



3 BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE BİR MİKROŞERİT YAMA ANTENİN MALİYET ETKİN ÜRETİMİ

Peyman MAHOUTI*

Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü,
İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

3 boyutlu yazıcı,
Maliyet etkin üretim,
Mikroşerit anten,
Değişken Di-elektrik.

Öz

Günümüz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan anten modellerinden biri mikroşerit yama antendir. Mikroşerit yama antenler düzlemsel yapılara sahip olmaları nedeni ile birçok kablosuz haberleşme uygulamasında kullanılmaktadırlar. Bu yapılar genellikle düşük maliyetli olması için; düşük hassasiyetli, çevreye zararlı ve sağlık riski taşıyan bakır eritme perhidrol tuz ruhu yöntemi veya maliyeti çok daha yüksek, çevreye daha az zararlı ve daha düşük üretim hatası olan mekanik kazıma veya lazer kesim tekniği ile üretilmektedir. Son yıllarda hızlı, doğruluğu yüksek ve düşük maliyetli üretim işlemi için geliştirilen yeniliklerden biri, 3 boyutlu (3B) yazıcı teknolojisidir. Bu çalışma kapsamında, 3B yazıcı teknolojisinde en yaygın kullanılan tekniklerden biri olan Eritilmiş Dökme Modelleme teknolojisi kullanılarak geleneksel bakır eritme, kazıma veya lazer kesim üretim teknikleri yerine, maliyeti düşük, hassasiyeti yüksek ve çevre dostu bir üretim tekniği sunulmuştur. Bu kapsamda tipik bir mikroşerit yama anten modeli 3B elektromanyetik benzetim ortamı CST de oluşturulmuştur. Tasarıma ait performans kriterleri incelendikten sonra uygun tasarım modelinin 3B yazıcı teknolojisi ile üretimi gerçekleştirilip deneysel sonuçlarının benzetim sonuçları ile kıyaslanması yapılmıştır. Üretilen anten modelinin 2.45GHz frekansında geri dönüş kaybı -15 dB ve kazancı 7.1 dBi olarak ölçülmüştür. Böylelikle kullanımı ile hızlı, çevre dostu, sağlığa tehdidi olmayan, ulaşılabilir, maliyet etkin hassasiyeti yüksek tasarımların gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

COST EFFICIENT PROTOTYPING OF MICROSTRIP PATCH ANTENNA USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

Keywords

3D printer,
Cost efficient prototyping,
Microstrip antenna,
Variable dielectric constant.

Abstract

Microstrip patch antenna is one of the commonly used antenna model in today's technology. Due to their planar structure, microstrip antenna are being used in many wireless communication application. Commonly during the prototyping process of these stages, either methods with low cost that has low accuracy, and have hazardous effect both on environment and human health such as melting copper with hydrochloric acid and perhydrol or methods with lesser prototyping error at the expense of high cost values like mechanic milling or laser cutting are being used. 3D printing technology is one of the recent innovation for fast, accurate and low cost prototyping. Herein, a low cost, accurate and environmental friendly prototyping method by using Fused Deposition Modelling (FDM), is presented instead of the traditionally prototyping methods such as melting copper with acid, milling and laser cutting. Thus, firstly a typical microstrip patch antenna design had been modelled in 3D electromagnetic simulation CST. After the analyst stage of the antenna models performance criteria's, the antenna design with optimally selected parameters had been prototyped with 3D printer for comparison of measured and simulated results. The prototyped antenna model achieves a return loss characteristics of -15dB and Gain 7.1 dBi at 2.45 GHz. As it can be seen from the obtained results, with the proposed 3D printing technology for the prototyping of

* İlgili yazar / Corresponding author: pmahouti@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5922

planar antenna or similar circuit stages it is possible to realize these designs with a fast, environmental friendly, non-hazardous, reachable, cost efficient and high accuracy method.

Alıntı / Cite

Mahouti, P., (2019). 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ile Bir Mikroşerit Yama Antenin Maliyet Etkin Üretimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(3), 473-479.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

P. MAHOUTI, 0000-0002-3351-4433

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	31.01.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	23.02.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.02.2019
Yayın Tarihi / Published Date	15.09.2019

1. Giriş

Günümüzde yüksek verimli ve karmaşık sistem tasarımların gerçekleştirilmesinde başlıca problemlerden olan, tasarım ve optimizasyon süreçleri için gereken yüksek donanımsal ihtiyaçlara ek olarak maliyet etkin bir biçimde üretim gerçekleştirmesini adlandırılabiliriz. Hızlı, yüksek hassasiyetli ve düşük maliyetli mikrodalga devrelerin ilk örnek üretimi mikrodalga mühendisliğindeki zorlayıcı problemlerden biridir. Hızlı, yüksek hassasiyetli ve düşük maliyetli ilk üretim işlemi için son yıllarda geliştirilen yeniliklerden biri, 3 boyutlu (3B) yazıcı teknolojisidir. Son yıllarda 3B yazıcı teknolojisi mimari, makine endüstrisi, biyomedikal ve uçak mühendisliği gibi birçok farklı araştırma alanında etkin bir şekilde kullanımı yaygın hale gelmiştir (Butscher vd, 2013; Xu, 2013; Wang, 2017; Yagnik, 2014; Sivadasan, 2014; Satyanarayanaa vd, 2015; Madhav vd, 2016; Malaeb vd, 2015). 3B yazıcı teknolojisi, plastik veya metalik malzemelerin birbirleri üzerine eklenerek tasarımın ihtiyacı doğrultusunda katmanlar oluşturulması yolu ile 3B modellerin üretilmesini sağlayan bir teknolojidir. 3B yazıcı teknolojisinde en yaygın kullanılan tekniklerden biri, Eritilmiş Dökme Modelleme (Fused Deposition Modelling FDM) metodudur. Bu metod ile ilk üretimi yapılacak olan model, eritilmiş termoplastik malzemeler (Acrylonitrile Butadiene Styrene ABS, PolyLactic Acid PLA) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu metotla üretilen modeller genellikle yüksek ısı ve kimyasal dayanıklılığa ek mekanik dayanıklı yapılara sahip olurlar.

3B yazıcı teknolojisinin kullanıldığı alanlardan biri ise mikrodalga mühendisliğidir. 3B yazıcı teknolojisi dalga kılavuzları, Dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu (DBD), yarıklı dizi antenler, frekans seçici yüzeyler, di-elektrik lensler, KU bant horn anten yapıları gibi, geleneksel üretim metodlarının zor veya kimi şartlarda laboratuvar üretimleri için pratik olmayan birçok tasarımın ilk üretimi için kullanılmıştır (Zhang vd, 2016; Ghazali vd, 2017; Jun vd, 2017; Wang vd, 2017, Wu vd, 2017; Belen vd, 2018; Toy vd, 2017; Garcia vd, 2013; Chiech vd, 2014; Junping vd 2015; Auria vd, 2015; Sage, 2016; Arbaoui vd, 2015; Moscato vd, 2015; Barton vd, 2015).

Günümüz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan anten modellerinden biri mikroşerit yama antenlerdir. Mikroşerit yama antenler düzlemsel yapılara sahip olmaları nedeni ile birçok kablosuz haberleşme uygulamasında kullanılmaktadırlar. Mikroşerit yama antenler genellikle her iki tarafı (üst ve toprak katı) iletken bir levha ile kaplı bir di-elektrik bir malzemenin üzerinde oluşturulan şekillerin, genellik ile kare, eliptik veya dairesel şekillerin, bir iletim hattı ile beslenmesi ile oluşturulan yapılardır. Bant genişlikleri dar olmasına karşın dizi şeklinde birçok farklı yama şekillerinin veya bozulmuş toprak yapısı kullanımı ile tasarımların bant genişliği, huzme genişliği, kazancı gibi karakteristikleri değiştirilebilmektedir. Buna örnek olarak (Belen, 2018) çalışmasında önerilen mikroşerit anten modelinde, eş düzlemsel hat beslemesi sayesinde 3GHz-11GHz bandı aralığında çalışan ultra geniş bantlı bir tasarım geliştirmiştir. (Arı vd, 2012) çalışmasında insan vücuduna uyumlu implant anten tasarımı için yenilikçi ve iç içe yapılardan oluşmuş bir anten mimarisi önermişlerdir. (Ardıc, vd, 2008) de çeşitli mimari tasarıma sahip mikroşerit hat beslemeli, yama dizileri, yarıklı yüklü yama, yarıklı yüklü yama anten dizileri ve çift bant anten yapıları incelenmiş ve 2.4 GHz ISM bandı sayısal kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılacak RF alıcı-verici sistemler için mikroşerit anten tasarımların önerilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak sadece yamanın şekilleri haricinde kullanılan malzemenin değiştirilmesi ile de anten performans karakteristikleri de iyileştirilmeler yapılabilmektedir, örnek olarak (Görgün vd, 2012) çalışmasında karbon nanotüp malzeme kullanılarak bir heliks anten yapısının performans kriterleri incelenmiş ve sonuç olarak heliks anten yapısının karbon nanotüp malzemenin yapılmasının antene ait yönlendiricilik ve kazanç karakteristikleri üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu yanı sıra kayıpların düşmesine neden olduğunu gözlemlenmiştir.

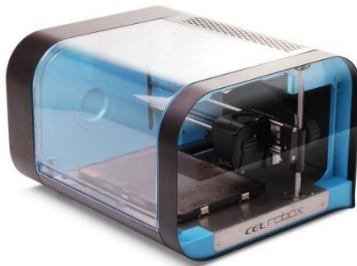
Bu çalışma kapsamında, ISM Bandı alıcı-verici sistemlerinde, endüstriyel, bilimsel ve medikal uygulamalar için kullanılacak mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tasarımda 3B yazıcı teknolojisi ve bu teknolojiye kullanılan malzemelerden PLA malzemesinin iç doluluk oranını değiştirilmesinin ile malzemeye ait etkin di-elektrik katsayısına etkisi göz önüne alınarak bir mikroşerit yama antenin ilk üretimi incelemeye alınmıştır. Bu amaç için öncelik ile tipik bir

mikroşerit yama anten modeli 3B elektromanyetik benzetim aracı CST de oluşturulup benzetimi yapılmıştır. Daha sonra ise elde edilen benzetim sonuçlarının doğrulanması için, modelin 3B yazıcı ile ilk üretimi gerçekleştirilip ölçüm sonuçları incelenmiştir. Elde edilen benzetim ve ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere önerilen 3B yazıcı teknolojisi ile anten üretimi, hızlı, doğruluğu yüksek, çevre dostu ve maliyet etkin bir yöntem olup düşük maliyetli bir ilk üretim yöntemi olarak mikrodalga devrelerin üretiminde kullanılabilmektedir.

Çalışmanın içeriği kısaca şu şekildedir, ikinci bölümde 3B yazıcı teknolojisi ve kullanılacak olan malzemenin iç doluluk oranının değiştirilmesi ile etkin di-elektrik katsayısının değişimi ile ilgili kısa bir inceleme yapılmıştır. Daha sonra ise 3B elektromanyetik benzetim aracı CST ortamında oluşturulan tipik bir kare mikroşerit yama antenin 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak ilk üretimi gerçekleştirilip deneysel sonuçları benzetim sonuçları ile kıyaslanması yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen bulgular ve deneysel sonuçların derlenmesi ile çalışma sonuçları sunulmuştur.

2. 3B Yazıcı Teknolojisi ve PLA Malzemesinin Dielektrik Katsayısı İncelemesi

3B yazıcı teknolojisi, plastik veya metalik malzemelerin birbirleri üzerine eklenerek tasarımın ihtiyacı doğrultusunda katmanlar oluşturulması yolu ile 3B modellerin üretilmesini sağlayan bir teknolojidir. Bu çalışma kapsamında Eritilmiş Dökme Modelleme tekniğinde kullanılan PLA malzemesinin di-elektrik özeliği incelenmiştir. İlk üretimin gerçekleştirilmesi için CEL Robox® Micro üretim platformu (Şekil 1) kullanılmıştır. 3B yazıcı 210x150x100mm³ alanında 500 mikron ile 50 mikron hassasiyete kadar üretim imkânı sağlamaktadır. Tasarımın hassasiyet ihtiyacı yüzey pürüzsüzlüğü gibi kriterler göz önüne alınarak katman hassasiyet değerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu tercih yapılırken unutulmaması gereken nokta, katman kalınlığı artıca üretim işleminin daha pürüzsüz ve detaylı ama bir o kadar da uzun süreceğidir.



Şekil 1. CEL Robox® Micro üretim platformu (CEL Robox)

Ayrıca cihaz üretim esnasında modelin iç doluluk oranında hava boşlukları bırakma özeliğine sahip

olduğu için PLA malzemesi ile üretilen modellerin değişken di-elektrik katsayılarına sahip olmalarını sağlamaktadır. Örnek olarak tamamı ile içi doldurulmuş bir PLA taban malzemesinin di-elektrik katsayısı 2.7 olurken aynı modelin iç doluluk oranı %18 alındığında malzemenin di-elektrik katsayısı 1.2 olacaktır. Zhang vd, 2015 çalışmasında tablo 1 de verilen deneysel ölçümler sonucunda PLA malzemesinin farklı iç doluluk oranlarında aldığı di-elektrik katsayıları verilmiştir. Zhang vd, 2015 tarafından elde edilen verilerin geleneksel interpolasyon teknikleri kullanılarak ara eleman değerlerinin belirlenmesi için bir denklem oluşturulmuştur (denklem (1)). Bu sayede PLA tabanlı bir taban malzemesinin di-elektrik katsayısını yaklaşık olarak 1.2 ile 2.7 arasında elde etmek mümkündür.

Tablo 1. PLA malzemesinin farklı doluluk oranlarında sahip olduğu di-elektrik katsayısı (Zhang, vd, 2015)

Doluluk oranı %	Di-elektrik katsayısı ϵ_r	Kayıp tanjant
18	1.24	0.002
33	1.6	0.004
73	2.53	0.006
100	2.72	0.008

$$\epsilon_r = -1.3 \times 10^{-6} x^3 + 0.0374x + \frac{6.42}{x} + 0.217 \quad (1)$$

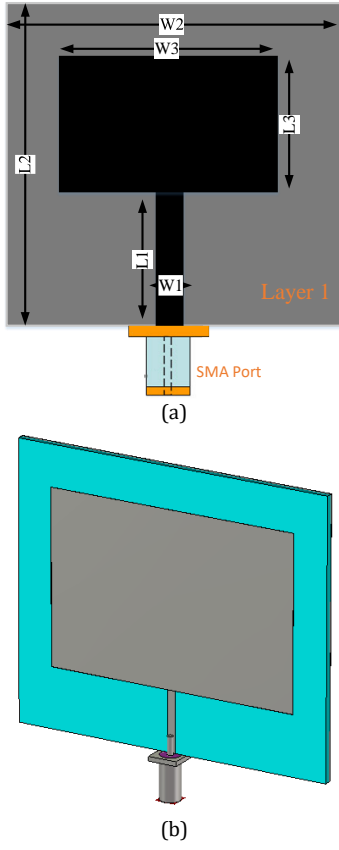
Burada; x malzemeye ait iç doluluk oranının % olarak temsil etmektedir.

3. 3B Anten Tasarımı ve Benzetim Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında, öncelik ile 3B elektromanyetik benzetim aracı CST de ISM bandı uygulamaları için tipik bir mikroşerit yama anten tasarımı ele alınmıştır. Literatürde en yaygın olarak kullanılan anten modellerinden biri kare şekilli mikroşerit yama antendir, bu nedenle üretim işlemi için en uygun tasarım modeli olacağı düşünülmüştür. Anten tasarımına ait 3B modelin şematik gösterimi şekil 2de, değişkenlerinin aldığı değerler tablo 2 de verilmiştir. Tablo 2 de elde edilen değerler simülasyon programı ile üretime uygun olarak parametrik değişkenler incelenerek elde edilmiştir.

Tablo 2. Mikroşerit kare yama antenin tasarım değişkenleri mm

W1	1.8	L1	13.2
W2	70	L2	60
W3	55	L3	37.8
Doluluk oranı / ϵ_r	% 66 / 2.4	H1 Substrate Yüksekliği	1.6

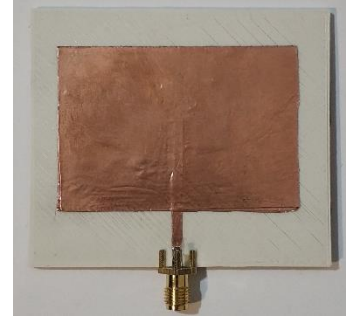


Şekil 2. Tipik bir mikroşerit kare yama anten (a) şematığı (b)3B modeli

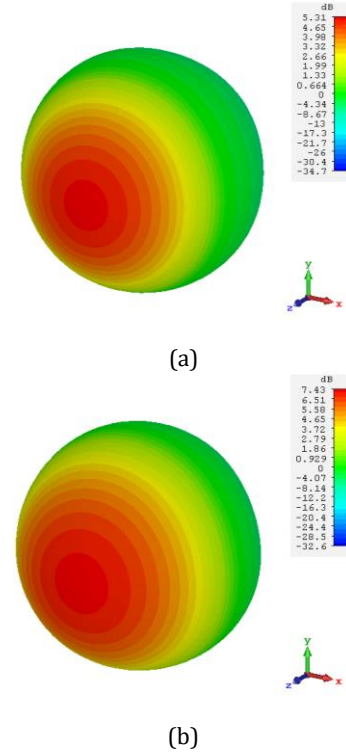
Mikroşerit yama antenin üretim işlemi için öncelik ile CST ortamında antene ait 3B modelin ".STL" uzantılı dosyasını çıkartılması gerekmektedir. Bu dosya daha sonra üretim platformuna verilerek basım işlemi için gerekli olan G-code dosyasının oluşturulması için kullanılacaktır. Üretim işlemi için önemli diğer parametre ise malzeme seçimidir. Bu çalışmada istenilen di-elektrik katsayısı 2.4 olarak seçildiğinden malzemenin doluluk oranı % 66 olarak denklem (1) aracılığı ile elde edilmiştir. Üretim hassasiyeti şeklin basit ve kompleks olmamasından kaynaklı 0.2 mm katman hassasiyeti seçilmiştir. Şekil 3 de ilk üretimi gerçekleştirilmiş mikroşerit yama anten verilmiştir. Anten üretiminde 3B yazıcıdan çıkarılan substrate malzeme üzerine tablo 2de verilen değerlerde bakır bant yapıştırılarak üretim gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4 te tasarlanan antene ait uzak alan ışıması verilmiştir. Anten kazancı 2.4GHz, 2.45GHz için sırasıyla 5.31dB ile 7.43 dB elde edilmiştir.

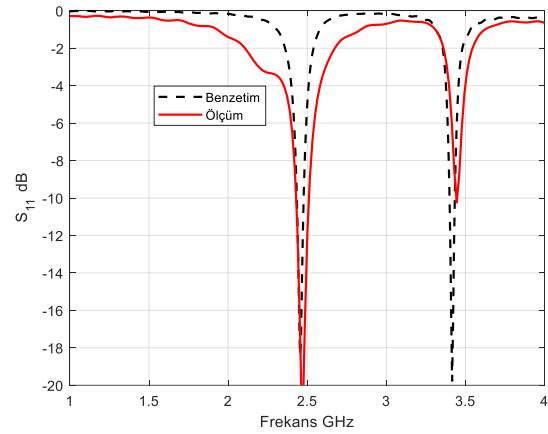
Şekil 5 te üretimi yapılan anten modelinin geri dönüş kaybı ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen anten modeli ile sonucun uyduğu gözlenmiştir.



Şekil 3. 3B yazıcı ile ilk üretimi gerçekleştirilen anten modeli

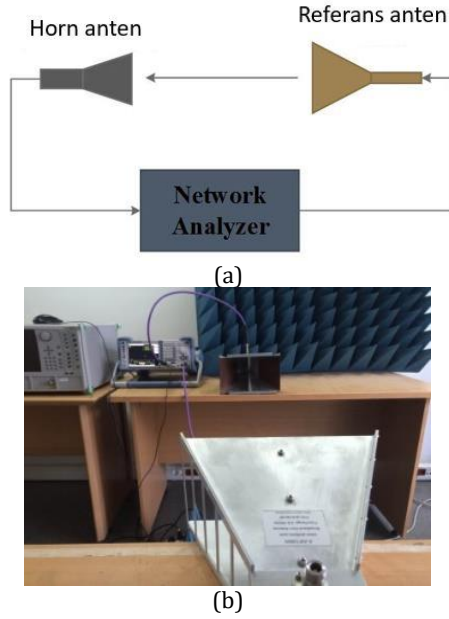


Şekil 4. Antene ait 3B uzak alan kazanç ifadesinin benzetim sonucu (a) 2.4 GHz, (b) 2.45 GHz



Şekil 5. 3B yazıcı ile basılan antene ait S_{11} karakteristiği

Üretilen modülünün ışımaya paterni şekil 6'daki ölçüm düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümlerde referans anten olarak 0.8-18GHz arasında çalışan dual ridged horn anten kullanılmıştır (A-info, lb8180).



Şekil 6. (a) Ölçüm Düzeneği, (b) Laboratuvar Ortamında ölçüm kurulumu (Belen MA vd, 2018)

Şekil 7 de üretilen anten modelinin 2.4GHz ve 2.45GHz için ışımaya huzmeleri verilmiştir. Ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere 3B yazıcı ile üretilen anten modelinden elde edilen deneysel sonuçları benzetim sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. Tablo 3 te simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) 2.45GHz da -15 dB ve kazancı 7.1 dBi olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda önerilen 3B yazıcı tekniği ile bir mikroşerit anten modeli için maliyet etkin üretiminin yapılabileceği görülmüştür.

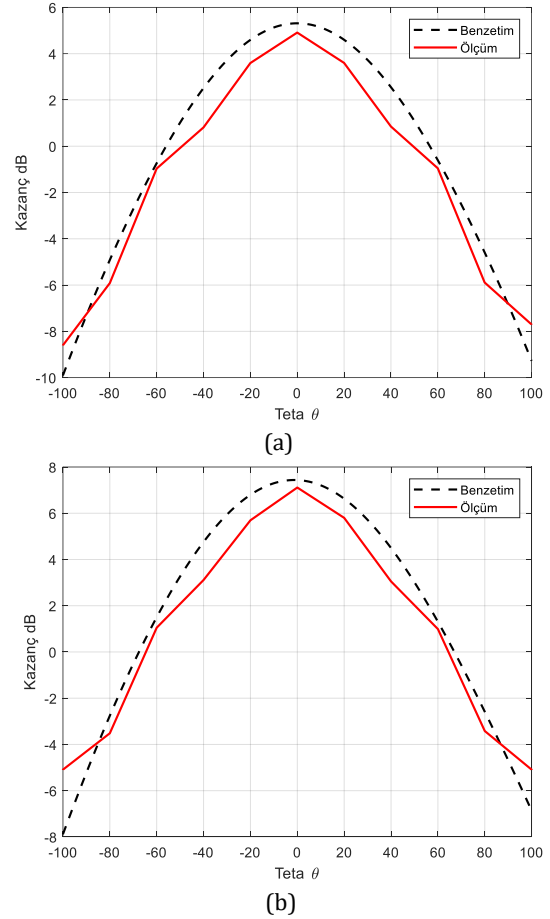
Tablo 3. 3B yazıcı ile üretilen antene ait benzetim ve ölçüm sonuçları

Frekans GHz	S_{11} dB		Kazanç dBi	
	Benzetim	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm
2.4	-6	-5	5.3	4.9
2.45	-18	-15	7.4	7.1

Tablo 4 te literatürde yapılan antenler ile karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda anten geridönüş kaybı ve kazancı iyi durumdadır.

Tablo 4. Literatür Karşılaştırması

	Frequency f GHz	S_{11} dB	Kazanç dBi	Boyut mm
(Yoon, 2006)	2.4	-17	1	40x40
(Khan vd, 2016)	2.4	-25	5	80x100
Bu Çalışmada	2.45	-18	7.1	70x60



Şekil 7. Antene ait uzak alan kazanç ifadesi (a) 2.4 GHz, (b) 2.45 GHz $\varphi = 90^\circ$

4. Sonuç ve Tartışma

Günümüzdeki mühendislik problemlerindeki zorlayıcı problemlerinden biri olan, bir tasarımın hızlı, yüksek hassasiyetli ve maliyet etkin bir biçimde ilk üretiminin 3B yazıcı teknolojisi ile gerçekleşmesi incelenmiştir. Deneysel çalışma amacı ile tipik bir mikroşerit yama anten tasarımı ele alınarak tasarımın 3B elektromanyetik benzetim programı ile analizi yapılmıştır. Modelin 3B yazıcı vasıtası ile ilk üretimi gerçekleştirilip deneysel sonuçları ölçülmüştür. Üretilen anten modelinin 2.45GHz frekansında geri dönüş kaybı -15dB ve kazancı 7dB olarak ölçülmüştür. Elde edilen benzetim ve deneysel çalışmalar sonucundan da görüleceği üzere, önerilen 3B yazıcı teknolojisi ile farklı di-elektrik katsayısına sahip mikroşerit yama anten tasarımlarının

gerçekleştirilebileceği görülmüştür. Bu sayede geleneksel olarak kullanılan bakır eritme perhidrol tuz ruhu kullanımı gibi tehlikeli ve çevreye zararlı üretim metodu, makine kazıma veya lazer baskı gibi maliyeti yüksek teknikler yerine maliyeti düşük, ulaşılabilir ve doğruluğu yüksek bir üretim metodu olarak 3B yazıcı tekniğinin kullanılabilirliği görülmüştür

Teşekkür

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FAP-2018-3427, ayrıca Aktif Naser Elektronik şirketine CST programının akademik lisansını sağladıkları için teşekkür ederiz.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar

A-info, lb8180, 0.8-18 Ghz broad band horn antenna available at: http://www.ainfoinc.com/en/p_ant_h_brd.asp

Arbaoui Y., Laur V., Maalouf A., Queffelec P., Passerieux D., Delias A., Blondy P., Full 3-D printed microwave termination: A simple and low-cost solution, *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 64 (2015), 271–278.

Ari O., Coşkun Ö., "Biyomedikal Uygulamalar İçin Ultra Geniş Bant UWB Anten Tasarımı Ve Analizi", Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler Dergisi, cilt.1, ss.1-4, 2012.

Ardıç S. B., Kaya A., Coskun Ö. "Slot-Loaded Microstrip Antenna Design of Transceiver for Wireless Data Communication in ISM Band" *Beykent University, Journal of Science and Technology*, (2008), 293-314.

Auria M., Otter W.J., Hazell J., Gillatt B.T.W., Long-Collins C., Ridler N.M., Lucyszyn S., 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides, *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol* 5 (2015), 1339–1349.

Barton J.H., Garcia C.R., Berry E.A., Salas R., Rumpf R.C., 3- D printed all-dielectric frequency selective surface with large bandwidth and field of view, *IEEE Trans Antennas Propag* 63 (2015), 1032–1039.

Belen MA, Ultra Geniş Band Uygulamaları için Düzlemsel Hat Beslemeli Mikroşerit Anten Tasarımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, (2018).

Belen MA, Mahouti P. Design and realization of quasi Yagi antenna for indoor application with 3D printing technology. *Microw Opt Technol Lett.* (2018); 60:2177–2181.

Belen MA, Güneş F, Mahouti P, Belen A, "UWB Gain Enhancement of Horn Antennas Using Miniaturized Frequency Selective Surface", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, (2018), 997-1002.

Butscher A., Bohner M., Doebelin N., Hofmann S., Müller R., New depowdering-friendly designs for three-dimensional printing of calcium phosphate bone substitutes, *Acta Biomaterialia*, 2013, 9149-9158s, ISSN 1742-7061,

CEL Robox® Micro üretim platformu, <http://cel-uk.com/3d-printer/rbx01-480.html>. Available on [21.11.2018]

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 Wireless Propag Lett* 13 (2014), 201–204.

Garcia C. R., Rumph R. C., Tsang H. H., Barton J. H., Effects of extreme surface roughness on 3D printed horn antenna, *Electron Lett* 49 (2013), 734–736.

Ghazali M.I.M., Karuppuswami S., Kaur, A, '3-D printed air substrates for the design and fabrication of RF components', *Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, (2017), 982–989, doi: 10.1109/TCPMT.2017.2686706

Görgün A.R., Coşkun Ö., Kaya İ., "Karbon Nanatüp Malzeme İle Tasarlanan Heliks Antenlerin Performans Parametrelerinin İncelenmesi", *Teknik Bilimler Dergisi*, (2012).

Jun S., Sanz-Izquierdo B., Heirons J., 'Circular polarised antenna fabricated with low-cost 3D and inkjet printing equipment', *Electron. Lett.*, 2017, 370–371, doi: 10.1049/el.2016.4605

Junping S., Wei-Jiang Z., Xinrong L., Xiuhan J., 75-500 MHz quadruple-ridged horn antenna with dual polarisation, *Electron Lett.*, (2015), 597–598.

Khan M. A. H., S. Ali, J. Bae, and C. H., Lee Inkjet Printed Transparent And Bendable Patch Antenna Based On Polydimethylsiloxane And Indium Tin Oxide Nanoparticles, *Microwave And Optical Technology Letters*, (2016) 2884-2887,

- Malaeb Z, Hachem H, Tourbah A, Maalouf T, Zarwi NE, Hamzeh F, 3d Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, (2015), 14–22.
- Moscato S., Bahr R., Le T., Pasian M., Bozzi M., Perregrini L., Tentzeris M.M., Additive manufacturing of 3D substrate integrated waveguide components, *IET Electron Lett* 51 (2015), 1426–1428.
- PLA Filament - Polar White RBX-PLA-WH002, <http://cel-uk.com/3d-printer/filament/pla/rbx-pla-wh002.html>. (Avaliable on 27.01.2019)
- Sage G.P. , 3D printed waveguide slot array antennas, *IEEE Access* 4 (2016), 1258–1265.
- Satyanarayanaa B., Prakash KJ, Component replication using 3D printing technology, *Procedia Materials Science*, (2015), 263 – 269.
- Sivadasan, Use of fused deposition modeling process in investment precision casting - a viable rapid tooling, *International Journal of Conceptions on Mechanical and Civil Engineering*, (2013).
- Toy Y. C., Mahouti P., Güneş F., Belen MA, "Design and manufacturing of an X-band horn antenna using 3-D printing technology," 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, (2017), 195-198. doi: 10.1109/RAST.2017.8002988
- Venu Madhav CH., Kesav R. Sri Nidhi Hrushu, Y. Shivraj Narayan (2016), Importance and Utilization of 3D Printing in Various Applications, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, pp. 24–29.
- Wang K, Ho CC, Zhang C, Wang B, A Review on the 3D Printing of Functional Structures for Medical Phantoms and Regenerated Tissue and Organ Applications, *Engineering*, (2017), 653-662, ISSN 2095-8099,
- Wang S., Zhu L., Wu W.: '3-D printed inhomogeneous substrate and superstrate for application in dual-band and dual-CP stacked patch antenna', *Trans. Antennas Propag.*, (2018), doi: 10.1109/TAP.2018.2810330
- Wu J., Kodi A., Kaya S., 'Monopoles loaded with 3-D-printed dielectrics for future wireless IntraChip communications', *Trans. Antennas Propag.*, (2017), 6838–6846, doi: 10.1109/TAP.2017.2758400.
- Xu T., Zhao W., Zhu JM, Albanna MZ, Yoo JJ, Atala A, Complex heterogeneous tissue constructs containing multiple cell types prepared by inkjet printing technology, *Biomaterials*, 2013, 130-139, ISSN 0142-9612,
- Yagnik D, Fused deposition modeling - a rapid prototyping technique for product cycle time reduction cost effectively in aerospace applications, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, (2014), 62-68.
- Yonn J., Fabrication And Measurement Of Modified Spiral-Patch Antenna for use as a Triple-Band (2.4ghz/ 5ghz) Antenna Microwave And Optical Technology Letters , (2006),1275-1278.
- Zhang S. , Njoku C C., Whittow, W. G. and Vardaxoglou, J. C., Novel 3D printed synthetic dielectric substrates. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, (2015) 2344-2346. doi:10.1002/mop.29324
- Zhang, S., Arya, R.K., Pandey, S., et al.: '3D-printed planar graded index lenses', *Microw. Antennas Propag.*, (2016), 1411–1419, doi: 10.1049/iet-map.2016.0013