

Araştırma Makalesi / Research Article

V-Bant Düz Dalga Kılavuzlarının Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretimi ve İletkenliklerinin İncelenmesi

Abdulahim EVLİ^{1*}, Asaf Behzat ŞAHİN¹

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Doğa ve Mühendislik Bilimleri Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara.

* Sorumlu yazar: e-posta: abdulahimevli@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8710-7921>
absahin@ybu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9759-8448>

Geliş Tarihi: 08.02.2021

Kabul Tarihi: 08.04.2021

Öz

Bu çalışmada, ticari olarak temin edilebilen standart dikdörtgen dalga kılavuzları (DDK) üç boyutlu (3B) yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu üretim, diğer literatürden yer alan çalışmalarından farklı olarak V bantta kullanılmak üzere gerçekleştirilmiş ve iletkenliği incelenmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretilen milimetre (mm) dalga uygulama ekipmanlarının artan fiyat ve teslim süresi, bu tür ürünlerin mümkün olduğunca kolay ve ucuz üretilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Dalga kılavuzları (DK) elektromanyetik dalgaları belirli bir frekans aralığında istenilen bir yönde bir noktadan diğer bir noktaya taşımak için kullanılan pasif elemanlardır. TE₁₀ modunda DDK SolidWorks programı kullanılarak tasarlanmış ve daha sonra eriyik yığılma modelleme yöntemi ile PLA termoplastığı kullanılarak üretilmiştir. DK'ların iç yüzeyi kaplandıktan sonra performansı oluşturulan mm-dalga sistemi üzerinde test edilmiştir. Milimetre dalga sisteminde bileşenlerin performansı olarak zayıflama kaybı (S₂₁) ölçülmüştür ve sonuç olarak DDK'ların 1 dB'den daha az zayıflama kaybı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada mm-dalga uygulama bileşenlerinin 3B yazıcı ve iletken gümüş boya kullanarak daha ucuz ve hızlı bir şekilde üretilbildiği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler

Milimetre Dalga;
Düz Dalga Kılavuzları;
3B Baskı;
V-Bant

Production of V-Band Straight Waveguides with Three-Dimensional Printer and Examining of Their Conductivity

Abstract

In this work standart rectangular straight waveguides which were obtained commercially are manufactured using three dimensional (3D) printer. Unlike other literature studies, this production was carried out for using in V-band and its conductivity was examined. Increasing cost and delivery time of the traditionally manufactured milimeter (mm) wave application components lead to the requirement of producing this type of products as easy and cheap as possible. Waveguides are passive components that are used to carry the magnetic wave from one point to another point in the desired direction in a certain frequency range. For TE₁₀ mode, rectangular waveguides have been designed with the SolidWorks program and then manufactured using PLA thermoplastics with the fused deposition modelling method. After the inner surfaces of the waveguides are completely covered with silver conductive paint, their performances are tested on the mm wave testpad. The performance of components on the mm-wave system has been measured by obtaining attenuation loss (S₂₁) and as a result, it is seen that straight rectangular waveguides have an attenuation loss of less than 1 dB. It is demonstrated that mm wave application components can be produced with 3D printer cheaper and faster and examined of the conductivities.

Keywords

Milimeter wave;
Straight Waveguides;
3D Printing;
V-Band

1. Giriş

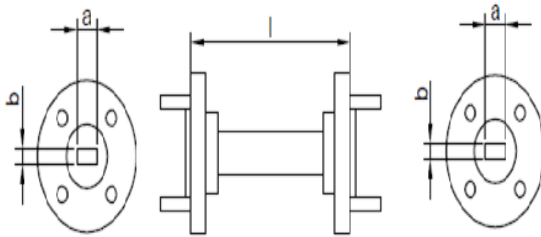
Dikdörtgen dalga kılavuzları (Rectangular waveguide-RWG) milimetre (mm) ve terahertz sistemlerinde sıkça kullanılan pasif elemanlardır (Balzer *et al.* 2016). Haberleşme sistemleri ve özellikle uydu haberleşmesi için kullanılmaktadır. WR15 dalga kılavuzları V bandında (50-75 GHz) mm-dalga haberleşme sistemleri, radar sistemi uygulamaları gibi antenlerin ön uç kısmında kullanılmaktadır. Dalga kılavuzları (DK) ağırlıklarının düşük olması, ucuz ve hızlı üretilmelerinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir (Geterrud *et al.* 2013). Özellikle son yıllarda farklı türdeki elemanların üretilmesinde ve geliştirilmesinde rollerinin artmasıyla birlikte üç boyutlu (3B) yazıcılar, mm pasif elemanların üretilmesinde daha fazla kullanılmaya başlanmıştır ve böylece antenlerin ve dalga kılavuzlarının üretimi kolaylaşmıştır. Geleneksel üretim metotlarının uzun teslim süresi, radyo frekans (RF) bileşenleri ve mm-dalga uygulama sistemi ürünlerinin yüksek maliyeti, araştırmacıları 3B yazıcıların yardımıyla RF bileşenleri üretme yoluna itmiştir. Katmanlı üretim, uzay alanında, biyomedikal ve birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Milimetre dalga sisteminde kullanılan anten, filtre ve DK gibi ara bileşen elemanları SolidWorks bilgisayar destekli çizim programı (CAD) aracılığıyla modellenilebilir. Daha sonra ise yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve eriyik yağma modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM) 3B yazıcılarda kullanılan termoplastik alifatik bir poliyester olan polilaktik asit (PLA) filament ya da Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) filament kullanılarak yazdırılır. FDM tekniği yaygın olarak kullanılan 3B baskı teknolojilerinden biridir. Bu teknikte PLA ya da ABS gibi termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Eklemeli üretim olarak da adlandırılan bu teknikte üretim nesne oluşuna kadar malzeme katmanı üzerine katman ekleyerek, geleneksel üretim metoduna göre kısa sürede ve ucuz maliyetle karmaşık yapıdaki nesnelere oluşturur (Kartal 2018). Ayrıca stereo-litografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS/SLM), polyjet gibi üretim teknikleri de bulunmaktadır. Geleneksel mikrodalga ve mm-dalga uygulamaları için, SLS/SLM ve bağlayıcı püskürtme

(Binder Jetting-BJ) metal üretim metodu, metal dalga kılavuzları için yüksek boyutlu bir doğrulukla üretim için uygun olmasına rağmen, 3B baskıda yüksek sermaye yatırımı ve metal alaşımli tozlar biçiminde yüksek maliyetli malzemeler gerektirir (Chan *et al.* 2018). PLA tabanlı 3B baskı tekniği, metal üretim imalatına kıyasla düşük ağırlıkta, düşük malzemede ve kısa sürede üretim gibi avantajlara sahiptir (Itagaki *et al.* 2019). PLA, nispeten ucuz bir malzemedir ve FDM 3B yazıcılar için uygun maliyetli malzeme üretiminde tercih edilmektedir (Sorocki *et al.* 2017). FDM 3B yazıcı ile bir nesne oluşturmak için termoplastik filamentleri sıcaklık kontrollü nozle ile ısıtarak ve ekstrüde ederek, katman katman parçalar aşağıdan yukarıya doğru yazdırılır (Promarin and Somwang 2019). Öncelikle, herhangi bir CAD programı ile oluşturulan ürünün STL dosyası 3B yazıcının programına aktarılır. 3B yazıcı için nozül çapı, baskı hızı, dolgu yüzdesi gibi parametreler hazırlandıktan sonra nozül aracılığı ile termoplastik belirli bir sıcaklığa kadar ısıtma işleminden sonra eritilerek katman katman nesne oluşmaktadır. Daha sonra nesne soğutularak ve katılarak hazır hale gelmektedir. Oluşan nesnenin elektromanyetik dalgayı (EM) kılavuzlaması için kaplama işlemi gerekmektedir. Kaplama işleminde ise elektrolizli ve elektrolizsiz işlem yapılabilmektedir. Elektroliz işlemi olmadan uygulamada boyama ve bantlama gibi birçok farklı teknik kullanılabilir (Karakoç ve Şahin 2020). Dalga kılavuzların kaplanması için gümüş iletken boya ile iç kısmı boyama tekniği tercih edilmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda yüksek frekansta güç kaybı olmaması için iç kısmının mükemmel pürüzsüz yüzeye sahip olması gerektiği önerilmiştir (Zhang and Zirath 2016). Bu çalışmada, daha önceki literatür çalışmalarından farklı olarak V bandında 3B yazıcı ile TE₁₀ baskın modda DDK üretilerek laboratuvarında deneysel çalışması yapılmıştır. Farklı uzunluktaki DDK iletkenlikleri ve zayıflama kayıpları incelenmiştir. Malzemeler FDM tekniği ile üretilmiş olup malzeme tipi olarak da kullanması kolay olan PLA termoplastik tercih edilmiştir ve iletken olmayan bu yapı üretildikten sonra iç kısmının bir iletken ile kaplanmasına ihtiyaç duyulmuştur. İç kısmı gümüş iletken boya ile iletken hale gelen bileşenler mm-dalga sisteminde 56-64 GHz frekansında

performansları test edilmiştir ve iletkenlikleri incelenmiştir. Milimetre dalga sistemi verici, alıcı, huni anten ve DK elemanlarından oluşmaktadır. Bu makalede elde edilen dalga kılavuzlarının 3B modelinin üretim detayları ve fiziksel özellikleri 2. bölümde açıklanmıştır. 3. bölümde ise ölçüm sonuçları teorik ve deneysel olarak açıklanmıştır. Son olarak ise 4. bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. 3B Model ve Üretim Detayları

Tasarlanan dikdörtgen dalga kılavuzları sırasıyla SAGE Milimetre firması tarafından üretilen SWG-15010-FB, SWG-15015-FB, SWG-15020-FB düz DDK (rectangular waveguide – RWG) modellerine dayanmaktadır. Şekil 1’de verilen DK’ların geometrisinde, giriş ve çıkış bağlantı noktasında standart bir WR15 kesiti (3,76 mm × 1,88 mm) bulunur. TE₁₀ baskın modunda kesim frekansı Denklem 1’de verilen eşitlikten 39,89 GHz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Düz dalga kılavuzu CAD modeli

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

Çizelge 1’de ise farklı uzunluktaki dalga kılavuzların boyutları gösterilmiştir. Ayrıca DDK çalışma bant aralığı teorikte $1.25f_c < f < 1.89f_c$ olarak belirlenmiştir. Teorik olarak ideal WR15 DK’ları 60 GHz frekansında zayıflama sabiti Denklem 4’te 1.5 dB/m olarak hesaplanmıştır. Denklem 1’de a ve b kılavuzun bantlarını göstermektedir ve m , n ise EM dalganın mod derecesini göstermektedir. DK’nın içinde boşluk bulunmakla birlikte farklı bir malzeme kullanıldığı zaman dielektrik katsayısının (ϵ) değişmesiyle birlikte dalga kılavuzunun boyutları küçülmektedir. Dielektrik kayıp ise dielektrik

sabitine bağlı olarak kayıp tanjantın (tangent loss, $\tan\delta$) artmasıyla yükselir (Genç vd. 2018).

DK’ları Solidwork programında simetrik olarak endüstri standardı STL dosyası olarak kaydedildikten sonra bir 3B baskı sistemine aktarılmıştır. Daha sonra bileşenler RAISE3D tarafından sağlanan polimer polilaktik asit (PLA) filament malzemesi kullanılarak Şekil 2’de gösterilen FlashForge Adventurer3 3B yazıcı ile simetrik olarak üretilmiştir.



Şekil 2. 3B Yazıcı

3B yazıcı ile üretilen DK’ların iç yüzeyi iletkenliği sağlamak için ideal iletkenliği $6,30 \times 10^7$ (S/m) olan gümüş boya ile kaplanmıştır. Gümüş boya olarak Electrofix elektrik iletken boya seti tercih edilmiştir. Kullanılan gümüş bazlı iletken boya seti radyo antenleri ve diğer alçak voltaj uygulamaları-baskı devre vs. gibi yerlerde kullanılmaktadır. Kaplama işleminden sonra uzun süre bekletilerek, yaklaşık 4-5 saat sonra, simetrik bileşen parçaları yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. İç kısımdaki pürüzlülüklerin eklemeye kaybını etkilediği görülmüştür (Zhang and Zirath 2016, Genç vd. 2019). Özellikle yüksek frekanslarda iç yüzeylerdeki pürüzlülükler performanslarını daha çok azaltmaktadır (Genç vd. 2019). Bileşenlerin tümü iç yüzeyi iletken gümüş boya ile tamamen yaklaşık $30 \pm 10\%$ μm kalınlığında boyanmıştır. İletken gümüş boyanın kalınlığı hassasiyeti 1 μm olan analog mikrometre ile saptanmıştır. Kaplanan iletken gümüş boyanın kalınlığı 56-64 GHz için hesaplanan deri kalınlığından kalındır. İdeal gümüş iletkenin 60 GHz da deri kalınlığı denklem 4’te verilen denkleme göre 0.259 μm olarak hesaplanmıştır.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu f \pi \sigma}} \quad (2)$$

İdeal WR15 düz dalga kılavuzlarının gerilim duran dalga oranı (VSWR) 1.05:1 kadardır.



Şekil 3. Dalga Kılavuzları

Çizelge 1. Düz Dalga Kılavuzları

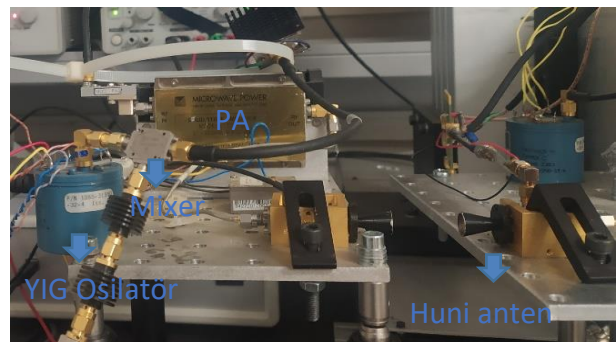
Parçalar	a(mm)	b(mm)	L(mm)	İletkenlik(σ)
SWG-15010-FB	3.76	1.88	25.04	5×10^5
SWG-15015-FB	3.76	1.88	38.1	3.7×10^5
SWG-15020-FB	3.76	1.88	50.8	2.4×10^5

3. Karşılaştırma ve Ölçüm Sonuçları

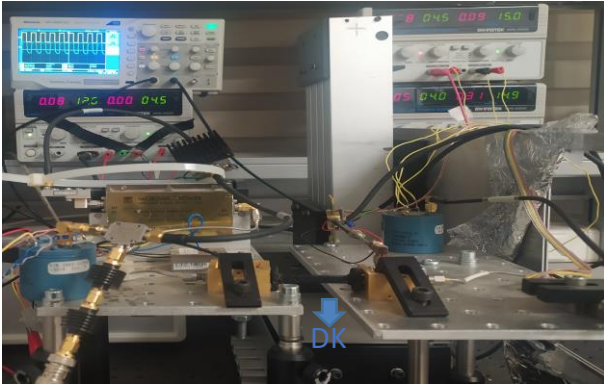
Dikdörtgen dalga kılavuzlarının 56-64 GHz de ölçüm için deneysel kurulumu Şekil 4'te gösterilmiştir. Milimetre dalga sistemi alıcı ve verici olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Alıcı ve verici kısımda akım ile ayarlanabilir YIG (Yttrium Iron Garnet) osilatör bulunmaktadır. YIG osilatör yardımıyla üretilen 9-11 GHz arasındaki frekans, frekans çarpanı ile 3 katına çıkartılır ve güç yükseltici ile sinyalin gücü yükseltilir. Daha sonra frekans katlayıcı ile frekans 2 katına çıkartılarak elde edilen 56-64 GHz arasındaki sinyal ile ölçümler yapılmaktadır. Alıcı kısımda ise düşük gürültülü yükselteç, YIG osilatör, frekans çarpanları ve güç dedektörü bulunmaktadır. Dalga kılavuzlarının performansı Şekil 4'de mm-dalga sisteminde test edilmiştir.

Şekil 4'de mm-dalga sisteminde bileşenlerin performansı test edilmeden önce, üretilen WR15 huni (horn) anten ile birlikte çok yakın mesafede 56-64 GHz arasında maksimum seviyede alınan sinyal gücü tespit edilmiştir. Harmonik karıştırıcının çıkışında kalibrasyonlu WR15 bulunmaktadır. Daha sonra üretilen bileşenler Şekil 4'de gösterildiği gibi alıcı ve vericide bulunan harmonik karıştırıcının çıkışında birleştirilerek performansları huni anten ile alınan referans sinyal gücüyle karşılaştırılarak test edilmiştir. Dalga kılavuzunun ölçüm sonucu alınan

referans sinyal ile karşılaştırılmasıyla iletim kaybı (S21) elde edilmiştir. CST Studio Suite EM manyetik benzetim programı kullanılarak bileşenlerin simülasyon ölçümleri yapılmıştır. Simülasyonda iletkenliği $6,30 \times 10^7$ (S/m) olan kayıplı gümüş kullanılmıştır. Ayrıca dalga başına örgü sayısı 25, örgü şekli altı yüzlü (hexahedral), sınır koşulları $E_t = 0$ olarak seçilmiştir. Daha sonra deneysel ölçümleri ve benzetim ölçümleri Şekil 5'de verildiği gibi karşılaştırılmıştır.



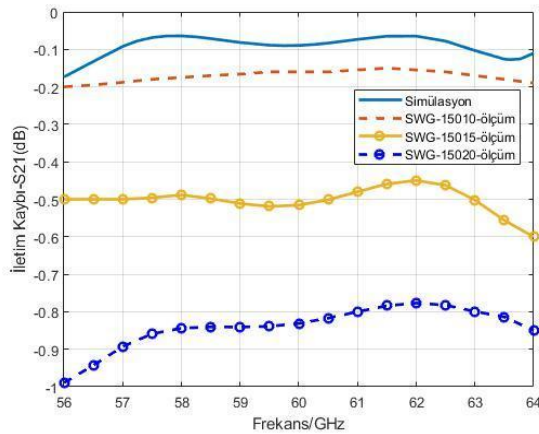
(a)



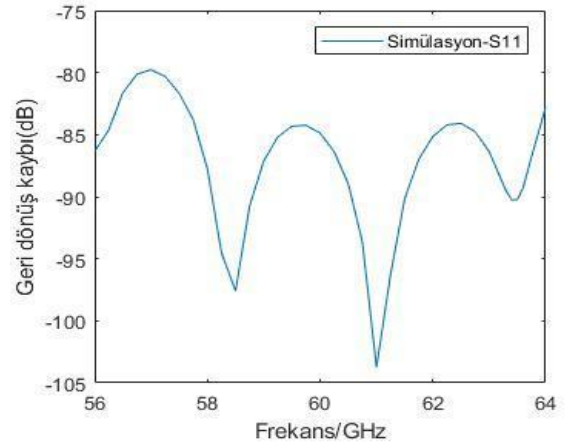
(b)
Şekil 4. (a) (b) Sistem düzeneği

DK'ların performansını belirleyen temel parametreler iletim kaybı ve geri dönüş kaybıdır. SWG-15 elemanlarının iletim kayıpları benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında 1 dB'den daha az kayıp olduğu görülmektedir. Şekil 5'de görüldüğü gibi SWG-15010 elemanın zayıflama kaybı benzetim sonucu ile hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Ama bileşenin uzunluğu arttıkça iletim kaybı artmaktadır. SWG-15020 elemanın ise iletim kaybı, diğer elemanlara ve simülasyon sonucuna göre daha fazladır. İletim kaybının artmasının nedeni ise yüzey pürüzlülüğünün olmasından dolayıdır. Tablo 1'de elemanların iletkenlik değerleri Denklem 3'e göre hesaplanıp verilmiştir (Mach and Cinert 2011). DK boyu "Uzunluk", iletken kesit alanı "Alan", uçları arasındaki direnci "Direnc" olarak ifade edilmektedir.

$$\sigma = \frac{\text{Uzunluk}}{\text{Alan} \times \text{Direnc}} \quad (3)$$



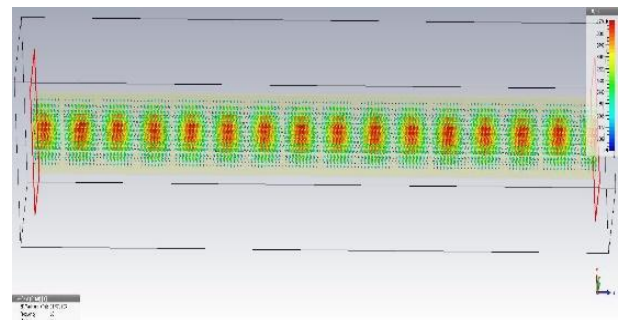
(a)



(b)

Şekil 5. Düz Dalga Kılavuzlarının Performans Ölçümü (a) İletim Kaybı (b) Geri Dönüş Kaybı

Literatürde, mm dalgada yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla iletkenliğin azaldığı sonucuna varılmıştır (Kirley *et al.* 2012). Bileşenlerin uzunluğu arttıkça kaplama sırasında iletken gümüş boyanın homojen olarak dağılamamasından dolayı iletkenlik azalmaktadır. İletkenliklerin azalmasından dolayı ise bileşenlerin iletim kayıpları artmaktadır. Sonuç olarak bileşenlerin yüzey pürüzlüğünden dolayı iletkenliklerinin azalmasıyla ideal ölçüm sonuçlarından uzaklaştığı görülmektedir. İdeal DK'ların geri dönüş kaybı ise -80 dB altında olduğu Şekil 5'de görülmektedir. İdeal DK'nın 60 GHz frekansta elektrik alan dağılımı ise Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Elektrik alan dağılımı

Dalgı kılavuzlarında ohmik ve yalıtkan kayıp olmak üzere iki tür zayıflama söz konusudur (Pozar 2005). DK toplam güç zayıflaması Denklem 4'de ve TE₁₀ modda ohmik kayıp ve dielektrik kayıp denklemleri Denklem 5 ve Denklem 6'da verilmiştir.

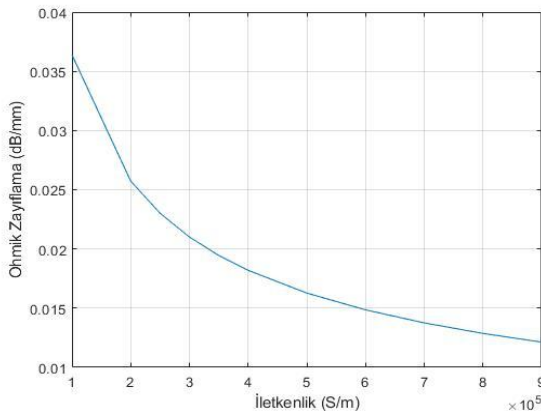
$$\alpha_T = \alpha_c + \alpha_D \quad (4)$$

Ohmik kayıp (α_c) metal duvarlardan kaynaklanan ve daha önce bahsedilen iletken kayıptır. Yalıtkan kayıp (α_D) ise DDK içindeki bulunan kayıplı dielektrik malzemeden kaynaklanmaktadır. Fakat bu çalışmada DDK içerisinde boşluk bulunmaktadır.

$$\alpha_d = \frac{\omega \tan \delta}{2c \sqrt{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}} \quad (5)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \alpha_c = \frac{R_s}{\eta b} \frac{(1 + \frac{\omega_c^2}{\omega^2})}{\sqrt{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}}} \quad (6)$$

Dielektrik kayıp, kayıp tanjanta ($\tan \delta$) bağlı olarak değişmektedir. Dielektrik kayıp, ohmik kayba göre daha küçük olacağından dolayı buradar önemsenmemiştir. Ohmik kayıp ya da iletken kaybı, iletken maddenin yüzey direncine " R_s " bağlıdır. Ortamın iç direncini " η ", ışık hızını " c ", kesim açısı frekansını " ω_c ", manyetik geçirgenliğini " μ " ifade etmektedir. Ohmik kayıp nepers/m biriminde ifade edilmektedir ve değeri dB/m açısından $\alpha_{dB} = 8.686 \alpha_c$ olarak elde edilmektedir. Ohmik kayıp sabitini etkileyen en önemli parametre iletkenliktir. Bileşenin 60 Ghz frekansta iletkenliğe bağlı ohmik kayıp grafiği Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi iletkenlik azaldıkça ohmik kayıp artışı görülmektedir.



Şekil 7. Ohmik Zayıflama

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 3B yazıcı ile V bandında düz dalga kılavuzları üretilmiştir. İletken gümüş boya ile

kaplama işleminden sonra performansları test edilmiş ve iletkenlikleri incelenmiştir. SWG-15010 model dalga kılavuzu, ideal iletkenliğe sahip DDK CST simülasyon ölçümü ile karşılaştırıldığında hemen hemen aynı performansa sahip olduğu görülmektedir. SWG-15015 ve SWG-15020 elemanlarının performansında ise 1 dB' den daha az zayıflama kaybı görülmüştür. Elemanların uzunluğu arttıkça, kaplama işlemi sırasında iletken boya homojen olarak dağılamadığından dolayı yüzey pürüzlüğü oluşmakta ve iletkenlikleri azalmaktadır. Bunun sonucu olarak iletim kaybı artmaktadır. Bu literatürde bahsedilen X-Bantta yapılan çalışma ile karşılaştırıldığı zaman, V bantta yapılan bu çalışma ile yakın performans sonuçlara sahip olduğu görülmüştür (Genç vd. 2019). Deneysel olarak yapılan bu çalışma, 3B yazıcı ile FDM tekniği kullanılarak milimetre dalga pasif elemanların ucuz ve kısa sürede üretilebileceğini göstermektedir.

5. Kaynaklar

- Balzer, J. C., Weidenbach, M., Busch, S. F., Koch, M., 2016. 3D printed waveguides for 120 GHz. *2016 German Microwave Conference (GeMIC)*, 2016, Bochum, 1-3.
- Geterud, E. G., Bergmark, P., Yang, J., 2013. Lightweight waveguide and antenna components using plating on plastics. *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013, Gothenburg, 1812-1815.
- Kartal, F., 2018. Yapım zamanı için erimiş birikim modelleme işlem parametrelerinin optimizasyonu. *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry*, **2:1**(2018), 96-103.
- Chan, K. Y., Ramer, R., Sorrentino, R., 2018. Low-Cost Ku-Band Waveguide Devices Using 3-D Printing and Liquid Metal Filling. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 3993-4001.
- Itagaki, K., Doi, M., Hara, T., and Lee, S., 2019. 3D Printed Waffle Type Waveguide for Millimeter Wave Application. *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Paris, France, 1-2.

- Sorocki, J., Koryciak, S., Piekarz, I. Gruszczynski S. and Wincza K., 2017. Investigation on additive manufacturing with conductive PLA filament for realisation of low-loss suspended microstrip microwave circuits. *2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)*, 2017, Kanazawa. 48-51.
- Promarin, K. and Somwang, P., 2019. Thermal Behavior of FDM 3D Printing by Using Arduino Mega 2560 Approach. *16th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Pattaya, Chonburi, Thailand, 767-770.
- Karakoç, M. C., Şahin, A. B., 2020. Development of 15-dB Gain Conical Horn Antenna Using 3D Printing Technology. *Electica*, **20(2)**, 177-181.
- Zhang, B., Zirath, H. 2016. Metallic 3-D printed rectangular waveguides for millimeter-wave applications. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol* 2016, **6 (5)**, 796-804.
- Genc, A., Göksu, T., Helhel, S., 2019. 3D baskı ve bakır kaplama ile üretilen dalga kılavuzu dönüş elemanlarının performanslarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **34(2)**, 801-810.
- Genç, A., Göksu T., Doğan H., Başyığıt, I., Helhel S., 2019. Fabrication of Low-weight Broadband 90° Waveguide Twist at X-Ku Band with 3D Printing Technology. *Proceedings of 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems*, 971-978.
- Genc, A.G., Tuna, H., Selcuk., 2018. Fabrication of 3D Printed Rectangular Waveguide T-Junction With in-Phase And Equal Power Division. *Microwave and Optical Technology Letters*, (**60**), 2043-2048.
- Mach, P., Cinert, J., 2011. Conductive mechanisms in electrical conductive adhesives with isotropical electrical conductivity. *2011 IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Timisoara, 103-106.
- Kirley, M. P., Carlsson, N. B., Yang B., Booske, J. H., 2012. Study of the effect of surface roughness and skin depth on the conductivity of metals at 650 GHz. *IVEC 2012*, Monterey, CA, 239-240.
- Pozar, D. M., 2005. Microwave engineering. Third Edition. John Wiley & Sons.