

Araştırma Makalesi

3D Yazıcı ile Üretilen Elmas Şekilli Antenin Kablosuz Haberleşme Sistemlerindeki Performans Analizi

Mehmet Duman^{a,*}, Mustafa Duman^b, Volkan Berk^b

^aDüzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.

^bDüzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye.

* Sorumlu Yazar: mehmetduman@duzce.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, 3D yazıcı kullanılarak kablosuz haberleşme sistemleri ile uyumlu çalışabilecek, elmas görüntüsüne sahip, 3 boyutlu bir anten tasarımı ve üretimi sunulmaktadır. Yapılan çalışmadaki amaç, 3D yazıcılar ile standart anten tasarımlarından farklı tipte oluşturulan cisimlerin, bakır bant ile kaplanmasıyla meydana gelen yeni anten tasarımlarının performansını incelemektir. Antenin çalışıp çalışmadığının tespitini yapmaktır. Tasarlanan antenin bilgisayar ortamında 0-4 GHz frekansları aralığında benzetim grafikleri elde edilmiştir ve üretilen anten yine 0-4 GHz frekansları aralığında Nano-VNA ile test edilmiştir. Yapılan literatür araştırmasına göre, çoğu 3D yazıcı yardımıyla üretilip tasarlanan elmas şekline sahip antenlerde, elmasın sadece 2 boyutlu düzlemi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilirken bu çalışmada elmas şeklinin 3 boyutlu düzlem üzerindeki hali ile çalışılmaktadır. Sonuç olarak, elmas şekilli antenin 3000 MHz ve 3805 MHz (laboratuvar ölçümü: 3300 MHz – 3800 MHz) frekansları arasında -15 dB değerinden daha düşük giriş geri yansımaya (S11) oranı ile çalıştığı, dolayısıyla; antenin başarılı bir performans sergilediği görülmektedir. Bu bulgular ışığında, 3D yazıcılarda eklemeli imalatın kullanımı dahilinde, önerilen parametrelerin kullanılmasıyla, elmas şeklinde üretilen antenlerin kablosuz iletişim cihazlarında ve 5G uygulamalarında kullanılabilir olduğu aşikardır. Aynı zamanda, gerçekleştirilen bu çalışma sayesinde başka şekillerde oluşturulabilecek anten tasarımlarının gerçekleştirilmesine olumlu katkı sağlanmış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Elmas şekilli anten tasarımı, Kablosuz iletişim sistemleri, S Bandı, 3D yazıcının farklı uygulama alanları.

Analysis of Performance of 3D-Printed Diamond-Shaped Antenna in Wireless Communication Systems

ABSTRACT

In this study, a three-dimensional antenna design with a diamond shape, compatible with wireless communication systems, produced using a 3D printer, is presented. The aim of the study is to examine the performance of newly designed antennas. They are created with different types than standard antenna designs using 3D printers by covering objects with copper tape. The second aim of the study is to determine whether the antennas operate successfully. Simulation graphs of the designed antenna were obtained in the computer in the frequency range of 0-4 GHz, and the produced antenna was tested with Nano-VNA in the frequency range of 0-4 GHz. According to the literature survey, most diamond-shaped antennas produced and designed with 3D printers operate only on the 2D plane of the diamond, while in this study, the diamond shape is worked on the 3D plane. As a result, it is observed that the diamond-shaped antenna operates with an input return loss (S11) lower than -15 dB between the frequencies of

3000 MHz and 3805 MHz (laboratory measurement: 3300 MHz – 3800 MHz), indicating that the antenna demonstrates successful performance. In light of these findings, it is evident that antennas produced in the diamond shape with the proposed parameters using additive manufacturing on 3D printers can be used in wireless communication devices and 5G applications. At the same time, this study will contribute positively to the realization of antenna designs that can be created in different shapes.

Keywords: *Additive manufacturing, Diamond-shaped antenna design, S Band, The diverse applications of 3D printing, Wireless communication systems.*

I. Giriş

3D yazıcılar, ilk olarak 1980’li yıllardan itibaren başlamış olsa da son 10 yılda popülerliğini ciddi bir şekilde arttırmıştır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki (Glasco ve ark., 2022) 2010 ve 2022 seneleri arasında “3D printing” anahtar kelimesini içeren yayınlar git gide artmaktadır. Buna göre 3D yazıcılarla ilgili yapılan çalışmalar özellikle 2013 senesinden itibaren ciddi bir artış görülmektedir. Buna yönelik olarak 3D yazıcılarla anten tasarımları da son 3 senede yapılan çalışmalarda oldukça öne çıkmaktadır. Y. Wang ve arkadaşları yaptığı çalışmada 3D yazıcılarla üretilen antenlerin yapı ve malzemelerine göre 5G iletişime olan katkısına yönelik detaylı bir inceleme gerçekleştirmiştir (Wang ve ark., 2023). Peter Njogu ve arkadaşları 3D yazıcı ile yapay insan turnağı üzerine bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirerek 5G uygulamalarına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir (Njogu ve ark., 2020). J. Olivia ve arkadaşları ise 3D yazıcıyla bir horn anten tasarımı gerçekleştirerek standart bir horn antenle karşılaştırması üzerine çalışmıştır (Olivová ve ark., 2022). G. Mazingue ve arkadaşları uzay uygulamalarında kullanılabilecek seramik yapıda bir anten tasarlamışlardır (Mazingue ve ark., 2020). Kotzé ve Gilmore, uydu haberleşmesi için X bantta çalışan dairesel polarizasyonlu 3D anten üretmiştir (Kotzé ve Gilmore, 2019).

3D yazıcılar diğer üretim türlerine göre daha özel tasarımların üretilmesine imkan sağlamaktadır (Praveena ve ark., 2022). Bundan dolayı, 3D yazıcılarla üretilen antenlerin standart antenlere nazaran daha geniş bir ürün yelpazesi vardır (Colella ve ark., 2019). Bu hususta, ilgili çalışmada gerçekleştirilen anten tasarımında elmas yapısı model olarak alınmıştır. Bu modelin tercih edilmesindeki temel prensipler; pürüzsüz yüzey yapısına ve daha dayanımlı bir geometriye sahip olmasıdır. Bu şekilde antenin; düşme, çarpma, kırılma durumlarında anten geometrisinin bozulmasının önüne geçilmesi düşünülmüştür. Ayrıca göze daha hoş gelen bir görüntü olmasının satın almada tercih sebeplerine etkisi olabileceği göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çalışma, temel olarak 3D yazıcı kullanılarak elmas şekilli bir dizaynın PLA baskısı alınarak bakır bant kaplanması ardından SMA portun bağlanması ile üretilen bir anten tasarımı oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu işlemde eklemeli imalat kullanılmıştır. Bilgisayar simülasyonları ve gerçek ortam testleri 0-4 GHz frekansları aralığında yapılmıştır. IEEE’ye göre S bandında (2-4 GHz) çalışabilecek anten, en iyi verimi 3300 MHz ve 3500 MHz frekansları arasında vermektedir. Çalışma noktası 3460 MHz frekansındır.

Literatürde bulunan elmas şeklindeki antenlerin çoğu 2 boyutlu FR-4 ya da farklı bir “substrate” yüzey üzerinde üretilmiştir. Buna ek olarak “elmas şeklinde anten” olarak bahsedilen kısımlar ya bakır yüzeyin elmas şekline benzemesinden ya da yüzeyin elmas şekline benzemesinden oluşmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Rana ve Rahman, 2022), “Rogers RT5880” yüzeyi üzerinde gerçekleştirilen mikroşerit yama anten tasarımında, bakır kaplı alanda, elmas şeklinde bir boşluk oluşturularak performans incelemesi yapılmıştır. Yapılan ayrı bir çalışmada (Shaif ve ark., 2017) ise, bakır kaplı alanı dörtgen bir elmas şeklinde olan mikroşerit anten tasarımı sunulmuştur. Bu çalışmada, tasarlanan ve üretilen antenin literatürdeki diğer elmas şekline benzeyen antenlerden farklı 3 boyutlu bir yapıya sahip olmasıdır. Anten performansının kablosuz haberleşme sistemleri ile uyumlu çalışması beklenmektedir. Yapılan çalışmalar baz alındığında literatürde rastlanmayan, benzersiz bir anten tasarımı sunmak ana hedefdir.

II. MATERYAL METOT

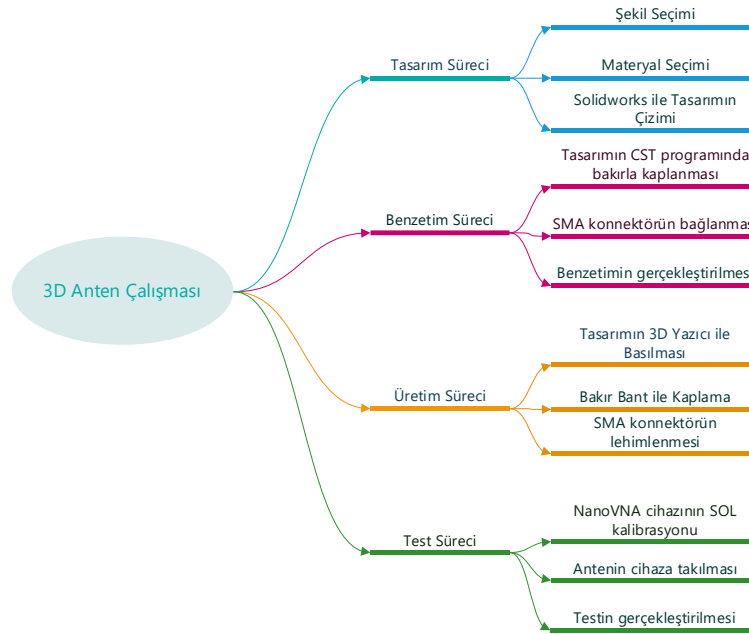
Bu çalışmanın konusu, 3D yazıcıyla bastırılan elmas şeklindeki bir cismin, kendinden yapışkanlı bakır bant kullanılarak dış yüzeyinin kaplanması ve 0-4 GHz frekanslarında çalışmaya elverişli SMA port lehim edilmesiyle oluşan bir 3D anten üretilmesi üzerinedir. Antenin performansı kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan spektrumlarda kayıpsız çalışarak, elektromanyetik uygulamalarına uyumlu olması ile belirlenir. Bu hususta, mobil iletişim teknolojileri olan 2G, 3G, 4G, 4.5G, 5G gibi standartlar önem kazanmaktadır. Standartlara ait bant değerleri Tablo 1’de yer verilmiştir (Dirlik, 2020). Ayrıca, “Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, GPS” gibi özel uygulamalarda çalışabilmesi de çalışmanın değerini artıracaktır.

Tablo 1. Mobil iletişim teknolojileri ve frekans bantları

| Teknoloji | Frekans Bandı (MHz) |
|-----------|---------------------|
| 2G | 900-1800 |
| 3G | 2100 |
| 4G | 800-2600 |
| 5G | 700-3400 |

Tasarımı gerçekleştirilen antenin girişten geri yansıma parametresi (S11) değerinin -10dB ve altındaki değerlerde olması beklenmektedir. S11, güç, verimlilik ve buna benzer faktörlerin yeterli olması durumunda antenin diğer ülkelerde farklı alanlarda kullanımı söz konusu olabilir.

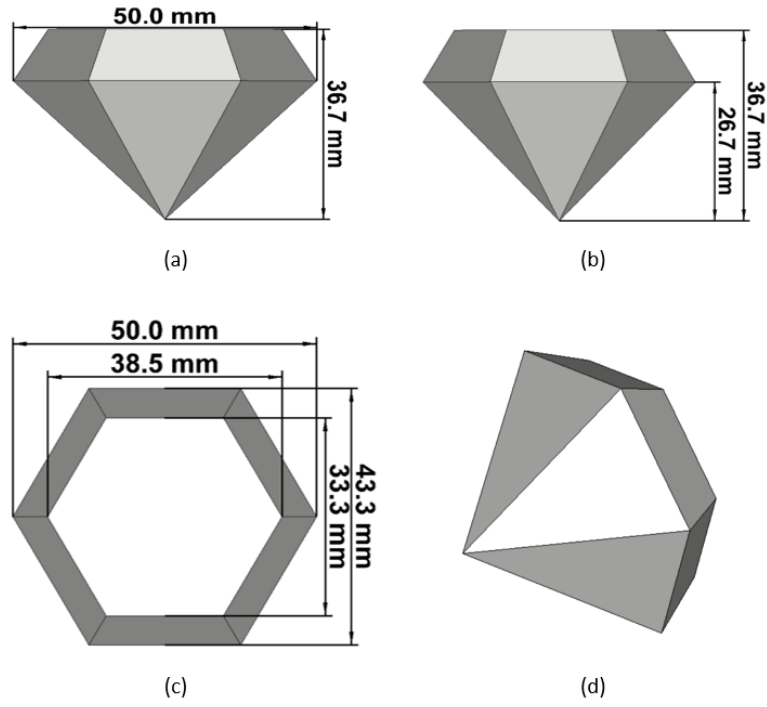
Çalışma süreci ile ilgili planlama Şekil 1’de verildiği gibi 4 aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 1. Çalışma süreci ile ilgili planlama.

A. Tasarım ve Benzetim

Şekil 1’de yer alan aşamalardan ilk ikisi Tasarım ve Benzetim aşaması olarak tek bir başlıkta sunulabilir. Bu başlıkta, ilk olarak antene ait tasarlanacak olan geometrinin seçilmesi sağlanır. Bu çalışmada belirtildiği üzere elmas şeklindeki anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Seçilen elmas şekline ait boyutların ölçekli çizimleri Şekil 2’de görülmektedir. Benzetim boyutları gerçekleşmiş tasarım boyutlarının 3 katıdır. Laboratuvar ölçümlerinde maliyet/hız oranının azalması için boyutta küçülmeye gidilmiştir.



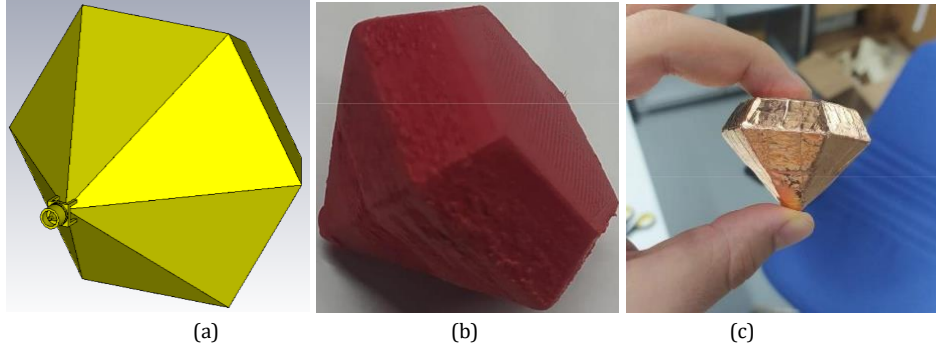
Şekil 2. Elmas şekline ait görsel ve ölçüler.

Şekil 2’de altıgen başa sahip elmas bir yapı yer almaktadır. Tasarımın oluşturulmasında “Solidworks” programı kullanılmıştır. Şekil 2 a ve Şekil 2 c’de görüldüğü üzere; elmasın üst kısmını oluşturan altıgen yapının en uç noktalarının birbirine uzaklığı 50 mm iken en kısa noktalarının birbirine uzaklığı 38.5 mm’dir. Elmasın yüksekliği ise Şekil 2 b’de gösterildiği gibi 36.7 mm’dir. Şekil 2 a’daki elmas şeklinin 60 derece x ekseninde döndürülmesiyle Şekil 2 b oluşur; Şekil 2 a’daki elmas şeklinin dikey ekseninde 90 derece döndürülmesiyle ise Şekil 2 c oluşmuştur. Şekil 2 d’de perspektif görüntüsü verilmiştir. Diğer uzunluk bilgileri için Şekil 2 incelenebilir.

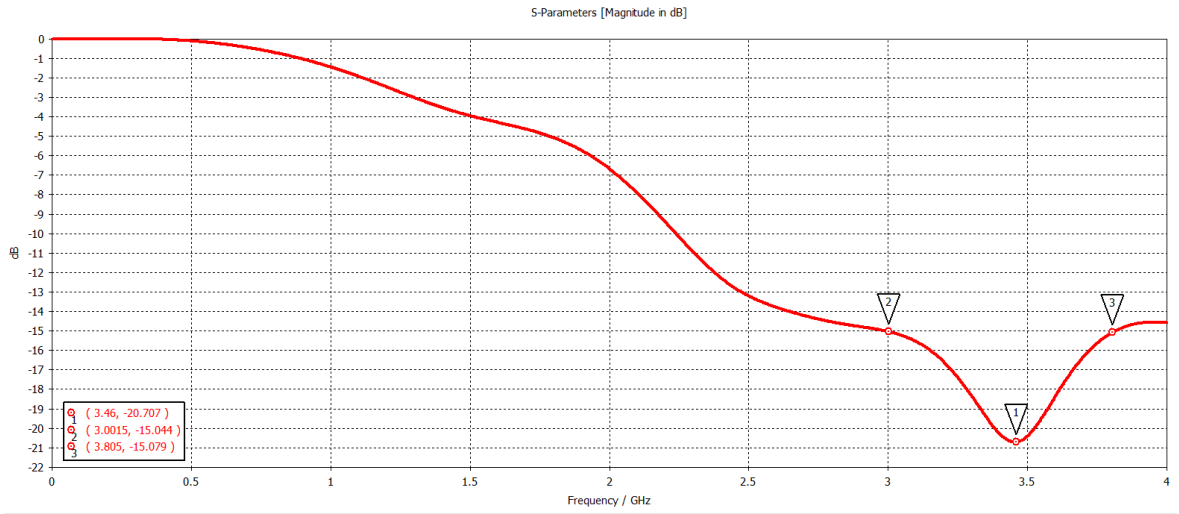
Kullanılan malzeme Polilaktik Acid (PLA)’dır. PLA, 3D yazıcı ile üretilen birçok üründe kullanılan popüler bir malzemedir. Çevre dostu bir malzeme olması ve maliyet/erişim bakımından daha avantajlı olması PLA’nın tercih edilmesindeki en önemli faktörlerdendir (Xu ve ark., 2022). Buna ek olarak, PLA’nın FR-4 dielektrik alt-taban malzemesi ile benzer kazanç ve sabit radyasyon modeline sahip olduğu ortaya çıkmıştır (Prakash ve ark., 2021).

Bu başlık ikinci olarak, antenin “CST Studio” programında performansının ölçülmesi ile ilgili verileri kapsar. Bu noktada, antene bağlanacak olan SMA konnektörünün konumu belirlenerek ölçüm noktası kararlaştırılır. Şekli oluşturulan elmas tasarımın yüzeyi programın materyal sekmesi kullanılarak bakır ile kaplanır. Ardından antene bağlanacak olan SMA konnektör, port olarak eklenir. Devamında antene ait performans ölçümü alınması için benzetim gerçekleştirilir. Benzetimi gerçekleştirilen bakır kaplı ve SMA eklenmiş olan antene ait bilgisayar görseli Şekil 3 a’da aktarılmıştır.

SMA konnektör için materyal olarak altın kaplama seçilmiştir. Benzetim aşamalarının sonucunda elde edilen S11 grafiği Şekil 4’te sunulmuştur.



Şekil 3 a. Benzetimi gerçekleştirilen anten tasarımı b. Yazıcıdan üretilen baskı c. Antenin bakır bant ile kaplanması.



Şekil 4. Anten tasarımına ait S11 grafiği.

Antenin en iyi performans gösterdiği frekans 3460 MHz noktasıdır. Anten bu frekans değerinde -20.707 dB değerine ulaşmaktadır. Grafiğe göre anten yaklaşık olarak 3000 MHz ile 3805 MHz arasında -15 dB değerinin altında çalışmaktadır. Genel olarak bakılan -10 dB sınır noktaları ele alındığında çalışma frekansları arası S bandının frekansları arasından dahi daha geniştir. Bant genişliği için ise 3 dB yükselen noktalar arasına yani -17.707 dB değerleri arasına (≈ 3240 MHz – ≈ 3675 MHz) bakılır ve bant genişliği yaklaşık 435 MHz olarak bulunur.

B. Üretim

Üçüncü aşamada, tasarlanan şeklin çıkartılması için tasarım, STL formatında 3D yazıcıya aktarılır. STL formatı, birçok yazılım programının desteklediği, prototipleme ve bilgisayar destekli üretimlerde sıkça kullanılan bir format türüdür.

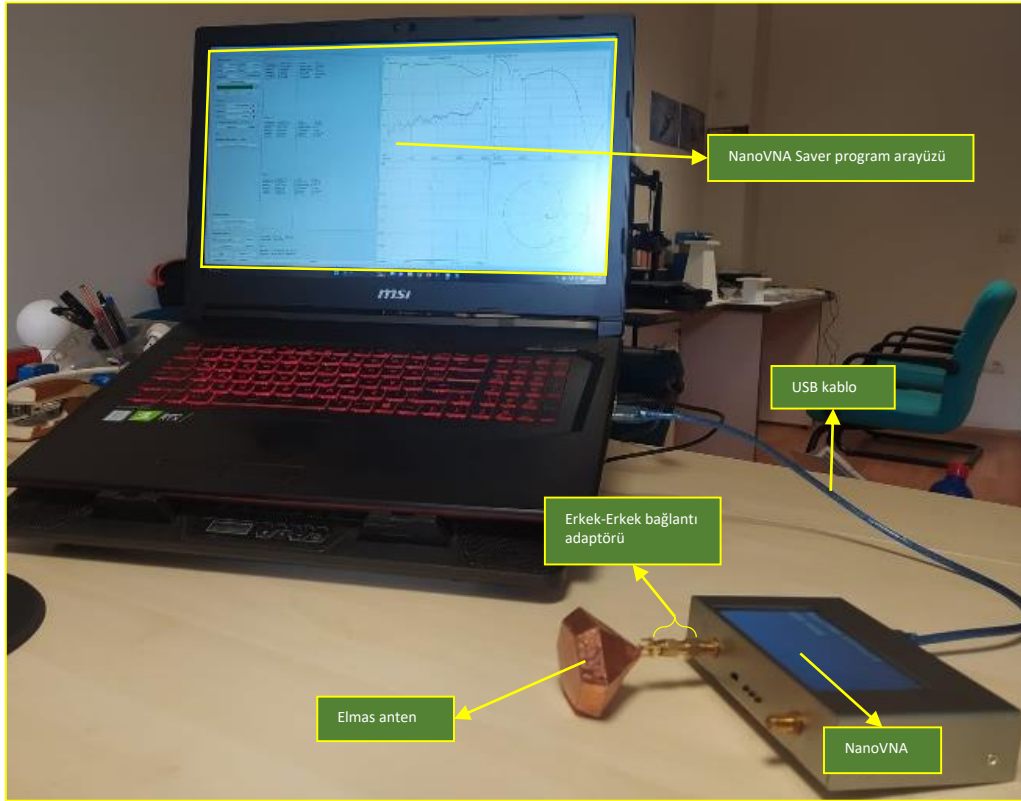
Şekil 3 b'de yer alan baskı çıktısı için kullanılan yazıcı modeli Creality markasına ait Ender-3 S 1 modelidir. Bu cihaz PLA ve ABS gibi malzemeleri kullanarak baskı alınmasını sağlayabilmektedir. Daha sonra üretimi yapılan elmas, kendinden yapışkanlı bakır bant ile kaplanır. Bakır bant kaplı elmas Şekil 3 c'de gösterilmiştir. Yapışkanın elektriksel geçirgenlik değeri bakırın altında kaldığı için önemsizdir. 3D baskı malzemesinin cinsi de sağlamlık açısından önemli diğer yönlerden önemsizdir. Çünkü yayılan elektromanyetik dalga, antenin yüzeyini kullanılarak aktarılır, iç tarafı ilgili ile bir aktarma yoktur.

Şekil 3 c'de görülen bakır bant ile kaplı anten, SMA konnektörünün lehimlenmesi işleminden sonra laboratuvarında gerçekleştirilecek test aşamalarına hazır hale getirilmiştir. SMA'nın canlı ucu bakır banda temas etmektedir fakat toprak uçları havadadır, bu demektir ki; toprak olarak hava kullanılmıştır ve empedansı: 377 ohm'dur.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{1 \times \mu_0}{1 \times \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{\frac{1}{36\pi \times 10^9}}} = 120\pi = 377 \text{ } [\Omega] \quad (1)$$

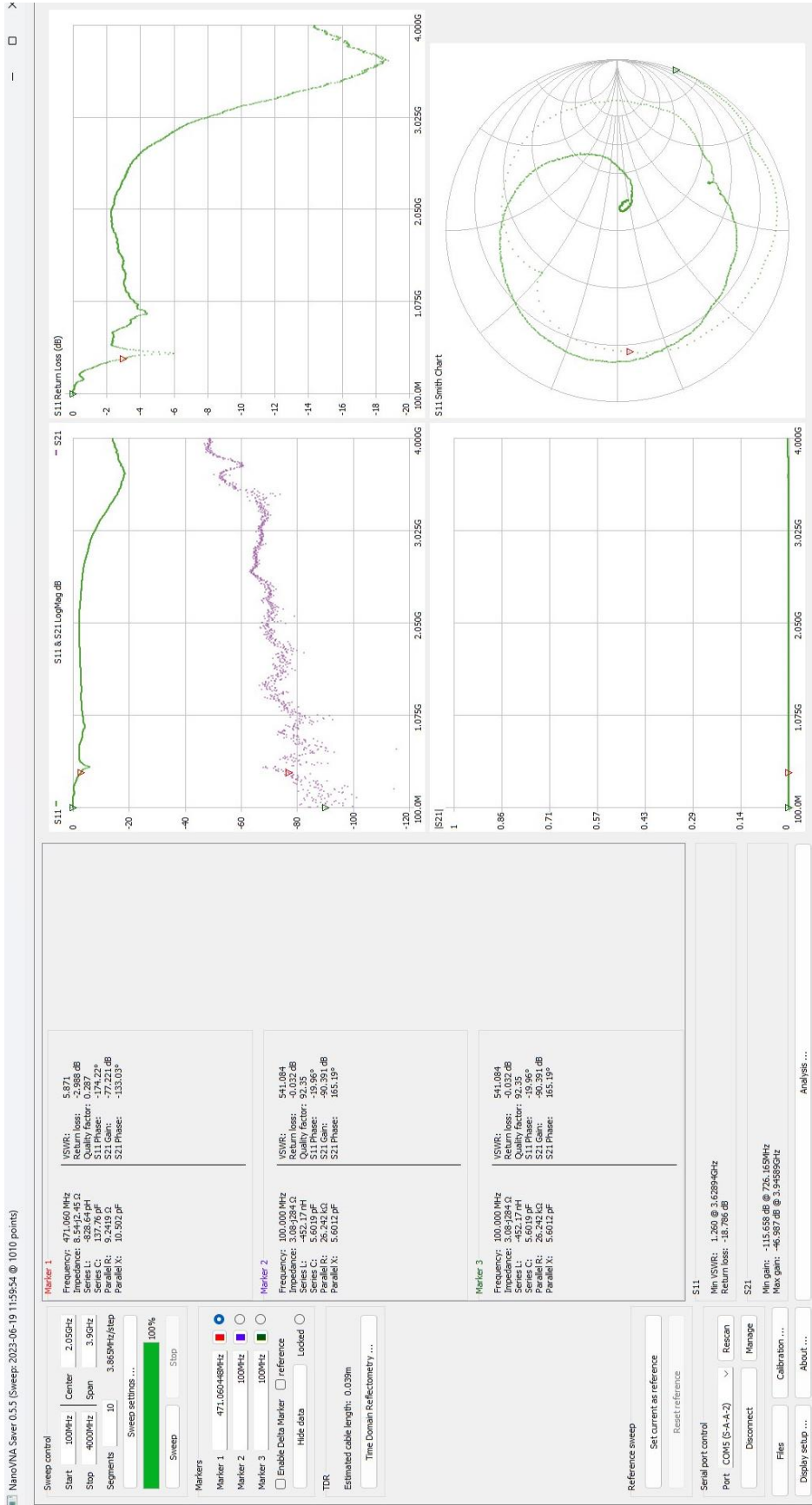
C. Test

Son aşamada, elmas şeklindeki antenin performansını test etmek için NanoVNA (“Nano Vector Network Analyzer” – Nano Vektör Ağ Analizörü) test cihazı kullanılmıştır. VNA, bir elektrik devresinin ya da sisteminin giriş ve çıkış özelliklerini ölçmek için kullanılan bir elektromanyetik test cihazıdır. Bu cihaz sayesinde antene özgü karakteristik özellikler olan iletim katsayısı, yansıma katsayısı, empedans değeri gibi değerler ölçülebilmektedir.



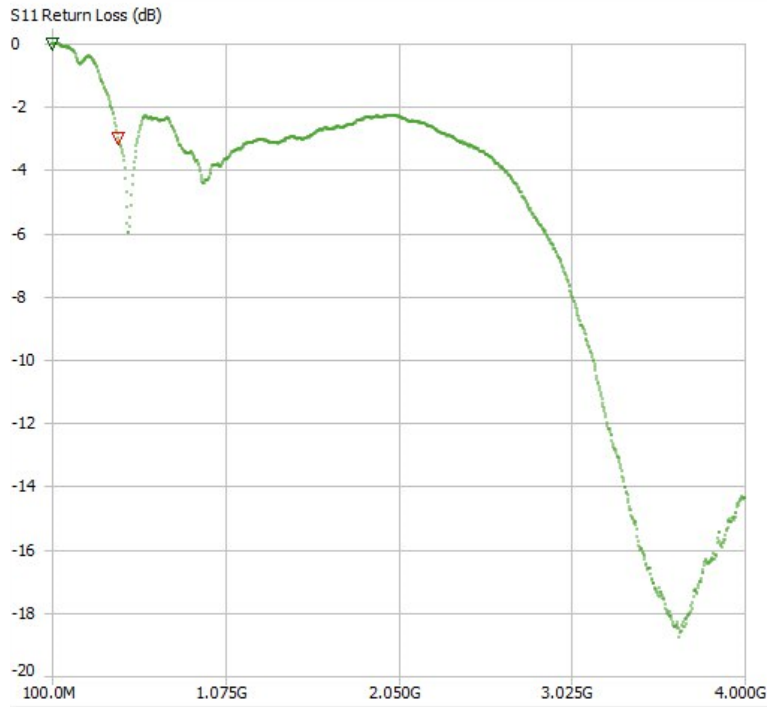
Şekil 5. NanoVNA ile Test Ölçüm Görüntüsü.

Şekil 5’te antenin test edildiği düzenek gösterilmektedir. Anten, NanoVNA’ya ait portun ve kendi üzerindeki SMA’nın dişi olması sebebiyle erkek-erkek SMA bağlantı aparatı yardımıyla NanoVNA cihazına bağlanmıştır. NanoVNA aracılığıyla ölçülen veriler USB kablo üzerinden bilgisayara aktarılır. Bilgisayarda kullanılan VNA programı (NanoVNA Saver) sayesinde antene ait karakteristik datalar incelenebilmektedir.



Şekil 6. Ölçüm Sonuçları.

Şekil 6'da ölçüm sonuçlarına ait veriler ve grafikler görülmektedir. Sol taraftaki veriler grafik üzerinde seçilmesi muhtemel "Marker"ların değerlerini okuyucuya aktarır. Ayrıca başlangıç ve bitiş frekans ayarlamaları, adım değeri, orta frekans değeri vs bu bölümden ayarlanır. Kalibrasyon başlangıç ayarı da yine sol menüde yer almaktadır. Sağ tarafta yer alan grafikler ölçüm yapılacak olan devre elemanın karakteristik davranışlarını frekans ekseninde gösteren grafiklerden ve Smith Chart grafiğinden oluşur. Anten, tek port olduğundan S21 veya S12 ölçümü yoktur. S11 değerine bakıldığında, üretimi gerçekleştirilen anten yaklaşık olarak 3300 MHz ile 3800 MHz arasında -15 dB değerinin altında girişten geri yansıma parametresini vermektedir. Yaklaşık 3600 MHz frekansı ise orta frekans olarak bulunmuştur. Bu frekans değerinde -19 dB bulgusuna varılmıştır. CST programındaki benzetim grafiği ile NanoVNA cihazının ortaya koyduğu S11 ölçüm grafiği karşılaştırıldığında tasarlanan anten ile üretilen antenin birbiriyle benzer sonuçlar verdiği söylenebilir. S11 ölçüm grafiği daha yakından Şekil 7'de verilmiştir. Bant genişliği için ise 3 dB yükselen noktalar arasına bakıldığında -16 dB değerleri arasında (≈ 3375 MHz – ≈ 3830 MHz) bakılması gerekir. Böylece bant genişliği 455 MHz olarak bulunur.



Şekil 7. S11 Ölçümü.

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Solidworks ve CST Studio programlarında oluşturulan elmas şeklindeki bir tasarımın 3 boyutlu yazıcıyla baskısı çıkarılıp bakır bant kaplanması yapılmıştır. Bu sayede; 3 boyutlu bir anten tasarımının benzetimi, üretimi ve testi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, standart olmayan 3 boyutlu şekillerin 3D yazıcıyla baskılanıp bakır bant kaplanmasıyla anten tasarımının oluşturulup üretilmesinin mümkün olup olmadığının belirlenmesidir. Çalışmanın hedefi, S bandında, spesifik olarak ise 3 GHz ila 4 GHz arasında kullanıma uygun olan ve kablosuz haberleşme projelerinde çalışabilen bir anten üretmektir; bu projeden başarılı bir sonuç alınmıştır.

Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre 3 boyutlu elmas yapıdaki anten tasarımı 3300 MHz ve 3800 MHz titreşim aralığında -15 dB değerinin altında (benzetimde 3000 MHz ile 3805 MHz arasında); 3600 MHz orta frekansı (benzetimde 3460 MHz) civarlarında ise -19 dB (benzetimde -20.707 dB) değerinde S11 performansı sergilemiştir; bant genişliği değeri, laboratuvar ölçümünde 455 MHz (benzetimde 435 MHz) olarak bulunmuştur. Tüm bu verilere göre sunulan projenin benzetim ve laboratuvar ölçümlerinin yaklaşık eşit olduğu ayrıca 5G tarzı uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılabilir yorumu ortaya çıkmıştır.

Tablo 2’de benzetim sonuçları ve laboratuvar ölçümlerinden elde edilen değerler aktarılmıştır.

Tablo 2. Mobil iletişim teknolojileri ve frekans bantları.

| | Benzetim | Laboratuvar |
|--|---------------------------|---------------------------|
| Ölçüm frekans aralıkları | 100 MHz – 4 GHz | 100 MHz – 4 GHz |
| Çalışabileceği frekans aralıkları | 3 GHz – 4 GHz | 3 GHz – 4 GHz |
| -15 dB altına indiği frekans aralıkları | 3000 MHz – 3805 MHz | 3300 MHz – 3800 MHz |
| Merkez frekans | 3460 MHz (-20.707 dB) | 3600 MHz (-19 dB) |
| Bant genişliği aralıkları | 3240 MHz – 3675 MHz arası | 3375 MHz – 3830 MHz arası |
| Bant genişliği | 435 MHz | 455 MHz |

IV. TARTIŞMA

Üretilen yeni antenin performans parametresi değerlerinin diğer antenlerin değerleriyle daha doğru bir kıyaslama yapılarak araştırılmasının sağlanması için üretilen antenin empedans uyumuna bakılması gerekebilir. Üretilen antene ait örüntülerin incelenmesi performans parametreleri için katkı sağlayabilir. Ayrıca referans anteninden yararlanılarak bulunabilen anten kazancı bilgisiyle yorum yapılması daha doğru sonuçların elde edilmesine yardımcı olacaktır.

V. ÇIKARIM

Bu çalışma; 0-4 GHz frekansları arasında taraması yapılan, 3300 MHz ve 3800 MHz frekansları arasında kablosuz iletişim teknolojilerine uyumlu olabilecek, 3D yazıcıyla 3 boyutlu elmas yapısı ve görüntüsü verilen, araştırma ve geliştirme süreçleri yapılan bir antenin periyotları ile ilgilidir. Elde edilen sonuçlara göre antenin kablosuz iletişim teknolojilerinde özellikle de 5G uygulamaları için 3600 MHz merkez frekansını kullanan ülkelerde çalıştırılabileceği ön görülmektedir. Sonuç olarak, 3 boyutlu yazıcılarla eklemeli imalat sayesinde basımı yapılan şekillere, bakır bant kaplanarak üretilen antenlerin kablosuz iletişim teknolojilerine uyum sağlayabileceği görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; 3D yazıcıyla basılarak oluşturulan benzer şekil veya cisimler, bakır kaplanarak farklı sistemlere entegre edildiğinde, faydalı işlem gören antenler haline getirilebilir.

KAYNAKLAR

- Dirlik, T. (2020). Metamalzeme kullanılarak eş benzetim ile mikroşerit anten tasarımı ve optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Glasco, D. L., Sheelam, A., Ho, N. H., Mamaril, A. M., King, M., ve Bell, J. G. (2022). Editors’ Choice—Review—3D printing: an innovative trend in analytical sensing, *ECS Sensors Plus*, 1(1), 010602.
- Kotzé K. ve Gilmore J. (2019). SLM 3D-Printed Horn Antenna for Satellite Communications at X-band, *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Granada, Spain, ss. 148-153, doi: 10.1109/APWC.2019.8870367.
- Mazingue G., Byrne B., Romier M. ve Capet N. (2020). 3D Printed Ceramic Antennas for Space Applications, *14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Kopenhag, Danimarka, ss. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135312.
- Njogu P., Sanz-Izquierdo B., Elibiary A., Jun S. Y., Chen Z. ve Bird D. (2020). 3D Printed Fingernail Antennas for 5G Applications, *IEEE Access*, vol. 8, ss. 228711-228719, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043045.
- Olivová, J., Popela, M., Richterová, M., ve Štefl, E. (2022). Use of 3D printing for horn antenna manufacturing. *Electronics*, 11(10), 1539.
- Prakash, C., Senthil, P., ve Sathies, T. (2021). Fused deposition modeling fabricated PLA dielectric substrate for microstrip patch antenna, *Materials Today: Proceedings*, 39, 533-537.
- Praveena B. A., Lokesh N., Buradi A., Santhosh N., Praveena B. L., ve Vignesh R. (2022). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential, *Materials Today: Proceedings*, 52, 1309-1313.
- R. Colella ve ark. (2019). Electromagnetic Analysis and Performance Comparison of Fully 3D-printed Antennas, *Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring)*, Roma, İtalya, ss. 964-970, doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017888.

- Rana M. S. ve Rahman M. M. (2022). Design and Operation Exploration of a Diamond-Shape Slotted Microstrip Antenna for Digital World High-Speed 5G Wireless Digital Technologies, *2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, Ravet, Hindistan, ss. 1-4, doi: 10.1109/ASIANCON55314.2022.9908769.
- Shaif A. D. S. S., Selçuk S., Kabadayı G., Toraman Ö., ve İmeci Ş. T. (2017). Diamond-shaped microstrip patch antenna with defected ground structure, *25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU)*, ss. 1-4.
- Wang, Y., Zhang, X., Su, R., Chen, M., Shen, C., Xu, H., ve He, R. (2023). 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges, *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 100065.
- Xu, C., Sun, C., Wan, H., Tan, H., Zhao, J., ve Zhang, Y. (2022). Microstructure and physical properties of poly (lactic acid)/polycaprolactone/rice straw lightweight bio-composite foams for wall insulation. *Construction and Building Materials*, 354, 129216.