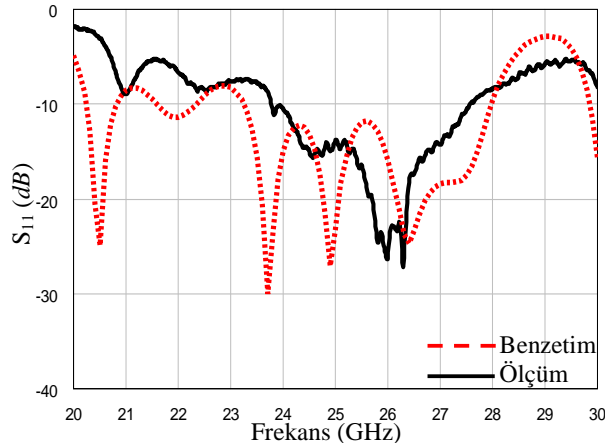


**Şekil 26.** Temel T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.

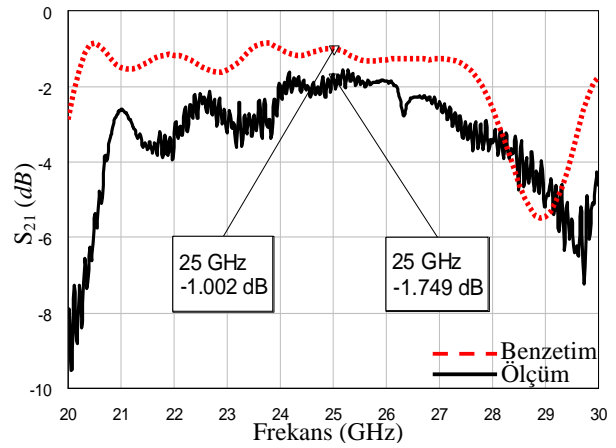
Şekil 26'daki tasarımda, geçiş yapıları ve  $50\Omega$  karakteristik empedansa sahip mikroşerit iletim hatlarının parametreleri bir önceki yapı olan Y-Bağlantı ikiye bölen güç bölücü yapısı ile aynı olup  $W_t=2.1\text{mm}$ ,  $L_f=2.1\text{mm}$ ,  $L_f=7.5\text{mm}$ ,  $W_f=1.25\text{mm}$ 'dir. Bölücüye ait diğer parametreler ise  $W=6\text{mm}$ ,  $L_1=5\text{mm}$ ,  $L_2=11\text{mm}$ 'dir. Taban malzemesi üzerine açılmış, dalga kılavuzunun duvarlarını teşkil eden içi metal doldurulmuş eş özellikli deliklerin çapı  $0.8\text{mm}$  ve periyodu  $P=1\text{mm}$ 'dir. Merkezdeki,  $P_m=1.75\text{mm}$  pozisyonundaki, ayırık deliğin çapı  $D_m=1\text{mm}$  ve iç kenarlarda  $W_{sx}=W_{sy}=2\text{mm}$  pozisyonunda bulunan iki ayırık delik birbiriyle eş özelliklerde olup, çapı  $D_s=2\text{mm}$ 'dir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 27.** Temel T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a) üretim fotoğrafı (b)  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması (c)  $S_{21}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması.

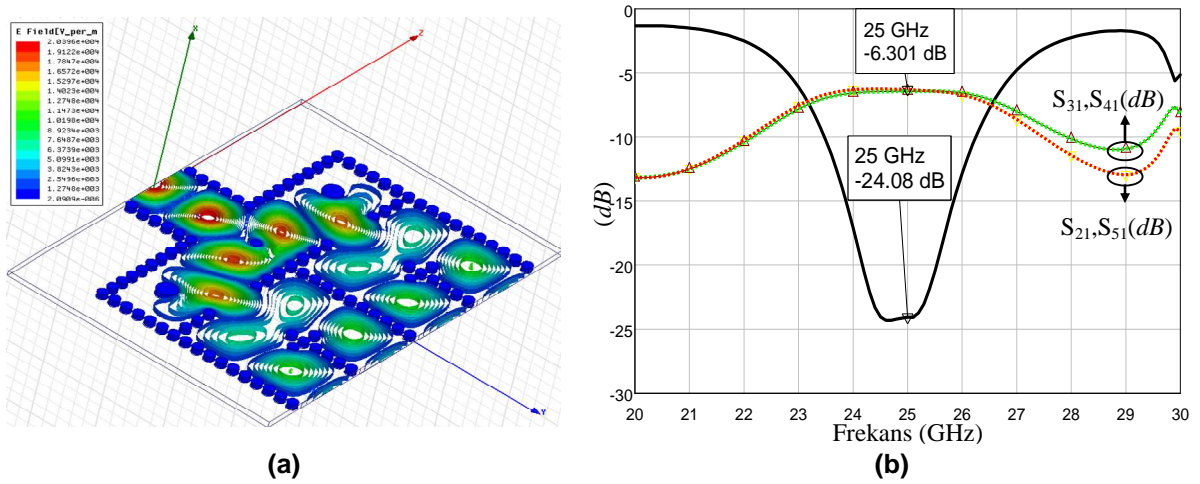
Şekil 27 (a)'da, üretilen güç bölücünün fotoğrafı görülmektedir. Şekil 27 (b) ve (c)'de görülen, Temel T-Bağlantı İkiye Bölen STDK Güç Bölücü yapısının  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması sonuçları incelendiğinde, tasarlanan ve üretilen yapının geçiş ve dönüş kaybı değerlerinin 25 GHz frekansında çalışmaya gayet uygun olduğu söylenebilir.



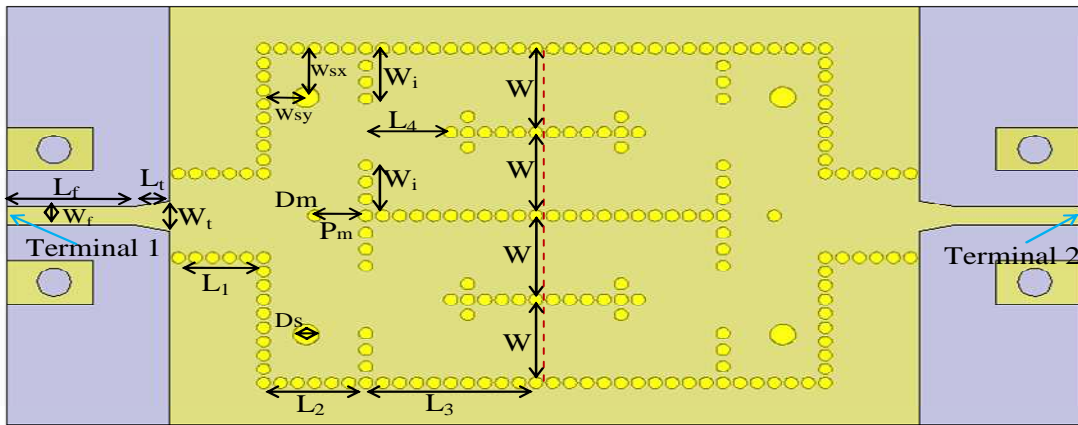
### 3.4. 1 x 4 T & Y-Bağlantı Güç Bölücü

Proje kapsamında tasarlanıp üretilen dizi anten yapısını besleyebilmek için, bir giriş dört çıkış terminaline sahip (1 x 4) dörde bölen STDK güç bölücü yapısına ihtiyaç duyulmuştur. 1 x 4 güç bölücü elde edebilmek amacıyla, herhangi bir temel ikiye bölen (1 x 2) güç bölücünün her bir çıkış terminaline, birer 1 x 2 güç bölücünün giriş terminali ilave edilerek tasarımlar yapılmıştır.

Bu tasarımlardan bir tanesi, bir 1 x 2 T-Bağlantı güç bölücünün çıkış terminallerine birer uygunlaştırılmış 1 x 2 Y-Bağlantı güç bölücü eklenmesi ile oluşturulan 1 x 4 güç bölücü yapısıdır. Bu yapı ile girişten gelen güç önce uygunlaştırılmış yapıda ikiye, daha sonra her bir bölünmüş güç, temel bölücü yapısı ile tekrar ikiye bölünerek, giriş terminalinden gelen gücün dörtte birine yakın bir değer çıkış terminallerinde görülmüştür. Ansys HFSS benzetim programı kullanılarak tasarlanan yapının 25 GHz frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi Şekil 28 (a)'da, S parametreleri benzetim sonucu Şekil 28 (b)'de gösterilmektedir.

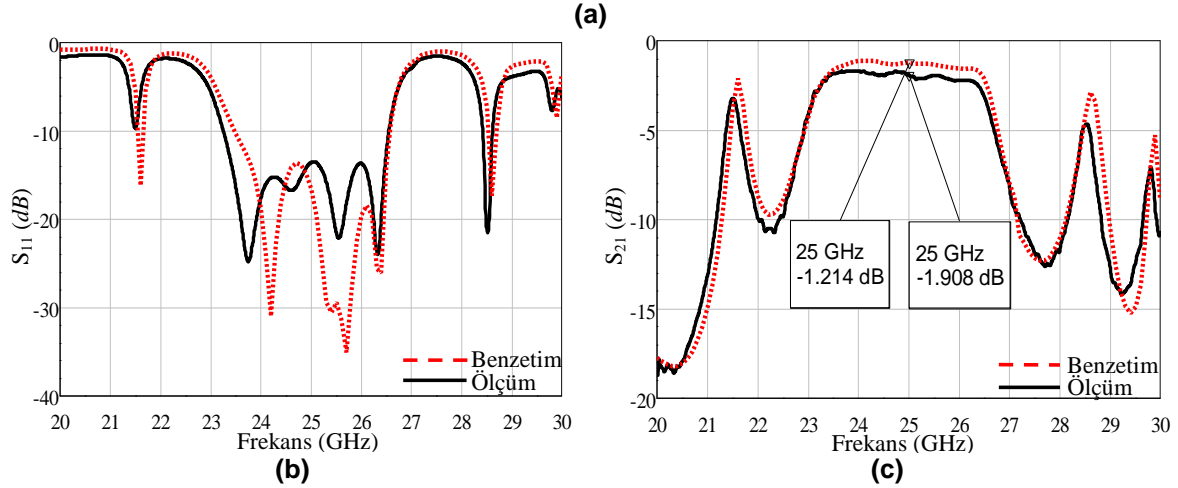
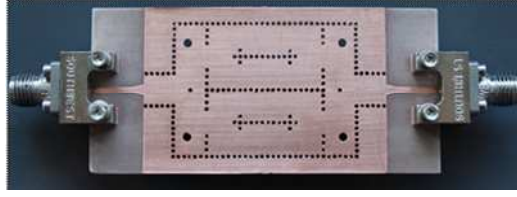


Şekil 28. T & T-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü (a) 25 GHz çalışma frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi (b) S parametreleri benzetim sonucu.



Şekil 29. T & T-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.

Şekil 29'da görülen yapıdaki tasarım parametreleri;  $W_t = 2.1\text{mm}$ ,  $W = 6\text{mm}$ ,  $L_1 = 5\text{mm}$ ,  $L_2 = 6\text{mm}$ ,  $L_3 = 10\text{mm}$ ,  $L_4 = 5\text{mm}$ ,  $L_f = 2.1\text{mm}$ ,  $L_t = 7.5\text{mm}$ ,  $W_f = 1.25\text{mm}$ 'dir. Taban malzemesi üzerine açılmış, dalga kılavuzunun duvarlarını teşkil eden içi metal doldurulmuş eş özellikli deliklerin çapı  $0.8\text{mm}$  ve periyodu  $P = 1\text{mm}$ 'dir. Merkezde,  $P_m = 3\text{mm}$  pozisyonundaki ayırık deliğin çapı  $D_m = 0.8\text{mm}$  ve iç kenarlarda  $W_{sx} = 3.5\text{mm}$ ,  $W_{sy} = 2.5\text{mm}$  pozisyonunda bulunan iki ayırık delik birbiriyle eş özelliklerde olup, çapı  $D_s = 1.5\text{mm}$ 'dir. İlk bölücü tarafındaki deliklerden oluşan girintiler  $W_f = 3.6\text{mm}$  genişliğinde ve periyodu  $1.2\text{mm}$ 'dir.



**Şekil 30.** T & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a) üretim fotoğrafı (b)  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması (c)  $S_{21}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması.

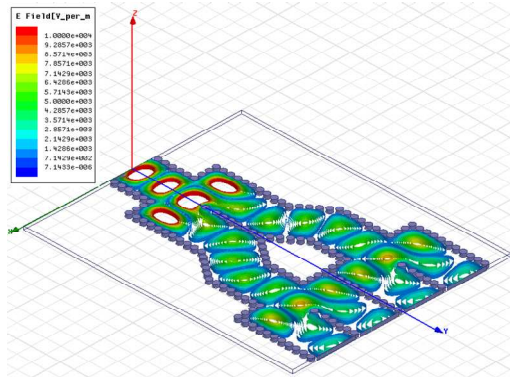
Şekil 30 (a)'da, üretilen güç bölücünün fotoğrafı görülmektedir. Şekil 30 (b) ve (c)'de görülen  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması sonuçları incelendiğinde, tasarlanan ve üretilen yapının geçiş ve dönüş kaybı değerlerinin çalışma frekansında birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca bu yapının, tasarlanan dizi antenin çalışma frekans aralığında çalışmaya oldukça elverişli olması sebebiyle, dizi anten çalışmaları bu 1 x 4 güç bölücü yapısı ile devam ettirilmiş ve besleme kısmı ile bütünleşik (tüm yapı) çalışmaları bu yapının ilavesi ile devam etmiştir. Ancak 1 x 4 STDK Güç Bölücü üzerine araştırma-geliştirme çalışmaları devam ettirilmiş ve farklı türlerde dörde bölen güç bölücü tasarımları da yapılmıştır.

### 3.5. 1 x 4 Y & Y-Bağlantı Güç Bölücü

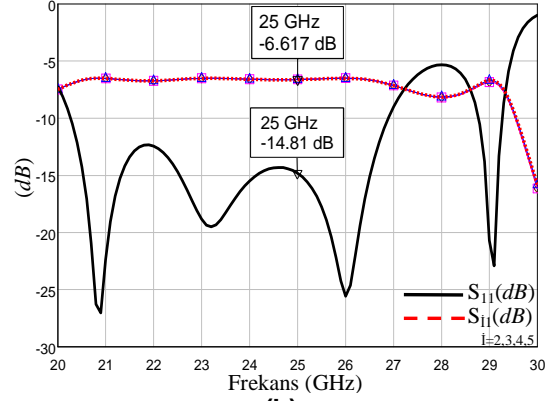
Diğer bir 1 x 4 güç bölücü tasarımı ise, bir 1 x 2 Y-Bağlantı güç bölücünün uygunlaştırılmış her bir çıkış terminallerine birer 1 x 2 Y-Bağlantı güç bölücü eklenmesi ile elde edilen yapıdır. Benzer şekilde bu yapıda da, giriş gücü önce uygunlaştırılmış yapıda ikiye, daha sonra her bir bölünmüş güç temel bölücü yapısı ile tekrar ikiye bölünerek, çıkış terminaline iletilmiştir.

Bu tür bir 1 x 4 bölücü ile daha geniş çalışma frekans bandına sahip olunması amaçlanmıştır. Çalışma frekans bandının genişliği, birçok yapıda olduğu gibi güç bölücüler için de önemli bir özelliktir.

HFSS benzetim programı kullanılarak tasarlanan yapının 25 GHz frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi Şekil 31 (a)'da, S parametreleri benzetim sonucu Şekil 31 (b)'de gösterilmektedir.

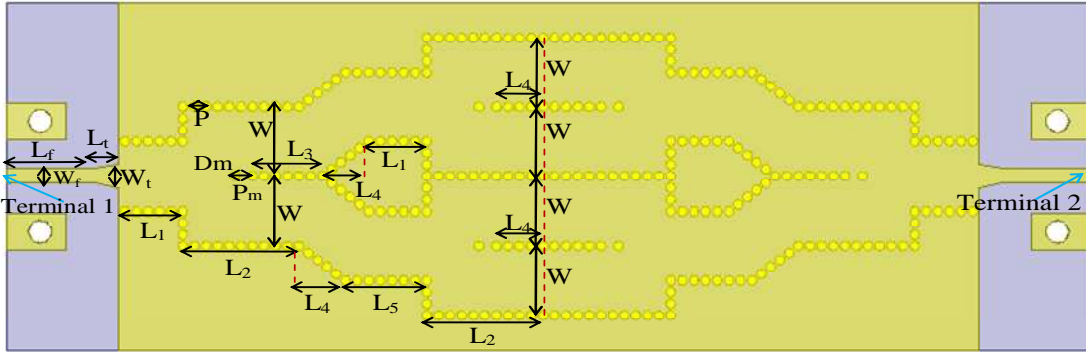


(a)



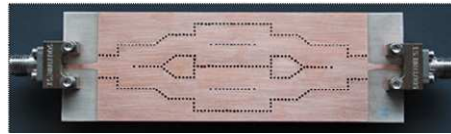
(b)

**Şekil 31.** Y & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç Bölücü (a) Elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi (b) S parametreleri benzetim sonucu.

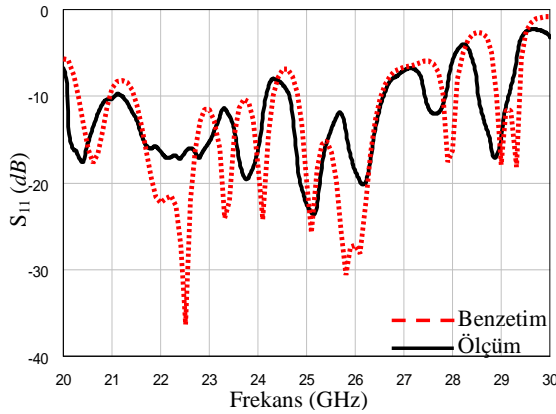


**Şekil 32.** Y & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri.

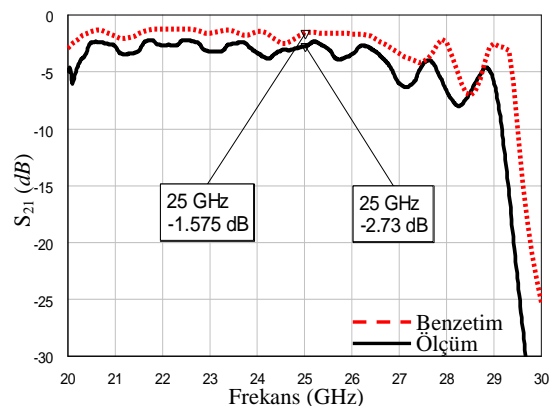
Şekil 32'deki tasarımda, geçiş yapıları ve  $50\Omega$  karakteristik empedansa sahip mikroşerit iletim hatlarının parametreleri bir önceki yapılar ile aynı olup,  $W_t = 2.1\text{mm}$ ,  $L_t = 2.1\text{mm}$ ,  $L_f = 7.5\text{mm}$ ,  $W_f = 1.25\text{mm}$ 'dir. Diğer parametreler ise,  $W = 6\text{mm}$ ,  $L_f = 5\text{mm}$ ,  $L_2 = 10\text{mm}$ ,  $L_3 = 6\text{mm}$ ,  $L_4 = 4\text{mm}$ ,  $L_5 = 7\text{mm}$  değerindedir. Taban malzemesi üzerine açılmış eş özellikli deliklerin çapı  $0.8\text{mm}$  ve periyodu  $P = 1\text{mm}$  ve  $P_m = 1.5\text{mm}$ 'dir.



(a)



(b)



(c)

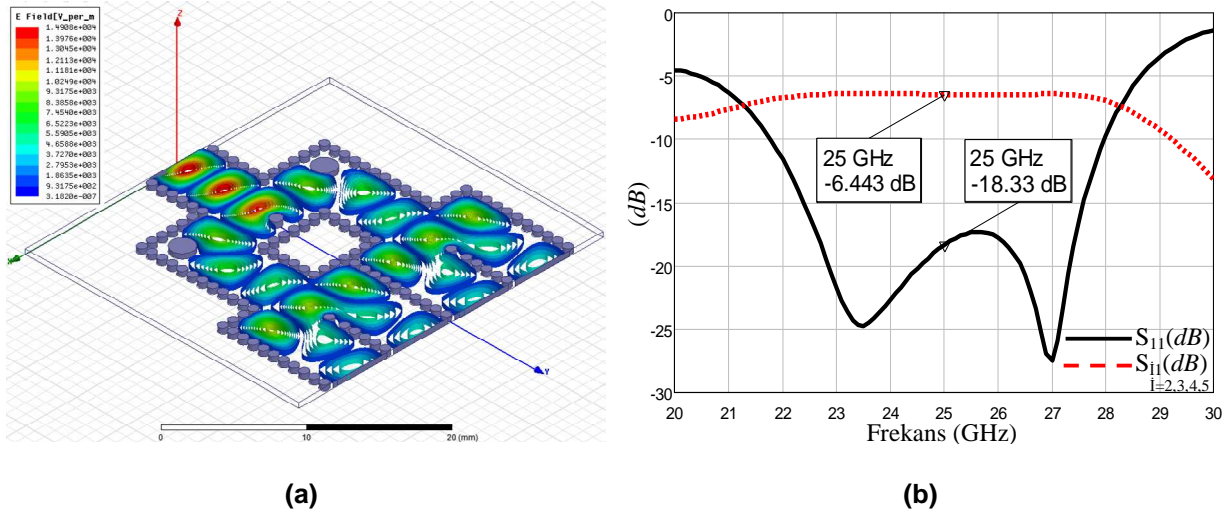
**Şekil 33.** Y & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a) üretim fotoğrafı (b)  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması (c)  $S_{21}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması.

Şekil 33 (a)'da, üretilen güç bölücünün fotoğrafı görülmektedir. Şekil 33 (b) ve (c)'de  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması sonuçlarının tutarlılığı göz önünde bulundurulduğunda, tasarlanan yapının geçiş ve dönüş kaybı değerlerinin 25 GHz frekansında çalışmaya uygun olduğu söylenebilir. Ayrıca bu yapının, iki adet 1 x 2 T-Bağlantı güç bölücü yapısının artarda kullanılmasıyla elde edilen (1 x 4 T & T-Bağlantı Güç Bölücü) tasarımdan daha geniş bir frekans bandına sahip olduğu fakat geçiş kaybının daha yüksek olduğu görülmektedir.

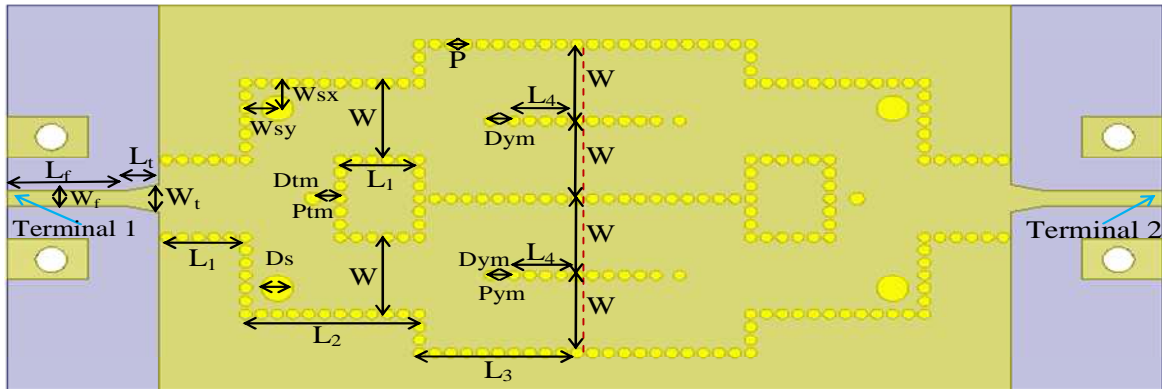
### 3.6. 1 x 4 T & Y-Bağlantı Güç Bölücü

Bu tasarım çalışmasında, geniş çalışma frekans bandına sahip 1 x 4 Y & Y-Bağlantı Güç Bölücü tasarımının getirdiği, nispeten yüksek olan geçiş ( $S_{21}$ ) kaybının azaltılması hedeflenmiştir. 1 X 2 T-Bağlantı Güç Bölücünün, her bir çıkış terminallerine birer 1 x 2 Y-Bağlantı Güç Bölücü ilave edilmesiyle dörde bölen bir güç bölücü tasarlanmıştır.

HFSS benzetim programı kullanılarak, Şekil 34 (a)'da 25 GHz frekansındaki elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi ve Şekil 34 (b)'de S parametreleri benzetim sonucu görülmekte olan dörde bölen T & Y-Bağlantı STDK güç bölücü yapısı (Xie, 2011; Kazemi, 2011) tasarlanmıştır.



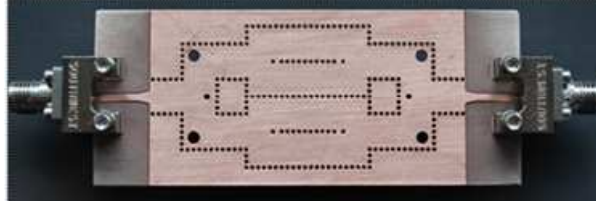
Şekil 34. T & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü (a) elektrik alan (E-field) dağılımı benzetimi (b) S parametreleri benzetim sonucu.



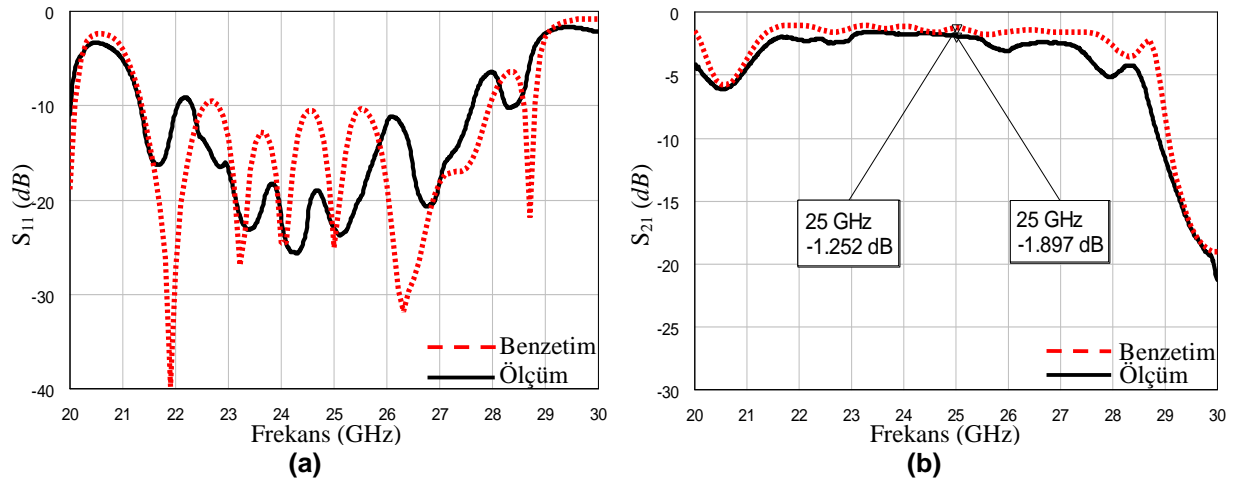
Şekil 35. T & Y-Bağlantı dörde bölen STDK güç bölücü tasarım parametreleri

Şekil 35'teki tasarımda, geçiş yapıları ve  $50\Omega$  karakteristik empedansa sahip mikroşerit iletim hatlarının parametreleri bir önceki yapı olan Y-Bağlantı ikiye bölen güç bölücü yapısı ile aynı olup  $W_t = 2.1\text{mm}$ ,  $L_t = 2.1\text{mm}$ ,  $L_f = 7.5\text{mm}$ ,  $W_f = 1.25\text{mm}$ 'dir. Diğer parametreler ise,  $W = 6\text{mm}$ ,  $L_1 = 5\text{mm}$ ,

$L_2=11\text{mm}$ ,  $L_3=10\text{mm}$ ,  $L_4=4\text{mm}$ , değerindedir. Taban malzemesi üzerine açılmış, dalga kılavuzunun duvarlarını teşkil eden içi metal doldurulmuş eş özellikli deliklerin çapı  $0.8\text{mm}$  ve periyodu  $P=1\text{mm}$ 'dir. Giriş gücü bölücünün merkezinde,  $P_{tm}=1.75\text{mm}$  pozisyonundaki, ayrı deliğin çapı  $D_{tm}=1\text{mm}$  ve iç kenarlarda  $W_{sx}=W_{sy}=2\text{mm}$  pozisyonunda bulunan iki ayrı delik birbiriyle eş özelliklerde olup, çapı  $D_s=2\text{mm}$ 'dir. Her bir çıkış terminaline eklenmiş olan  $1 \times 2$  Y-Bağlantı güç bölücülerin merkezinde,  $P_{ym}=1.5\text{mm}$  pozisyonundaki ayrı deliğin çapı ise  $D_{ym}=0.8\text{mm}$ 'dir.



**Şekil 36.** T & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü üretim fotoğrafı.



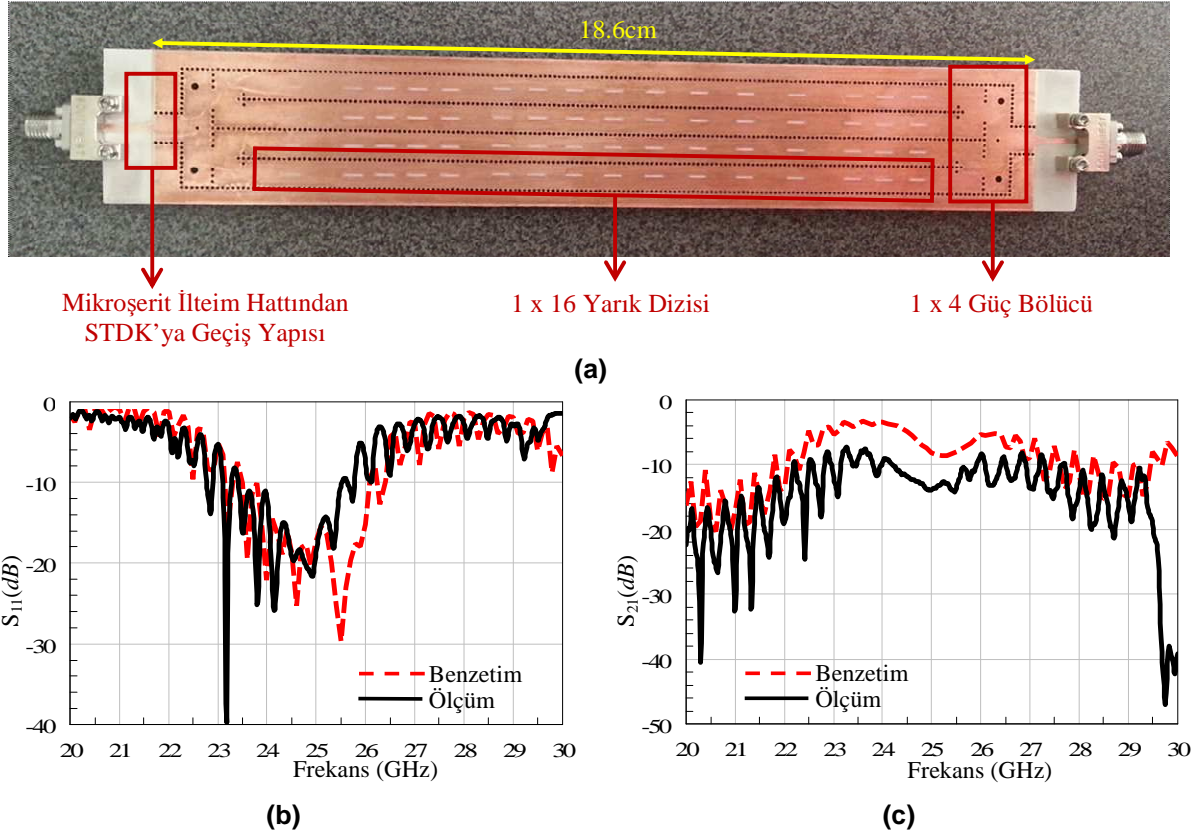
**Şekil 37.** T & Y-Bağlantı ikiye bölen STDK güç bölücü (a)  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması (b)  $S_{21}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması.

Şekil 37 (a)'da, üretilen güç bölücünün fotoğrafı görülmektedir. Şekil 37 (b) ve (c)'de  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  ölçüm ve benzetim karşılaştırması sonuçları incelendiğinde, tasarlanan ve üretilen yapının geçiş ve dönüş kaybı değerlerinin de, diğer denemelerde olduğu gibi uyumlu olduğu görülmektedir.

Bu yapıya ek olarak  $1 \times 4$  Çoklu Mod Güç Bölücü tasarımları yapılmış, fakat band genişliği ve faz uyumu konusunda arzu edilen değerler ulaşılamamıştır. Belirli bir referans frekansında tasarlanan yapıda, STDK genişliğinin aniden artırılması sonucu geniş STDK'da yüksek dereceden modlar oluşmaktadır. Yapının sonuna yerleştirilen dar STDK yapıları bu modları karşılamakta ve bölünen güçleri ayrı kollarda iletmektedir. Dar STDK yapıları, delik (via) dizilerinin pozisyonlarının yüksek derece modun referans frekansındaki durumuna göre tasarlanmaktadır. Frekans değiştiğinde değişen mod yapısı güç bölücü yapısının uygun şekilde çalışmasını engellemektedir.

## 4. 4 x 16 Yarıkli SSTDK Dizisi Üretim ve Ölçüm Sonuçları

Optimize edilmiş 1 x 16 yarıkli STDK dizisi, mikroşerit iletim hattından STDK'ya geçiş yapıları ve 1 x 4 güç bölücü yapıları kullanılarak Şekil 38 (a)'da gösterilen 4 x 16 yarıkli STDK dizisi PCB üretim süreci ile üretilmiştir. Dizinin STDK kısmının uzunluğu 18.6 cm'dir. Geçiş yapılarında kullanılan mikroşerit iletim hattının toplam uzunluğu 6.1 mm'dir. Yapının ölçülen S parametreleri Şekil 38 (b) ve (c)'de benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Benzetimlerde 4 x 16 yarıkli STDK dizisi, R = 10 cm olacak şekilde bir silindir üzerine yerleştirilmiştir ve konektör etkileri hesaba katılmıştır. Şekil 38 (b)'de  $S_{11}$  ölçümleri benzetimler ile uyum içindedir. Şekil 38 (c)'de  $S_{21}$  ölçümlerinin benzetimlerden daha fazla kayıp içerdiği gözlenmiştir. Proje kapsamında üretilen bütün yapılarda, benzetimlerde ölçümlerden daha az kayıp hesaplanmıştır. Özellikle uzun yapılarda bu fark artmaktadır. Ölçümlerde kaybın artmasının sebebi konektörlerin ideal bir şekilde takılmaması ve üretimde karşılaşılan sorunlar olabilir. Üretimde delik içi elektro-kaplama adımları oldukça düzensiz sonuçlar vermektedir. Yarık içermeyen aynı üretimden elde edilen aynı yapının iki ayrı örneğinde, elektriksel performansın birinde iyi diğerinde kötü olduğu gözlenmiştir. Bu gözlem, elektro-kaplama adımında taban malzemenin her yerinin aynı oranda bakır ile kaplanmadığını göstermektedir. Özellikle 4 x 16 yarıkli STDK gibi büyük yapılarda, elektro-kaplama adımında yaşanan bu sorundan dolayı çalışan bir örnek elde etmek oldukça zor olmuştur. İyi bakır kaplanamayan delikler STDK içinde kayıpları arttıran bir etkiye sahiptir. Şekil 38 (c)'de  $S_{21}$  benzetimleri ile ölçümler arasında kayıp miktarı açısından fark olsa da grafiklerin davranışları hemen hemen aynıdır. Bu antenler daha iyi bir performans elde edilebilmesi için PCB üreten bir firmaya da ürettirilmiştir. Fakat, firma tarafından üretilen yapıların çok daha kötü sonuçlar verdiği gözlenmiştir.



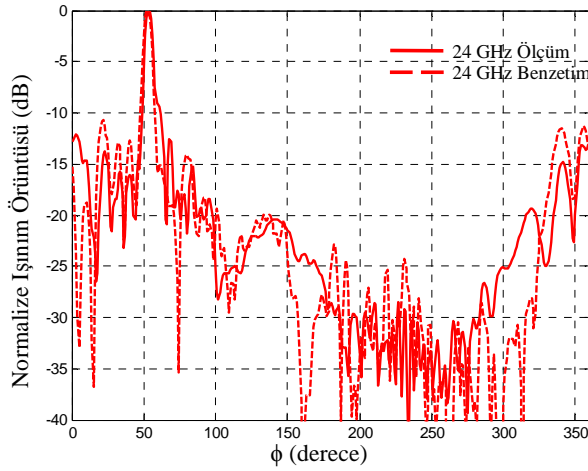
Şekil 38. (a) STDK üzerinde 4 x 16 yarık dizisi. (b) & (c) Yarıkli STDK'nın S parametresi sonuçları.

Üretilen 4 x 16 yarıkli STDK dizisinin ışınım örüntüleri, Şekil 39'da gösterilen ölçüm düzeneği kullanılarak yankısız odada 24-26 GHz arasında 0.5 GHz'lik frekans aralıkları ile ölçülmüştür.

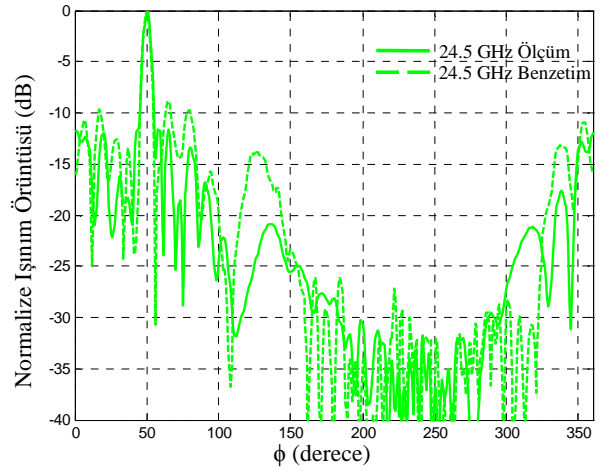
Ölçümler 1°lik açı adımları ile gerçekleştirilmiştir. Ölçülen H-düzlemi ışınım örüntüleri Şekil 40 ve Şekil 41'de benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 40'da 24 GHz ve 24.5 GHz'de, Şekil 41'de ise 25 GHz, 25.5 GHz ve 26 GHz'de ışınım örüntüsü ölçümleri belirtilmiştir. Işınım örüntüsü ölçümleri ile benzetimler arasında oldukça iyi uyum elde edilmiştir. Şekil 41 (d)'de ölçülen ve benzetimler ile elde edilen ana huzme pozisyonları hemen hemen aynıdır. Ölçülen yan huzme seviyeleri genel olarak benzetimlere yakındır. Oluşan ufak farklılıklar dizinin yerleştirildiği silindirin köpük malzemeden elde edilmiş olmasından kaynaklanabilir. Silindirik köpük yüzeyin oluşturulması esnasında pürüzler oluşmuştur. Bu pürüzler antenin yüzeye ideal yerleştirilmesini etkileyebilir ve yan huzme seviyelerinde ufak farklılıklara sebep olabilir. Frekansın 24 GHz ile 26 GHz arasında değiştirilmesi sonucunda, yaklaşık 10° ana huzme taraması sağlanmıştır. Işınım örüntülerinin HPBW değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan HPBW değerleri, ölçülen çapraz polarizasyon seviyeleri ile birlikte Tablo 4'te listelenmiş ve benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4'te ölçümler ile benzetimler arasında uyum gözlenmektedir.



**Şekil 39.** 4 x 16 yarıkli STDK dizisinin ölçüm düzeneği ( $R = 10$  cm).

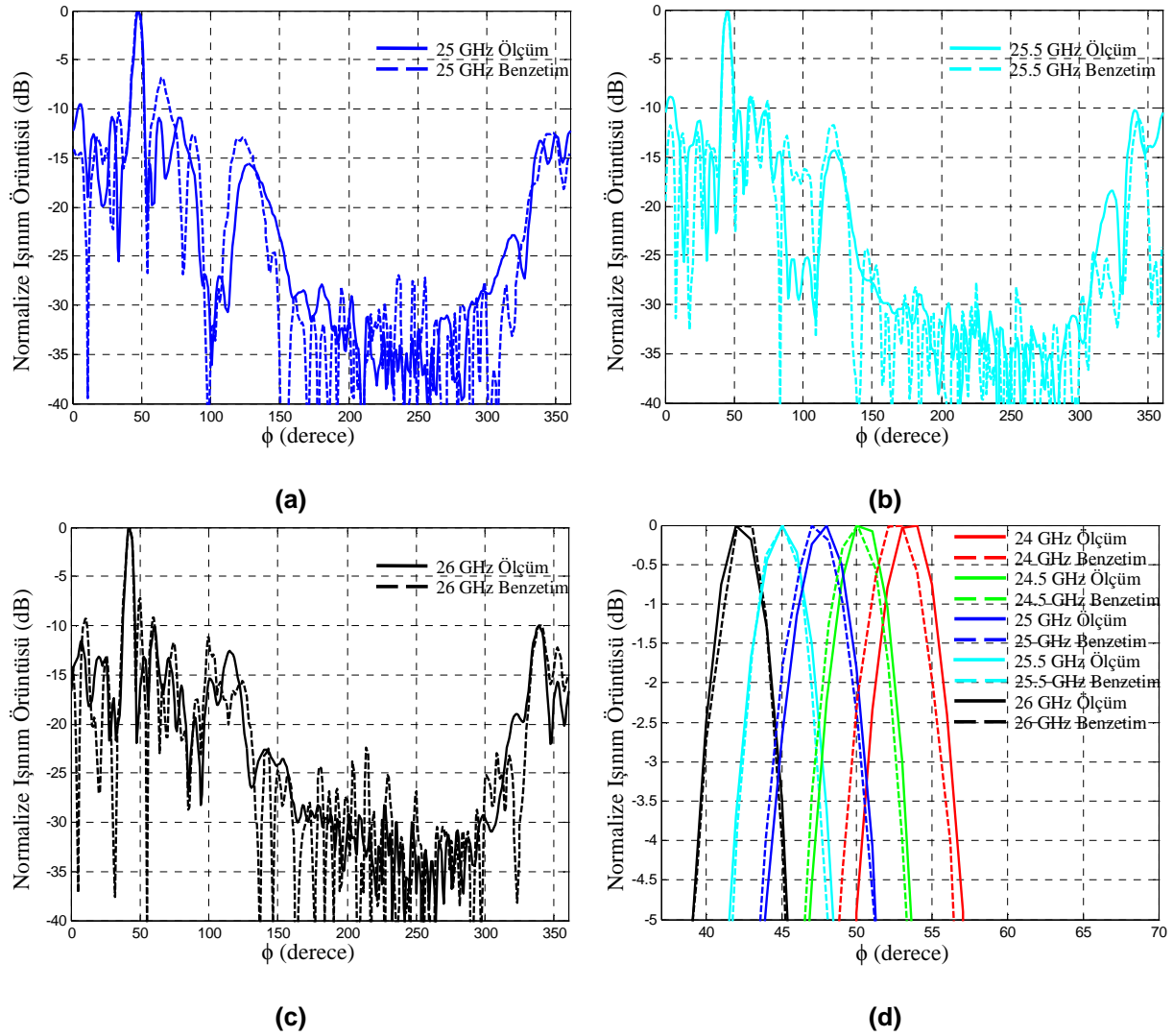


**(a)**



**(b)**

**Şekil 40.** 4 x 16 yarıkli SSTDK dizisinin ışınım örüntüsü sonuçları ( $R = 10$  cm). (a) 24 GHz & (b) 24.5 GHz.



**Şekil 41.** 4 x 16 yarıkli SSTDK dizisinin ışınım örüntüsü sonuçları ( $R = 10$  cm). (a) 25 GHz, (b) 25.5 GHz & (c) 26 GHz. (d) 4 x 16 yarıkli SSTDK ( $R = 10$  cm) dizisinin ışınım örüntülerinin ana huzmelerinin karşılaştırılması.

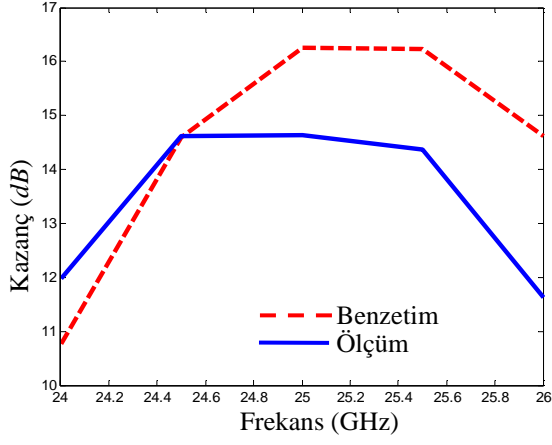
4 x 16 yarık dizisinin kazanç değerleri 24-26 GHz arasında 0.5 GHz adımlar ile standart kazançlı anten kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 41'de ölçümler ile benzetimler arasında gözlenen iyi uyum sebebi ile benzetimden elde edilen yön seçicilik değerleri verim ölçüm hesaplarında kullanılmıştır. Ölçülen kazanç ve verimlilik değerleri Şekil 42'de benzetimler ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen ve benzetimlerden elde edilen kazanç değerleri 25 GHz'de sırası ile yaklaşık 16 dB ve 14.5 dB'dir. Daha önce bahsedildiği gibi düzensiz elektro-kaplama adımı sebebi ile artan kayıplar, ölçülen kazanç değerlerinin bir miktar düşürmüştür. Kazanç değerleri arasında 25 GHz'de 2.5 dB fark olsa da kazanç ve verim grafiklerinde, ölçüm ve benzetimlerin frekans ile değişimleri uyumludur ve 24 GHz, 24.5 GHz gibi frekanslarda benzetimler ölçümler ile yaklaşık olarak aynı sonucu vermektedir.

**Tablo 4.** 4 x 16 STDK dizisinin HPBW ve Çapraz polarizasyonlarının ölçüm ve benzetim sonuçları.

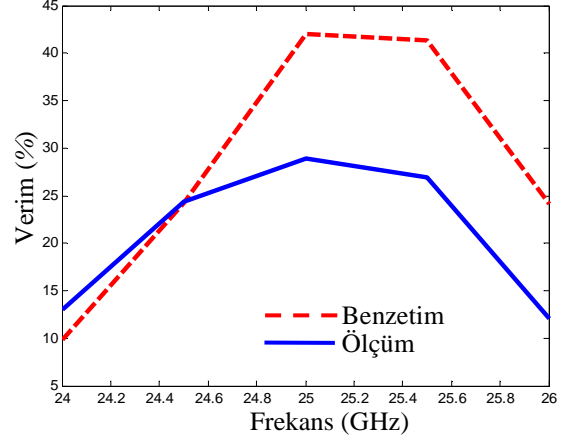
Frekans (GHz)	HPBW (Ölçüm)	HPBW (Benzetim)	Çapraz-polarizasyon (Ölçüm)	Çapraz-polarizasyon (Benzetim)
24 GHz	5.92°	5.49°	-21.56 dB	-18.48 dB
24.5 GHz	5.39°	5.34°	-23.44 dB	-24.84 dB



<b>25 GHz</b>	5.79°	5.75°	-24.23 dB	-23.90 dB
<b>25.5 GHz</b>	4.91°	5.36°	-23.36 dB	-23.35 dB
<b>26 GHz</b>	4.77°	4.96°	-17.51 dB	-20.57 dB



(a)



(b)

**Şekil 42.** 4 x 16 yarıklı STDK dizisinin (a) kazanç ve (b) verim sonuçları.

## 5. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Gelecek Çalışmalar

Proje kapsamında güvenlik görüntüleme sistemlerinde kullanılacak, frekans taramalı yürüyen dalga 4 x 16 yarıklı STDK dizisi, silindirik bir yüzey üzerinde 25 GHz'de tasarlanmıştır. Tasarlanan anten dizisi, baskı devre kartı (PCB) üretim süreci ile ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında üretilmiş ve yankısız odada ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre frekansın 24 GHz ile 26 GHz arasında değiştirilmesi sonucunda, 10° ana huzme taraması elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu proje kapsamında literatürde ilk kez silindirin çevresine sarılan bir yarıklı SSDK dizi anteni tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Benzetim sonuçları ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak tasarımın doğrulanması yapılmıştır.

Ayrıca, proje kapsamında iletim hattından STDK'ya geçiş yapısı ve STDK güç bölücü yapıları tasarlanmış ve bunlar dizi anten yapısında kullanılmıştır. Besleme devreleri, dizi anteni ile tektaş (monolithic) olarak aynı üretim sürecinde üretilmiş ve özellikle milimetre dalga frekanslarında sorun yaratan, yapıların ayrı ayrı birleştirilmesinden kaynaklanabilecek parazit etkiler önlenmiştir. Ayrıca STDK yapılarının dalga kılavuzu teknolojisi ile mikroşerit anten teknolojisinin avantajlarını barındırdığı düşünüldüğünde, STDK dizi antenlerinin yüzey uyumlu anten uygulamaları için oldukça uygun olduğu görülmektedir.

Bu proje süresince delik içi kaplama dahil baskı devre yöntemleriyle STDK yapılarının üretimi konusunda deneyim kazanılmıştır.

Proje kapsamında yapılan çalışmalardan iki uluslararası konferans bildirisi sunulmuş ve yayınlanmış, bir makale değerlendirilmek üzere *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* dergisine gönderilmiştir. Proje bursiyerlerinden Ömer Bayraktar'ın doktora tezinin, Orçun Kiriş'in yüksek lisans tezinin önemli bir kısmı bu projede yaptıkları çalışmalardan oluşmaktadır. Proje kapsamında COST IC1102-VISTA toplantılarına katılmış; proje çalışmaları bu toplantılarda sunulmuştur. COST aksiyonunun yılda iki kez düzenlenen yönetim kurulu ve çalışma grupları çalıştayının üçüncüsü, Eylül 2012 tarihinde diğer Türkiye delegesi Sabancı Üniversitesinden Prof. Dr. İbrahim Tekin'le birlikte, İstanbul'da başarıyla düzenlenmiştir.

Bu projede yapılan çalışmaların devamı olarak aşağıda sıralanan araştırma geliştirme çalışmaları yapılabilir:

- Sunulan anten yapısında, STDK silindirin çevresel yönü doğrultusunda uzanmaktadır. Bu antenle elde edilen tarama aralığı, antenin silindir etrafında olması nedeniyle dardır. Tarama bölgesini genişletmek için, SSDK üzerinde sızıntı anten dizileri (leaky wave antenna) tasarlanıp geliştirilebilir.
- Tasarlanan antenin kullanımında ışınım örüntüsünü bozmadan anteni dış etkenlerden koruyacak anten kaportası (radome) tasarlanıp üretilebilir.
- Silindirin çevresine sarılmış yarıklı dalga kılavuzu üzerinde yarıklar arası bağlaşımın hesaplanabilmesi için sayısal yöntemler geliştirilebilir.

## 6. REFERANSLAR

- BAYRAKTAR, O., Civi, O. A., Slots on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Chicago-Illinois-ABD, (2012), pp:1-2.
- BAYRAKTAR, Ö., Çivi, Ö. A., Slindirik Yüzey Tümeleşik Dalga Kılavuzu Üzerinde Yarık Modellemesi, VI. URSI-Türkiye'2012 Bilimsel Kongresi, İstanbul-Türkiye, (2012), pp:1-3.
- BAYRAKTAR, O., Civi, O. A., Slot Array on Curved Substrate Integrated Waveguide, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Orlando-Florida-ABD, (2013), pp.1-2.
- CHEN, K., Yan, B., Xu, R., A Novel W-Band Ultra-Wideband Substrate Integrated Waveguide (SIW) T-junction Power Divider, International Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE), Nankin-Çin, (2010), pp: 1-3.
- CHENG S., Yousef H., Kratz H., 79 GHz Slot Antennas Based on Substrate Integrated Waveguides (SIW) in a Flexible Printed Circuit Board, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 57, 1, 64-71, (2009).
- CHENG Y. J., Hong W., Wu K., Kuai Z.-Q., Yu C., Chen J. X., Zhou J. -Y., Tang H.-J., Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman Lens and Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 56, 8, 2504-13, (2008).
- CHENG Y. J., Xu H., Ma D., Wu J., Wang L., Fan Y., Millimeter-Wave Shaped-Beam Substrate Integrated Conformal Array Antenna, IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 61, 9, 4558-66, (2013).
- DESLANDES D., Wu K., Integrated Microstrip and Rectangular Waveguide in Planar Form, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 11, 2, 68-70, (2001).
- DJERAFI T., Wu K., A Low-Cost Wideband 77-GHz Planar Butler Matrix in SIW Technology, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60, 10, 4949-54, (2012).
- ELLIOTT R., An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 31, 1, 48-53, (1983).
- ELLIOT, R. S., Antenna Theory and Design, ed: Stamatios V. Kartalopoulos, 1, IEEE Press, Piscataway, (2003), pp: 95 ve 408-10.
- EOM D.-S., Byun J., Lee H-Y, Multilayer Substrate Integrated Waveguide Four-Way Out-of-Phase Power Divider, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 57, 12, 3469-76, (2009).
- ERTÜRK V. B., Güner B., Analysis of Finite Arrays of Circumferentially Oriented Printed Dipoles on Electrically Large Cylinders, Microwave and Optical Technology Letters, 42, 4, 299-304, (2004).
- FAN G.-X., Jin J.-M., Scattering From a Cylindrically Conformal Slotted Waveguide Array Antenna, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 45, 7, 1150-9, (1997).
- GERMAIN, S., Deslandes, D., Wu, K., Development of Substrate Integrated Waveguide Power Dividers, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Montreal-Kanada, (2003), pp: 1921-4.
- HAO, Z. C., Hong, W., Li, H., Zhang, H., Wu, K., Multiway Broad-Band Substrate Integrated Waveguide (SIW) Power Divider, IEEE AP-S Int. Symp., Washington-ABD ,(2005), pp: 639-42.
- HIROKAWA J., Ando M., Single-layer Feed Waveguide Consisting of Posts for Plane TEM Wave Excitation in Parallel Plates, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 46, 5, 625-30, (1998).

- HOSSEININEJAD S.E., Komjani N., Optimum Design of Traveling-Wave SIW Slot Array Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61, 4, 1971-5, (2013).
- JOSEFSSON, L., Persson, P., Conformal Array Antenna Theory and Design, ed: Mohamed E. El-Hawary, 1, IEEE Press, Piscataway, (2006), Pp: 156.
- KAZEMI, R., Sadeghzadeh, R.A., Fathy, A., A New Compact Wide Band 8-way SIW Power Divider at X-Band, *Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough-Ingiltere, (2011), pp: 1-4.
- KAZEMI, R., Fathy, A.E., Sadeghzadeh, R.A., Ultra-Wide Band Vivaldi Antenna Array Using Low Loss SIW Power Divider and GCPW Wide Band Transition, *Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Santa Clara-ABD,(2012), pp: 39-42.
- LAI Q.-H., Hong W., Kuai Z.-Q., Zhang Y. S., Wu K., Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Transverse Slot Array Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57, 4, 1064-72, (2009).
- LEWIN, L., Chang, D. C., Kuester, E.F., *Electromagnetic Waves and Curved Structures*, 2, P. Peregrinus IEEE Press, Stevenage, (1977), pp: 36-41.
- LI, J., Dong, T., Design of a Substrate Integrated Waveguide Power Divider That Uses a Neural Network, *2nd International Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET)*, Chengdu-Çin, (2010), pp: V7-448-V7-452.
- LIU B., Hong W., Kuai Z., Yin X., Luo G., Chen J., Tang H., Wu K., Substrate Integrated Waveguide (SIW) Monopulse Slot Antenna Array, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57, 1, 275-9, (2009).
- LIU, Y.-Y., Guo, M., Zhong, S.-S., Conformal Slotted Waveguide Array Antenna, *IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, (2012), Tucson-AZ-ABD, pp: 56-9.
- MOHAMMADI, P., Demir, S., Two Layers Substrate Integrated Waveguide Power Divider, *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, İstanbul-TÜRKİYE*, (2011), pp.1-4.
- NASIMUDDIN N., Chen Z. N., Qing X., Substrate Integrated Metamaterial-Based Leaky-Wave Antenna With Improved Boresight Radiation Bandwidth, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61, 7, 3451-7, (2013).
- SONG K., Fan Y., Zhang Y. , Eight-Way Substrate Integrated Waveguide Power Divider With Low Insertion Loss, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56, 6, 1473-7, (2008).
- TRAILLE, A., Ratner, J., Hopkins, G. D., Tripp, V., Development of a Novel Faceted, Conformal, Slotted-Waveguide Subarray for Sensor Applications with Full 360° Azimuth Tracking Capabilities, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Honolulu-HI-ABD, (2007), pp: 3828-31.
- WESTERMAN C. W., Harrington V. L., Park P. K., Analytic Design of Conformal Slot Arrays, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31, 4, 668-72, (1983).
- XIE, Z., Liu, B., Zhao, Y., Tian, B., Jia, S., A Novel Ka Band Multi-Layer SIW Power Divider, *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Harbin-Çin,(2011), pp: 634-36.
- XU X., Bosisio R. G., Wu K., A New Six-Port Junction Based on Substrate Integrated Waveguide Technology, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53, 7, 267–73, (2005).

XU J., Hong W., Tang H., Kuai Z., Wu K., Half-Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) Leaky-Wave Antenna for Millimeter-Wave Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 85-8, (2008).

XU J.F., Hong W., Chen P., Wu K., Design and Implementation of Low Sidelobe Substrate Integrated Waveguide Longitudinal Slot Array Antennas, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 3, 5, 790-7, (2009).

YAN L., Hong W., Hua G., Chen J., Wu K., Cui T. J., Simulation and Experiment on SIW Slot Array Antennas, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14, 9, 446-8, (2004).

YANG, N., Caloz, C., Wu, K., Substrate Integrated Waveguide Power Divider Based on Multimode Interference Imaging, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta-GA-ABD*, (2008), pp: 883-86.

YU, J., Jiang, Y., Lin, X., Zhu, Z., Fan, Y., A Four-Way Half-Mode SIW Power Divider with Improved Impedance Match, *IEEE 4th International Symposium on Microwave, Antenna and Propagation EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), Pekin-Çin*, (2011), pp: 306-8.

ZOU, M., Yin, Z., Shao, Z., Liu, L., Zhu, X., Design of Ka-band Substrate Integrated Waveguide Power Dividers/Combiners, *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), Chengdu-Çin*, (2011), pp: 361-3.

ZOU X., Tong C.-M., Yu D.-W., Y-Junction Power Divider Based on Substrate Integrated Waveguide, *Electronics Letters*, 47, 25, 1375-6, (2011).

## Ek. Proje Kapsamında Yapılan Yayınlar ve Tezler

### Tezler

1. Ömer Bayraktar, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (beklenen tamamlama tarihi: Haziran 2014)
2. Orçun Kiriş, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (beklenen tamamlama tarihi: Mart 2014)

### Hakemli Dergilere Gönderilmiş Makaleler

3. Bayraktar O., Aydın Civi O. ., Circumferential Traveling Wave Slot Array on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide (CSIW), *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* dergisine değerlendirilmek üzere gönderildi, 2013.

### Uluslararası Konferans Bildirileri

4. Bayraktar, O., Aydın Civi, O., Slots on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Chicago-Illinois-ABD, (2012), pp:1-2.
5. Bayraktar, O., Aydın Civi, O., Slot Array on Curved Substrate Integrated Waveguide, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Orlando-Florida-ABD, (2013), pp.1-2.

### Ulusal Konferans Bildirileri

6. Bayraktar, Ö., Aydın Çivi, Ö., Silindirik Yüzey Tümlüşik Dalga Kılavuzu Üzerinde Yarı Modellemesi, VI. URSI-Türkiye'2012 Bilimsel Kongresi, İstanbul-Türkiye, (2012), pp:1-3.

### Diğer

7. Bayraktar, O., Aydın Civi, O, Longitudinal Slot Characteristics on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide, COST IC1102 VISTA 2<sup>nd</sup> Working Group Meeting and Workshop, İstanbul-Türkiye, (2012)

**TÜBİTAK**  
**COST PROJESİ ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 111R001
<b>Aksiyon No:</b> COST IC 1102 VISTA
<b>Proje Başlığı:</b> Güvenlik Görüntüleme Uygulamaları İçin Frekans Taramalı Silindirik Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu (STDK) Yarık Dizi Anteni Geliştirilmesi
<b>Aksiyon Başlığı:</b> Versatile, Integrated, and Signal-aware Technologies for Antennas
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Özlem Aydın Çivi, Lale Alatan, Şimşek Demir Bursiyerler: Ömer Bayraktar, Orçun Kiriş
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çankaya 06800 Ankara
<b>Varsa Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b>
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 1 Eylül 2011-31 Ağustos 2013
<b>COST Aksiyonu'nun Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> Aralık 2011- Aralık 2015
<b>Öz (en çok 100 kelime)</b> K bant, frekans taramalı, yarıklı silindirik substrat tümlşik dalga kılavuzu (SSTDK yürüten dalga anten dizisi tasarlanmış ve üretilmiştir. Yarıklı substrat tümlşik dalga kılavuzlarının silindirin çevresine sarıldığı bu anten yapısı, bilgimiz dahilinde, literatürde ilk kez bu projede gerçekleştirilmiştir. Her biri optimize edilmiş 1 x 16 yarık dizisi içeren 4 adet SSTDK oluşturularak 4 x 16 yarık dizisi elde edilmiştir. 4 x 16 yarık dizisini beslemek amacı ile substrat tümlşik dalga kılavuzu (STDK) güç bölücü yapıları ve mikroserit iletim hattından STDK'ya geçiş yapıları incelenmiştir. Anten dizisi, baskı devre üretim süreci ile ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında üretilmiş ve yanksız odada ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre frekansın 24 -26 GHz arasında değiştirilmesi sonucunda, yaklaşık 10° ana huzme taraması elde edilmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Yüzey Uyumlu Anten Dizileri, Yarıklı Dalga Kılavuzu Anteni, Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu Anteni, Substrat Tümlşik Dalga Kılavuzu Güç Bölücü
<b>COST Aksiyonu Kapsamında İşbirliği Ağına Dâhil Olan Araştırmacılarla Birlikte Yapılan Ortak Etkinlikler ve Geri Kazanımları:</b> COST aksiyonunun yılda iki kez düzenlenen yönetim kurulu ve çalışma grupları çalıştayının üçüncüsü, Eylül 2012 tarihinde diğer Türkiye delegesi Sabancı Üniversitesinden Prof. Dr. İbrahim Tekin'le birlikte, İstanbul'da başarıyla düzenlenmiştir ( <a href="http://www.cost-vista.eu/events/3rd-mc-and-wg-meeting/">http://www.cost-vista.eu/events/3rd-mc-and-wg-meeting/</a> ) COST VISTA araştırmacılarından Prof. Dirk MANTEUFFEL ve öğrencisi ile RF MEMS faz kaydırıcı geliştirilmesi konusunda işbirliği yapılmaktadır. Çalışma sonucunda ortak yayın yapılacaktır. COST VISTA projeleri kapsamında oluşturulan Teknoloji Platformlarına yüzey mikroişleme teknolojisi ile anten ve RF MEMS bileşeni üretme olanakları ile katkı yapılmış ve bu platform kullanılarak diğer araştırmacılarla ortak işler yapılması planlanmaktadır. Teknoloji platformları henüz toplanma aşamasında olduğundan COST VISTA araştırmacılarına açılmamıştır. Önümüzdeki aylarda bu kapsamda işbirlikleri öngörülmektedir.
<b>COST Aksiyonu Kapsamında İşbirliği Ağına Dâhil Olan Araştırmacılarla Birlikte Yapılan Ortak Projeler / Yayınlar:</b>
<b>Projenin Yapılan Diğer Yayınlar ve Tezler:</b>  Hakemli Dergilere Gönderilmiş Makaleler 1. Bayraktar O., Aydın Civi O. ., Circumferential Traveling Wave Slot Array on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide (CSIW), IEEE Transactions on Antennas and Propagation dergisine değerlendirilmek üzere gönderildi, 2013.  Uluslararası Konferans Bildirileri 1. Bayraktar, O., Aydın Civi, O., Slots on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Chicago-Illinois-ABD, (2012), pp:1-2.

2. Bayraktar, O., Aydın Civi, O., Slot Array on Curved Substrate Integrated Waveguide, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Orlando-Florida-ABD, (2013), pp.1-2.

Ulusal Konferans Bildirileri

1. Bayraktar, Ö., Aydın Çivi, Ö., Silindirik Yüzey Tümlleşik Dalga Kılavuzu Üzerinde Yarı Modellemesi, VI. URSI-Türkiye'2012 Bilimsel Kongresi, İstanbul-Türkiye, (2012), pp:1-3.

Diğer

1. Bayraktar, O., Aydın Civi, O., Longitudinal Slot Characteristics on Cylindrical Substrate Integrated Waveguide, COST IC1102 VISTA 2nd Working Group Meeting and Workshop, İstanbul-Türkiye, (2012)

Tezler

1. Ömer Bayraktar, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (beklenen tamamlama tarihi: Haziran 2014)  
2. Orçun Kiriş, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (beklenen tamamlama tarihi: Mart 2014)

**Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu?**

**Evet**

**Gerekli Değil**

Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.

Sonuçlanan projenizin aşağıdaki kriterleri sağladığını düşünüyorsanız "ARDEB Başarı Hikâyeleri Formu"nu doldurup sonuç raporu ile birlikte ilgili Araştırma Destek Grubu'na iletmeniz gerekmektedir.

- Projeden, uluslararası, impakt faktörü yüksek dergilerde yer alan yayın (lar) yapılmıştır.
- Proje kapsamında elde edilen bir ürün, buluş, çıktı vb. için patent alınmıştır/alınacaktır ve/veya teknolojik/ticari uygulamaya geçilmiştir/geçilecektir.
- Proje kapsamındaki çıktılar veya proje ekibindeki kişiler proje ile ilgili olarak ödül almıştır/ödüle aday gösterilmiştir.
- Ülkenin bilimsel ve teknolojik araştırma gücüne, bilim insanı yetiştirilmesi ve yeni yetenekler kazanılmasına katkı sağlamıştır.