



## Investigation of the performance of waveguide bend components fabricated with 3D printing and copper plating

Abdullah Genç<sup>1\*</sup>, Tuna Göksu<sup>2</sup>, Selçuk Helhel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, Isparta University of Applied University, Isparta, 32200, Turkey

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, 32200, Turkey

<sup>3</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Akdeniz University, Antalya, 07070, Turkey

### Highlights:

- Design of waveguide bend components in X-Ku band
- Fabrication with methods of 3D printing and copper plating
- Measurement of return loss and transmission loss

### Keywords:

- Waveguide-bend components
- Passive microwave components
- 3D printing
- Copper plating

### Graphical/Tabular Abstract

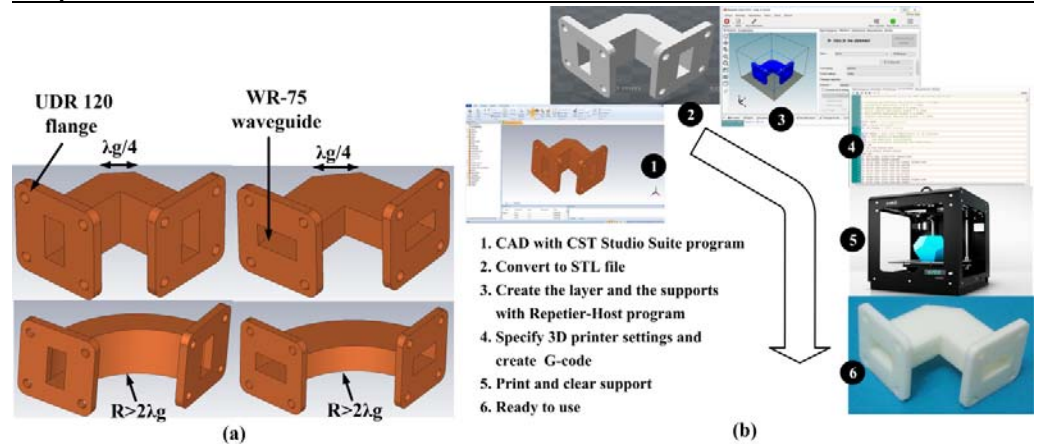


Figure A. a) E-type and H-type sharp bend and E-type and H-type bend components, respectively b) 3D printing steps

### Article Info:

Research Article

Received: 15.01.2018

Accepted: 06.02.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416538

### Acknowledgement:

This work was supported by Süleyman Demirel University, Scientific Research Projects Supporting Unit (BAP), and Akdeniz University EMUMAM Directorate with the project number 4605-D2-16.

### Correspondence:

Author: Abdullah Genç  
e-mail: [abdullahgenc@isparta.edu.tr](mailto:abdullahgenc@isparta.edu.tr)  
phone: +90 246 211 1487

**Purpose:** 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, E-type and H-type sharp bend and bend components are designed at X-Ku band and fabricated via 3D printing and a total of  $20 \pm 10\mu\text{m}$  non-electrolytic and electrolytic copper plating is made on all surfaces.

**Theory and Methods:** ABS thermoplastic as material and fused deposition modeling (FDM) technique as a method are used. Return losses and transmission losses of the proposed components are obtained as simulation and measurement and their performances are compared with commercial counterparts. CST Microwave Studio is used as a simulation program.

**Results:** When the results are examined, the E-type bend component has the best performance over the other three components and the return loss and transmission loss values of that are -20 dB and -4 dB, respectively. Thanks to this method, passive microwave components are 80% cheaper and 90% lighter than commercial counterparts made from aluminum or brass.

**Conclusion:** In this study, 3D printing rectangular waveguide and bend elements in X-Ku band are designed and produced and their performances with losses of reflection and transmission are examined. Unlike traditional methods, the 3D printing method is used, and then all surfaces of components are covered with copper. These results show that E-type bend element has better performance than the other three structures. Therefore, that should be preferred in the waveguide feeding network for the horn array antenna due to its lower loss.



## 3D baskı ve bakır kaplama ile üretilen dalga kılavuzu dönüş elemanlarının performanslarının incelenmesi

Abdullah Genç<sup>1\*</sup>, Tuna Göksu<sup>2</sup>, Selçuk Helhel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, 32200, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Isparta, 32200, Türkiye

<sup>3</sup>Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya, 07070, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dalga kılavuzu dönüş elemanlarının X-Ku bandında tasarımı
- 3D baskı ve bakır kaplama yöntemiyle üretim
- Geri dönüş kaybı ve iletim kaybının ölçümü

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.01.2018

Kabul: 06.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416538

### Anahtar Kelimeler:

Dalga kılavuzu dönüş elemanı,  
pasif mikrodalga  
komponentler,  
3D baskı, bakır kaplama

### ÖZET

Mikrodalga pasif bileşenlerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretimine olan ilgi son yıllarda artmaktadır. Karmaşık geometrideki mikrodalga pasif bileşenlerinin oldukça kısa bir sürede, düşük ağırlıkta ve düşük maliyette üretilebiliyor olması bu yöntemin en büyük avantajıdır. Bu çalışmada, X-Ku bandında dikdörtgen dalga kılavuzu, E-tipi ve H-tipi köşe ve dirsek elemanları tasarlanıp 3D baskıyla üretilmiş ve tüm yüzeylerine elektrolizsiz ve elektrolizli olmak üzere toplam  $20 \pm 10 \mu\text{m}$ 'lik bakır kaplama yapılmıştır. Yöntem olarak birleştirmeli yağmayla modelleme tekniği ve malzeme olarak Acrylonitrile bütadien stiren ABS termoplastik malzeme ile model olarak kaynaştırılmış depozisyon modelleme tekniği kullanılmıştır. Önerilen komponentlerin geri dönüş kayıpları ve iletim kayıpları simülasyon ve ölçüm olarak elde edilmiş ve ticari muadilleriyle performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon programı olarak CST Microwave Studio kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, E-tipi keskin dirsek elemanı, diğer üç elemene (H-tipi keskin dirsek, E-tipi dirsek ve H-tipi dirsek) göre en iyi performansa sahiptir ve geri dönüş kaybı ve iletim kaybı değerleri sırasıyla -20 dB ve -4 dB seviyesindedir. Önerilen bu yöntem sayesinde pasif mikrodalga komponentler, alüminyum veya pirinçten yapılan ticari muadillerine göre %80 daha ucuz ve %90 daha hafif olarak üretilmiştir.

## Investigation of the performances of waveguide bend components fabricated with 3D printing and copper plating

### H I G H L I G H T S

- Design of waveguide bend components in X-Ku band
- Fabrication with methods of 3D printing and copper plating
- Measurement of return loss and transmission loss

### Article Info

Research Article

Received: 15.01.2018

Accepted: 06.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416538

### Keywords:

Waveguide bend  
components,  
passive microwave  
components,  
3D printing, copper plating

### ABSTRACT

The interest in the production of microwave passive components with the methods of additive manufacturing has increased recently. 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, E-type and H-type right angle and bend components are designed at X-Ku band and fabricated via 3D printing and a total of  $20 \pm 10 \mu\text{m}$  non-electrolytic and electrolytic copper plating is made on all surfaces. ABS thermoplastic as material and fused deposition modeling (FDM) technique as a method are used. Return losses and insertion losses of the proposed components are obtained as simulation and measurement and their performances are compared with commercial counterparts. CST Microwave Studio is used as a simulation program. When the results are examined, the E-type sharp bend component has the best performance over the other three components (H-type sharp bend, E-type bend and H-type bend) and the return loss and transmission loss values of that are -20 dB and -4 dB, respectively. Thanks to this method, passive microwave components are 80% cheaper and 90% lighter than commercial counterparts made from aluminum or brass.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: abduhahgenc@sdu.edu.tr, tunagoksu@sdu.edu.tr, selcukhelhel@akdeniz.edu.tr /

Tel: +90 246 211 1416

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mikrodalga pasif bileşenlerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretimine olan ilgi son yıllarda son yıllarda artmaktadır [1]. Bu yöntemleri kullanarak monolitik yüksek performanslı mikrodalga pasif bileşenleri kısa sürede ve düşük maliyette üretmek mümkündür [2]. Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan birleştirmeli yığmayla modelleme tekniği ile dikdörtgen dalga kılavuzu (DDK) ve köşe ve dirsek elemanlarının üretimi, düşük ağırlık, esnek uygulanabilirlik ve maliyet gibi birçok açıdan geleneksel yöntemlere iyi bir alternatiftir [3]. 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 yönteminde (BMY), 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 [4]. Çalışma prensibi, erimiş filament nozul vasıtasıyla bir platforma enjekte edilerek bir katman oluşturulması şeklindedir. Bir sonraki katmanı uygulanmadan önce ilk katmandaki termoplastik malzeme sertleşir ve bu şekilde enine kesit modeliyle istenilen üç boyutlu yapı elde edilir. Genellikle ABS ve PLA (polilaktik asit) gibi termoplastikler kullanılır [5].

ABS termoplastik malzemeden üç boyutlu yazıcı ile yapının iskeleti oluşturulduktan sonra bileşenlerin elektromanyetik dalgayı kılavuzlaması için tüm yüzeylerine metal kaplama işlemi uygulanmalıdır. Bileşenlerin 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 komponentlerin daha iyi performansa sahip olabilmesi için dikkat edilmesi gereken kritik parametreler, özellikle yüksek frekanslarda düşük yüzey pürüzlülüğü ve nihai boyutlardaki yüksek hassasiyettir [7]. Önümüzdeki yıllarda 3D baskı teknolojisinin gelişmesiyle birlikte üretilen bileşenler performans açısından ticari ürünlerle rekabet edebileceği ön görülmektedir. Bu sayede, kuplörden filtreye birçok pasif mikrodalga bileşenler üretilecektir [8].

Dalga kılavuzu dirsek ve köşe elemanları, dikdörtgen dalga kılavuzundaki elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusunu 90° değiştiren pasif mikrodalga bileşenleridir. Dirsek elemanlarının kıvrılma şekli kavisli iken köşe elemanlarının kıvrılma şekli ise diktir. Hem dirsek hem de köşe elemanları, E-tipi ve H-tipi olmak üzere ikiye ayrılır. E-tipi dirsek elemanında, elektrik alan yönünde değişme veya geniş kenarlı yüzeyde kıvrılma söz konusudur. H-tipi dirsek elemanında ise, manyetik alan yönünde değişme veya dar

kenarlı yüzeyde kıvrılma söz konusudur [9]. Dirsek elemanının yansıma kaybını en aza indirmek için bükülme yarıçapı  $2\lambda_g$ 'den büyük olmalıdır. Dirsek elemanının dönme noktalarında dalga kılavuzunun (DK) empedansı değişmesinden dolayı yansımanın yanı sıra dirseklerde oluşan yüksek modlar reaktif düzensizliklere neden olmaktadır. Teorik olarak eğer bir dirseğin iç yarıçapı  $\lambda_g$ 'den büyük ise, bu dirsekten dolayı oluşan duran dalga oranı  $VSWR \leq 1,1$  olacak şekilde gerçekleşir. Ayrıca fiziksel alanın belirleyici olduğu durumlarda dirsek elemanı yerine, köşe elemanları da kullanılmaktadır. Köşe açısı 45° olduğunda, duran dalga oranı  $VSWR = 1,2$  değerine ulaşırken köşe açısının 90° olması halinde ise tam yansıma gerçekleşir. Yansımayı azaltmak için köşe açısı 45° olan E-tipi köşe elemanının kesilen uzunluğu  $2\lambda_g/4$  olmalıdır. Giriş ve çıkış portlarındaki  $|S_{11}|^2$  ve  $|S_{21}|^2$  değerlerinden iletilen ve yansıyan güç oranları elde edilir [10, 11].

Bu çalışmada, 12 GHz merkez çalışma frekansı olmak üzere X-Ku bandı için DDK, E-tipi ve H-tipi köşe ve dirsek elemanları tasarlanıp 3D baskıyla üretilmiş ve tüm yüzeylerine bakır kaplama yapılmıştır. S-parametreleri için benzetim ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Önerilen bu yöntem sayesinde pasif mikrodalga bileşenler alüminyum veya pirinçten üretilen ticari muadillerine göre % 80 daha ucuz ve % 90 daha hafif üretmek mümkündür. Mevcut pasif mikrodalga bileşen üreticilerinin geleneksel yöntemlere bağlı olması, görece yeni bir teknoloji olan 3B baskı teknolojilerine adaptasyon konusunda mesafeli durmaları ve ayrıca önerdiğimiz yöntemlerin özellikle çok yüksek güç ve dayanım gerektiren askeri uygulamalardaki performansının henüz görülmemiş olması nedeni ile önerilen yöntem henüz yaygınlık kazanmamıştır. 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 (THE DESIGN AND THE FABRICATION)

### 2.1. Dirsek ve Köşe Elemanlarının Tasarımı (Design of Waveguide Bend and Sharp Bend Components)

DDK'larının 90°lik doğrultu değiştirmesini sağlayan dört farklı mikrodalga komponentlerin perspektif görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Kılavuz-koaksiyel adaptör yardımıyla elemanların network analizörüne bağlanması için her elemana standart UDR 120 flanş yerleştirilmiştir.

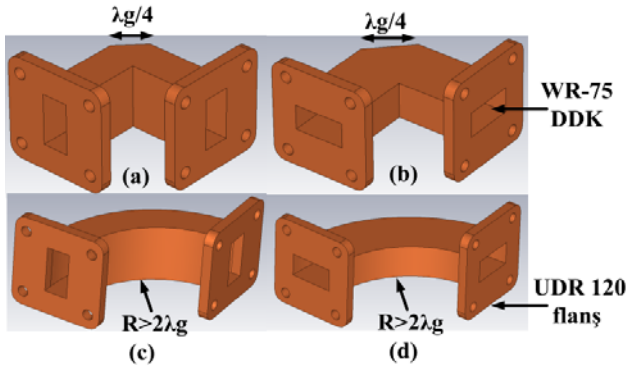
Tüm tasarımlar X-Ku bandında (10-15 GHz) WR-75 DDK için tasarlanmıştır. TE<sub>10</sub> baskın modunda kesim frekansı  $f_c = 7,886$  GHz olarak seçilerek kılavuzun ebatları Eş. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. DK'nın çalışma frekansı,  $1,25 f_c < f < 1,89 f_c$  aralığında değerler alabilir.

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

Burada a ve b kılavuzun ebatlarını ve m, n ise elektromanyetik dalga'nın olası modlarını gösterir. DDK'nın ebatları  $a = 19,05$  mm ve  $b = 9,52$  mm olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak WR-75 DK için 10GHz'te yaklaşık 0,1 dB/m zayıflama meydana gelir. Bu çalışmada kılavuzların içlerinde boşluk bulunmakla birlikte bazı uygulamalarda, farklı dielektrik malzemeler de kullanılabilir. Bu sayede ile Eş. 1'den anlaşılacağı gibi kılavuzun ebatları dielektrik sabitine ( $\epsilon$ ) bağlı olarak küçülürken dielektrik kayıplar kayıp tanjanta ( $\tan\delta$ ) bağlı olarak değişir [12]. O yüzden özel mikrodalga uygulamalarda yüksek dielektrik sabitli ve düşük kayıp tanjantlı malzemeler seçilir ki bunların maliyetleri de oldukça yüksektir. Dirsek ve köşe elemanlarının ebatları, DK dalga boyu  $\lambda_g$  hesaplanarak belirlenir ve Eş. 2'de verilmiştir.

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \quad (2)$$

Burada  $\lambda$  serbest uzaydaki dalga boyu ve  $\lambda_c$  kesim dalga boyudur. Kesim ve çalışma frekansı sırasıyla 7,886 GHz ve 12 GHz olarak belirlenmiştir.



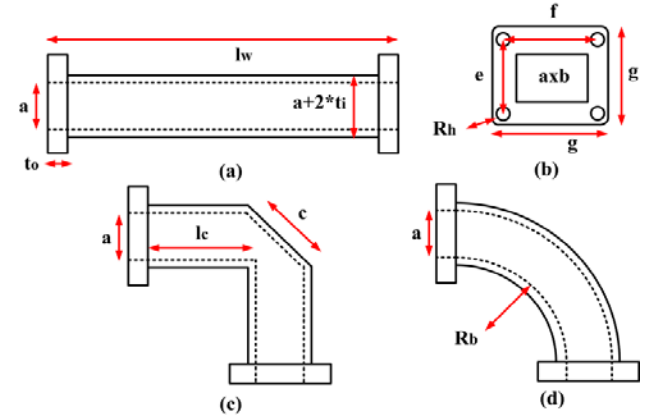
**Şekil 1.** Sırasıyla a) E-tipi b) H-tipi köşe ve c) E-tipi d) H-tipi dirsek elemanları  
(Respectively (a) E-type (b) H-type sharp bend and (c) E-type (d) H-type bend components)

UDR 120 flanşın boyutları tüm bileşenler için  $f = 26,42$  mm,  $e = 28,5$  mm,  $g = 38,3$  mm ve  $R_h = 2,2$  mm olarak seçilmiştir. Fiziksel dayanıklılık sağlaması için tüm bileşenlerin kalınlığı  $t_i$  2 mm ve flanşların kalınlığı  $t_o = 4$  mm olarak belirlenmiştir. 100 mm dikdörtgen DD, flanş, köşe ve dirsek elemanlarının profil görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Ayrıca, tasarlanan pasif bileşenlerin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

### 2.2. Bileşenlerin Üç Boyutlu Baskısının Alınması (3D Printing of Components)

Bileşen ebatları belirlendikten sonra, Şekil 3'te gösterilen 3D baskı aşamasına geçilir. Öncelikle CST Studio Suite® gibi bir elektromanyetik simülasyon programı vasıtasıyla istenilen yapının CAD hali elde edilir. 3D 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. 3D 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 üç boyutlu yazıcı tercih edilmiştir. 3D yazıcı için beyaz renkli ABS termoplastik malzeme kullanılmıştır. Termoplastiğin erime sıcaklığı 245 °C'dir ve doluluk oranı % 80 olarak seçilmiştir. ABS kullanımının en önemli sebeplerinden biri bir alternatif PLA'nın yüzeyini henüz metal kaplama yapmak mümkün değildir. Ayrıca ABS'nin mekanik ve ısıya karşı dayanıma daha fazladır [13].



**Şekil 2.** a) 100 mm dikdörtgen dalga kılavuzu b) flanş c) köşe ve d) dirsek elemanlarının profil görüntüleri  
(Profile views of (a) 100 mm rectangular waveguide (b) flange (c) sharp bend and (d) bend components)

**Tablo 1.** Tasarlanan mikrodalga pasif bileşenlerin ebatları (mm)  
(Dimensions of designed microwave passive components (mm))

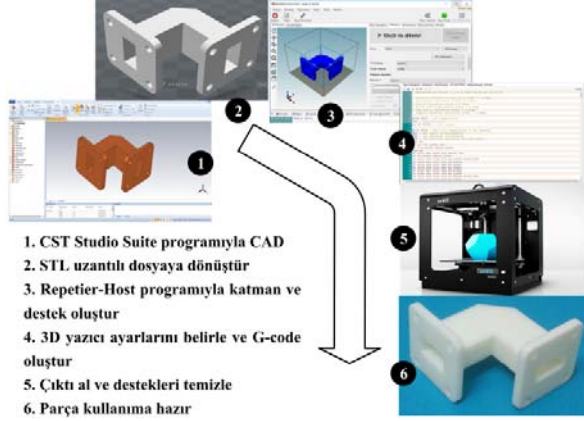
Komponentler	a	b	lw	lc	c	Rb	ti	to
DDK	19,05	9,52	100	-	-	-	2	4
Flanş	19,05	9,52	-	-	-	-	-	4
E-tipi Köşe E	19,05	9,52	-	30	10,75	-	2	4
H-tipi Köşe E	19,05	9,52	-	30	17,75	-	2	4
E-tipi Dirsek E	19,05	9,52	-	-	-	40	2	4
H-tipi Dirsek E	19,05	9,52	-	-	-	45	2	4

### 2.3. Metal Kaplama İşlemi (Metal Coating Process)

Yazıcıdan parçanın çıktısı alındıktan sonra ABS parçanın yüzeyine metal kaplama yapılır. ABS termoplastik üzerine metal kaplama işlemi, aşındırma, Pd-Sn aktivasyonu, ivme, elektroliz nikel ve asitli bakır kaplamadan adımlarından oluşur. Öncelikle ABS plastik, bütadien bağlarını kırma amacıyla kromik asit ve sülfirik asit içeren ön aşındırma banyosuna yatırılır. Kırılan bütadien bağlarına kalay ( $\text{Sn}^{+2}$ ) ve paladyum ( $\text{Pd}_2^+$ ) iyonlarını yerleştirmek için Pd-Sn aktivasyon işlemi yapılır. Daha sonra parçanın yüzeyde fazla kalan kalayı temizlemek için hızlandırma işlemine geçilir. Eğer bu işlem doğru bir şekilde yapılmaz ise sonraki nikel katman oluştuğundan sonra parçanın yüzeyinde kalan kalay bu katmanın kalkmasına neden olur. Daha sonra akımsız nikel kaplama işlemi uygulanır. Bu işlemden sonra parçalar



üzerindeki ince kaplamayı sağlamlaştırmak için nikelklorür, nikel sülfat, borikasit karışımından oluşan mat nikel kaplama yapılır. Sonunda parçaya bakır sülfat ( $\text{CuSO}_4$ ) ve sülfirikasit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) içeren asit bakır kaplama işlemi uygulanarak süreç tamamlanır. Parçanın dış yüzeyinde iletken püskürtme toz boya kullanarak da iletken yüzey oluşturulabilir [14]. Fakat hem karmaşık geometrilerin içini boyamak hem de yüzeyde eşit kalınlıkta katman oluşturmak mümkün değildir.



Şekil 3. Üç boyutlu baskı aşamaları (3D printing steps)

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 Eş. 3'te verilmiştir. Buradan, 10 GHz'de bakırın deri kalınlığı 0,66  $\mu\text{m}$  olarak bulunur [15].

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

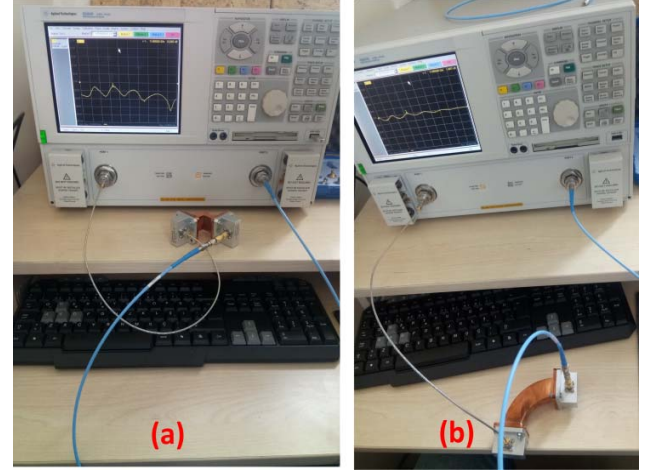
Burada  $f$  çalışma frekansı,  $\mu$  manyetik geçirgenlik sabiti,  $\sigma_c$  metalin elektrik iletkenliğini temsil etmektedir.

### 3. BENZETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI (SIMULATION AND MEASUREMENT RESULTS)

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 yansımalarının doğruluğu -100 dB seviyesindedir. Benzetimde iletken olarak,  $5,8 \times 10^7$  (S/m) elektrik iletkenliğine sahip kayıplı bakır (copper, annealed) kullanılmıştır. Besleme olarak waveguide port seçilmiştir. DDK, E-tipi, H-tipi köşe elemanlar ve E-tipi, H-tipi dirsek elemanların örgü hücre sayıları sırasıyla 529.090, 666.460, 832.030, 1.323.550 ve 1.323.550'dir. Benzetim hesaplamalarında zaman domeninde çözücü) ve parametreleri optimize etmek için

“Parametrik Tarama” kullanılmıştır. Frekans domeninde çözücünün hassasiyeti daha yüksek olmakla birlikte hesaplama süresi daha fazladır.

Ölçüm düzeneği Şekil 4'te 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 DK'ya uyumlu PE9819 Pasternack marka kılavuz-koaksiyel adaptör kullanılmıştır. Ayrıca 3. porttaki yansımayı önlemek için WR-75 DK'yla 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.

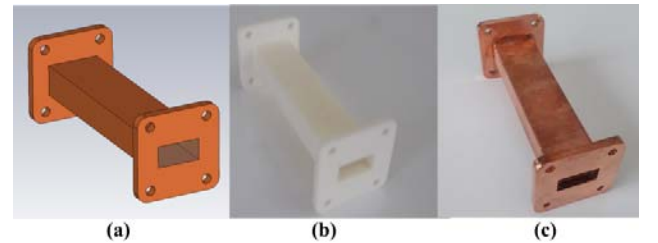


Şekil 4. a) Köşe elemanı ve b) dirsek elemanı için ölçüm düzeneği

(Measurement setup for (a) right angle bend and (b) bend components)

#### 3.1. Dikdörtgen Dalga Kılavuzunun Performansı (The Performance of Rectangular Waveguide)

Üretilen DDK CAD CST-modeli, ABS plastik ve bakır kaplanmış görünümü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Üretilen DDK görüntüsü a) CAD CST-model b) ABS plastik c) bakır kaplanmış son hali

(The view of fabricated rectangular waveguide (a) CAD CST-model (b) ABS plastic (c) copper-coated)

Düz  $l$  uzunluğundaki DK'da yansıma ve ohmik kayıplardan dolayı iki tür kayıp söz konusudur ve toplam güç kaybı  $\alpha_T$  Eş. 4'te verilmiştir.

$$\alpha_T = \alpha_R + \alpha_D \quad (4)$$

Burada  $\alpha_R$  flanşlardaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan yansıma kayıplarıyla ve  $\alpha_D$  ise kılavuz içindeki metal duvarlardan kaynaklanan ohmik kayıplardır ve Eş. 5 ve Eş. 6'da verilmişlerdir [16].

$$\alpha_R = -10 \log(1 - |S_{11}|^2) \text{ [dB]} \quad (5)$$

$$\alpha_D = -\frac{10}{l} \log\left(\frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2}\right) \text{ [dB/m]} \quad (6)$$

Ohmik kayıplar beklenildiği gibi birim uzunlukta ifade edilirler ve kullanıcıdan bağımsızdır.  $\alpha_R$ ,  $\alpha_D$ 'ye nispeten çok küçüktür ve bu çalışmadaki grafiklerde gösterilmemiştir. Mikrodalga pasif bileşenlerin performansları geri dönüş kaybı ve araya girme kaybı bakılarak anlaşılır ve sırasıyla Eş. 7 ve Eş. 8'de verilmiştir. Geri dönüş kaybı (GDK), komponentin giriş portundan verilen enerjinin tekrar girişe geri yansıyan enerji oranı olarak ifade edilebilir.

$$\text{Geri dönüş kaybı} = -20 \log|S_{11}| \quad (7)$$

$$\text{İletim kaybı} = -20 \log|S_{21}| \quad (8)$$

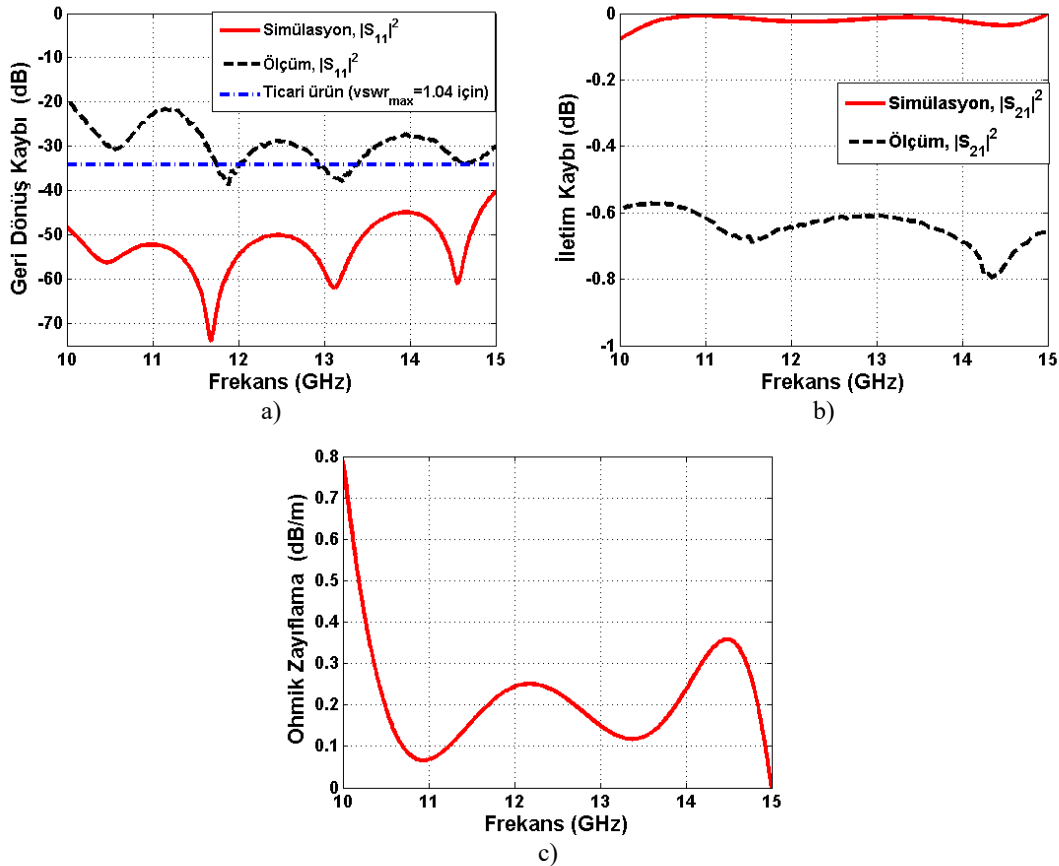
100 mm'lik DDK için geri dönüş kaybı, iletim kaybı ve ohmik zayıflama Şekil 6'da verilmiştir. Frekansa göre ohmik

(dissipative) zayıflama değeri, Eş. 6 kullanılarak hesaplanmıştır. GDK tüm frekans bölgesinde -20 dB'nin altındadır ve ölçüm ile simülasyon sonuçları arasında yaklaşık 25 dB'lik fark vardır. Pasternack marka ticari ürün için DDK'nun maksimum VSWR değeri 1,04 (GDK= 34,15 dB)'dir ve beklenildiği gibi performansı ölçüm sonuçlarından daha iyi iken benzetim sonuçlarından daha kötüdür. Literatürdeki çalışmalarda belirtildiği gibi bunun en önemli sebebi, benzetimlerdeki yapıardan farklı olarak üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü var olmasındandır [17]. Ohmik zayıflama, ortalama 0,2 dB/m değerindedir ve düşük frekans bölgesinde daha yüksektir.

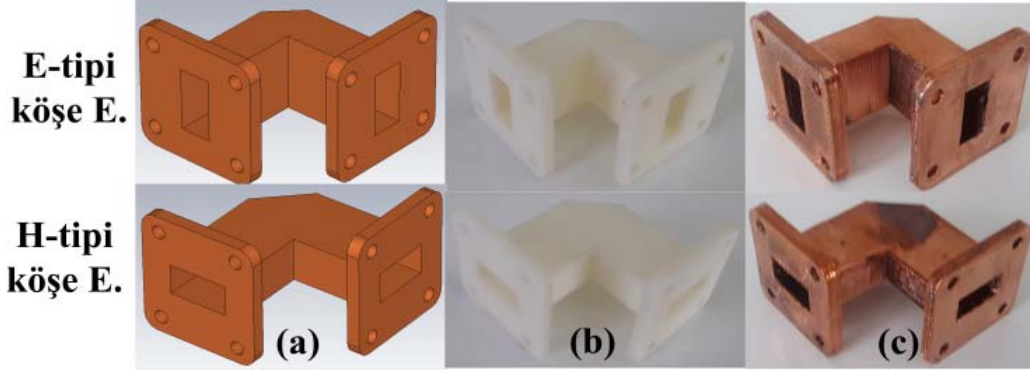
### 3.2. Köşe Elemanlarının Performansı (The Performance of Sharp Bend Components)

Üretilen E ve H-tipi köşe elemanlarının CAD CST-modeli, ABS plastik ve bakır kaplanmış görünümü Şekil 7'de verilmiştir.

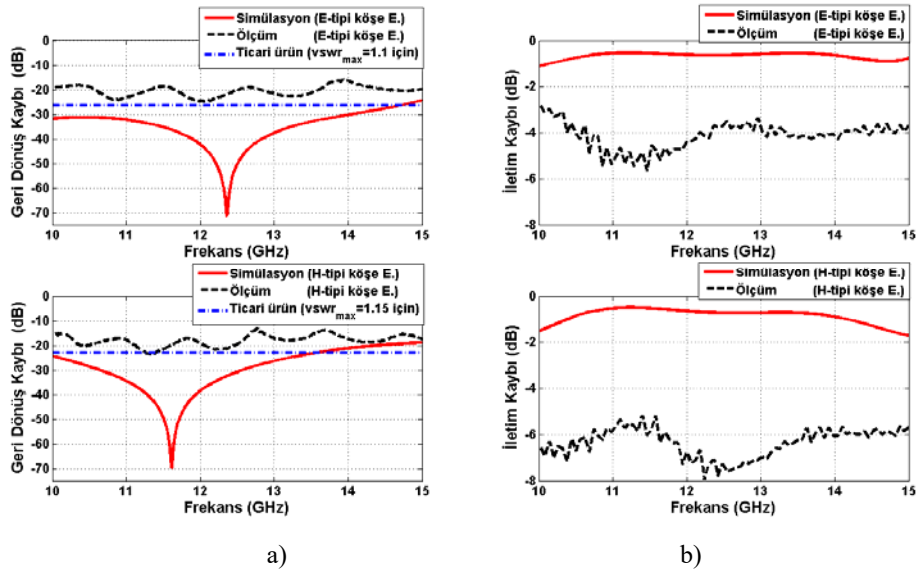
E-tipi ve H-tipi köşe elemanları için GDK, iletim kaybı değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre tüm frekans bölgesinde GDK -10 dB'nin altındadır ve benzetim ve ölçüm değerleri arasında yaklaşık 10 dB'lik fark görülmektedir. Vector Telecom marka alüminyumdan yapılmış ticari E-tipi ve H-tipi köşe elemanlarının



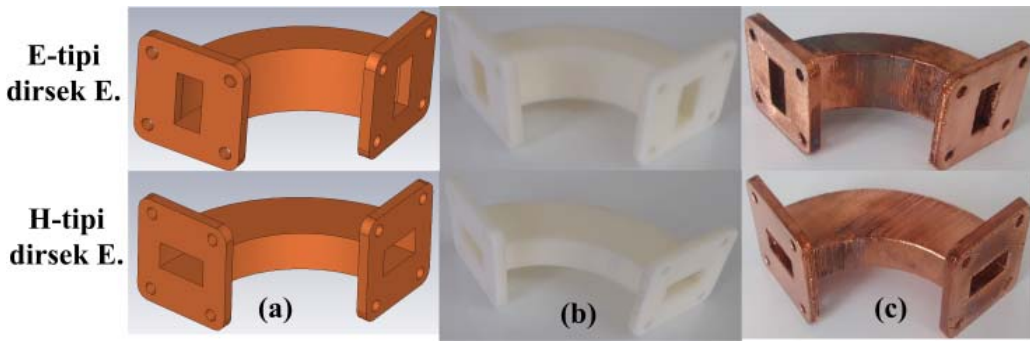
Şekil 6. 100 mm'lik DDK performansı a) geri dönüş kaybı b) araya girme kaybı ve c) ohmik zayıflama  
(The performance of 100 mm rectangular waveguide (a) return loss (b) transmission loss and (c) ohmic attenuation)



Şekil 7. Üretilen E-tipi ve H-tipi köşe elemanlarının görüntüsü a) CAD CST-model b) ABS plastik c) bakır kaplanmış son halı (The view of fabricated E-type and H-type right angle bend (a) CAD CST-model (b) ABS plastic (c) copper-coated)



Şekil 8. E-tipi ve H-tipi köşe elemanları için a) geri dönüş kaybı b) iletim kaybı  
(a) return loss (b) transmission loss for E-type and H-type bends)

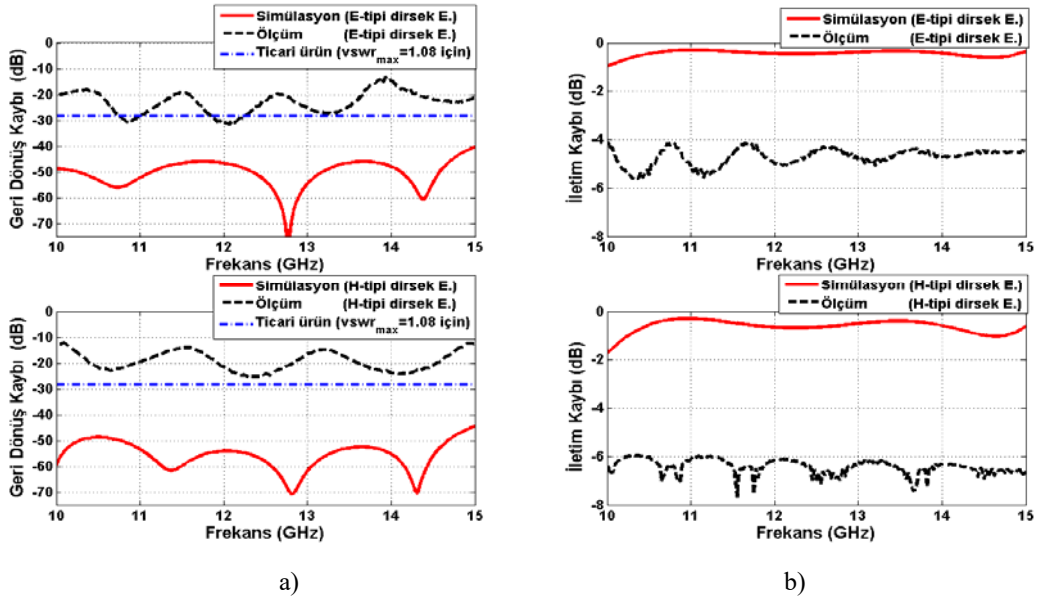


Şekil 9. Üretilen E ve H-tipi dirsek elemanlarının görüntüsü a) CAD CST-model b) ABS plastik c) bakır kaplanmış son halı (The view of fabricated E-type and H-type bends (a) CAD CST-model (b) ABS plastic (c) copper-coated)

maksimum VSWR değerleri sırasıyla 1,1 (GDK= 26,44 dB) ve 1,15 (GDK= 23,12 dB)'dir ve önerilen bileşenlerin performansı ticari ürüne oldukça yakındır. E-tipi ve H-tipi köşe elemanları için iletim kaybı değerleri sırasıyla -4 dB ve -6 dB seviyesindedir. Ayrıca bu sonuçlardan E-tipi köşe elemanı H-tipine göre daha düşük geri dönüş kaybına ve daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir.

### 3.3. Dirsek Elemanlarının Performansı (The Performance of Bend Components)

Üretilen E ve H-tipi dirsek elemanlarının CAD CST-modeli, ABS plastik ve bakır kaplanmış görünümü Şekil 9'da verilmiştir. E-tipi ve H-tipi dirsek elemanları için GDK, iletim kaybı değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre



Şekil 10. E-tipi ve H-tipi dirsek elemanları için a) geri dönüş kaybı b) araya girme kaybı  
(a) return loss (b) araya girme kaybı for E-type and H-type right angle bend)

simülasyon ve ölçüm değerleri arasında yaklaşık 30 dB'lik fark oluşur. Fakat tüm frekans bölgesinde GDK -10 dB'nin altındadır. Pasternack marka ticari E-tipi ve H-tipi dirsek elemanlarının maksimum VSWR değerleri 1,08 (GDK= 28,29 dB)'dir. Burada E-tipi ve H-tipi dirsek elemanlarının yarıçapları birbirinden farklıdır. Benzer geometrideki E-tipi dirsek elemanı H-tipine göre daha az yansımaya sahiptir. E-tipi ve H-tipi dirsek elemanları için araya girme kaybı değerleri sırasıyla -4 dB ve -6 dB seviyesindedir. Ayrıca genel olarak köşe elemanındaki geri dönüş kaybı dirsek elemanına göre daha yüksektir. Bu çalışmadan önerilen dört farklı bileşenler için şu sonuçları elde edebiliriz: hem köşe hem de dirsek elemanı için E-tipi elemanlar H-tipine göre daha iyi performansa sahiptir. En iyi performansa sahip komponent E-tipi dirsek elemanıdır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, X-Ku bandında 3D baskı DDK ve dönüş elemanları tasarlanıp üretilmiş ve ardından araya girme kaybı ile geri dönüş kaybına bağlı olarak performansları incelenmiştir. Geleneksel yöntemlerin aksine üç boyutlu baskı yöntemi kullanılmış ve daha sonra tüm yüzeyler bakır tabakayla kaplanmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak 3D baskı teknolojisi dönüş elemanları üzerine uygulanmıştır ve önerilen yapıların ölçüm ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında E-tipi dirsek elemanının diğer üç yapıdan daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Huni dizi anten beslemesinde kullanılan besleme ağlarında, T-ekleme elemanına ek olarak daha düşük kayıplı olduğu için E-tipi dirsek elemanı tercih edilmelidir. Ayrıca mikrodalga bileşenler oldukça yüksek maliyetli olduğu için okullardaki eğitim çalışmalarında 3D baskı mikrodalga bileşenler kullanılabilir. 3D baskı teknolojilerinin iyileşmesi ile pek çok ticari ürünün yanı sıra daha kritik mikrodalga komponentlerinde üretilmesi beklenmelidir. Önerilen bu pasif mikrodalga komponenti,

sonraki çalışmalarda huni dizi antenin besleme ağında kullanmayı planlıyoruz. Literatürle uyumlu olmakla birlikte benzetim ve son ürünler arasındaki performans farkının temel nedeni kullanılan kaplama yeteneğine bağlı olarak ulaşılabilen yüzey pürüzlülüğünün "ya da eş anlamlı olarak düzgün(süz)lüğünün" bir sonucudur. İlerleyen zamanlarda hedeflediğimiz çalışmalara paralel olarak üretim ve kaplama yeteneklerinin iyileştirilmesi ile daha düzgün yüzeylerin elde edilmesine dönük araştırmalar yürütülecektir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

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 yüksek frekans bölgesi laboratuvar altyapısını çalışmamız boyunca kullanıma açan Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Araştırma Uygulama Merkezi (EMUMAM) Müdürlüğüne (Proje No: DPT-2007K120530) ve EMC Elektronik firmasına teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Geterud EG., Bergmark P., Yang J., Lightweight waveguide and antenna components using plating on plastics, Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on, Gothenburg-Sweden, 8-12 April 2013.
2. Timbie P.T., Grade J., Weide D.V.D., Maffei B., Pisano G., Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2011 36th International Conference on, TX-USA, 2-7 October 2011.
3. Garcia C., Rumpf R., Tsang H., Barton J., Effects of extreme surface roughness on 3D printed horn antenna, Electron. Lett., 49 (12), 734-736, 2013.



4. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive manufacturing technologies rapid prototyping to direct digital manufacturing, Springer, 2010.
5. Bang J.H., Hwang S.M., Lee S.G., Ahn B.C., Design formulas for the H-plane septum power divider in a rectangular waveguide, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 37 (5), 390-393, 2003.
6. Mallory G.O., Hajdu J.B., *Electroless Plating: Fundamentals and Applications*, William Andrew, 1990.
7. Zhang B., Zirath H., Metallic 3-D printed rectangular waveguides for millimeter-wave applications, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 6 (5), 796-804, 2016.
8. Zhang B., Zirath H., A metallic 3-D printed E-band radio front end, *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, 26 (5), 331-333, 2016.
9. Sehm T., Lehto A., Räisänen A.V., A large planar 39 GHz antenna array of waveguide-fed horns, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 46 (8), 1189-1193, 1998.
10. Genç A., Design and manufacturing of X-Ku band horn array antenna and passive microwave components, PhD thesis, Suleyman Demirel University, Isparta, 2017.
11. Genç A., Impedance matching of dielectric loaded T-junction in X-Ku band, *Proc. Int. Conf. on Signal Processing and Communication Application (SIU), Zonguldak-Türkiye*, 16-19 May 2016.
12. Ozenc K., Aydemir M.E., Oncu A., Design of a 1.26 GHz high gain microstrip rectangular patch antenna using double layer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (4), 743-750, 2013.
13. Von Bieren A., De Rijk E., Ansermet J.P., Macor A., Monolithic metal-coated plastic components for mm-wave applications, *Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, 2014 39th International Conference on, AZ-USA, 14-19 September 2014.
14. Chieh J.C.S., Dick B., Loui S., Rockway J.D., Development of a Ku-band corrugated conical horn using 3-D print technology, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 13, 201-204, 2014.
15. Genç A., Başıyigit İ.B., Göksu T., Helhel S., The comparison of the characteristics of the double-ridged horn antennas depending the geometry of ridge profiles for wideband application, *38th Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2017, St. Petersburg-Rusya*, 19-23 Mayıs 2017.
16. D'Auria M., Otter W.J., Hazell J., Gillatt B.T., Long-Collins C., Ridler N.M., Lucyszyn S., 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 5 (9), 1339-1349, 2015.
17. Zhang B., Zirath H., Metallic 3-D printed rectangular waveguides for millimeter-wave applications, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 6 (5), 796-804, 2016.

