

Araştırma Makalesi / Research Article

FR4 ve FR2 Baskı Devre Kartlarının Mikroşerit Anten Uygulamasında Tasarımı ve Simülasyonu

Gözde KONUK EGE^{1*}, Uğur KESEN², Hüseyin YÜCE³, Garip GENÇ⁴

¹ İstanbul Gedik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7349-0416>, gozde.konuk@gedik.edu.tr

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3460-9060>, ukesen@marmara.edu.tr

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5525-7733>, huseyin@marmara.edu.tr

⁴ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7711-3845>, ggenç@marmara.edu.tr

Geliş/ Recieved: 24.11.2020;

Kabul / Accepted: 25.02.2021

ÖZET: Elektrik-elektronik aygıt teknolojilerinde kablosuz haberleşmenin hızlı gelişimi ile birlikte mikroşerit antenler önem kazanmıştır. Baskı devre kartı (PCB) teknolojisi de dünya çapında köklü bir endüstriye sahiptir. PCB teknolojisi, çeşitli elektrik-elektronik aygıtların üretimi için alternatif, düşük maliyetli bir yaklaşım sunar. FR4 ve FR2 tipi PCB kartlar elektronik endüstrisinde en çok tercih edilen iki PCB kart türüdür. Bu çalışmada, PCB kartlarda tespit edilen arıza veya diğer olumsuzlukları tanımlayabilmek ve bu olumsuzluklara çözüm üretebilmek için bir mikroşerit tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım ve analizde FR4 ve FR2 PCB'ler kullanılarak PCB kartın mikroşerit anten üzerindeki 3 boyutlu kazanç ve empedans-frekans davranışları analiz edilerek sunulmuştur. FR4 ve FR2 PCB'lerin 2.4 GHz referans frekans bandında kullanılabilirlikleri MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonların sonucu gösterilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, FR4 malzemenin S11 geri dönüş kaybının -14.9 dB olduğu ve bant genişliğinin 80 MHz olduğu görülmektedir. Bu bant genişliği değeri WiFi çalışma bandını karşılamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Baskı devre kartı (PCB), Mikro şerit anten, Yama anten, Performans değerlendirmesi.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: gozde.konuk@gedik.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Konuk Ege, G., Kesen, U., Yüce, H., Genç, G. (2021). FR4 ve FR2 Baskı Devre Kartlarının Mikroşerit Anten Uygulamasında Tasarımı ve Simülasyonu. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 2(1), 51-59.

Design and Simulation of FR4 and FR2 Printed Circuit Boards in Microstrip Antenna Application

ABSTRACT: Microstrip antennas have gained importance with the rapid development of wireless communication in electrical-electronic device technologies, Printed circuit board (PCB) technology also has a well-established industry worldwide. PCB technology offers an alternative, low-cost approach for manufacturing a variety of electrical-electronic devices. FR4 and FR2 type PCB boards are the two most preferred PCB board types in the electronics industry. In this study, a microstrip design and analysis has been carried out in order to identify malfunctions or other negativities detected in PCB boards and to find solutions to these negativities. In this design and analysis, 3D gains and impedance-frequency behaviors of the PCB board on the microstrip antenna are analyzed and presented by using FR4 and FR2 PCBs. The usability of FR4 and FR2 PCBs in the 2.4 GHz reference frequency band has been shown as a result of simulations using MATLAB software. Examining the analysis results, it is seen that the S11 return loss of FR4 material is -14.9 dB and the bandwidth is 80 MHz. This bandwidth value corresponds to the WiFi spectral band.

Keywords: Printed circuit board (PCB), Microstrip antenna, Patch antenna, Performance evaluation.

1. GİRİŞ

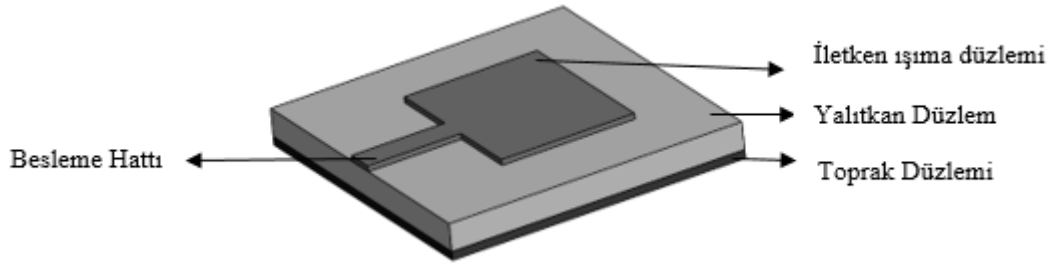
Günümüzde, bilgisayarlar ve tabletler, cep telefonları gibi kişisel elektronik ürünleri; robotlar, algılayıcılar ve eyleyiciler gibi endüstriyel elektronik ürünleri, tıp elektroniği gibi elektrik-elektronik aygıtlar hayatımızın her alanının vazgeçilmez öğeleri haline gelmiştir. Yarı iletken teknolojisinin gelişimi elektronik komponentlerin geliştirilmesinde bir dönüm noktası olmuştur. Ve bu süreçten itibaren elektrik-elektronik aygıt üretiminde ivme kazanılmıştır. Teknolojinin sürekli gelişimi ile beraber elektrik-elektronik komponentlerin ve buna bağlı gelişen aygıtların artan büyüme oranı, elektrik-elektronik aygıt endüstrisini dünyadaki en baskın imalat endüstrisi haline getirmiştir (Ning ve ark., 2017). Bununla beraber bu aygıtların hızlı ve yenilenen gelişimi, bu aygıtların temel bileşenini oluşturan baskı devre kartı (PCB) endüstrisinin de gelişmesine yol açmıştır.

Baskı devre kartı (PCB) teknolojisi, dünya çapında yaygınlaşmış endüstriye sahiptir. PCB teknolojisi klasik elektronik kart üretimine ek olarak farklı biyolojik ve kimyasal algılayıcı üretimleri için de kullanılmaktadır. PCB teknolojisinin kökeni 1903'lü yıllara dayanmaktadır ve 1980'li yıllara kadar çeşitli evrelerden geçerek günümüzde yaygın olarak bilinen cam-epoksi, kağıt-fenol bileşenlerinin kullanıldığı, piyasada FR4, FR2, FR1, CEM1, CEM3 isimleri ile bilinen tek taraflı veya çift taraflı kullanılabilen halini almıştır (Shamkhalichenar ve ark., 2020). En yaygın baskı devre kartı FR4 (Flame Reterdant 4) olarak bilinen PCB karttır. FR4; Ulusal elektrik üreticileri derneği endüstriyel termoset ürünleri (NEMA LI 1-1998) gereksinimlerini karşılayan bir malzeme sınıfıdır. FR4 malzeme, aleve dayanıklı bir epoksi reçine ile birleştirilmiş dokuma fiberglas kumaştan oluşur. FR4 suya karşı dayanıklıdır. Ortamdaki nemden bağımsız olarak yalıtkanlığı çok yüksektir. Mükemmel mukavemet/ağırlık oranına sahiptir (Shamkhalichenar ve ark., 2020). FR4 PCB uzun ömürlü standart süreçlerle üretilmesi ve çok sayıda rekabetçi üretimden kaynaklı düşük maliyete sahip olması ve son kullanıcı tarafından kolay kullanım avantajları sayesinde yeni elektronik aygıt geliştirilme süreçlerinde elektronik parçaları modellemek için sıklıkla tercih edilmektedir. FR2 PCB kart ise kâğıt ve bromlu alev geciktiricilerle güçlendirilmiş fenolik reçineden yapılmış bir diğer baskı devre kartıdır (Fellman, 2018). Sadece tek katmanlı PCB için kullanılır. FR1 ve FR2 benzer özelliklere sahip olmakla beraber tek fark cam geçiş sıcaklığıdır. FR1, FR2'ye kıyasla daha yüksek

cam geçiş sıcaklığına sahiptir. FR tip baskı devre kartlarında brom ve/veya fosfat alev geciktirici katkı maddesi olarak kullanılmaktadır ve bu katkı maddeleri toksiktir (Hall ve Williams, 2007). Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada FR4 ve FR2 PCB'ler kullanılmıştır.

Anten; elektromanyetik dalgaları iletmek veya toplamak üzere geliştirilmiş dönüştürücülerdir. Diğer mikrodalga antenlere olan üstünlükleri nedeniyle araştırmacıların ilgi odağı haline gelen mikroşerit antenler, bugüne kadar çok büyük aşamalar kaydetmişlerdir. Az hacim kaplamaları, üretiminin kolay olması, düşük maliyetli olması, ikili frekans ve polarizasyon özelliklerine sahip olması, mikrodalga entegre devrelerle kolay entegrasyon gibi avantajlarından dolayı tasarlandığı ilk yıllarda güdümlü füzeler, roketler, uydular gibi sadece askeri uygulamalarda kullanılan mikroşerit antenler, günümüzde kablosuz haberleşmenin hemen hemen her alanında kullanılmaktadırlar (Singh ve Tripathi, 2011; Supratha ve Robinson, 2018; Werfelli ve ark., 2016).

Mikroşerit antenler iki iletken yüzey arasında bulunan yalıtkan bir yüzeyden oluşur. Besleme hattı ışıma yapan yüzey ile aynı düzlemde bulunur. Bu yöntemde yama, mikroşerit hattın uzantısı durumundadır ve bu yapı anten üretimini basit kılar. Mikroşerit antenin tipik yapısı şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Mikroşerit anten yapısı

Mikroşerit antenlerde, ışıma yapan yüzey çok farklı şekillerde tasarlanıp farklı ışıma özellikleri sağlamaktadır. Işıma yapan yüzey dikdörtgen, daire, üçgen, beşgen, altıgen, elips, yıldız olmak üzere farklı yapılarla bulunmaktadır ancak tasarım ve üretim kolaylığı ile en çok tercih edileni dikdörtgen yapıdır. Mikroşerit antenlerde iletken malzeme olarak genelde altın, gümüş, bakır gibi iletkenliği yüksek metaller kullanılır.

Bu çalışmada FR4 ve FR2 baskı devre kartları kullanılarak mikro şerit anten tasarımı ve simülasyonu yapılmış olup FR4 ve FR2 PCB kartlarının kazanç, geri dönüş kaybı ve empedans-frekans değerleri karşılaştırılmıştır. 2.4 GHz frekans bantlarında çalışılmış olup bu PCB kartların 2.4 GHz frekans bantlarındaki uygulamalarda kullanılabilirliği tartışılmıştır. Mikroşerit anten tasarımı ve simülasyonu için MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışma, PCB kartların bilgisayar destekli analizi ve geliştirilmesi hedeflenen yeni nesil Biyokompozit PCB kartların ön çalışması amacı ile gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Mikroşerit Anten Parametreleri

Mikroşerit anten tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli parametreler vardır. Anten tasarımı bu parametrelere bağlı olarak yapılmaktadır.

2.1.1 Geri dönüş kaybı

Kaynaktan antene gönderilen gücün ne kadarının geri döndüğünün ölçüsü, geri dönüş kaybı (Return Loss, S11) parametresi olarak adlandırılır. Birimi dB (desibel) cinsinden gösterilmektedir.

Geri dönüş kaybı parametresi, empedans uyumunu ve gücün maksimum transferini gösteren, antenin en önemli parametrelerinden biridir. Empedans uyumu olmazsa gücün bir kısmı yansır, kayıp meydana gelir ve bu da tüm gücün yüke aktarılamaması demektir. Geri dönüş kaybı belirli bir frekans aralığında -9.95 dB'in altında değer alması, bu frekans bölgesinde antenin çalıştığını gösterir (Supratha ve Robinson, 2018). Geri dönüş kaybı değeri eşitlik 2.1 ve eşitlik 2.2 ile hesaplanabilir. Eşitlik 1 ve 2'de bulunan Z_L , Γ , Z_0 sırasıyla yük empedansını, yansıma katsayısını ve iletim hattının karakteristik empedansını göstermektedir (Reineix ve Jecko, 1989).

$$RL = -20 \log \log_{10}[\Gamma] \quad (2.1)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right| \quad (2.2)$$

2.1.2 Voltaj duran dalga oranı (VSWR)

Voltaj duran dalga oranı Yük ve iletim hattı arasındaki uyumsuzluğun bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. İdeal durum için ve ideal eşleşme için VSWR'nin değeri 1 olmalıdır (Supratha ve Robinson 2018).

Anten ile besleme kaynağı arasında empedans uyumu tam olarak sağlanamayan anten sistemlerinde elektromanyetik dalgaların bir kısmı geri yansır ve bu geri yansıyan dalgalar ile ilerleyen dalgalar girişim oluştururlar. Bu durum ise hatta duran dalga oluşmasına neden olur. Bu duran dalga oranı eşitlik 2.3 ile ifade edilmektedir (Johnson ve Jasik, 1984).

$$VSWR = \frac{V_{maksimum}}{V_{minimum}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.3)$$

2.1.3 Kazanç

Kazanç, test anteninin radyasyon alanı yoğunluğunun referans anteninin radyasyon alanı yoğunluğuna oranıdır (Supratha ve Robinson, 2018). Anten kazancının matematiksel hesaplaması Eşitlik 2.4'te sunulmuştur. $D(\theta, \phi)$ yönlendiricilik, $U(\theta, \phi)$ antenin ışınma şiddeti yoğunluğu, $P_{ışınma}$ ise antenin yayınladığı toplam güçtür. Kutupsal koordinat sisteminde θ x eksenine ile yaptığı açı ve ϕ ise z eksenine ile yaptığı açı parametreleridir. Θ ve ϕ açılarının alt ve üst sınır değerleri 0-360 derece alınmıştır.

Antenin girişine gelen sinyali ne kadar yönlendirebildiğinin göstergesine yönlendiricilik denir (Johnson ve Jasik, 1984).

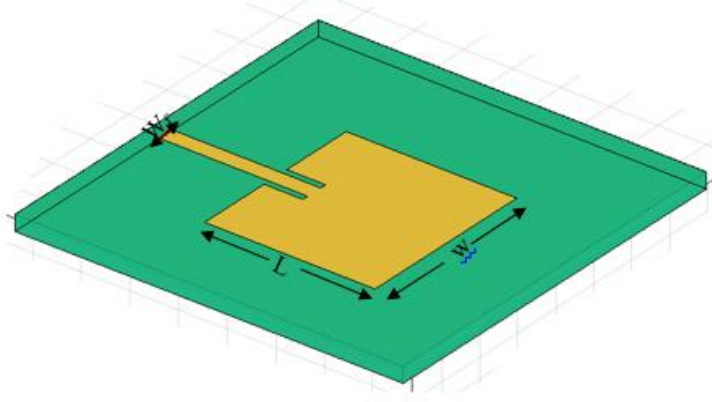
$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P/4\pi} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{ışınma}} \quad (2.4)$$

2.2 Mikroşerit Anten Tasarımı

2.2.1 Anten tasarımı için fiziksel parametreler

Mikroşerit anten tasarımlarında kullanılmak üzere dikdörtgen, daire, üçgen, beşgen, altıgen, elips, yıldız şekillerinde yama geometrileri bulunmaktadır. Ancak bunlardan en çok tercih edilenleri üretim ve tasarım kolaylığı nedeniyle dairesel ve dikdörtgen yapıları geometrilerdir (Johnson ve Jasik, 1984). Tasarlanacak antenin geometrisi için gömülü (inset fed) mikroşerit beslemeli dikdörtgen yama

formu seçilmiştir. Dikdörtgen yama formu; tasarım ve üretim kolaylığının yanı sıra zorlu uygulamalarda da analiz kolaylığı sağlamaktadır (Johnson ve Jasik, 1984). Tasarlanan antenin fiziki yapısı Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan antenin fiziksel yapısı

Anten tasarımında öncelikle antenin rezonans frekansı ve antenin üretileceği dielektrik malzeme belirlenmelidir. Bu yapıdaki tasarımlar için antenin rezonans frekansı $f_r = 2.4$ GHz olarak belirlenmiştir. WiFi, 802.11 kablosuz yerel ağ (WLAN) için kullanılan bir teknolojidir. WiFi teknolojisini kullanabilen cihazlar arasında güvenlik kameraları, kişisel bilgisayarlar (PC), akıllı telefonlar, akıllı televizyonlar (TV), dijital kameralar, dijital ses çalarlar ve yazıcılar gibi çok sayıda cihaz bulunur. WiFi kullanan cihazların çoğunluğu 2.4 GHz radyo frekanslarını kullanır. Dielektrik malzeme olarak kullanım kolaylığı, düşük maliyet ve yüksek yalıtkanlık özellikleri ile FR4 ve FR2 PCB seçilmiştir.

Yukarıdaki parametreler dikkate alınarak 2.4 GHz çalışma frekansı için yama boyutları aşağıdaki eşitlik 2.5, 2.6, 2.7 ve 2.8 kullanılarak yapılan hesaplamalar ile belirlenmiştir. Eşitlik 2.5’te verilmiş w , c , f_c , ϵ_r sembolleri sırasıyla; yama genişliği, ışık hızı, çalışma frekansı ve dielektrik sabitini ifade etmektedir. Eşitlik 2.6’da verilen ϵ_e etkin dielektrik katsayısını temsil ederken eşitlik 2.7 ve 2.8’de verilmiş h , L ve Δl sırasıyla; yama kalınlığı, yama uzunluğu ve hat boyunu ifade etmektedir.

$$W = \frac{c}{2f_c} \times \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12t}{w} \right] \quad (2.6)$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.7)$$

$$L = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (2.8)$$

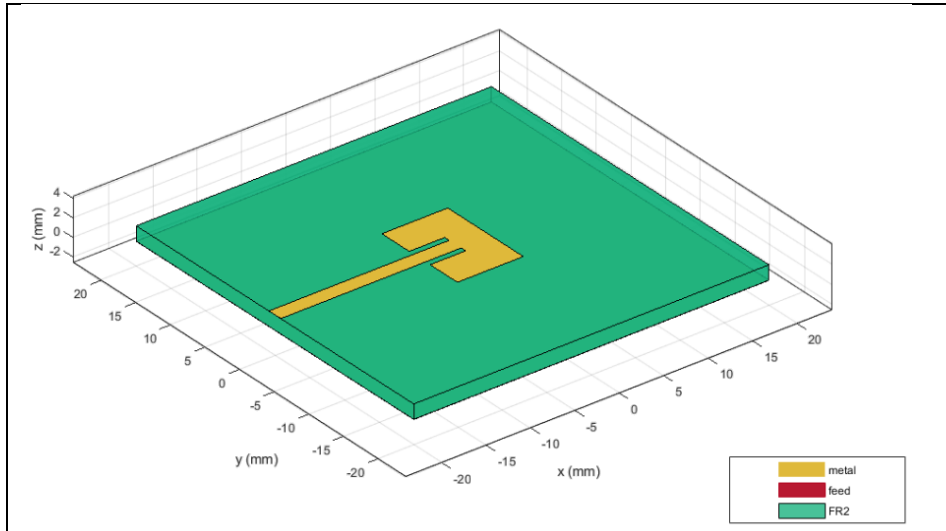
Bu hesaplamalar sonucu yama boyutları ve tasarım için gereken temel parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler Çizelge 1’de sunulmaktadır. Bu aşamadan sonra sırasıyla mikroşerit besleme yöntemi için antenler tasarlanmıştır.

Çizelge 1. Tasarlanan antenin fiziksel parametreleri

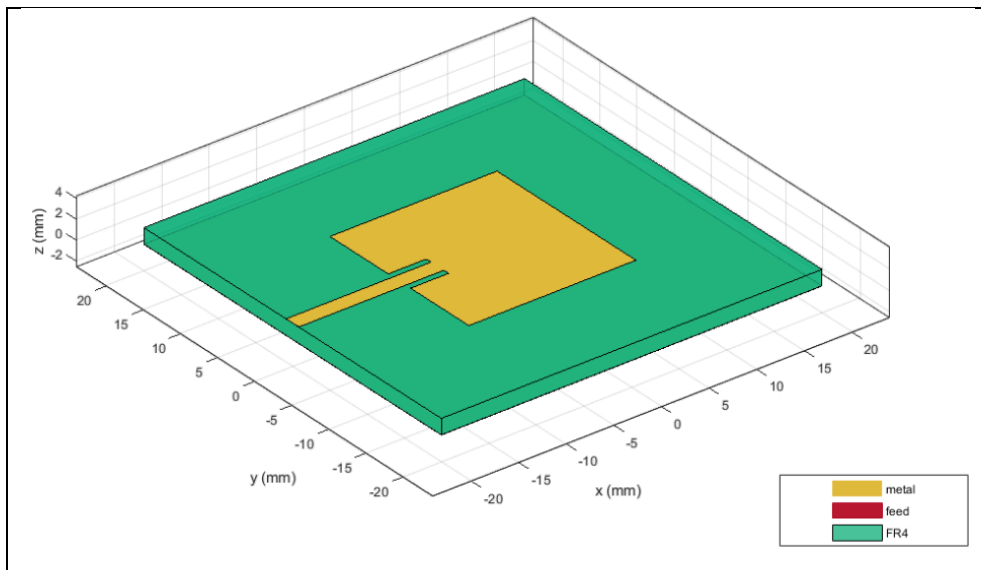
Tasarım Parametreleri	FR2 PCB	FR4 PCB
Dielektrik sabiti	14.86	4.8
Kalınlık (mm)	1.6	1.6
Tan δ (tanjant kaybı)	0.03	0.02
Yama Uzunluğu (mm)	7.41	17.55
Yama Genişliği (mm)	10.89	18.68

2.2.2 Anten tasarımı

Matlab programının “Antenna Designer” uygulamasında çizelge 1’de verilen fiziksel parametrelere uygun olarak antenlerin tasarımı yapılmıştır. Bu parametrelere göre simülasyon gerçekleştirilmiştir. Antenlerin tasarım çizimleri Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 3. FR2 PCB Anten Tasarımı

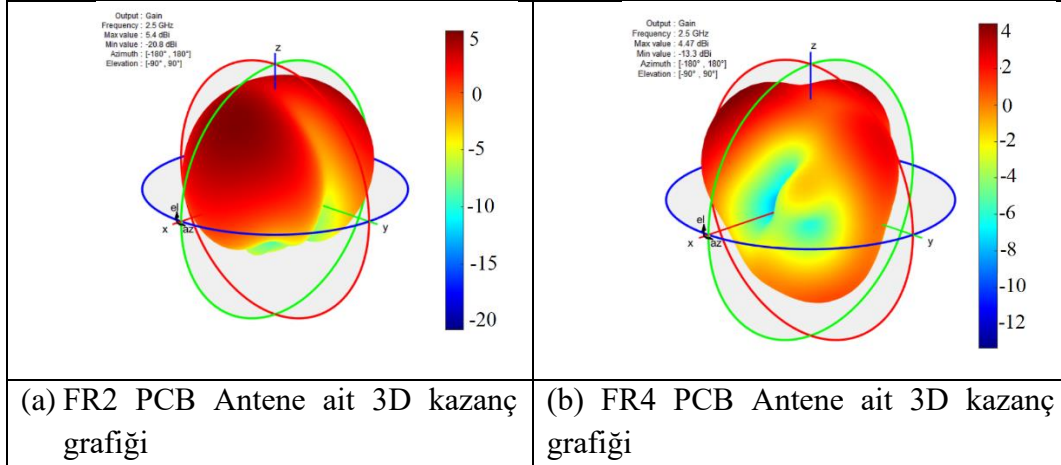


Şekil 4. FR4 PCB Anten Tasarımı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

FR4 ve FR2 PCB kullanılarak tasarlanan mikroşerit antenlerin fiziksel özellikleri çizelge.1’de belirtilmiştir. Bu fiziksel özelliklere göre Matlab programında “Antenna Designer” uygulaması kullanılarak anten çizimleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan mikroşerit antenlerin simülasyon sonuçları ve sonuçların değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

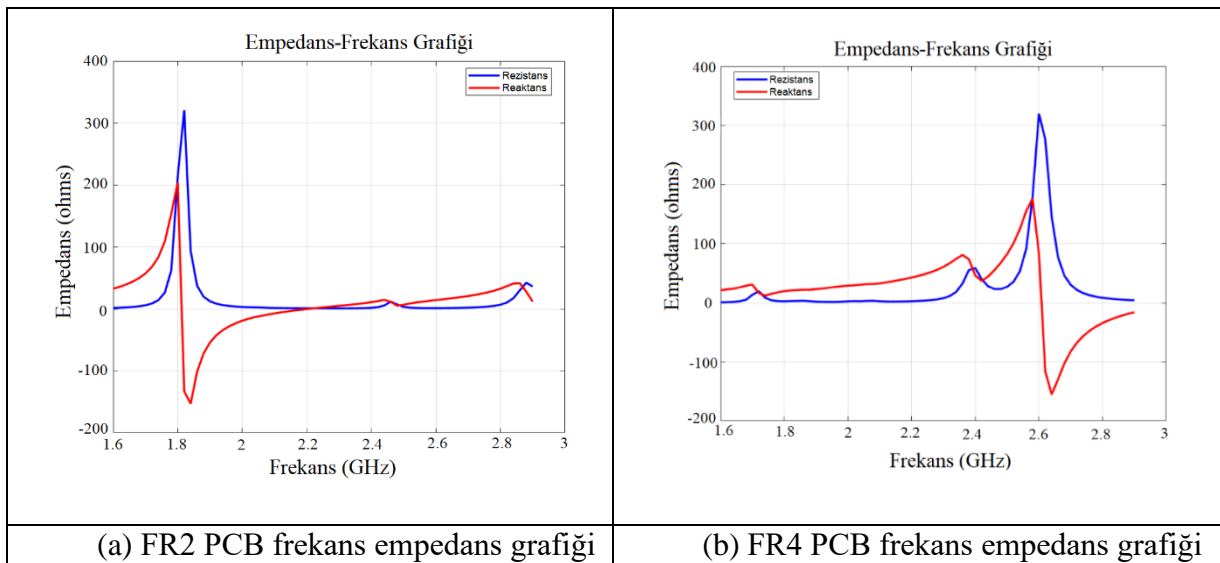
Antenlerin tablo 1’de belirlenen parametrelere göre FR4 ve FR2 PCB ile tasarlanan mikroşerit antenlerin simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir. FR4 ve FR2 PCB’ler ile tasarlanmış antenlerin 3D kazanç grafiği Şekil 5 (a)(b)’de gösterilmektedir.



Şekil 5. FR2 (a) ve FR4 (b) PCB Antene ait 3D kazanç grafikleri

Şekil 5 (a)’ya göre FR4 malzemenin maksimum anten kazancı 4,47 dBi, minimum anten kazancı ise -13,3 dBi’dir. Şekil 5 (b)’ye göre FR2 malzemenin maksimum anten kazancı 5.4 dBi, minimum anten kazancı ise -20,8 dBi’dir. FR4 malzemenin S_{11} geri dönüş kaybının -14,9 dB olduğu ve bant genişliğinin 80 MHz olduğu görülmektedir. Bu bant genişliği değeri WiFi çalışma bandını karşılamaktadır.

Şekil 6.(a) ve (b)’de ise; FR2 ve FR4 PCB’ler ile tasarlanmış antenlerin frekans-empedans grafikleri sunulmuştur. FR2 malzeme için rezistans ve reaktans değişiminin 1900 MHz’lerde olduğu, FR4 malzeme için rezistans ve reaktans değişiminin 2600 MHz’lerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6. FR2 (a) ve FR4 (b) PCB’lerin frekans-empedans grafikleri

FR2 ve FR4 PCB ile tasarlanan mikroşerit antenlerin 3 boyutlu kazanç ve yönlülük özellikleri incelenmiştir. Anten tasarım ve simülasyonunda 2.4 GHz çalışma frekansı referans olarak alınmış olup FR4 PCB kullanılarak tasarlanmış malzemede yapılan simülasyon sonuçlarında FR4 malzemenin 2.6 GHz’de değişim göstermiştir. FR2 malzeme ile elde edilen sonuçlar ise literatürde bulunan değerler ile yaklaşık çıkmıştır. Bu farklılıkların çözümü için tasarım parametreleri değiştirilerek, gelecek çalışmalarda tekrar simülasyon gerçekleştirilecektir. Simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde FR2 ve FR4 malzemelerinin dielektrik özelliklerinin farklı olması sebebiyle tasarlanan antenin fiziksel boyutlarının farklı olduğu ve mikroşerit antenin tasarım parametrelerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. FR2 ve FR4 malzeme yerine dielektrik özelliği farklı bir malzeme kullanıldığında tasarım parametrelerinin de değişeceği tespit edilmiştir.

4. SONUÇ

Günümüz teknolojisinde modern kablosuz iletişim teknolojileri, antenler ve ağ teknolojilerinin hızla gelişimiyle, mikroşerit antenler büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada FR4 ve FR2 PCB’ler kullanılarak mikroşerit anten fiziksel özellikleri belirlenmiş ve bu özelliklere göre tasarımı ve simülasyonları yapılmıştır. FR4 ve FR2 PCB’ler düşük maliyet, bulunabilirlik, kolay kullanım yöntemleri ve yüksek yalıtkanlık avantajları nedeniyle mikroşerit anten tasarımında tercih edilmiştir. FR4 ve FR2 PCB ile tasarlanan mikroşerit antenlerin 3 boyutlu kazanç ve frekans-empedans grafikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde FR4 malzemenin S11 geri dönüş kaybının -14.9 dB olduğu ve bant genişliğinin 80 MHz olduğu görülmektedir. Bu bant genişliği değeri WiFi çalışma bandını karşılamaktadır. Bu çalışmada yapılan tasarım ve simülasyon sonuçlarına göre, PCB’lerde kullanılan FR4 ve FR2 malzemelerin dielektrik özelliklerinin, tasarlanan dikdörtgen yamalı mikroşerit antenin fiziksel boyutlarına etki ettiği görülmüştür.

Bu çalışma, gelecekte özellikle yeni nesil Biyokompozit malzeme türleri (Genc ve ark., 2020; Zhan ve Wool, 2016; Zhan ve ark., 2011) kullanılarak, farklı anten geometrilerinde tasarlanacak anten tasarım ve uygulamaları için ön çalışma niteliği oluşturmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği öğrencisi Mehmet Ali Acar'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

- Fellman J., Printed Circuit Board (PCB) Scrap Melting and Mixing with Molten Fayalite Slag, Aalto University School of Chemical Engineering, Master Thesis (Printed), 2018.
- Genc G., Sarikas A., Kesen U., Aydın S., Luffa/Epoxy Composites: Electrical Properties for PCB Application. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 10(6) 933–940, 2020.
- Hall W. J., Williams P. T. Separation and Recovery of Materials from Scrap Printed Circuit Boards. Resources, Conservation and Recycling 51(3) 691–709, 2007.
- Johnson R. C., Jasik H., Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill Professional, 1984.
- Ning C., Lin C. S. K., Hui D. C. W., McKay G., Waste Printed Circuit Board (PCB) Recycling Techniques. Topics in Current Chemistry 375(2), 1-36, 2017.

- Reineix A., Jecko B., Analysis of Microstrip Patch Antennas Using Finite Difference Time Domain Method. *IEEE Transactions On Antennas and Propagation* 37(11), 1361-1369, 1989.
- Shamkhalichenar H., Bueche C. J., Choi J. W., Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms. *Biosensors* 10(11), 159, 2020.
- Singh I., Tripathi V. S., Micro Strip Patch Antenna and Its Applications: A Survey. *International Journal of Computer Technology and Applications* 2(5), 1595-1599, 2011.
- Supratha C., Robinson S., Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna for WLAN Application. *International Conference on Current Trends towards Converging Technologies, (ICCTCT) India, March 1-3, pp: 1114–1118, 2018.*
- Werfelli H., Tayari K., Chaoui M., Lahiani M., Ghariani H., Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna. *2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), Monastir/Tunisi, March 21-24, pp: 798–803, 2016.*
- Zhan M., Wool R. P., Mechanical Properties of Composites with Chicken Feather and Glass Fibers. *Journal of Applied Polymer Science* 133, 44013, 2016.
- Zhan M., Wool R. P., Xiao J. Q., Electrical Properties of Chicken Feather Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42(3), 229–233, 2011.