

## Farklı Güç Oranları için Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Güç Bölücülerinin Karakteristiklerinin İncelenmesi

Abdullah GENÇ<sup>\*1</sup>, İbrahim Bahadır BAŞYİĞİT<sup>2</sup>, Tuna GÖKSU<sup>3</sup>,  
Selçuk HELHEL<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniv., Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Isparta

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniv., Mühendislik Fakültesi, Elektronik Haberleşme Müh. Bölümü, Isparta

<sup>3</sup>Süleyman Demirel Üniv., Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta

<sup>4</sup>Akdeniz Üniv., Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya

Geliş tarihi: 27.11.2017

Kabul tarihi: 14.03.2018

### Öz

Mikrodalga pasif bileşenlerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretimine olan ilgi son yıllarda gün geçtikçe artmaktadır. Bu yöntemlerin en önemli avantajları karmaşık geometrideki mikrodalga pasif bileşenleri kısa sürede, düşük ağırlıkta ve düşük maliyette üretmektir. Bu çalışmada, 12 GHz çalışma frekansında dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücülerini tasarlanıp 3B baskıyla üretilmiş ve tüm yüzeylerine elektrolizsiz ve elektrolizli olmak üzere toplam 20 µm'lik bakır kaplama yapılmıştır. Yöntem olarak birleştirmeli yığmayla modelleme tekniği ve malzeme olarak ABS termoplastik malzeme kullanılmıştır. Bu çalışmanın özgün yönü, T-ekleme elemanının ABS termoplastik ve bakır kaplama kullanılarak 3B baskı teknolojisiyle üretilmesinin yanı sıra farklı güç oranlarındaki güç bölücülerinin performans sonuçlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. CST Microwave Studio yazılımıyla önerilen bileşenlerin geri dönüş kayıpları, iletim kayıpları ve elektrik alan dağılımları elde edilmiştir. Farklı güç oranlarındaki dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücülerini tasarlanıp performansları incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, eşit güç oranlı güç bölücünün iletim katsayısı tüm frekans bölgesinde ~3 dB civarındadır ve diğer durumlar için çıkış portları arasındaki faz farkı ve güç oranları frekansa bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Tüm durumlardaki geri dönüş kayıpları birbirine oldukça yakındır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç bölücü, Dikdörtgen dalga kılavuzu, T-ekleme elemanı, 3B baskı, Bakır kaplama

### Investigation of the Characteristics of the Rectangular Waveguide Power Dividers for Different Power Ratios

#### Abstract

The interest in the production of microwave passive components with the methods of additive manufacturing has increased day by day. The most important advantages of these methods are to produce microwave passive components having complex geometry in short time, low weight and low cost. In this study, rectangle waveguide power dividers at 12 GHz operating frequency are designed and produced via

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Abdullah GENÇ, [abdullahgenc@sdu.edu.tr](mailto:abdullahgenc@sdu.edu.tr)

3D printing and a total of 20 µm non-electrolytic and electrolytic copper plating is made on all surfaces. ABS thermoplastic as material and fused deposition modeling technique as a method are used. The novelty of this work is not only the manufacturing of T-junction component by means of 3D printing technology by using ABS thermoplastic and copper plating but also, having the performance results of T-junction components with different power ratios comparatively. Return losses, transmission losses and electric field distributions of the proposed components are obtained by using CST Microwave Studio software. Rectangular waveguide power dividers having different power ratios are designed and their performances are investigated. When the results are examined, the transmission coefficient of the power divider having equal power ratio is ~3 dB in the entire frequency range. For other cases, it is observed that the phase difference and the power ratio between the output ports change depending on the frequency. The return losses in all cases are very close to each other.

**Keywords:** Power divider, Rectangular waveguide, T-junction component, 3D printing, Copper plating

## 1. GİRİŞ

Mikrodalga pasif bileşenlerin eklemeli imalat yöntemleri (EİY) ile üretimine olan ilgi son yıllarda gün geçtikçe artmaktadır. Bu yöntemleri kullanarak monolitik yüksek performanslı mikrodalga pasif bileşenleri kısa sürede ve düşük maliyette üretmek mümkündür [1-3]. Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan birleştirmeli yığmayla modelleme (BYM) tekniği ile dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücülerin (T-ekleme elemanı) üretimi, düşük ağırlık, esnek uygulanabilirlik ve maliyet gibi birçok açıdan geleneksel yöntemlere iyi bir alternatiftir. Geleneksel yöntemlerde, mikrodalga pasif bileşenler genellikle CNC makineleri vasıtasıyla bazı metallerden oluşur; bu da oldukça maliyetlidir ve karmaşık geometrilerin imalatı oldukça zordur. Birleştirmeli yığmayla modelleme tekniğinde, ısıya bağlı olarak katı veya sıvı halde içyapısı bozulmadan geçebilen termoplastikler kullanılır. Bu teknoloji, S. Scott Crump tarafından 1980'lerin sonunda geliştirilmiş ve 1990'da ticarileştirilmiştir. Çalışma prensibi, erimiş filament nozul vasıtasıyla bir platforma enjekte edilerek bir katman oluşturulur. Bir sonraki katmanı uygulanmadan önce ilk katmandaki termoplastik malzeme sertleşir ve bu şekilde enine kesit modeliyle istenilen üç boyutlu yapı elde edilir. Genellikle ABS (akrilonitril butadien stiren) ve PLA (polilaktik asit) gibi termoplastikler kullanılır [4,5].

ABS termoplastik malzemeden üç boyutlu yazıcı ile yapının iskeleti oluşturulduktan sonra bileşenin elektromanyetik dalgayı kılavuzlaması tüm

yüzeylerine metal kaplama işlemi uygulanmalıdır. Bileşenin yüzeylerini iletken hale getirmek için önce elektrolizsiz kaplama daha sonra elektroliz yöntemiyle kaplama gerçekleştirilir. Elektrolizsiz kaplama, elektroliz yöntemiyle kaplamanın aksine harici bir elektrik akımı gerektirmeden kimyasal yollarla yapılır. Elektrolizsiz kaplama daha yavaştır ve kaplama kalınlığı bakımından belli bir sınırlama söz konusudur. Ayrıca, elektrolizsiz kaplama yönteminin en önemli avantajı, karmaşık geometrideki tüm yapılara metal kaplama yapılabilmesidir [6]. Üretilen bileşenlerin daha iyi performansa sahip olabilmesi için kritik parametreler, özellikle yüksek frekanslarda düşük yüzey pürüzlülüğü ve boyutlardaki yüksek doğruluktur [7,8]. Önümüzdeki yıllarda 3B baskı teknolojisinin gelişmesiyle birlikte üretilen bileşenler performans açısından ticari ürünlerle rekabet edebileceği ön görülmektedir. Bu sayede, kuplörden filtreye birçok pasif mikrodalga bileşenler üretilecektir.

Dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücülerini, dalga kılavuzlarındaki elektromanyetik dalgaları farklı güç ve genlik oranlarında ikiye bölen pasif mikrodalga bileşenleridir. Basitliği ve dayanaklılığından dolayı hem güç bölücü hem de güç birleştirici olarak yaygın olarak kullanılabilir. Radar ve uydudan doğrudan yayın gibi uygulamalarda H-düzlem güç bölücüsü veya T-ekleme elemanı, dizi anteni beslemek amacıyla genellikle dalga kılavuzu besleme ağında kullanılır [9-11]. T-ekleme elemanı, H-düzlem ve E-düzlem olmak üzere ikiye ayrılır. Elektrik alanının ilerleme yönünde yani dalga kılavuzunun geniş

olan yüzünde bir dallanma söz konusuysa buna E-düzlem T-ekleme elemanı denir. Benzer şekilde bu çalışmada olduğu gibi manyetik alanının ilerleme yönünde yani dalga kılavuzunun dar yüzünde bir dallanma söz konusuysa buna da H-düzlem T-ekleme elemanı denir ve literatürde paralel T-ekleme elemanı olarak da isimlendirilir. Dizi huni antenin besleme ağında genellikle H-düzlem T-ekleme elemanı kullanılır. Çünkü empedans uyumlu simetrik bir H-düzlem T-ekleme elemanında, giriş portundan verilen güç çıkış portlarına eşit genlik ve fazda ayrılır. E-düzlem T-ekleme elemanında ise, çıkış portları arasında  $180^\circ$ 'lik faz farkı olduğundan dolayı çok fazla tercih edilmez. T-ekleme elemanının empedans uyumlamasında yaygın olan iki yöntem vardır. İlk yöntemde, giriş portunun karşısına yerleştirilen perde ve iris yapıları kullanılarak uyumlanma yapılır. Diğer yöntemde ise, empedans uyumlama giriş portunun önüne yerleştirilen metal silindirik pin ile yapılır [12].

Bing Zhang ve arkadaşarı, çalışmalarında E-bant (60-90 GHz) ve D-bandında (110-170) Cu-15Sn tozunu eritmeye dayanan eklemeli imalat teknolojisiyle metalik dikdörtgen dalga kılavuzları önermiştir. Benzetim ve ölçüm hataları üretim toleransı ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır. Bu bileşenler, önerdiğimiz teknolojiyle üretilen bileşenlere göre hem daha ağır hem de oldukça pahalıdır. Fakat yüksek güç gerektiren askeri uygulamalarda termoplastik malzeme sıcaklıktan dolayı zarar göreceği için metal bileşenler tercih edilir. Ayrıca, pasif mikrodalga elemanları oldukça pahalı olduklarından 3B baskı teknolojisiyle üretilen daha düşük maliyetli birçok pasif mikrodalga bileşenler üniversitelerdeki ilgili derslerin laboratuvar uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir.

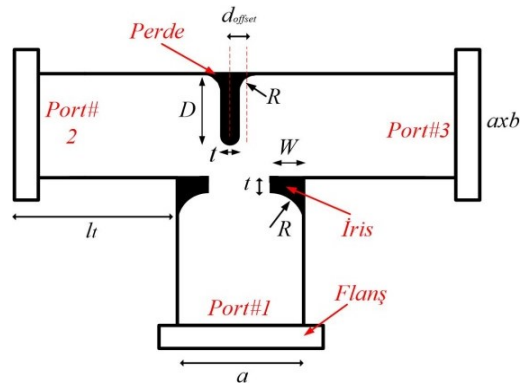
Bu çalışmada, 12 GHz çalışma frekansı için dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücüleri tasarlanıp 3B baskıyla üretilmiş ve tüm yüzeylerine bakır kaplama yapılmıştır. S-parametreleri için benzetim ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Farklı güç oranlarındaki dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücüleri tasarlanıp performansları incelenmiştir. Dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücülerin çıkış portları arasındaki

faz farkı ve güç oranları frekansa bağlı olarak elde edilmiştir. Termoplastik veya metal malzeme kullanılarak 3B baskı teknolojisiyle üretilen dalga kılavuzları, filtre ve kuplör gibi farklı pasif mikrodalga bileşenler üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bunun yanı sıra 3B baskı teknolojisiyle üretilen T-ekleme elemanı üzerine literatürde herhangi bir çalışmayla karşılaşılmamıştır. Bu çalışmanın özgün yönü, T-ekleme elemanının ABS termoplastik ve bakır kaplama kullanılarak 3B baskı teknolojisiyle üretilmesinin yanı sıra farklı güç oranlarındaki güç bölücülerinin performanslarının karşılaştırmalı olarak elde edilmesidir. Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 1'de giriş bölümü, Bölüm 2'de tasarım ve imalat aşamaları bulunmaktadır. Bölüm 3'te benzetim ve ölçüm sonuçları elde edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Bölüm 4'deki sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. TASARIM VE İMALAT

### 2.1. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu Güç Bölücülerinin Tasarımı

Dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücüsünün tasarımında yansıma kaybını azaltmak için empedans uyumlama yapılmalıdır. Giriş portunun karşısına yerleştirilen bir perde ve iki adet iris yapısı kullanılarak empedans uyumlama gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzu güç bölücüsünün geometrisi tasarım parametreleri ile birlikte Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Dalga kılavuzu güç bölücüsünün geometrisi

Tüm tasarımlar X-Ku bandında (10-15 GHz) WR-75 dikdörtgen dalga kılavuzu için tasarlanmıştır. TE<sub>10</sub> baskın modunda kesim frekansı ( $f_c$ ) 7,886 GHz olarak seçilerek kılavuzun ebatları Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır. Dalga kılavuzunun çalışma frekansı,  $1,25 f_c < f < 1,89 f_c$  aralığında değerler alabilir.

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1)$$

Burada  $a$  ve  $b$  kılavuzun ebatlarını ve  $m$ ,  $n$  ise EM dalganın olası modlarını gösterir. Dikdörtgen dalga kılavuzunun ebatları  $a = 19,05$  mm ve  $b = 9,52$  mm olarak hesaplanmıştır.

Güç bölücüdeki perdenin bulunduğu konum, çıkış portları arasındaki güç oranını ( $r$ ) belirler. Eğer H-düzlem T-ekleme elemanında perde simetrik olarak konumlanırsa faz farkı olmaksızın iki çıkışa da eşit güç aktarılır. Perde ile kılavuzun merkezi arasındaki mesafeye  $d_{offset}$  uzaklığı adı verilir. Bu uzunlukla güç oranı arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Perdenin bulunduğu konumu değiştirerek istenilen çıkış portlarında güç oranı belli bir değer aralığında ayarlanabilir. Fakat bu durumda belli bir faz farkı ( $\Delta\Phi$ ) oluşur. Ebatları bulmak için gerekli formülasyonlar eğri uydurma yöntemiyle geliştirilmiştir. Perdenin konumuna bağlı olarak çıkış portları arasındaki güç oranı ve faz farkı ilişkisi Eşitlik 2'de verilmiştir.

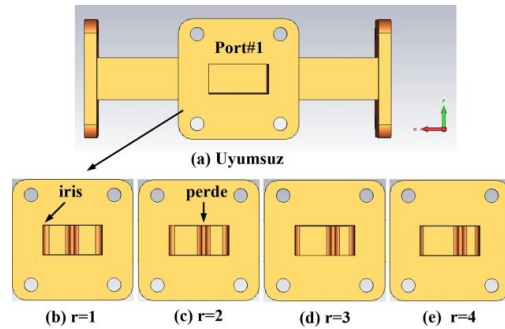
$$\begin{aligned} d_{offset}=0 &\Rightarrow r=1, \Delta\Phi=0 \\ d_{offset}\neq 0 &\Rightarrow r\neq 1, \Delta\Phi\neq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Burada güç oranı  $r = \frac{|(S_{31})|^2}{|(S_{21})|^2}$  ve faz farkı  $\Delta\Phi = \angle(S_{31}) - \angle(S_{21})$  olarak ifade edilebilir. Daha düşük yansımaya katsayısı elde etmek için, tasarım parametreleri, sonlu entegrasyon tekniğini (SET) kullanan CST Microwave Studio® (MWS) yazılımında parametrik süpürme (parametric sweep) kullanılarak optimize edilmiştir. Beş farklı güç oranındaki güç bölücülerin ebatları Çizelge 1'de verilmiştir. Burada çıkış portları arasındaki güç oranı farklı olan dört adet güç bölücü tasarlanmıştır.

**Çizelge 1.** Farklı güç oranlarındaki güç bölücülerin ebatları

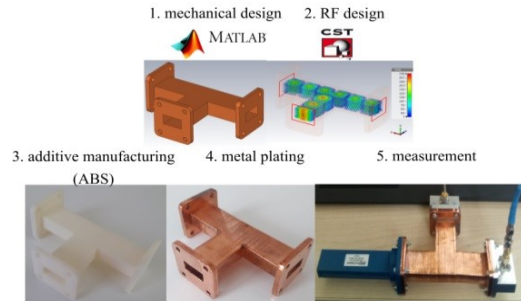
(mm)	$lt$	$t=R$	$d_{offset}$	$D$	$W$
Uyumsuz	40	-	-	-	-
$r = 1$ için	40	1,42	0	9,43	2
$r = 2$ için	40	1,42	1,77	9,46	1,72
$r = 3$ için	40	1,42	2,86	9,53	1,41
$r = 4$ için	40	1,42	3,67	9,64	1,10

Burada  $D$  perdenin uzunluğunu,  $W$  iris genişliğini ve  $d_{offset}$  perdenin konumunu göstermektedir. Farklı güç oranlarındaki güç bölücülerin giriş portundaki perde ve iris görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Güç oranı arttıkça perdenin konumunun kaydığı görülmektedir. Çizelge 1'den de anlaşılacağı gibi güç oranı arttıkça perdenin uzunluğu artarken iris genişliği azalmaktadır.



**Şekil 2.** Güç bölücülerin giriş portundaki perde ve iris görüntüleri (a) uyumsuz (b)  $r = 1$  (c)  $r = 2$  (d)  $r = 3$  (e)  $r = 4$

Tasarımdan, benzetime, üretimden kaplama ve ölçüme tüm üretim süreci Şekil 3'te gösterilmiştir.

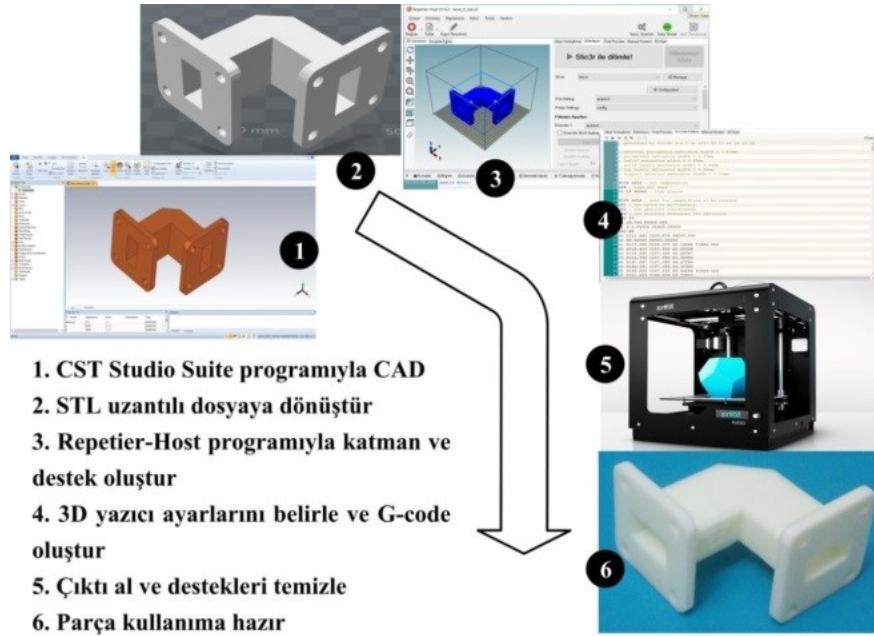


**Şekil 3.** İmalat süreci

## 2.2. Bileşenlerin Üç Boyutlu Baskısının Alınması

Bileşenin ebatları belirlendikten sonra, Şekil 4'de gösterilen 3B baskı aşamasına geçilir. Öncelikle CST Studio Suite® gibi bir elektromanyetik benzetim programı vasıtasıyla istenilen yapının bilgisayar destekli tasarım (CAD) hali elde edilir. 3B yazıcı ile uyumlu olması için Repetier-Host programı kullanılarak yazıcı başlığının x-y doğrultusundaki hareketlerini belirleyen G-kodu dosyası oluşturulur ve üç boyutlu yazıcıya aktarılır. 3B yazıcıdan baskı alındıktan sonra varsa

destekler sökülür ve parça kullanıma hazır hale getirilir. Yazıcıdan çıktı almadan önce filamentin erime sıcaklığı, destek oluşturulması, katman yüksekliği, ilk katman sayısı, kabuk kalınlığı, doluluk oranı, desen türü, çalışma hızı, yapının tabladaki pozisyonu gibi birçok parametre ayarlanmalıdır. BYM tekniği ile çalışan Zortrax M200 model yazıcı tercih edilmiştir. 3B yazıcı için beyaz renkli ABS termoplastik malzeme kullanılmıştır. Termoplastiğin erime sıcaklığı 245 °C'dir ve doluluk oranı % 80 olarak seçilmiştir.



Şekil 4. Üç boyutlu baskı aşamaları

## 2.3. Metal Kaplama İşlemi

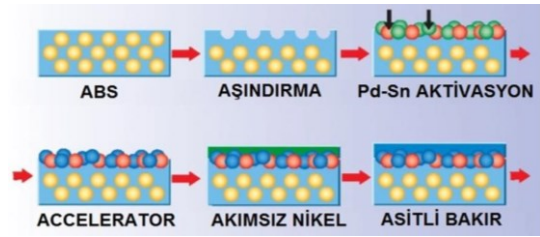
Yazıcıdan bileşenin iskeleti elde edildikten sonra metal kaplama işlemine geçilir. ABS yüzeyine metal kaplamak için gerekli adımlar Şekil 5'te verilmiştir.

ABS termoplastik üzerine metal kaplama işlemi, aşındırma, paladyum-kalay aktivasyonu, hızlandırıcı, elektroliz nikel ve asitli bakır kaplamadan adımlarından oluşur. Öncelikle ABS plastik, bütadien bağlarını kırma amacıyla kromikasit ve sülfirikasit içeren ön aşındırma

banyosuna yatırılır. Kırılan bütadien bağlarına kalay ( $\text{Sn}^{+2}$ ) ve paladyum ( $\text{Pd}_2^+$ ) iyonlarını yerleştirmek için paladyum-kalay aktivasyon işlemi uygulanır. Parçanın yüzeyinde fazladan kalan kalayı temizlemek için hızlandırıcı işlemi uygulanır. Daha sonra akımsız nikel kaplama işlemi uygulanır. Bu işlemden sonra parçalar üzerindeki ince kaplamayı sağlamlaştırmak için nikelklorür, nikelsülfat, borikasit karışımından oluşan mat nikel kaplama yapılır. Sonunda parçaya bakırsülfat ( $\text{CuSO}_4$ ) ve sülfirikasit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) içeren asit bakır kaplama işlemi uygulanarak süreç tamamlanır. Bileşenin dış yüzeyinde püskürtme



boya kullanarak da iletken tabaka oluşturulabilir. Bununla birlikte karmaşık geometrideki yapıların içini boyamak ve yüzeyde eşit kalınlıkta tabaka oluşturmak mümkün değildir.



Şekil 5. ABS yüzeyine metal kaplamak için gerekli adımlar

Elektrolizsiz kaplamalı kalınlığı 3-5  $\mu\text{m}$  ile sınırlıdır. Bu aşamadan sonra parçaların yüzeyleri iletken olduktan sonra, 20  $\mu\text{m} \pm \%10$ 'a kadar elektrolizli bakır kaplama uygulanmıştır. İstenildiği takdirde bakır üzerine nikel ve krom kaplamak mümkündür. Belirtilen kaplama kalınlığı, 10-15 GHz frekans bandında bakırın deri kalınlığından oldukça kalındır. Deri kalınlığının formülü Eşitlik 3'te verilmiştir. Buradan, 10 GHz'de bakırın deri kalınlığı 0,66  $\mu\text{m}$  olarak bulunur.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} \quad (3)$$

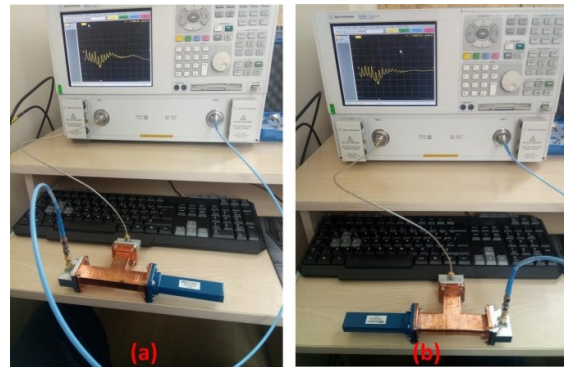
Burada  $f$ , çalışma frekansı,  $\mu$ , manyetik geçirgenlik sabiti,  $\sigma_c$ , metalin elektrik iletkenliğini temsil etmektedir.

### 3. BENZETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bütün benzetimler Intel Core i7 2.40 GHz işlemci ve 16 GB RAM'e sahip olan dizüstü bilgisayarla yapılmıştır. CST Studio Suite® elektromanyetik benzetim programının Design Studio modülü tercih edilmiştir ve Sonlu Entegrasyon Tekniğine (SET) dayanmaktadır. Dalga boyu başına örgü (mesh) sayısı 20, örgü şekli altı yüzlü ve tüm yöndeki sınır koşulları  $\vec{E}_t = 0$  olarak seçilmiştir. Enerji yakınsamasının doğruluğu -100 dB seviyesindedir. Benzetimde  $5,8 \times 10^7$  (S/m) elektrik iletkenliğine sahip kayıplı bakır

kullanılmıştır. Besleme olarak dalga kılavuzu (waveguide) port seçilmiştir. Yukarıdaki beş farklı T-ekleme elemanı için örgü hücre sayıları sırasıyla 1.051.155, 1.251.588, 1.224.608, 1.216.656 ve 1.224.608'dür. Benzetim hesaplamalarında zaman alanında zaman alanında (time domain) Solver kullanılmıştır.

Ölçüm düzeneği Şekil 6'da verilmiştir. Ölçümler EMC Elektronik firmasının ölçüm laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 10 MHz-40 GHz bandında çalışan E8363B model Agilent PNA Microwave vektör network analizörü (VNA) tarafından S-parametreleri ölçülmüştür. Ayrıca koaksiyel kabloyla kılavuz arasında bağlantı için WR-75 dalga kılavuzuna uyumlu PE9819 Pasternack marka kılavuz-koaksiyel adaptör kullanılmıştır. Ayrıca 3. porttaki yansımayı önlemek için WR-75 dalga kılavuzuyla uyumlu PEWTR1005 Pasternack 50  $\Omega$  sonlandırıcı kullanılmıştır. Adaptör ve sonlandırıcının maksimum VSWR seviyeleri sırasıyla 1,3:1 ve 1,2:1'dir ve maksimum giriş gücü 2,5 Watt'tır.

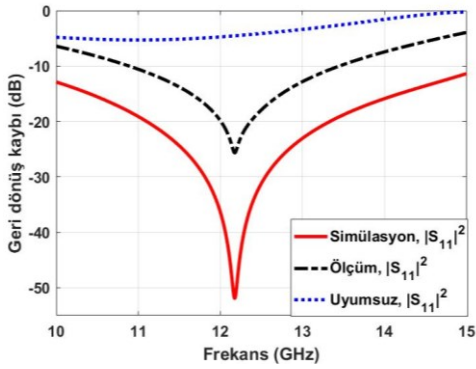


Şekil 6. Ölçüm düzeneği, a)  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  için, b)  $S_{11}$  ve  $S_{31}$  için

#### 3.1. Eşit Güç Oranına Sahip Güç Bölücünün Performansı

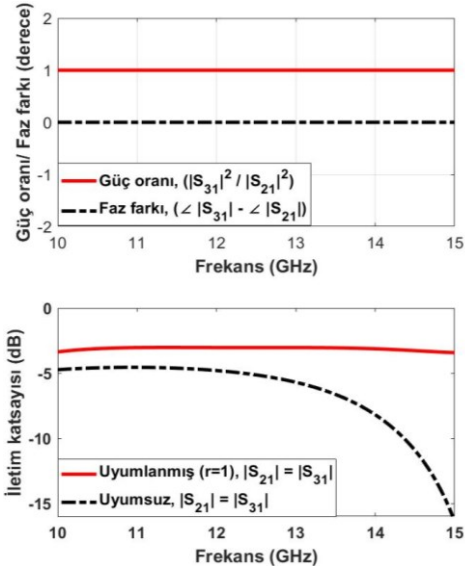
Eşit güç oranına sahip ( $r=1$ ) güç bölücünün geri dönüş kaybı Şekil 7'de verilmiştir. Benzetim ve ölçüm sonuçları arasında iyi bir uyum söz konusudur ve önerilen yapı çalışma frekansı olan 12 GHz civarında çok iyi bir performans sergilemektedir. Uyumsuz (iris ve septum yok iken) güç bölücünün geri dönüş kaybı tüm frekans

bölgesinde oldukça kötüdür. Önerilen yapının performansını daha çok düşük yüzey pürüzlülüğü ve ebatlardaki yüksek doğruluk etkiler.



Şekil 7. Eşit güç oranına sahip güç bölücünün geri dönüş kaybı

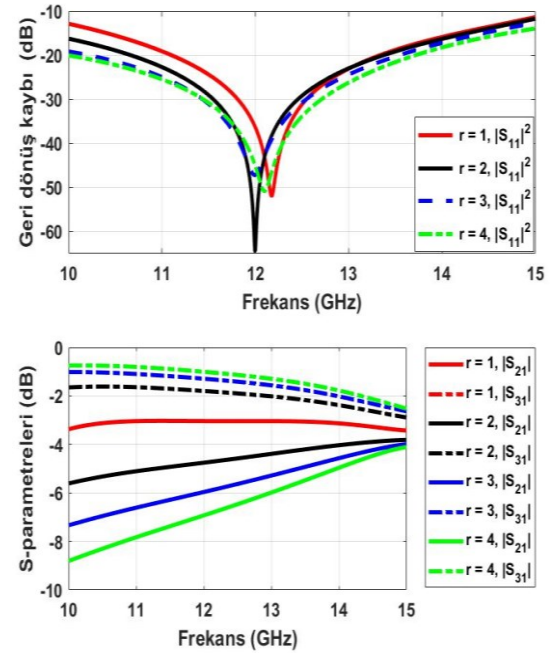
Eşit güç oranına sahip güç bölücünün iletim katsayısı Şekil 8’de verilmiştir. Çıkış portları arasındaki güç oranı ve faz farkı, X-Ku bandında frekanstan bağımsızdır ve sırasıyla 1 ve  $0^\circ$  eşittir. Uyumlanmış güç bölücünü iletim katsayısı, tüm frekans bölgesinde -3 dB civarındadır ve oldukça iyidir. Uyumsuz güç bölücü iletim katsayısı ise, daha yüksek frekanslara gittikçe kötüleşir.



Şekil 8. Eşit güç oranına sahip güç bölücünün iletim katsayısı ve güç oranı/faz farkı

### 3.2. Farklı Güç Oranlarındaki Güç Bölücülerinin Performanslarının İncelenmesi

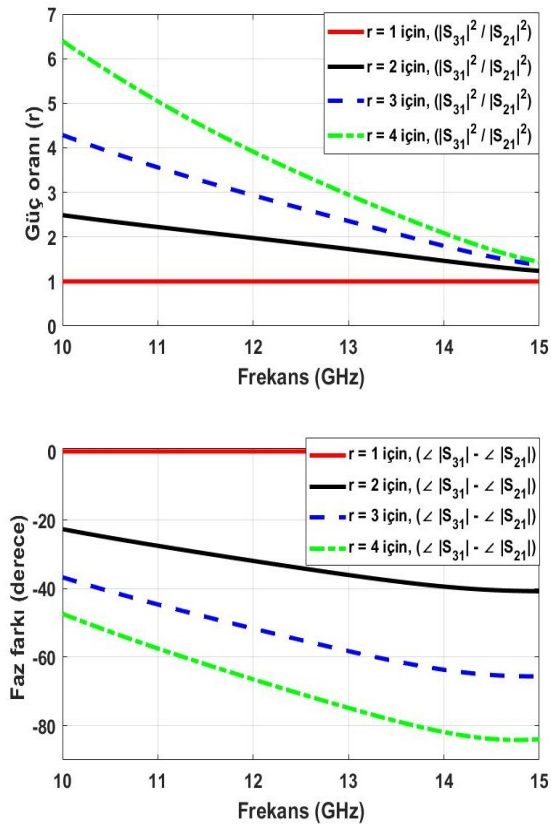
Farklı güç oranlarındaki güç bölücülerinin geri dönüş kayıplarının ve S-parametrelerinin karşılaştırılması Şekil 9’da verilmiştir. Bu benzetim sonuçlarına göre tüm frekans bandında bütün geri dönüş kayıpları -10 dB’nin altındadır ve 12 GHz civarında en iyi performansa sahiptir. Farklı güç oranları için geri dönüş kayıpları birbirine oldukça yakındır ve bundan dolayı ölçüm sonuçları grafikte verilmemiştir. Ayrıca çıkış portlarındaki S-parametreleri incelendiğinde güç oranı arttıkça  $|S_{21}|$  ile  $|S_{31}|$  genlik değerleri arasındaki farkın da arttığı görülmektedir.  $r=1$  durumu için  $|S_{21}|$  ve  $|S_{31}|$  değerlerinin çakıştığı görülmektedir ve diğer durumlara kıyasla çok fazla frekansa bağımlı değildir. Buradan  $r=2$ ,  $r=3$  ve  $r=4$  durumları için çıkış portları arasında belli bir faz farkının oluşacağı görülür.



Şekil 9. Geri dönüş kayıplarının ve S-parametrelerinin karşılaştırılması

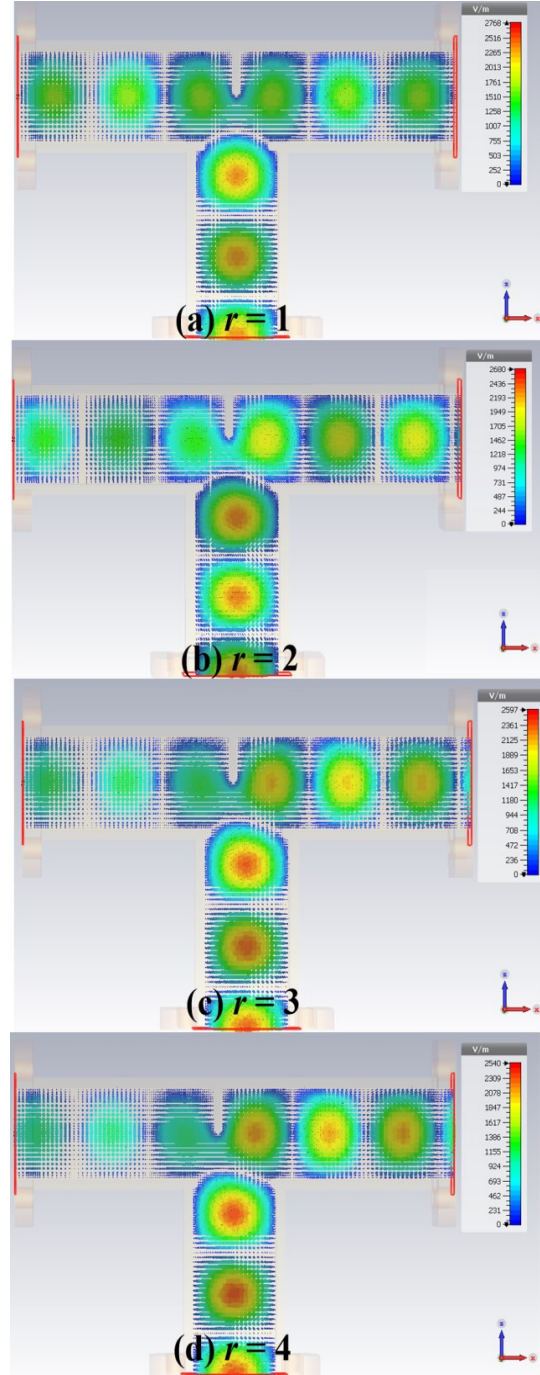
Çıkış portlarındaki güç oranlarının ve faz farklarının karşılaştırılması Şekil 10’da verilmiştir.

Buna göre  $r=1$  durumu için güç oranı frekanstan bağımsız iken diğer üç durum için güç oranı frekansa bağımlıdır. Bu üç durum için sadece 12 GHz civarında istenilen güç oranını sağlar. Dolayısıyla geniş bant gerektiren uygulamalarda kullanılamazlar. Ayrıca  $r=1$  durumu dışında tüm frekans bölgesinde belli bir faz farkı oluşur. Oluşan faz farkı güç oranı arttıkça artar. Bu durumdan kurtulmak için çıkış portlarından birinin uzunluğu artırarak çıkış portları arasındaki faz farkı dengelenebilir.



Şekil 10. Çıkış portlarındaki güç oranlarının ve faz farklarının karşılaştırılması

12 GHz'deki elektrik alan dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 11'de verilmiştir. Buna göre her bir durum için çıkış portlarındaki elektrik alan şiddetinden (grafikteki renkten) güç oranlarının değiştiği ve çıkış portlarındaki elektromanyetik dalganın konumundan da fazlarının nasıl değiştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 11. 12 GHz'deki E-alan dağılımlarının karşılaştırılması, (a)  $r=1$ , (b)  $r=2$ , (c)  $r=3$ , (d)  $r=4$



#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, 3B baskı dalga kılavuzu güç bölücülerini tasarlanıp üretilmiştir ve çıkış portları arasındaki güç oranlarına bağlı olarak performans sonuçları incelenmiştir. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak 3B baskı yöntemi kullanılmış ve daha sonra bileşenin tüm iç ve dış yüzeyleri bakırla kaplanmıştır. Empedans uyumu, perde ve iris kullanarak gerçekleştirilmiştir. Güç oranı  $r=1$  durumu dışında çıkış portları arasındaki faz farkı ve güç oranları frekansa bağlı olarak değişir. Dolayısıyla geniş bantlı uygulamalarda sadece eşit güç oranlı güç bölücü kullanılmaya elverişlidir. Tüm durumlar için yansıma kaybı karakteristikleri oldukça birbirine yakındır ve çalışma frekansı civarında güç bölücü en düşük kayba sahiptir. Çalışmada imal edilen bakır kaplı bileşenlerin alüminyum ve pirinçten imal edilen ticari muadillerine göre %80 daha ucuz ve %90 daha hafiftir. Önerilen bu pasif mikrodalga bileşenleri, ilerideki çalışmalarda huni dizi antenin besleme ağında kullanmayı planlıyoruz.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, "X-Ku Bandı Huni Dizi Anten ve Pasif Mikrodalga Elemanlarının Tasarımı ve Üretimi" adlı proje kapsamında Süleyman Demirel Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinasyon birimi tarafından desteklenmektedir (Proje No: 4605-D2-16). Ayrıca Devlet Planlama Teşkilatı desteği ile kurulan Akdeniz Üniversitesi EMUMAM Müdürlüğüne ve EMC Elektronik firmasına teşekkürlerimizi sunarız (2007K120530-DPT).

#### 6. KAYNAKLAR

1. Geterud, E.G., Bergmark, P., Yang, J., 2013. Lightweight Waveguide and Antenna Components using Plating on Plastics, 7<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1812-1815.
2. Timbie, P.T., Grade, J., Weide, D.V.D., Maffei, B., Pisano, G., 2011. Stereolithographed Mm-wave Corrugated Horn Antennas, International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 36<sup>th</sup> International Conference on IEEE, 1-3.
3. Garcia, C., Rumpf, R., Tsang, H., Barton, J., 2013. Effects of extreme surface roughness on 3D printed horn antenna, Electronics Letters, 49(12), 734-736.
4. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2010. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Additive Manufacturing Technologies Springer, 299-332.
5. Bang, J.H., Hwang, S.M., Lee, S.G., Ahn, B.C., 2003. Design Formulas for the H-plane Septum Power Divider in a Rectangular Waveguide, Microwave and Optical Technology Letters, 37(5), 390-393.
6. Mallory, G.O., Hajdu, J.B., 1990. Electroless Plating: Fundamentals and Applications, William Andrew.
7. Zhang, B., Zirath, H., 2016. Metallic 3-D Printed Rectangular Waveguides for Millimeter-wave Applications, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 6(5), 796-804.
8. Yang, S., Fathy, A.E., 2005. Synthesis of a Compound T-junction for a Two-way Splitter with Arbitrary Power Ratio, Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International.
9. Sehm, T., Lehto, A., Raelsaenen, A., 1997. Matching of a Rectangular Waveguide T-junction with Unequal Power Division, Microwave and Optical Technology Letters, 14(3), 141-143.
10. Yang, S., Fathy, A.E., 2009. Design Equations of Arbitrary Power Split Ratio Waveguide T-junctions using a Curve Fitting Approach, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 19(1), 91-98.
11. Sehm, T., Lehto, A., Räisänen, A.V., A Large Planar 39 GHz Antenna Array of Waveguide-Fed Horns, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 46(8), 1189-1193.
12. Milligan, T.A., 2005. Modern Antenna Design, John Wiley & Sons.

