T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

OPTİK OLARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Güzin TEKNECİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2025

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

OPTİK OLARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Güzin TEKNECİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK OLARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Güzin TEKNECİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK OLARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Güzin TEKNECİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 03/02/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN
Prof. Dr. Selçuk HELHEL
Dr. Öğretim Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖZET

OPTİK OLARAK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR TEKSTİL ANTEN TASARIMI

Güzin TEKNECİ

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN

Şubat 2025; 61 sayfa

Son dönemlerde giyilebilir teknolojilerdeki artış sebebiyle kıyafetlere entegre edilebilen sistemler büyük ilgi görmekte ve bu sistemler vasıtasıyla kişiye özgü parametreler kablosuz iletişim yoluyla izlenebilmektedir. Bu amaçla önerilen giyilebilir tekstil antenlerin insan vücudundaki hareketlerden etkilenmeyen, yüksek frekans uygulamalar için vücut içi veya vücut dışı kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılabilecek küçük boyutlu, hafif, mekanik ve elektriksel sağlamlığı olan, kolay üretilebilen, yeniden yapılandırılabilir antenler olması ve çoklu bant/geniş bant performans sergilemesi beklenmektedir.

Tekstil antenler PCB teknolojisiyle üretilen antenlerden farklı olup kısmen veya tamamıyla tekstil malzemelerden ya da akıllı tekstil malzemelerden üretilmektedir. Mikroşerit anten yapısının kullanıldığı tekstil antenlerin ışıyan yamasında iletken malzemeler kullanılırken alt katmanda iletken olmayan kumaşlar kullanılmaktadır.

Yeniden yapılandırılabilir anten tasarım patenti ilk defa 1983 yılında Schaubert vd. (1983) tarafından rapor edilmiştir. Bu tarihten günümüze kadar farklı metot ve tasarımlar kullanılarak yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bir antende yeniden yapılandırılabilirlik radyatörün temel çalışma karakteristiklerini elektriksel, mekanik ve yapısal olarak değiştirebilme yeteneğidir. Literatürde rapor edilen yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler kullanım amaçlarına göre dört değişik şekilde sınıflandırılmaktadır. Bunlar:1) Frekansı yeniden yapılandırılabilir 2) Işıma örüntüsü yeniden yapılandırılabilir 3) Polarizasyonu yeniden yapılandırılabilir 4) Hibrit yeniden yapılandırılabilir tekstil antenlerdir. Bu antenler sadece sistem gereksinimlerine cevap vermekle kalmayıp aynı zaman da sistem için gereken anten sayısını da azaltmaktadır. Günümüzde kablosuz haberleşmede aynı frekans spektrumunu kullanan kullanıcı sayısı arttığından kullanıcılar arasındaki girişim etkisi yeniden yapılandırılabilir antenler vasıtasıyla önlenebilmektedir. Yazılım tabanlı radyo, mikrodenetleyici ve FPGA içerikli otomasyon, sensör, RFID teknolojisi, uzaktan izleme, sağlık takibi gibi gelişen teknolojileri destekleme yeteneği sayesinde yeniden yapılandırılabilir anten tipleri büyük ilgi odağı olmuşlardır. Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler tek bir antenin değişik frekanslarda çalışmasına izin vermektedir. Bu yeniden yapılandırma mekanizması daha çok çoklu bant mobil cihazlar gibi RF iletişim sistemlerinde kullanılmaktadır. Frekansı yeniden yapılandırma en çok kullanılan yeniden yapılandırma çeşididir çünkü bu değiştirilmesi en kolay özelliktir.

Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler bir veya birden fazla rezonans frekansının sürekli değiştirilmesine izin vermektedir.

Yeniden yapılandırılabilir antenlerin çalışması için kullanılan uygulama teknikleri şunlardır: 1) Elektriksel yeniden yapılandırma 2) Mekanik yeniden yapılandırma 3) Optik yeniden yapılandırma 4) Akıllı materyal tabanlı yeniden yapılandırma. Elektriksel olarak yeniden yapılandırmada anten karakteristikleri PIN diyot, varaktör, RF-MEMS, FET gibi elektronik anahtarlama elemanları kullanılarak değiştirilmektedir. Bu tip yeniden yapılandırma tekniğinin uygulanması kolay ve maliyeti düşüktür. Ancak uygulama yapısı karmaşık olup bias devresine ihtiyaç duyulmaktadır. Mekanik yeniden yapılandırmada antenin ana radyatörü değişik karakteristikler sağlamak için yeniden yapılandırılmaktadır. Burada kullanılan mekanik aktivatörlerin antende yerleştirilmesine gerek yoktur. Optik yeniden yapılandırmada ise foto iletken anahtarlar kullanılmaktadır. Foto iletken anahtarların avantajları DC bias devresine ihtiyaç duymadan lazer ışık kaynağı ile uyarılması ve düşük akım ve gerilim harcayarak yüksek anahtarlama hızına sahip olmasıdır. Akıllı materyal tabanlı yeniden yapılandırma elektro aktif polimerler (EAP), biçim hafıza alaşımları (SMA) gibi yeni akıllı materyal tabanlı teknolojilere dayalı aktivatörler ile gerçekleştirilmektedir. Klasik mekanik aktivatörlere kıyasla bu aktivatörler hafiflik, düşük maliyet gibi avantajlara sahiptirler.

Literatürde tasarım mühendisleri yeniden yapılandırılabilir antenleri akortlamak için PIN diyot, varaktör, RF-MEMS, FET transistör, yapısal başkalaşım, değiştirilebilir dielektrik sabite veya dielektrik geçirgenliğe sahip malzemeler ve foto iletken anahtarlar kullanmışlardır. Bu tür antenlerin tasarımında yaygın şekilde mikroşerit antenler kullanılmaktadır çünkü mikroşerit antenler akortlanabilmekte, yama kısmına pek çok farklı tasarımlar uygulanabilmekte ve yapılarına yarıklar dahil edilebilmektedir. Mikroşerit anteni beslemek için esas ışıyan kısım olan yama tabakasının altında tamamlayıcı alt katmana ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan günümüzde küçük cihazlar için tasarlanan yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler için anten boyutunun küçük olması da oldukça önem arz etmektedir. Bunun için dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliği negatif olan ve klasik malzemelerde bulunmayan özellikler sergileyen metamalzemeler tercih edilmektedir. Metamalzemelerle gerçekleştirilen yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler baskı devre yüzeyine monte edilebilen elektriksel olarak küçük ve güçlü anten olarak görev yapmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında yüksek kalite faktörü, yüksek hassasiyet ve küçük boyut avantajları sunan bir metametaryal rezonatör yapısı olan iç içe geçen yarık halka rezonatörlü (NSRR) iki adet tekstil anten tasarım ve üretimi yapılmıştır. Literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalarda NSRR yapısı anten, osilatör, filtre ve sensör tasarımları için kullanılmıştır. Ancak bu tez çalışmasında NSRR rezonatör yapısı ilk kez bir tekstil anten tasarımında kullanılmıştır. Tasarlanan tekstil antenler monopol mikroşerit anten yapısında olup anten alt katmanı bağıl dielektrik sabiti (ε_r) 1.8, bağıl geçirgenliği (μ_r) 1, dielektrik kayıp tanjantı (tan δ) 0.03 ve yüksekliği 0.7 mm olan denim kumaştan yapılmıştır. Anten yama ve toprak düzlemleri ise 200 μm kalınlıklı bakır levhadan oluşmaktadır. Üretilen NSRR temelli tekstil anten GPS ve Wi-MAX uygulama bantlarını kapsayan (1.556- 1.601) GHz ve (5.043- 5.550) GHz frekanslarında çift bant çalışma sergilemektedir. Bu tekstil anten $0.187\lambda_g$ x $0.215\lambda_g$ x $0.004\lambda_g$ ($\lambda_g = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon_r}$ ve λ_0 en düşük

frekans bandındaki kılavuz dalgaboyudur) boyutuyla bugüne kadar literatürde rapor edilen tekstil antenlerle karşılaştırıldığında oldukça küçük elektriksel boyuta sahiptir. Ayrıca literatürde şimdiye kadar GPS bandını kapsayan tekstil anten üretiminin sayıca çok az olduğu tespit edilmiştir. Üretilen NSRR temelli çift bant tekstil antenin çalışma prensibini anlamak ve açıklamak için anten eşdeğer devre modeli AWR programıyla elde edilmiştir. Anten rezonatör ve besleme hattı parametrelerinin anten çalışması üzerindeki etkilerini incelemek için CST programı kullanılarak parametrik çalışmalar yapılarak S11 grafiklerinden elde edilen sonuçlar ile en iyi anten performansı için optimal parametre değerleri elde edilmiştir. Öte yandan önerilen tekstil antenin vücut üzeri giysilerde kullanıma uygunluk performansını saptamak için anten x-ekseni ve y-ekseni etrafında bükülme testlerine tabii tutulmuş ve insan vücut dokusu tarafından emilen elektromanyetik dalga düzeyini ölçmek için SAR analizi yapılmıştır. Önerilen anten için simülasyon ve ölçüm ile elde edilen ışıma desenleri, geri dönüş kayıp karakteristikleri, eş polarizasyon ve çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri ve üç boyutlu mutlak kazanç ışıma diyagramları elde edilmiştir. Üretilen NSRR temelli çift bant tekstil anten son yıllarda literatürde rapor edilen tekstil antenlerle rezonatör şekli, alt katman malzeme, dielektrik malzeme, dielektrik sabit, büyüklük, çalışma frekansı, % bantgenişlik ve mutlak kazanç karakteristikleri açısından karşılaştırılmıştır.

Bunun yanında anten rezonatör kısmındaki NSRR yapısına dar alanda uzun iletim hattı sağlayacak kıvrımlı çizgi dahil edilerek çift bant ve çoklu bantta çalışma gösterecek tekstil anten tasarımları HFSS simülatörde gerçekleştirilerek geri dönüş kayıp karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra birden çok frekans bandında çalışabilen kıvrımlı şerit eklemeli NSRR rezonatöre sahip optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir kompakt tekstil anten tasarım ve üretimi yapılmıştır. Bu antenin üretiminde literatürde bugüne kadar sunulan anten yapılarından farklı olarak anahtarlama elemanı olarak foto diyot kullanılmıştır. Yüksek dalga boyuna duyarlı olan foto diyot aracılığıyla ışığın olup olmamasına bağlı olarak tek bir anten elemanı ile farklı frekans cevapları elde edilmiştir. Dolayısıyla literatürde bu tür antenlerin üretiminde kullanılan anahtarlama elemanlarının yarattığı dezavantajlar da bertaraf edilmiştir. Metamalzeme antenlerde kullanılan NSRR rezonatör yapısının literatürde optik olarak yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarımında bugüne kadar hiç kullanılmamış olması da araştırmacılara yeni bir ufuk açmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Bias devresi, Foto diyot, Metamalzeme**,** NSRR, Optik olarak yeniden yapılandırılabilir tekstil anten.

JÜRİ: Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ABSTRACT

DESIGN OF OPTICALLY RECONFIGURABLE TEXTILE ANTENNA

Güzin TEKNECİ

MSc Thesis in Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN

February 2025; 61 pages

In recent times because of the increment in wearable technology systems which are integrated to dresses have taken great attention and by the means of these systems proprietary parameters can be followed up by wireless communication. Wherefore proposed wearable textile antennas are intended not to be affected by the movements of human body, for high frequency applications to be small sized, light weighted, to be wearable, to have mechanical and electrical robustness, to be manufactured easily, to be reconfigurable antennas and to exhibit multifrequency band/wide band performance.

Textile antennas are different from the antennas manufactured by PCB technology as they are manufactured using partially or completely textile materials or also smart textile materials. In the radiating patch of the textile antenna which use microstrip patch antenna structure conductive materials are used and, in the substrate non-conductive fabrics are used.

Reconfigurable antenna design patent was first reported by Schaubert in 1938. From this date up to now by using different methods and designs reconfigurable textile antenna designs have been carried out. In an antenna reconfigurability is an ability to change basic operating characteristics of a radiator electrically, mechanically, and structurally. Reconfigurable antennas reported in the literature are denominated in four different ways. These are: 1) Frequency reconfigurable antennas 2) Radiation pattern reconfigurable antennas 3) Polarization reconfigurable antennas 4) Hybrid reconfigurable antennas. These antennas do not only respond to system requirements but also decreases the number of antennas required in the system. Now a days as the number of users in wireless communication systems that utilize the same frequency spectrum is increasing, the interference effect among the users can be avoided by reconfigurable antennas. By the ability of encouraging evolving technologies such as software-based radio, microcontroller or FPGA inclusive automation, sensor, RFID technology, distant monitoring, health surveillance etc. reconfigurable antenna types have been a great centre of interest. Frequency reconfigurable textile antennas allow an antenna to operate at different frequencies. This reconfiguration mechanism is implemented mostly to RF communication systems as multiband mobile devices. Frequency reconfiguration is the most used type because frequency is the easiest property to be changed. Frequency reconfigurable textile antennas continuously allow to change one resonance frequency or more than one.

The application techniques to operate reconfigurable antennas are: 1) Electrical reconfiguration 2) Mechanic reconfiguration 3) Optic reconfiguration 4) Smart material-

based reconfiguration. In electrical reconfiguration antenna characteristics are changed by electronic switching elements like PIN diode, varactors, RF-MEMS, FET. This reconfiguration technique is easy to implement and cost-effective. But its application structure is complex and bias circuit is required. In mechanic reconfiguration main radiator of the antenna is reconfigurated to supply different characteristics and there is no need to install mechanic activators on the antenna. In optical reconfiguration photoconductive switches are used. The advantages of photoconductive switches are that they are excited by laser light supply lack of bias circuit, and they have high switching speed by consuming low current and voltage. Smart material-based reconfiguration is achieved by actuators such as electro-active polymer (EAP), shape memory alloy (SMA), piezo electric actuator vb. which are attributed on novel smart material-based technologies. Compared with traditional mechanic activators these activators are light weighted and cost effective.

In the literature design engineers have used pin diode, varactor diode, RF-MEMS, FET transistor, structural metamorphosis, materials which have changeable dielectric constant or dielectric permeability and photoconductive switches to tune reconfigurable antennas. In the design of these kinds of antennas extensively microstrip antennas are used because microstrip antennas can be tuned, many different designs can be applied to its patch and slots can be incorporated in it. To feed microstrip antenna supplementary substrate layer is needed under the patch layer which is the mainly radiating part. On the other hands nowadays reconfigurable textile antennas designed for small devices having small size presents a great importance. Therefore, metamaterials which have negative dielectric constant and magnetic permeability and exhibiting characteristics which aren't found in classical materials are preferred for this aim. Reconfigurable textile antennas achieved by metamaterials serve as small sized and powerful antennas which are mounted on printed circuits.

In this dissertation two textile antennas with metamaterial resonator in the form of nested split ring resonator (NSRR) which performs high quality factor, high sensitivity and small size advantages are designed and fabricated. In literature NSRR structures are used for the design of antenna, oscillator, filter, and sensor at the studies carried out up to now. However, in this dissertation NSRR resonator have been used in textile antenna design for the first time. The designed textile antennas are in the form of monopol microstrip antenna that's substrate is made of denim fabric with a relative dielectric constant (ε_r) 1.8, relative permeability (μ_r) 1, dielectric loss tangent (tan δ) 0.03 and a height of 0.7 mm. Antennas' patch and ground layers are made of 200 μm width copper plate. Fabricated NSRR based textile antenna exhibits dual band at (1.556-1.601) GHz and (5.043-5.550) GHz frequencies covering GPS and Wi-MAX application bands. This textile antenna with a total size $0.187\lambda_g$ x $0.215\lambda_g$ x $0.004\lambda_g$ ($\lambda_g = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon_r}$ and λ_0 is the guide wavelength in the smallest frequency band) has the smallest electrical size compared with the textile antennas reported in the literature up to now. Also it is detected that there has been very little amount of fabricated textile antenna covering GPS band. To understand and explain antenna's operational mechanism lumped equivalent circuit model is obtained by AWR- Microwave Circuit Design Software. Also to determine the affects of antenna resonator and feeding line parameters on antenna's operation some parametric analyzes are applied by using CST program, then by the help of the results of S11 graphs the optimal parameter values for the best antenna performance are obtained.

On the other hand to establish conformation performance of the proposed textile antenna on body wearable clothes the antenna has been applied to bending tests along x-axis and y-axis and to measure the absorbed electromagnetic radiation from the antenna to human body the SAR analysis has been implemented. For the proposed antenna by using simulation and measurements setups radiation patterns, return loss characteristics, co-polarization and cross polarization radiation patterns, 3D realized gain radiation diagrams are obtained. Then NSRR based dual band textile antenna has been compared with the novel textile antenna designs in the literature in terms of resonator type, substrate material, dielectric constant, size, frequency, % bandwidth, realized gain.

In addition to the dual band textile antenna including meander lines which supplies long conducting lines in narrow area for NSRR structure in the radiator, a new multi band textile antenna design has been managed by using HFSS simulator. Then, a meander line added NSRR based optically reconfigurable compact textile antenna operating in multi frequency bands has been designed and fabricated. Unlike other antenna structures proposed in literature up to now, a photo diode is used as a switching component in this antenna manufacturing. By the means of photo diode which is sensitive to high wavelength depending on light or lack of light different frequency responses are obtained. Therefore disadvantages that were created by the switching components used in the literature have been eliminated. It will be a new point of view for researchers as NSRR resonator structure has not been used in optically reconfigurable textile antennas up to now.

KEYWORDS: Bias circuit, Metamaterial, NSRR, Optical reconfigurable textile antenna, Photo diode.

COMMITTEE: Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Asist. Prof. Dr. Yusuf ÖZTÜRK

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında NSRR rezonatörü içeren elektriksel olarak küçük boyutlu çift bant tekstil anten ile kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli optik olarak yeniden yapılandırılabilir tekstil antenlerin üretim ve simülasyonları sunulmuştur. Yapılan çalışmanın giyilebilir anten uygulamalarında kullanılabilecek tekstil anten tasarımlarına yeni bir bakış açısı kazandıracağını ve ileride yapılacak çalışmalara katkıda bulunacağını düşünüyorum.

Tez konusunun belirlenip çalışmaların sürdürülmesinde bilgi ve deneyimi ile yol gösteren ve tüm sorularımı sabırla yanıtlayan danışman hocam Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN' a, anten tasarım, üretim ve ölçüm süreçlerinde destek olan Öğr. Gör. Dr. Alpaslan ÇINAR, Öğr. Gör. Dr. Ahmet Rıfat GÖRGÜN ve Arş. Gör. Mert ÇİFLİK hocalarıma, anten ölçümlerinin yapıldığı Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) laboratuvar yönetimi ile Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik laboratuvar yönetimine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET……i
ABSTRACT……iv
ÖNSÖZ.....vii
AKADEMİK BEYAN……...x
SİMGELER VE KISALTMALAR…….. xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ…….. xvi
1. GİRİŞ 1
1.1. Mikroşerit Antenler……..... 1
1.2. Temel Anten Parametreleri……. 2
1.2.1. Geri dönüş kaybı (RL)……. 2
1.2.2.Gerilim duran dalga oranı (VSWR)……...2
1.2.3. Giriş empedansı……3
1.2.4.Yönlülük (D)……..... 3
1.2.5.Anten kazancı (G)…… 4
1.2.6. Verimlilik…… 5
1.2.7. Işıma örüntüsü……. 5
1.2.8. Hüzme genişliği (Beamwidth)……. 6
1.2.9. Bantgenişlik (BW)……... 6
1.2.10. Polarizasyon……...6
1.2.11. Işıma şiddeti……... 7
1.3. Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri…… 7
1.3.1. Mikroşerit hat beslemesi……...7
1.3.2. Koaksiyel prob besleme……7
1.3.3. Açıklık kuplajlı besleme…….. 8
1.3.4. Yakınlık kuplajlı besleme…… 9
1.3.5. Eş düzlemsel hat (CPW) beslemesi……. 9

1.4. Tekstil Antenler……10

1.5. Tekstil Anten Üretim Teknikleri……11

1.5.1. Film baskısı……11

1.5.2. Mürekkep püskürtmeli baskı…… 12

1.5.3. Dikme ve işleme (nakış) işlemi……...13

1.6. Tekstil Anten Kullanım Şekilleri……...15

1.7. Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Antenler…… 16

2. KAYNAK TARAMASI……...18

3. MATERYAL VE METOT……...23

3.1. NSRR Temelli Çift Bant Tekstil Anten Tasarımı…… 23

3.1.1. NSRR temelli çift bant tekstil antenin nümerik analizi……. 25

3.1.2. NSRR temelli çift bant tekstil anten eşdeğer devre modeli……29

3.1.3. NSRR temelli çift bant tekstil anten bükülme testi…… 31

3.1.4. NSRR temelli çift bant tekstil antenin insan vücut modeli üzerinde SAR analizi …… 32

3.2. Kıvrımlı Şerit Eklemeli NSRR Temelli Tekstil Anten Tasarımları……. 35

3.3. Optik Olarak Frekansı Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Anten Tasarımı...38

3.3.1. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antende fotodiyot konumunun belirlenmesi …… 42

4. BULGULAR VE TARTIŞMA……45

4.1. NSRR Temelli Çift Bant Tekstil Antenin Üretim ve Ölçümü……. 45

4.2. Optik Olarak Frekansı Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Anten Üretim ve Ölçümü……... 50

5. SONUÇLAR……55

6. KAYNAKLAR……58

ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Optik Olarak Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Anten Tasarımı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

03 / 02 /2025

Güzin TEKNECİ

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε : Dielektrik sabiti

ε_r : Bağıl dielektrik sabiti

μ : Manyetik geçirgenlik sabiti

$\tan \delta$: Kayıp tanjantı

π : Pi sayısı

λ : Dalgaboyu

S : Siemens (mho)

Ω : Ohm

σ : İletkenlik

Kısaltmalar

5G	: Beşinci nesil kablosuz iletişim ağı.
dB	: Desibel
EBG	: Elektromanyetik bant boşluk
f	: Frekans
FET	: Alan etkili transistör
fF	: Femto Farad
FPGA	: Programlanabilir mantık blokları
g	: Gram
GHz	: Giga Hertz
GPS	: Küresel konumlama sistemi
Hz	: Hertz
ISM	: Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi.
kg	: Kilogram

LTE	: Uzun süreli gelişim
m	: Metre
MHz	: Mega Hertz
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
nH	: Nano Henry
nm	: Nanometre
NSRR	: İç içe geçen yarık halka rezonatör
PCB	: Baskı devre plaketi
PET	: Pozitron emisyon tomografi
pF	: Piko Farad
RF	: Radyo frekans
RFID	: Radyo frekansı ile tanımlama
RF-MEMS	: Radyo frekanslı mikro elektromekanik sistemler
RF-NEMS	: Radyo frekanslı nano elektromekanik sistemler
SAR	: Özgül soğurma değeri
USA	: Amerika Birleşik Devletleri
UWB	: Ultra geniş bant
W	: Watt
WBAN	: Kablosuz vücut alan ağı
Wi-fi	: Kablosuz bağlantı alanı
Wi-MAX	: Mikrodalga erişimi için evrensel uyumluluk
WLAN	: Kablosuz yerel alan ağı

Bu tezde “12.34” şeklinde ondalık yazım kuralı uygulanmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mikroşerit anten yapısı……...1

Şekil 1.2. Mikroşerit hat beslemesi……7

Şekil 1.3. Koaksiyel prob besleme…… 8

Şekil 1.4. Açıklık kuplajlı besleme……... 8

Şekil 1.5. Yakınlık kuplajlı besleme…….....9

Şekil 1.6. Eş düzlemsel hat beslemesi…….....10

Şekil 1.7.a) Film baskı işlemi (Khaleel vd. 2013); **b)** Naylon/tayt alt katman üzerine film baskılı anten (Hasni vd. 2021) ……11
c) Film baskılı giyilebilir yama anten (Kazani vd. 2014); **d)** Kıvrımlı çizgili tekstil anten (Leng vd. 2016) …… 12

Şekil 1.8. Mürekkep püskürtmeli baskı tekniği kullanan anten prototipleri; **a)** Sentetik kâğıt alt katman üzerine esnek anten (Abutarboush 2022); **b)** Esnek doğrusal dizi (Hester ve Tentzeris 2016) ……. 12
c) Akıllı bandaj üzerine halka anten (Shamim 2017); **d)** PET film üzerine esnek anten (Jilani vd. 2018) …… 13

Şekil 1.9. Dikiş/nakış teknikleri kullanan işlemeli anten prototipleri; **a)** İletken iplikler kullanan tekstil UWB anten (Osman vd. 2011); **b)** Esnek keçe kullanan E-şekilli anten (Mohamadzade vd. 2019); **c)** Keçe kullanan mikroşerit yama anten (Zhan vd. 2017); **d)** Geniş bant tekstil düzlemsel monopol (Bonefačić ve Bartolić 2021); **e)** Tekstil yüzeyler (Wang vd. 2015); **f)** E-fiber üzerine çoklu bant tekstil anten (Wang vd. 2014) …… 14

Şekil 2.1. Yeniden yapılandırma teknikleri …… 21

Şekil 3.1.NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm …… 23

Şekil 3.2. NSRR rezonatör tarak dişleri …… 24

Şekil 3.3. Önerilen antenin yüzey akım dağılımları ……26

Şekil 3.4. Önerilen anten için dört farklı SRR yapısı …… 26

Şekil 3.5. Önerilen antenin her bir SRR durumu için geri dönüş kaybı …… 27

Şekil 3.6. Önerilen antenin dört farklı yarık boşluk mesafeleri için elde edilen geri dönüş kayıp değerleri …… 27

Şekil 3.7. Mikroşerit besleme hattının geri dönüş kayıp karakteristiği ve anten bant genişliğine etkisi……...28

Şekil 3.8. Önerilen antenin rezonatör tarak dişleri arasındaki boşlukların üç farklı konum gösterimi ……. 28

Şekil 3.9. Önerilen antenin rezonatör tarak dişlerinin boşluk1, boşluk2 ve boşluk3 konumları için elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiği ……. 29

Şekil 3.10. NSRR temelli çift bant tekstil anten eşdeğer devre modeli ……30

Şekil 3.11. CST ve AWR simülatörlerle hesaplanan geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması……...30

Şekil 3.12. NSRR temelli çift bant tekstil antenin; a) x ekseni etrafında bükülmesi; b) y ekseni etrafında bükülmesi……. 31

Şekil 3.13. Önerilen antenin x ekseni etrafında farklı yarıçap kavisli bükülme ve bükülme olmaması durumlarındaki geri dönüş kayıp karakteristikleri ……31

Şekil 3.14. Önerilen antenin y ekseni etrafında farklı yarıçap kavisli bükülme ve bükülme olmaması durumlarındaki geri dönüş kayıp karakteristikleri ……32

Şekil 3.15. Üç katmanlı insan vücut modeli ……33

Şekil 3.16. İnsan vücut modeline bağlı olarak geri dönüş kayıp karakteristiği değişimi...34

Şekil 3.17. Antenin insan vücut dokusunun 10 mm üzerine yerleştirilmesiyle oluşan SAR dağılımları; **a)** 1575 GHz ’de 1 g doku için; **b)** 1575 GHz ‘de 10 g doku için……34 **c)** 5250 GHz ‘de 1 g doku için; **d)** 5250 GHz ‘de 10 g doku için ……... 35

Şekil 3.18. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm……36

Şekil 3.19. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çoklu bant tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm……37

Şekil 3.20. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çift bant ve çoklu bant tekstil antenlerin geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması……. 38

Şekil 3.21. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm……. 39

Şekil 3.22. TEMD7100X01 fotodiyotun mm cinsinden ebatları; **a)** Ön görünüm; **b)** Üst görünüm……. 40

Şekil 3.23. Pin fotodiyot yapısı……41

Şekil 3.24. TEMD7100X01 fotodiyot eşdeğer devresi; **a)** Kesim durumu için; **b)** İletim durumu için……42

Şekil 3.25. Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antende fotodiyotun altı farklı konumları**; a)** Konum1; **b)** Konum2; **c)** Konum3; **d)** Konum4……...42

Şekil 3.26. Fotodiyotun altı farklı konumları için kesim durumunda elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması……. 43

Şekil 3.27. Fotodiyotun altı farklı konumları için iletim durumunda elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması……. 43

Şekil 4.1. NSRR temelli çift bant tekstil anten prototipi…… 45

Şekil 4.2. NSRR temelli çift bant tekstil anten ölçüm düzenekleri…… 46

Şekil 4.3. Önerilen anten için nümerik ve ölçülen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması……. 46

Şekil 4.4. NSRR temelli çift bant tekstil anten için simülasyon ve ölçüm ile elde edilen ışıma örüntülerinin karşılaştırması……. 47

Şekil 4.5. NSRR temelli çift bant tekstil antenin üç boyutlu mutlak kazanç ışıma örüntüleri…… 48

Şekil 4.6. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten prototipi……. 50

Şekil 4.7. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten ölçüm düzeneği……...50

Şekil 4.8. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin fotodiyotsuz simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri……. 51

Şekil 4.9. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin fotodiyot iletim durumu için simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri……. 52

Şekil 4.10. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin fotodiyot kesim durumu için simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri……53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarım parametreleri ve değerleri ... .24

Çizelge 3.2. Karşılık gelen frekans değerleri için insan vücut modelinin elektriksel özellikleri ……..... 33

Çizelge 3.3. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çoklu bant tekstil anten tasarım parametreleri ve değerleri…… 37

Çizelge 3.4. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarım parametreleri ve değerleri…… 40

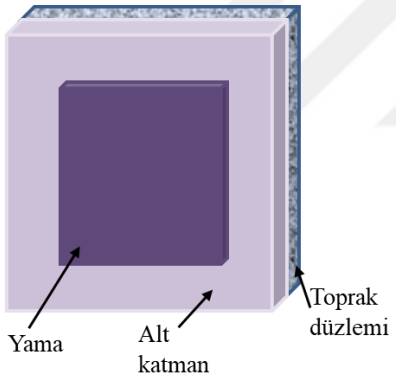
Çizelge 4.1. Tekstil antenlerin performans karşılaştırması……. 49

1. GİRİŞ

Son dönemde oldukça geniş bir yelpazede uygulama alanı bulan giyilebilir teknolojilerin önemi ve değeri hızla artmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde kıyafetlere entegre edilen sistemler aracılığıyla kişiye özgü çeşitli parametreler kablosuz olarak izlenebilmektedir. Söz konusu sistemlerde haberleşmenin kesintisiz olarak sağlanabilmesi için kullanılacak olan antenlerin ilgili sistemin fiziksel ve elektriksel gereksinimlerini karşılaması beklenmektedir. Bu kapsamda insan vücut hareketinin dinamik değişimiyle başa çıkmak için mekanik ve elektriksel sağlamlığı olan, kolay üretilebilir, küçük boyut ve düşük ağırlık özelliklerine sahip giyilebilir tekstil antenlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1. Mikroşerit Antenler

Günümüzde sıkça kullanılan anten çeşitlerinden biri de mikroşerit antenlerdir. Şekil 1' de mikroşerit anten yapısı gösterilmiştir. Antenin toprak düzlemi ile yama düzlemi çoğunlukla düzgün şekildedirler. Yama ışımayı sağlayan kısım olup kare, dikdörtgen, daire, halka, üçgen, elips, beşgen, altıgen, yıldız, E harfi, T harfi vb. şekillerde tasarlanabilmektedir. Alt katmanın fonksiyonu yamaya mekanik destek yapmak ve yama ile toprak düzlemi arasındaki gerekli boşluğu sağlamaktır. Alt katmanın üstünde iletken yama, altında ise iletken toprak düzlemi yer almaktadır.



Şekil 1.1. Mikroşerit anten yapısı

Mikroşerit anten uygulama alanı ve amacına bağlı olarak anten geometrisi, alt katman malzeme çeşidi, besleme tipi değiştirilerek kullanılmaktadır. Dielektrik alt katmanın kalınlığı anten verimine etki etmekte olup kalınlığın artması istenmeyen yüzey dalgalarının oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca alt katmanın dielektrik sabiti anten bant genişliği ve frekansını etkilemektedir. Alt katman için diğer önemli bir parametre olan tanjant kaybı dielektrik kaybını ifade etmekte ve anten verimliliğine etki etmektedir.

1.2. Temel Anten Parametreleri

1.2.1.Geri dönüş kaybı (RL)

Kaynaktan antene gelen gücün ($P_{giriş}$) yansıyan güce ($P_{yansıyan}$) oranının logaritmik ifadesidir. Bu ifade eşitlik 1.1'de verilmiştir. Geri dönüş kaybı, kaynak ile anten arasındaki empedans uyumunu ve gücün maksimum transferini gösteren parametredir.

$$RL = 10 \times \log_{10} \frac{P_{yansıyan}}{P_{giriş}} \tag{1.1}$$

İyi bir güç transferi için $P_{yansıyan}/P_{giriş}$ oranının düşük olması gereklidir. Geri dönüş kaybı hem duran dalga oranı (VSWR), hem de yansıma katsayısı (Γ) ile ilişkilidir. Geri dönüş kaybının farklı ifadeleri eşitlik (1.2) -(1.4) arasında verilmiştir.

$$RL = -20 \times \log_{10} \Gamma \tag{1.2}$$

$$RL = -20 \times \log_{10} \frac{z_{L-} z_0}{z_L + z_0} \tag{1.3}$$

$$RL = -20 \times log_{10} \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \tag{1.4}$$

Burada Γ yansıma katsayısını; VSWR gerilim duran dalga oranını (Voltage Standing Wave Ratio); z_L yük empedansını ve z_0 antene bağlanan iletim hattının karakteristik empedansını temsil etmektedir. Anten ve verici arasındaki empedans uyumunun mükemmel olabilmesi için Γ = 0 ve RL= ∞ olmalıdır. Bu durumlarda yansıtılan gücün geri yansıma yapmadığı sonucuna varılabilir. Pratikte ise bu sonuçlara asla ulaşılamamaktadır.

1.2.2. Gerilim duran dalga oranı (VSWR)

Antenlerde verici ile anten empedansı uyuşmadığı zaman yansıyan dalgalar, duran dalgaların oluşumuna neden olur. Yani gücün bir kısmı duran dalga olarak bulunur ki bu gerilim duran dalga oranı olarak belirtilir. Antenin verimli çalışabilmesi için vericinin empedansı ile anten giriş empedansı arasındaki uyumun sağlanmış olması gerekir. Böylece verici ile anten arasında maksimum güç transferi gerçekleşmiştir. VSWR eşitlik 1.5'teki gibi ifade edilir.

$$VSWR = \frac{V_{maksimum}}{V_{minimum}} \tag{1.5}$$

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{1.6}$$

Γ: yansıma katsayısı

Γ, -1 veya 1 değerini aldığında VSWR sonsuz değerini alır ki bu istenmeyen bir durumdur. Bu durum verici ile anten arasında empedans uyumunun olmadığını gösterir. VSWR, 1 değerini aldığında ise verici ile anten arasında empedans uyumu vardır.

1.2.3. Giriş empedansı

Anten giriş terminalindeki gerilimin akıma oranıdır. Giriş empedansı reel ve sanal kısımlardan oluşur ve eşitlik (1.7) ile gösterilir.

$$Z_A = R_A + jX_A \tag{1.7}$$

Z_A: a- b terminalleri arasındaki anten empedansı (Ω),

R_A: a- b terminalleri arasındaki anten direnci (Ω),

X_A: a- b terminalleri arasındaki anten reaktansı (Ω) 'tır.

Anten direnci R_A iki bileşenden oluşmaktadır ve eşitlik (1.8) ile gösterilmektedir.

$$R_A = R_r + R_L \tag{1.8}$$

R_r: anten ışıma direnci

R_L: anten kayıp direnci

1.2.4. Yönlülük (D)

Antenin maksimum ışıma yaptığı yöndeki güç yoğunluğunun aynı güçteki bir izotropik (ideal) antenin aynı uzaklıkta oluşturduğu güç yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Yönlülük eşitlik 1.9 ile gösterilir. Yönlülük her zaman 1'den büyüktür.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4 \times \pi \times U}{P_T} \tag{1.9}$$

$$D = \frac{U_{max}}{P_T} = \frac{4 \times \pi \times U_{max}}{P_T} \quad (1.10)$$

D: yönlülük(boyutsuz)

D_0: maksimum yönlülük(boyutsuz)

U_{max}: ışıma şiddeti (W/ birim katı açı)

U_0: izotropik antenin ışıma şiddeti (W/birim katı açı)

P_T: toplam ışıma gücü (Watt)

1.2.5. Anten kazancı (G)

Anten kazancı yönlülükle oldukça bağıntılı olmasına rağmen anten verimliliğinin yanında yönlülük kabiliyetini hesaba katan bir ölçümdür. Verilen bir yönde anten kazancı ışıma şiddetinin izotropik olarak ışıma yapan antenin aldığı güçten elde edilen ışıma şiddetine oranıdır. İzotropik olarak yayılan güce karşılık gelen ışıma şiddeti anten tarafından alınan (giriş) gücünün 4π' ye bölümüne eşittir. Bu eşitlik 1.11 'de gösterilmiştir.

$$G = 4 \times \pi \frac{ışıma\ şiddeti}{toplam\ giriş\ g\text{ücü}} = 4 \times \pi \frac{U}{P_{in}} \quad (1.11)$$

Çoğu durumlarda verilen yöndeki güç kazancının kayıpsız izotropik kaynağın kazancına oranı olarak ifade edilen bağıl güç ele alınmaktadır. Eşitlik (1.11) 'de eşitlik (1.12) 'deki P_{in} ifadesi yerine konulursa eşitlik 1.13 elde edilir.

$$P_{rad} = e_{cd} \times P_{in} \quad (1.12)$$

$$G = e_{cd}\left[4 \times \pi \frac{U}{P_{rad}}\right] \quad (1.13)$$

$$U = \frac{P_{rad}}{4 \times \pi} \quad (1.14)$$

Eşitlik (1.14)'i eşitlik (1.13)'de yerine koyarsak eşitlik (1.15) elde edilir.

Buna göre anten kazancı, verimlilik ile yönlülüğün çarpımına eşittir. Kayıpsız bir antenin kazancı, anten yönlülüğüyle doğru orantılıdır. Antenin kazancı, antene uygulanan güce göre daha büyük bir çıkış gücünün elde edilmesini sağlamaz. Anten kazancı eşitlik 1.15 ile ifade edilir.

$$G = e \times D \tag{1.15}$$

G: anten kazancı

D: yönlülük

e: anten verimi

1.2.6. Verimlilik

Anten verimliliği, ışıma verimliliği olarak da adlandırılır. Anten verimliliği anten kayıplarının bir ölçüsü olup 0 ile 1 arasında bir değer alır. Anten yapımında kullanılan mükemmel olmayan metaller ve dielektrik malzemelerden kaynaklanan kayıplar, anten girişindeki empedans uyumsuzluğu ve alıcı antenle kutuplanma uyumsuzluğu nedeniyle oluşan kayıplardan dolayı anten girişine aktarılan güç antenden yayılan güçten farklı olabilmektedir. Antende kaybolan bu güce kayıp güç adı verilir. Anten verimi antenden yayılan ışıma gücünün antene aktarılan giriş gücüne (elektriksel güce) oranıdır ve eşitlik (1.16) ile gösterilir.

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{kayıp}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{kayıp}}{P_{in}} \tag{1.16}$$

1.2.7. Işıma örüntüsü

Anten ışıma örüntüsü uzay koordinatlarının fonksiyonu olarak antenin ışıma özelliklerinin matematiksel veya grafiksel gösterimidir. Işıma özellikleri güç akı yoğunluğu, ışıma yoğunluğu, alan şiddeti, yönlülük, faz veya polarizasyonu kapsar. Çoğu durumlarda ışıma örüntüsü uzak alan bölgesinde elde edilir. Işıma örüntüsü, sabit yarıçaplı yüzey veya iz boyunca kesitler alınarak ışıyan enerjinin iki veya üç boyutlu uzaysal dağılımı olarak gösterilir. Işıma örüntüsü alan ve güç örüntüsü olarak iki şekilde gösterilir. Alan örüntüsü (doğrusal ölçekte), elektrik (|E|) ve manyetik (|H|) alanın doğrusal olarak açısal koordinatlarda çizimidir. Güç örüntüsü (doğrusal ölçekte veya desibel (dB) ölçekli), elektrik (|E|) ve manyetik (|H|) alan genliğinin karesi olarak gücün açısal koordinatlarda çizimidir.

1.2.8. Hüzme genişliği (Beamwidth)

Hüzme genişliği anten ışıma örüntüsü ile bağlantılı bir parametre olup örüntünün maksimum ışıma içeren kısmının (ana lobun) zıt tarafındaki iki eş nokta arasındaki açısal aralık olarak tanımlanmaktadır. Bir anten örüntüsünün birden fazla hüzme genişliği bulunmaktadır ki en çok kullanılanı yarım güç hüzme genişliği (HPBW)' dir. HPBW, örüntüde maksimum ışıma doğrultusu içeren düzlemde (ana lobun üzerinde) ışıma şiddetinin yarı değerde olduğu iki yön arasındaki açıdır. Diğer önemli hüzme genişliği örüntünün ilk sıfır noktaları arasındaki açısal açıklık olup ilk sıfır hüzme genişliği (FNBW) olarak adlandırılır. FNBW, antenin ışıma yapmadığı bölümünü temsil etmektedir. Diğer bir hüzme genişliği ise örüntüde maksimum ışıma noktalarının -10 dB aşağısındaki noktalar arası açısal aralıktır. Hüzme genişliği anten kalitesini belirleyen önemli bir parametredir.

1.2.9. Bantgenişlik (BW)

Anten performansının bazı karakteristik özellikleri (giriş empedansı, ışıma örüntüsü, hüzme genişliği, polarizasyon, yan lob seviyesi, kazanç, ışıma verimliliği vb.) bakımından belirli standartları sağladığı frekans aralığıdır. Başka bir ifade ile anten karakteristiklerinin kabul edilebilir değerde olduğu merkez frekansının her iki yanındaki frekans aralığıdır. Anten karakteristikleri zorunlu olarak aynı koşullarda değişmediği için veya kritik olarak frekanstan etkilendiği için bant genişliğinin tek bir tanımlaması yoktur. Tanımlamalar belirli anten uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için her bir durum için belirlenmektedir. Bantgenişliği aşağıdaki formülle gösterilmektedir.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \times 100\% \tag{1.17}$$

$$f_0 = \frac{(f_{max} + f_{min})}{2} \tag{1.18}$$

f_{max}: antenin bant içindeki maksimum frekansı

f_{min}: antenin bant içindeki minimum frekansı

f_0: antenin bant içindeki merkez frekansı

BW: bantgenişliği

Yansıma katsayısı değerinin –10 dB'e karşılık geldiği frekans değerleri arasındaki fark antenin bantgenişliğini vermektedir.

1.2.10. Polarizasyon

Verilen yönde bir antenin polarizasyonu anten tarafından iletilen(yayılan) dalga polarizasyonu olarak tanımlanmaktadır. Yön belirtilmediğinde ise polarizasyon maksimum kazanç doğrultusundaki polarizasyon(kutuplanma) olarak alınmaktadır. Pratikte yayılan enerjinin polarizasyonu anten merkezinin yönü ile değişmekte, böylece ışıma örüntüsünün

değişik parçaları değişik polarizasyonlara sahip olabilmektedir. Polarizasyon doğrusal, dairesel veya eliptik olarak sınıflandırılmaktadır. Eğer vektör uzaydaki bir noktadaki elektrik alanı zamanın fonksiyonu olarak tanımlayan vektör bir doğru boyunca yönlendirilmiş ise alan doğrusal kutuplanmıştır denir. Buna karşın elektrik alan izlerinin şekli elips ise alan eliptik kutuplanmış ya da daire şeklinde ise alan dairesel kutuplanmıştır denir.

1.2.11. Işıma şiddeti

Belirli bir yöndeki ışıma şiddeti "birim katı açı başına antenden yayılan güç" olarak tanımlanır. Işıma şiddeti bir uzak alan parametresidir ve ışıma yoğunluğunun uzaklığın karesiyle çarpımı ile elde edilir. Işıma şiddetinin matematiksel gösterimi eşitlik (1.19)'daki gibi gösterilmektedir.

$$U = r^2 \times W_{rad} \tag{1.19}$$

U: ışıma şiddeti (W/birim katı açı)

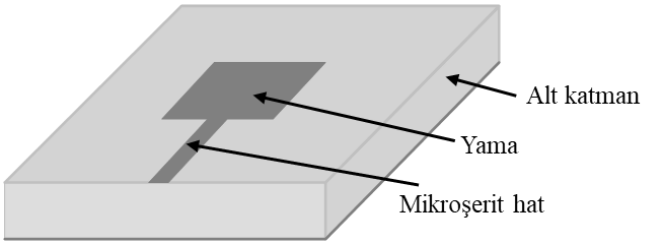
W_{rad}: ışıma yoğunluğu (W/m^2)

1.3. Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenlerde kullanılan en popüler dört besleme tekniği mikroşerit hat beslemesi, koaksiyel prob besleme, açıklık kuplajlı besleme ve yaklaşık kuplajlı besleme.

1.3.1. Mikroşerit hat beslemesi

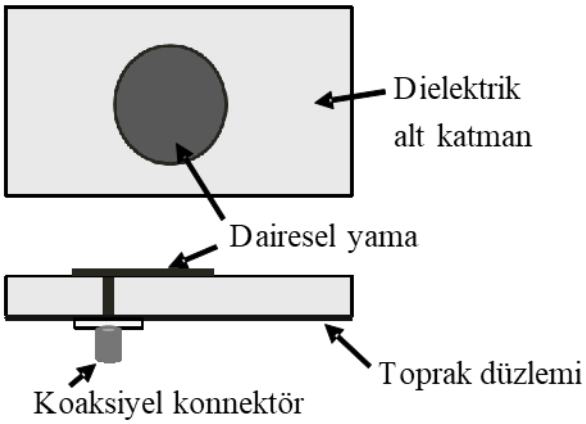
Bu tip besleme tekniğinde bir iletken şerit mikroşerit yamanın kenarına direk olarak bağlanmaktadır. İleten şeridin genişliği yama genişliğine oranla daha küçüktür.



Şekil 1.2. Mikroşerit hat beslemesi

1.3.2. Koaksiyel prob besleme

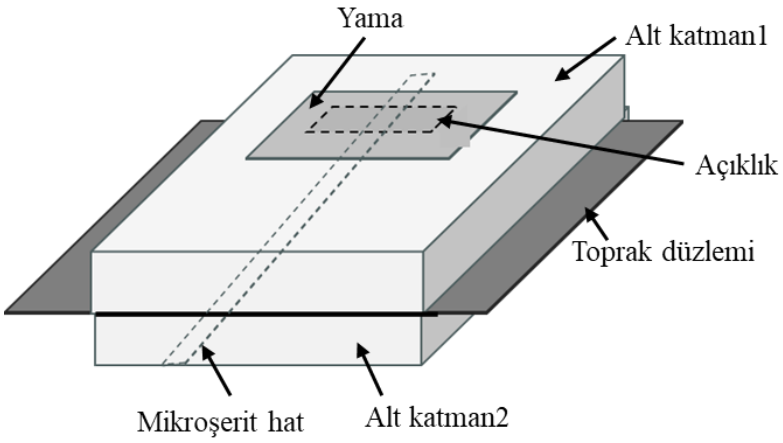
Koaksiyel prob beslemede koaksiyel konnektörün iç iletkeni anten alt katmanı boyunca antenin ışıyan yamasına bağlanırken dış iletken anten toprak düzlemine bağlanmaktadır.



Şekil 1.3. Koaksiyel prob besleme

1.3.3. Açıklık kuplajlı besleme

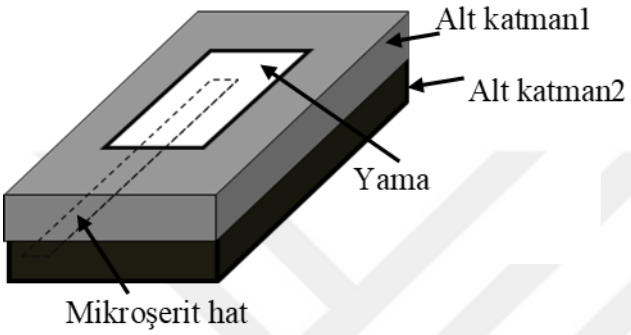
Açıklık kuplajlama elde etmek için mikroşerit besleme hattı alt katman beslemenin altına yerleştirilmektedir. Konfigürasyon simetrisine bağlı olarak daha düşük çapraz polarizasyona öncülük ederek kuplajlama açıklığı genellikle yamanın altında merkezlenmektedir. Besleme hattından yamaya olan kuplajlama miktarı açıklığın konumu, boyutu ve şekliyle elde edilmektedir. Toprak düzlemi yama ve besleme hattını ayırdığı için yapay ışıma minimize edilmektedir. Genellikle alttaki alt katman için yüksek dielektrik sabitli malzeme ve üstteki alt katman için düşük dielektrik sabitli, kalın malzeme kullanılarak yamadaki ışıma minimize edilmektedir.



Şekil 1.4. Açıklık kuplajlı besleme

1.3.4. Yakınlık kuplajlı besleme

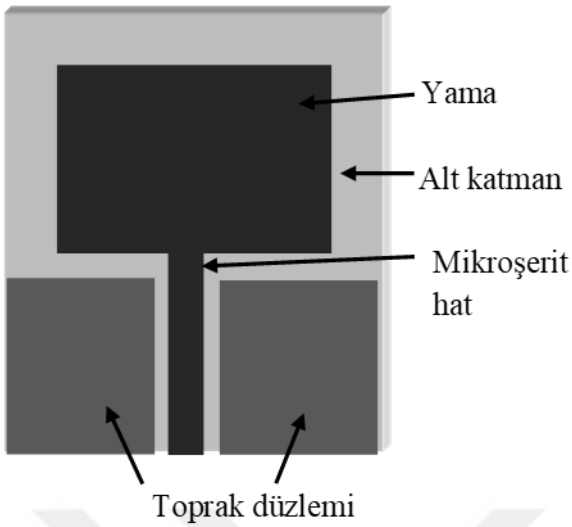
Bu besleme tekniğinde besleme hattı iki alt katman arasında ve üst alt katman üzerinde de ışıyan yama olacak şekilde iki dielektrik alt katman kullanılmaktadır. Bu tip besleme tekniği performansları optimize etmek için bir yama bir de besleme hattı için iki farklı dielektrik ortam arasında seçenekler sağlamaktadır. Öte yandan besleme hattının uzunluğu ve ışıma yamasının genişlik-boy oranı kontrol edilerek eşleştirme yapılabilmektedir.



Şekil 1.5. Yakınlık kuplajlı besleme

1.3.5. Eş düzlemsel hat (CPW) beslemesi

Bu beslemede toprak düzlemi ile ışıyan yama aynı düzlemde bulunmaktadır. Yama simetrik toprak levhaları arasında yer alan besleme hattı ile beslenmekte, böylece toprak levhaları da ışımaya katkı yapmaktadır. SMA (SubMiniature version A) konnektörün iç iletkeni bu şeride temas etmekte ve dış iletken simetrik toprak levhalarına temas etmektedir.



Şekil 1.6. Eş düzlemsel hat beslemesi

1.4. Tekstil Antenler

Giyilebilir tekstil antenlerde mikroşerit antenler kullanılmaktadır çünkü mikroşerit antenler düşük kesit, düşük maliyet, mekanik sağlamlık (Dang 2022), basit tasarım, kolay uygulanabilirlik, düzlemsel yapıya sahip olmaları ve çoklu konfigürasyonlarda çalışmaya muktedir olma (Andrade vd. 2016) avantajlarına sahiptirler. Tipik mikroşerit yama anten yapılarına uygun olarak tasarlanan tekstil antenlerde taban malzeme olarak pamuklu, polyester, jean, deri, likra vb. kumaşlar kullanılmakta, toprak düzlemi ve ışıma elemanı olarak iletken kumaş veya bakır şerit elemanları tercih edilmektedir (Ghodake A.P. ve Hogade B.G. 2022). Tekstil antenin tasarımında antenin kullanım yeri, anten yapısı göz önünde bulundurularak taban malzeme, ışıma elemanı ve toprak düzlemi belirlenmelidir. Bilhassa anten taban malzeme seçimi yapılmadan önce malzemenin analizi yapılmalıdır. Tekstil antenler PCB teknolojisiyle üretilen geleneksel antenlerden farklıdır. Tekstil antenler kısmen veya tamamıyla tekstil materyallerden üretilebilmektedir. Kullanılan kumaşlar iletken ve iletken olmayan olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. İletken kumaşlar iletken olan yama için kullanılırken iletken olmayan kumaşlar alt katman için kullanılmaktadır. Kullanılan kumaş türü tekstil antenlerin kazanç, bantgenişliği, etkinlik ve yansıma katsayısına etki etmektedir. Özellikle kullanılan alt katmanın dielektrik sabitinin etkisi büyüktür. Tekstil anten tasarımında kullanılan tekstil materyalin önemli özellikleri dielektrik sabiti, kumaş kalınlığı, iletken kumaşın yüzey özdirenci, kumaşın nem içeriği ve iletken kumaşın mekanik deformasyonudur (Bahaa vd. 2021). Vellux, sentetik keçe, Cordura , tüylü kumaş, döşemelik kumaş, denim, pamuk, naylon kumaş, aramid kumaş, jean kumaş, Daran, akrilik, ipek, sünger, Sheildit süper, tween, panama, pamuklu kadife, deri, Kevler vb. iletken olmayan kumaşlar ile nikel kaplamalı dokuma kumaş, gümüş kaplı örgü kumaş, gümüş-bakır-nikel kaplı dokuma kumaş, Flectron, Zelt, Shieldex-Prag, Shieldex-Kiel-SK-96, Shieldex-Kol, Nore Dell CR, Ag-Cu filamanlı üç iplik içeren metalik birleşik işlemeli iplik, metalleştirilmiş naylon kumaş, gümüş kaplı fenil, işlenmiş e-fiber vb. iletken kumaşlar tekstil anten yapımında kullanılmaktadır. Belirtilen tekstil

malzemeler dışında elektronik ve kumaşların iç içe girdiği elektronik tekstil (e-tekstil) veya akıllı tekstil malzemeler de tekstil antenler için oldukça etkin materyallerdir.

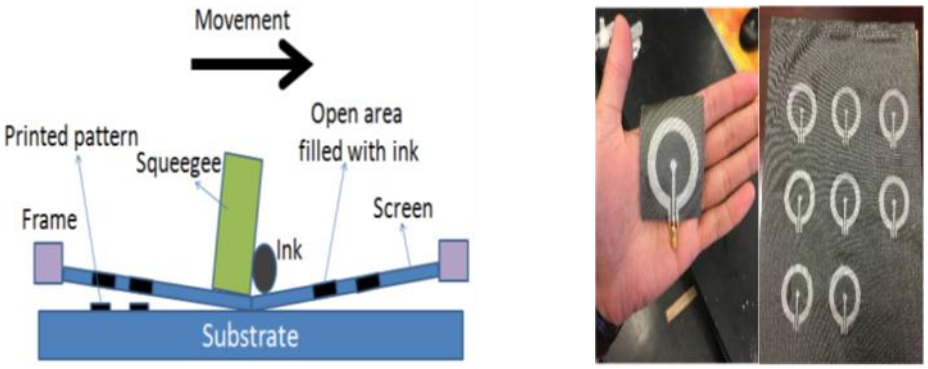
Bunun yanında ilgili antenin uluslararası standartlar uyarınca belirlenmiş olan frekans bantlarında çoklu bant/geniş bant performans sergilemesi veya yeniden yapılandırılabilir özellikte olması beklenmektedir. Tekstil antenin tasarımında antenin kullanım yeri, anten yapısı göz önünde bulundurularak taban malzeme, ışıma elemanı ve toprak düzlemi belirlenmektedir. Bilhassa anten taban malzeme seçimi yapılmadan önce malzemenin analizi yapılmaktadır. (Roy vd. 2020a, b) tarafından yapılan çalışmada istenilen anten tasarımında toprak düzlem boyutunun, alt katman yüksekliğinin ve anten yamasında oluşturulan yarıkların etkileri incelenerek S11 parametreleri kıyaslanmıştır.

1.5. Tekstil Anten Üretim Teknikleri

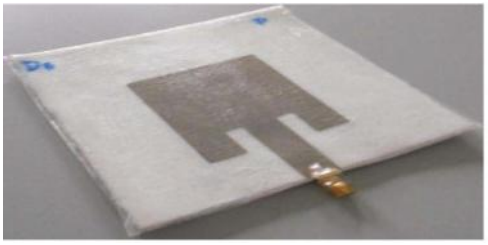
Giyilebilir tekstil anten tasarımında imalat metotları önemli bir rol oynamakta ve doğruluk, maliyet ve işlem zamanını etkilemektedir. Öte yandan bu metotlar anten tasarımında kullanılan alt katmana da bağlıdır. Araştırmacılar ile anten tasarımcıların önerdiği imalat tekniklerinden en çok kullanılanları i) Film baskısı ii) Mürekkep püskürtmeli baskı iii) Dikme ve işleme(nakış) metodudur.

1.5.1. Film baskısı

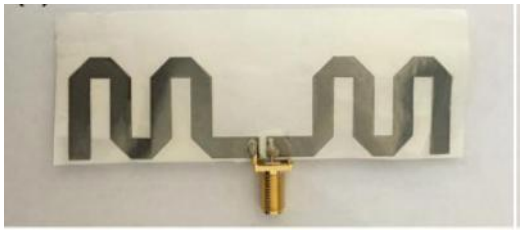
Film baskısı pek çok elektronik imalatçısı ve anten tasarımcısı tarafından kullanılan etkin maliyetli, hızlı, kolay bir metot olup düşük ağırlıklı, düşük maliyetli ve esnek giyilebilir anten tasarımında kullanılmaktadır. Bu teknikte mürekkep aşağı doğru hareket ettirilen kazıyıcı ağzı ile film aracılığıyla alt katmanın korunmasız kısmı üzerine bırakılmaktadır. Bu metot pek çok alt katman materyalinin üzerine istenilen deseni basma yeteneğine sahiptir. Antenin desen kısmı örtülmeden bırakılarak kumaş ipliklerinden oluşurken desensiz kısmı emülsiyonla kaplanmıştır. Öte yandan bu işlem paslanmaz çelik ve polyesterden yapılmış malzemelere de uygulanabilmektedir. Film baskının dezavantajı düşük baskı çözünürlüğü, baskı alınacak katman sayısının sınırlı kalması ve iletken katman kalınlığının değiştirilemez olmasıdır. Bu sebepler film baskı tekniğini daha az geçerli kılmaktadır. Şekil 1.7 film baskı tekniğini ve bu teknikle üretilmiş anten prototiplerini göstermektedir.



(a) **(b)**



(c)

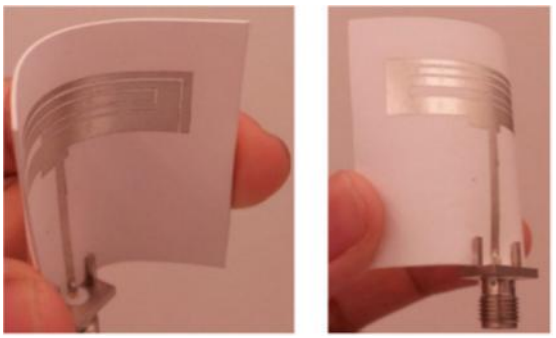


(d)

Şekil 1.7.a) Film baskı işlemi (Khaleel vd. 2013); **b)** Naylon/tayt alt katman üzerine film baskılı anten (Hasni vd. 2021); **c)** Film baskılı giyilebilir yama anten (Kazani vd. 2014); **d)** Kıvrımlı çizgili tekstil anten (Leng vd. 2016)

1.5.2. Mürekkep püskürtmeli baskı

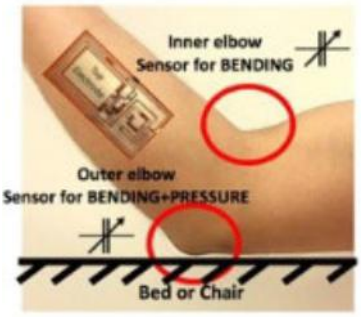
Güvenilirliği ve çabuk tasarlama hızı nedeniyle esnek anten yapımında en çok kullanılan ve makul fiyatlı baskı teknolojisidir. Bu metodun doğruluğu dikkate değerdir ve bir deseni oldukça yüksek hassasiyetle oluşturur çünkü üretim sürecinde kullanılan mürekkep damlacığı küçüktür. Bu metotta gümüş nanopartikülleri gibi iletken mürekkep kullanılmaktadır. Mürekkep baskısı daha sonra iki alt kategoriye ayrılmaktadır ki bunlar isteğe bağlı damlama ve sürekli mürekkep püskürtmedir. Mürekkep püskürtmeli teknik en etkin maliyetli baskı tekniklerinden biridir çünkü özellikle tasarlanan baskı aleti sadece bir mürekkebi ağızlıktan istenen bölgeye israfsız şekilde fırlatmaktadır. Bu avantajından dolayı mürekkep püskürtmeli baskı teknolojisi endüstride kullanılan alışılagelmiş asitli oyma ve frezeleme metotlarıyla karşılaştırıldığında gözle görülür bir fayda sağlamakta ve bu tekniklere birer alternatif olarak kullanılmaktadır. Fakat bazı iletken mürekkep çeşitleri büyük parça boyutuna sahiptir ki bu ağızlık tıkanmalarına neden olduğunda bu teknolojiyi uygunsuz kılmaktadır. Bu da bu metodun temel sakıncasıdır. Şekil 1.8 birkaç mürekkep püskürtmeli giyilebilir esnek anten prototipini göstermektedir.

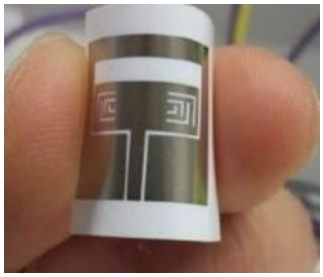


(a)



(b)



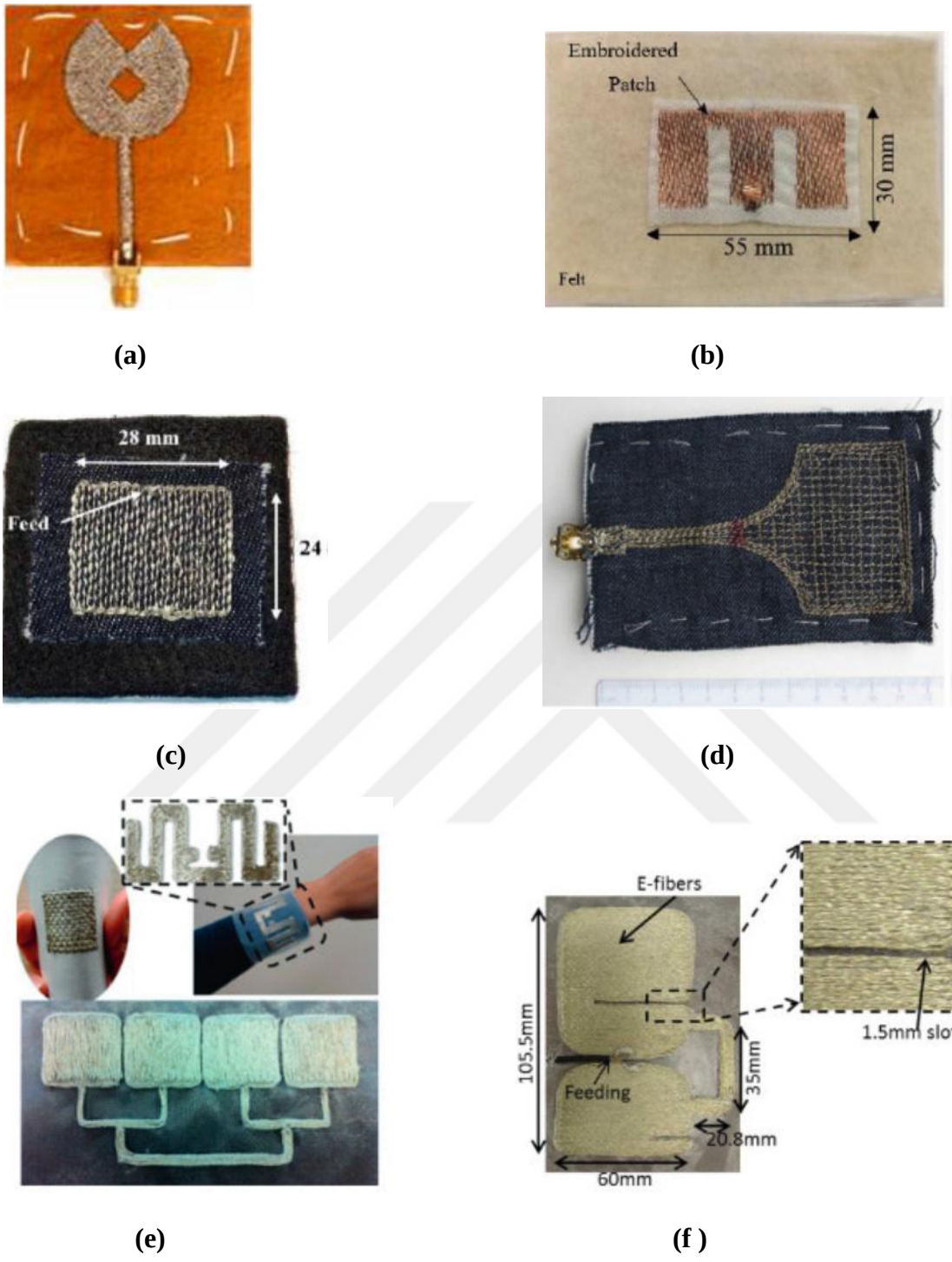


(c) **(d)**

Şekil 1.8. Mürekkep püskürtmeli baskı tekniği kullanan anten prototipleri; **a)** Sentetik kâğıt alt katman üzerine esnek anten (Abutarboush 2022); **b)** Esnek doğrusal dizi (Hester ve Tentzeris 2016; **c)** Akıllı bandaj üzerine halka anten (Shamim 2017); **d)** PET film üzerine esnek anten (Jilani vd. 2018)

1.5.3. Dikme ve işleme (nakış) işlemi

Bu metot son zamanlarda pek çok giyilebilir ve esnek anten uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu teknikte iletken olmayan materyaller üzerine direk olarak iletken kısımların ihtiyaç duyulan şeklini vererek işlemek için iletken kumaş materyal ipliği kullanılmaktadır. Öte yandan antenler işleme(nakış) için teknoloji destekli cihaz kullanılarak direk iletken olmayan giyilebilir kumaş üzerine işlenmektedir. Giyilebilir tekstil antenler için esneklik ve konfor bir ihtiyaç olduğundan işlenmiş antenler ışıyan kısmın başarıyla direk giysiye entegre edilmesi suretiyle piyasaya çıkabilmektedir. Ancak işleme tekniği antene deforme olmuş görüntüsü veren kırışıklıklara neden olmaktadır. Daha da ötesi ara levha tekstil alt katmanı bu metotta kullanılamamaktadır. Tipik olarak işleme (nakış) ile yapılan giyilebilir antenler dikiş makineleri ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. İşlem plan görüntüsü CAD programına gönderilmektedir ki bu daha sonra dikiş makinesine kılavuz notu olarak aktarılmaktadır. Nakış boşluğu, iplik gerginliği ve nakış hızı işlem başlangıcında doğru bir şekilde ayarlanmalıdır. Şunu da önemle belirtmek gerekir ki basit yama yapısı için ışıyan iplik elle de işlenebilmektedir. Bu teknikten sıklıkla faydalanılmaktadır çünkü ışıyan kısımları metal olan antenlerden daha elastik ve esnek olan antenlerin işlemeli şekline bağlı olarak alışılagelmiş antenlere göre daha iyi sonuç alınmaktadır. Şekil 1.9 işleme tekniğinden yararlanılarak oluşturulmuş birkaç anteni göstermektedir.



(a) **(b)**

(c) **(d)**

(e) **(f)**

Şekil 1.9. Dikiş/nakış teknikleri kullanan işlemeli anten prototipleri; **a)** İletken iplikler kullanan tekstil UWB anten (Osman vd. 2011); **b)** Esnek keçe kullanan E-şekilli anten (Mohamadzade vd. 2019); **c)** Keçe kullanan mikroşerit yama anten (Zhan vd. 2017); **d)** Geniş bant tekstil düzlemsel monopol (Bonefačić ve Bartolić 2021); **e)** Tekstil yüzeyler (Wang vd. 2015); **f)** E-fiber üzerine çoklu bant tekstil anten (Wang vd. 2014)

Bunun yanında literatürde giyilebilir tekstil antenlerin üretimi için Substrate Integrated Waveguide (SIW) metodu da rapor edilmiştir (Sharma vd. 2022). Buna benzer olarak pek çok güncel literatür Adhesives olarak bilinen bir üretim tekniği sunmaktadır. Bu basit üretim tekniklerinden alt katmanlar, yollar, konnektörler, kablolar ve ışıma elemanları gibi çeşitli anten kısımlarını bağlamak için faydalanılmaktadır (Zhang vd. 2014; Ali vd. 2020;).

1.6. Tekstil Anten Kullanım Şekilleri

Bugüne değin pek çok tekstil anten tasarımları literatürde yerini almıştır ancak bu tekstil anten tasarımlarının bazı kusurlarından dolayı giyilebilir elektronikte kullanımları sınırlı kalmıştır. Saptanan bu kusurlar şu şekilde sıralanabilir:

1) Antenlerin iki yönlü ışıma karakteristiklerine bağlı olarak insan vücut dokusuna yanaşık olma durumunda SAR seviyesi yükselmektedir.

2) Antenler düşük profilli ve konforlu olmadığından insan vücuduna ve giysilere dahil edilememektedir.

3) Antenlerin yakın yönsüz ışıma karakteristiklerine bağlı olarak ışımanın büyük çoğunluğu insan vücuduna doğru yönlendirildiğinden bu durum ışıma örüntüsünü başkalaştırmakta ve anten performansını azaltmaktadır.

4) Bu anten tasarımlarının boyutu oldukça büyüktür.

5) Antenler kötü FBR (front to back) oranı ve dar bant genişliğine sahiptir.

6) Antenlerin insan vücudu üzerinde giyilmesine veya giysilerin bir parçası olmasına bağlı olarak performansları düşmektedir.

Bu nedenle tekstil anten tasarımı uzun ve yorucu bir çalışma gerektirmektedir.

Son yıllarda kablosuz vücut alan ağları (WBAN) ve akıllı giyilebilir cihazların kullanımının artmasıyla birlikte çift bant ve çoklu bantlarda çalışan tekstil antenlere olan ilgi de artmaktadır. Öte yandan kablosuz giyilebilir iletişim sistemlerinin artan ivmeyle büyümesi neticesinde aynı spektrumu kullanan kullanıcı sayısı artmaktadır. Bu durum kullanıcılar arasında girişime neden olmaktadır. İstenmeyen bir durum olan girişimi ortadan kaldırmak da ancak yeniden yapılandırılabilir tekstil antenlerin kullanımıyla mümkündür.

Yeniden yapılandırılabilir tekstil anten kullanımının pek çok avantajları vardır:

1)Birden çok kablosuz standardı destekleme yeteneği
   a) Maliyeti düşürür.
   b) Hacim gereksinimini düşürür.
   c) Yapıyı basitleştirir.
   d) Farklı kablosuz standartlar arasında iyi izolasyon sağlar.
2)Daha az işlem gereksinimi
   a) Ön arka filtrelemeye ihtiyaç olmaması
   b) Bant dışını elimine etme
3)Akıllı giyilebilir ve giyilebilir yeni nesil uygulamalar için uygunluk
   a) Adapta olma ve entegre olma kolaylığı
   b) Mikrokontrolörler ve FPGA aracılığıyla otomasyon
4)Çok fonksiyonellik özelliği
   a) Vazife değiştiğinde fonksiyonellik değişir.
   b) Tek bir eleman veya dizi gibi davranma
   c) Dar bant veya geniş bant çalışma sağlama

Avantajlarının yanı sıra yeniden yapılandırılabilir antenlerin dezavantajları ise şunlardır:

1) Anahtarlama elemanlarının aktivasyon ve deaktivasyonu için biaslama şebekesi tasarımı anten yapısına karmaşıklık katar.
2) Sistem masrafını artıran aktif bileşenlerin birleştirilmesine bağlı olarak gereken güç tüketimindeki artış
3) Harmoniklerin oluşması
4) Sistemin doğru çalışmasını garanti altına almak için ışıma karakteristiklerinde hızlı akortlama ihtiyacı

1.7. Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Antenler

Yeniden yapılandırılabilir tekstil antenlerin tasarımında değişik uygulama teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler: 1) Elektriksel yeniden yapılandırma 2) Mekanik yeniden yapılandırma 3) Optik yeniden yapılandırma 4) Akıllı materyal tabanlı yeniden yapılandırma. Elektriksel olarak yeniden yapılandırmada anten karakteristikleri PIN diyot, varaktor, RF-MEMS, FET gibi elektronik anahtarlama elemanları kullanılarak değiştirilmektedir. Bu tip yeniden yapılandırma tekniğinin uygulanması kolay ve maliyeti düşüktür. Ancak uygulama yapısı karmaşıktır ve bias devresine ihtiyaç duymaktadır. Mekanik olarak yeniden yapılandırmada antenin ana radyatörü değişik karakteristikler sağlamak için yeniden yapılandırılmaktadır. Diğer tekniklere tezat olarak mekanik yeniden yapılandırmalı anten aktif eleman entegrasyonuna, bias devresine veya anahtarlama mekanizmalarına ihtiyaç duymamaktadır. Ancak bu teknik yavaş yanıt sunmakta ve güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Optik yeniden yapılandırma tekniği ise yarı iletkenden (silikon veya galyum arsenit) malzemeden yapılmış foto iletken anahtarların kullanımı temeline dayanmaktadır. Bu teknikte foto iletken anahtarlar bias devre kullanımına ihtiyaç duymamakta ve modülasyonlar arası distorsiyonu önlemektedir. Buna ilaveten oldukça yüksek (nanosaniye mertebesinde) anahtarlama hızına sahiptir. Ancak bu teknikte karmaşık aktivasyon mekanizması bulunmakta ve kayıplı davranış sergilemektedir. Akıllı materyaller ile yeniden yapılandırmada tekstil anten alt katmanının karakteristiklerini bağıl dielektrik sabiti veya manyetik geçirgenlik açısından değiştirmek için anten arkasına yerleştirilmiş boşluk içine sıvı pompalanması suretiyle anten karakteristikleri yeniden yapılandırılmaktadır. Bu teknikte anten tasarımında yeniden yapılandırılabilirlik için sıvı kristal ve ferit gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Bir tekstil anteni yeniden yapılandırma çeşitleri de şu şekilde sınıflandırılmaktadır: 1) Frekansı yeniden yapılandırma 2) Işıma örüntüsü yeniden yapılandırma 3) Polarizasyonu yeniden yapılandırma 4) Hibrit yeniden yapılandırma. Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten bir antenin değişik frekanslarda çalışmasın izin vermektedir. Bu yeniden yapılandırma mekanizması yaygın olarak çoklu bant mobil cihazlar gibi RF iletişim sistemlerinde kullanılmaktadır. Frekansı yeniden yapılandırma en çok kullanılan çeşittir çünkü frekans değiştirilmesi en kolay özelliktir. Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler bir veya birden fazla rezonans frekansının sürekli değiştirilmesine izin vermektedir. Işıma örüntüsünü yeniden yapılandırma antenin çalışma frekansı ve diğer özelliklerini sabit bırakırken ışıma örüntüsünü değiştirmeye izin vermektedir. Polarizasyonu yeniden yapılandırma anten polaritesini sol-el dairesel polarizasyon (LHCP), sağ-el dairesel polarizasyon (RHCP), dikey/yatay polarizasyon olarak değiştirmektedir. Hibrit yeniden yapılandırma ise aynı yeniden yapılandırmada frekans, ışıma örüntüsü veya polarizasyonu

birleştirmektedir. Örneğin frekans/ışıma örüntüsü yeniden yapılandırma, frekans/polarizasyon yeniden yapılandırma gibi.

Tekstil antenler giyen kişinin hareketine bağlı olarak anten deformasyonundan kaynaklanan akort bozulmasına maruz kalmaktadır. Buna bağlı olarak değişen anten rezonans frekansının başarımı için frekans yapılandırması mecburi olarak uygulanmaktadır. Öte yandan tekstil anteni giyen kişinin günlük aktiviteleri ve anten hareketlerinin neden olduğu vücut üzeri ve vücut dışı dinamik değişimlere bağlı olarak anten polarizasyonunun iletişim bağlantılarıyla uyumlu olma gereksinimi duyulmaktadır. Bir tekstil anten değişik teknikler uygulanmak suretiyle yeniden yapılandırılabilir bir tekstil antene dönüştürülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus antenin tüm çalışma durumları için iyi bir empedans uyumu, kararlı ışıma örüntüsü, iyi verimlilik ve iyi kazanç başarımını sağlamasıdır.

Negatif geçirgenlik ve negatif dielektrik sabitine sahip olması sebebiyle yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarımında yüksek performans sağlayan metametaryal malzemeler günümüzde geniş ölçüde kullanılmaktadır. Klasik malzemelerde bulunmayan kendine has özellikler sergileyen suni malzemeler olarak bilinen metametaryal malzemeler, pek çok tekstil antende kullanılması neticesinde antenden insan vücuduna yüksek derecede izolasyon yapmakta, antenin kazanç, bantgenişliği gibi parametreleri iyileştirilebilmekte, SAR seviyesini güvenli eşik seviyesine düşürmekte, baskı devre anten üretimi kolayca yapılabilmekte ve elektriksel küçük antenler gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanında anten büküldüğünde rezonans frekansının kayması açısından anten performansının azalmasını engellemek için de önemli bir role sahiptirler. Bu nedenle metametaryallerin giyilebilir tekstil antenlerde kullanımı artmaktadır. İlk metamateryal tabanlı 2.4 GHz frekanslı giyilebilir anten (Salonen 2001) tarafından önerilmiştir. Önerilen anten ince FR-4 alt katmanı üzerinde imal edilmiş ve EBG yapısı toprak düzlemine asitle oyma baskı yapılarak uygulanmıştır. Ancak anten gerçek bir giyilebilir anten değildir çünkü kullanılan alt katman eğilmemektedir. Dolayısıyla bu anten çalışmasının temel amacı metametaryalin anten üzerindeki etkisini keşfetmek olmuştur. Sonraki yıllarda değişik metamalzeme yapılar tekstil anten tasarımında kullanılmıştır.

Metametaryaller 60'lı yılların sonunda '' The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Ɛ and μ'' isimli makale ile Rus fizikçi Victor Veselago tarafından ortaya konulmuştur (Veselago 1968). Yirminci yüzyılın sonlarına doğru metametaryal alanındaki çalışmalar artan ilgi ile devam etmiştir. Metametaryal davranışı doğal maddelerde gözlenmez. Metametaryaller istenen özellikleri ve işlevleri elde etmek için yapay olarak tasarlanır. İstenen özellikleri elde etmek için uygun geometrik tasarım sayesinde metamalzeme kırılma indisi pozitif, sıfıra yakın veya negatif değerlere ayarlanabilir. Oysa doğal maddeler pozitif kırılma indisine sahiptirler. Negatif kırılma indisine sahip malzemeler biyotıpta, ısı transferinde, uzay uygulamaları ve birçok alanda yeni uygulamalara olanak sağlamaktadır. Metametaryal malzemeli anten yapıları yarık halka rezonatör (SRR), bütünler yarık halka rezonatör (CSRR), içi içe geçen yarık halka rezonatör (NSRR), elektrik alan kuplajlı (ELC) ve bütünler elektrik alan kuplajlı (CELC) rezonatör şeklindedirler.

2. KAYNAK TARAMASI

Günümüz dünyasında kablosuz ve giyilebilir uygulamalar insan hayatının bir parçası olmuştur. Giyilebilir uygulamalar uzaktan sağlık takibi, askeriye, çocuk bakım iletişimi, navigasyon, mobil bilgisayar, halk güvenliği, taşıma vb. alanlarda kullanılmaktadır (Pervez vd. 2018). Bu uygulamaların en önemli bileşeni değişik tekstiller veya elektronik ve tekstilin iç içe girdiği elektronik tekstil (e-tekstil) veya akıllı malzemelerden yapılmış tekstil antenlerdir. Tekstil antenlerin esneklik, mekanik ve elektriksel sağlamlık, küçük boyut, hafiflik, kolay üretilebilirlik, düşük SAR değeri ve yüksek verim gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklerinden dolayı giyilebilir uygulamalar için önerilen tekstil antenlerin kullanımı sınırlı kalmıştır (Usman vd. 2023). Dolayısıyla tekstil anten tasarım ve üretimi meşakkatli bir çalışma gerektirmektedir.

Literatürde değişik yapılarda değişik performanslar sergileyen pek çok tekstil anten önerilmiştir. Bunlardan bir kısmı tek bant çalışmayı örneğin ISM bandında (Xu vd. 2019; Anbalagan 2020; Mao vd. 2020; Li vd. 2022; Thaiwirot vd. 2024), Wi-MAX bandında (Roshni vd. 2017), 5G bandında (Li vd. 2020), WBAN bandında (Pandimadevi vd. 2021); bir kısmı çift bant çalışmayı örneğin LTE, WLAN bantlarında (Mohammad vd. 2018), ISM, WBAN bantlarında (Zhou vd. 2020), Wi-MAX, WLAN bantlarında (Singh vd. 2017), Wi-MAX, düşük 5G bantlarında (Mahfuz vd. 2021), insan güvenlik sistemlerinde (Regina ve Merline 2021); diğer bir kısmı da çoklu bant çalışmayı örneğin WLAN, C-bant, X/Ku bantlarında (Yadav vd. 2020), ISM, Wi-fi, Wi-MAX, C-bantlarında (Kaur ve Chawla 2022); bazıları da ultra geniş bant çalışma (Lin vd. 2020) sergilemektedir. Günümüzde çift bant ve çoklu bant tekstil antenlerin çok fonksiyonlu kablosuz sistemlere entegre edilmesi oldukça popüler bir konudur çünkü bu tip tekstil antenler sayesinde hem sistem için gerekli olan eleman sayısı etkin bir şekilde azalmakta hem de sistem donanımı sadeleşmektedir. Öte yandan ultra geniş bant (UWB) tekstil antenler 5G gibi uygulamalar için oldukça caziptirler (Yashi vd. 2020). Wi-MAX, WLAN, GPS vb. kablosuz iletişim sistemlerinde çalışan tekstil antenlerin performansları karşılaştırıldığında dairesel polarizasyonlu (CP) tekstil antenlerin doğrusal polarizasyonlu (LP) tekstil antenlere nazaran daha avantajlı olduğu araştırmacılar tarafından ispatlanmıştır. Nitekim literatürde rapor edilen CP 'lı tekstil antenlerin (Sharma ve Goen 2015; Li vd. 2019; Joler vd. 2020) çoklu yol kayıplarında azalma, kötü hava koşullarına direnç gösterme, yönlendirmeden bağımsız olma gibi özelliklere sahip olmasından dolayı kablosuz iletişimlerindeki performansları yüksektir.

Bahsedilen tekstil anten çalışmalarını inceleyecek olursak (Mao vd. 2020) tarafından tam dupleks giyilebilir uygulamalar için 2.45 GHz ISM bandında genişletilmiş bant genişlikli ve düşük profilli yeni çift port tekstil anten önerilmiştir. Film baskı teknolojisiyle düzlemsel tekstil malzeme kullanılarak üretilen antenin iki giriş portundaki bant genişliklerini genişletmek için antene ilave şeritler dahil edilmiştir. Besleme hatlarına dik yerleştirilen ilave şeritler başka bir rezonans frekansı oluşumunu sağlamıştır. (Li vd. 2022) alt katmanı esnek denim kumaştan, yama ve toprak düzlemleri iletken tekstilden yapılmış tekstil anten önermişlerdir. Önerilen anteni 2.45 GHz ve 5.4 GHz çalışma frekanslarında üç modu akortlamak için anten yamasında biri eliptik, diğeri C şekilli yarıklar oluşturulmuştur. (Anbalagan vd. 2019) daki çalışmada yama ve toprak düzlemi Zari kumaştan, alt katman pamuklu dokuma kumaş kullanılarak dört katmanlı yapıda işleme tekniğiyle üretilen anten 2.45 GHz' de çalışmaktadır. Anten geri dönüş kaybı ve verimliliğini iyileştirmek için anten yamasına uçtan uca yarık dahil edilmiştir. Farklı bir tekstil anten tasarımında E- şekilli mikroşerit yama anten için üç katmanlı polyester kumaş iki yapıştırıcı katman ile istiflenmiş ve PVB (polivinil butiral) ile kaplanmıştır. Önerilen tekstil anten 3.37 GHz' de Wi-MAX uygulamalar için film baskı tekniğiyle üretilmiş olup rahatlıkla

giysilere entegre edilebilmektedir (Roshni vd. 2017). Geniş bant tekstil anten tasarımı (Li vd. 2020) çalışmasında 24 GHz' den 30 GHz' e kadar 5G uygulama için 24.5 GHz ve 28 GHz frekansları içerecek şekilde çalışmaktadır. Anten polyester kumaş alt katmanı üzerinde mikroşeritten eş düzlemsel şerit hat (CPS) balun ile mikroşerit hat tarafından beslenmektedir. Tekstil antenin iki prototipi vardır. Birinci prototip gümüş partiküllü mürekkep ile film baskı yöntemiyle diğeri ise ince bakır folyo üzerinde lazer kesimle üretilmiştir. Tekstil anten ışıma artırımı için üç direktöre sahiptir. (Zhou vd. 2020) deki çalışma ise dairesel polarizasyonlu tekstil antene bir örnektir. Anten alt katmanı keçe kumaş, yama ve toprak düzlemleri polyester fiber üzerinde bakır ve nikel kaplamadan oluşmaktadır. Sekiz yarıklı dairesel yamaya sahip çift bant ve çift polarizeli anten 2.45 GHz 'de dairesel polarizasyon ve 5.8 GHz 'de düşey polarizasyona sahip olup vücut üzeri veya vücut dışı WBAN uygulamalar için tasarlanmıştır.

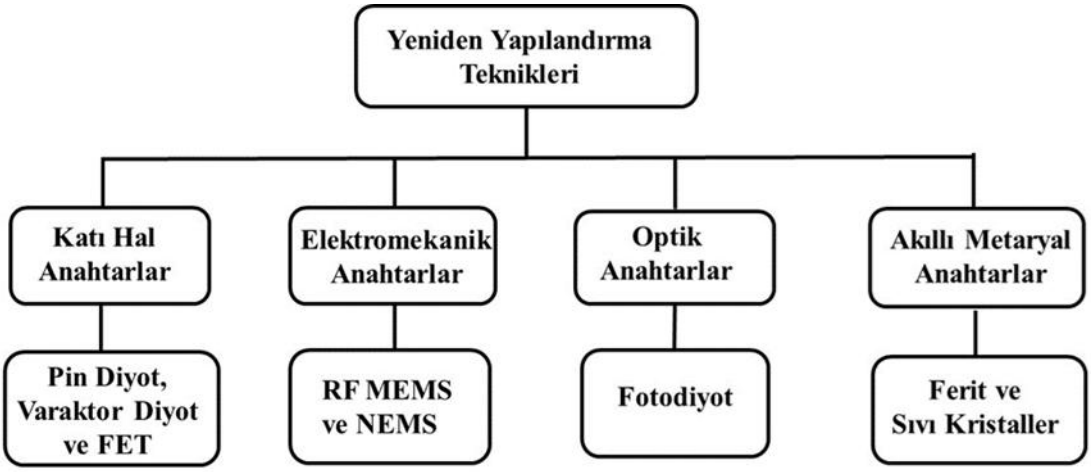
Tekstil antenlerin veri iletişimini çevre koşulları ve giyinme durumları etkilemektedir. Tekstil antenlerde kullanılan e-tekstillerin tüylenmesi, kırışması, aşınması ve yıkanmanın etkileri e-tekstil direnç performansı yönünden incelenip hem doğru akım (DC) hem de radyo frekansı (RF) açısından ölçülmüştür. DC performans için sonuçlar göstermektedir ki kumaşın tüylenmesi e-tekstil dirençliliğinde ağır hasara neden olurken kumaşın yıkanması ve kırışması e-tekstil dirençlilik performansını önemli ölçüde etkilememiştir. Germe etkisini incelemek için tekstil anten dikey ve yatay yönlerde sırasıyla gerildiğinde anten yamasının yatay ve dikey yönlerde yaklaşık 3-4 mm uzadığı görülmüştür. Anteni dikey yönde germek rezonans frekansını daha düşük değere kaydırırken anteni yatay yönde germek ise rezonans frekansını daha yüksek değere kaydırmaktadır (Xu vd. 2018).

Son yıllarda kablosuz iletişim, elektronik izleme vb. uygulamalar için büyük ilgi toplayan yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler frekans, bantgenişliği, polarizasyon ve kazançta seçiciliği başarabilme yeteneğine sahiptirler. Bir yeniden yapılandırılabilir tekstil anten pek çok tek amaçlı antenlerin sağladığı işlevselliği tek bir tekstil anten yapısında yerine getirerek maliyette, ağırlık, hacim, bakım ve onarım kaynaklarında tasarruf sağlamaktadır. Yeniden yapılandırılabilir tekstil anten yapım teknikleri dört sınıfta incelenmektedir. Bunlar: a) Frekansı yeniden yapılandırma b) Işıma desenini yeniden yapılandırma c) Polarizasyonu yeniden yapılandırma d) Hibrit yeniden yapılandırma. Tek bir veya çoklu aktif anahtarlama elemanları kullanarak bir yeniden yapılandırılabilir tekstil anten bantgenişliği, frekans, ışıma ve polarizasyon karakteristiklerini değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Böylece birden çok tekstil antenin yapacağı işi tek bir tekstil anten yerine getirmektedir. Son yıllarda kablosuz teknolojideki artan gelişmeye bağlı olarak kişisel iletişimde tanınırlık kazanan WBAN teknolojisi insan vücudunun değişik kısımlarında çoklu konfigürasyonlar sergileyen tek bir giyilebilir yeniden yapılandırılabilir tekstil anten kullanmaktadır. Tekstil antenlerin yeniden yapılandırılmasında katı hal anahtarlar (pin diyotlar, varaktor diyotlar ve FET), elektromekanik anahtarlar (RF-MEMS ve RF-NEMS), akıllı materyal anahtarlar (ferit ve sıvı kristaller) ve optik anahtarlar (fotodiyot) kullanılmaktadır (Musa vd. 2022).

Yeniden yapılandırılabilir tekstil antenler üzerinde yapılan çalışmalardan örnekler verecek olursak (Dang vd. 2022) 'deki çalışmada frekansı yeniden yapılandırılabilir giyilebilir tekstil anten RF anahtar tümleşik devreler (ICs) ve pin diyotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tekstil anten alt katmanı iki tabakalı PF-4 köpükten, toprak düzlemi, kare yama ve yakınlık kuplajlı besleme iletken kumaştan yapılmıştır. RF anahtar IC 'nin antene entegrasyonu ve üretiminin pin diyota kıyasla daha karmaşık olmasına rağmen RF-anahtar IC kullanımının daha iyi anten performansı sağladığı ispatlanmıştır. (Andrade vd. 2016) 'daki çalışmada tasarlanan antenin beş prototipi üretilmiş ve malzemelerin anten performansı üzerindeki etkileri

karşılaştırılmıştır. Birinci anten prototip üretiminde iletken iplik dikiş makinesi ile direk pamuklu denim kumaş alt katman üzerine, ikinci anten prototip üretiminde ise pamuklu patiska kumaş üzerine işlenmiştir. Üçüncü anten prototip üretiminde pamuklu denim alt katman, dördüncü anten prototip üretiminde pamuklu patiska alt katman, beşinci anten prototip üretiminde deri kumaş alt katman üzerine lazer kesici ile kesilmiş ince iletken bakır levha yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Üretilen antenler hem frekansı yeniden yapılandırılabilir hem de ışıma örüntüsü yeniden yapılandırılabilir tekstil anten olarak görev yapmaktadır. Frekans yapılandırma için yama üzerindeki ince çubuk konfigürasyonlarının değiştirilerek değişik rezonans frekansları oluşturulmakta ve anten ISM, Wi-Fi, Wi-MAX uygulamaları gibi ultra geniş bant frekans aralığında çalışmaktadır. Işıma örüntüsü yeniden yapılandırma için toprak düzlemi anten arka yüzündeki iki adet yarı eliptik ince iletken çubuklara birleştirilmektedir. İnce iletken çubuklarda bulunan elektronik anahtarların her ikisi kesim durumunda iken tekstil anten UWB çalışma sergilemekte, anahtarların sırasıyla birinin iletim diğerinin kesim konumuna geçirilmesi ışıma örüntüsünü anten geometrisinin +x ekseni ve -x eksenine yeniden yapılandırmaktadır. (Lee and Choi 2017) tarafından yapılan çalışmada polarizasyonu yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin keçe kumaş alt katmanına tutturulmuş yama ve toprak düzlemi iletken tekstillerden yapılmıştır. Dikdörtgen yamanın kesik dört köşelerine yerleştirilmiş pin diyotların konumlarına bağlı olarak üç polarizasyon modu elde edilmiştir. Pin diyotların sırasıyla iletim-kesim-iletim-kesim konumlarında sağ-el-dairesel polarizasyon (RHCP), kesim-iletim-kesim-iletim konumlarında sol-el-dairesel polarizasyon (LHCP) ve dört diyodun da kesim konumunda lineer polarizasyon sağlanmıştır. (Dang vd. 2023) çalışmasında önerilen anten iki tabakalı alt katman, iki dişi çıtçıt buton iliştirilmiş tam toprak düzlemi, bir yama ve prop beslemeden oluşmaktadır. Anten alt katmanı PF-4 köpük malzemeden, toprak ve yama Shieldex Nora-RS iletken kumaştan yapılmıştır. İki düşey yeniden yapılandırılabilir modüller ışıma örüntüsünü yeniden yapılandırabilmek için yamanın orta kısmına entegre edilmiştir. Anten iletken kısımlar lazer freze makinesi ile kesilmiş, iletken iplikler kullanılarak alttaki iki erkek çıtçıt butonlar toprak düzlemine dikilmiştir. Vücut üzeri ve vücut dışı iletişimler için tasarlanan ışıma örüntüsü yeniden yapılandırılabilir esnek tekstil anten 2.45 GHz ISM bandında yönsüz ve temel ışıma modları arasında anahtarlamaya muktedirler.

Anten yeniden yapılandırma tekniklerinin kullanılan anahtarlama elemanları açısından sınıflandırılması Parchin vd. (2020) tarafından şekil 2.1'deki gibi düzenlenmiştir.



Şekil 2.1. Yeniden yapılandırma teknikleri (Parchin vd. 2020)

Giyilebilir tekstil antenlerde mikroşerit antenler kullanılmaktadır çünkü mikroşerit antenler düşük kesit, düşük maliyet, mekanik sağlamlık, basit tasarım, kolay uygulanabilirlik, düzlemsel yapıya sahip olmaları ve çoklu konfigürasyonlarda çalışmaya muktedir olma avantajlarına sahiptirler (Andrade vd. 2016; Dang 2022). Tipik mikroşerit yama anten yapılarına uygun olarak tasarlanan tekstil antenlerde taban malzeme olarak pamuklu, polyester, jean, deri, likra vb. kumaşlar kullanılmakta, toprak düzlemi ve ışıma elemanı olarak iletken kumaş veya bakır şerit elemanları tercih edilmektedir. Tekstil antenin tasarımında antenin kullanım yeri, anten yapısı göz önünde bulundurularak taban malzeme, ışıma elemanı ve toprak düzlemi belirlenmelidir. Bilhassa anten taban malzeme seçimi yapılmadan önce malzemenin analizi yapılmalıdır (Ghodake ve Hogade 2022). Roy vd. (2020) 'daki çalışmada istenilen anten tasarımında toprak düzlem boyutunun, alt taban yüksekliğinin ve anten yamasında oluşturulan yarıkların etkileri incelenerek S11 parametreleri kıyaslanmıştır.

Tekstil anten uygulamalarında anten tasarımcılarının hedefi bantgenişliğini iyileştirmek ve elektriksel olarak küçük antenler oluşturmaktır. Tasarımcılar bu amaç için metametaryaller kullanmışlardır (Sigura vd. 2007; Razak vd. 2017). Metametaryaller 1968 yılında '' The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Ɛ and μ'' isimli makale ile Rus fizikçi Victor Veselago tarafından teorik olarak ortaya konulmuş ve elektromanyetik özelliklerinden dolayı büyük ilgi toplamıştır. 1999 yılında bu özellikler Pendry ve diğerleri tarafından deneysel olarak doğrulanmış ve metametaryal alanındaki çalışmalar artan ilgi ile devam etmiştir. Metametaryal davranışı doğal maddelerde gözlenmez. Metametaryaller istenen özellikleri ve işlevleri elde etmek için yapay olarak tasarlanır. İstenen özellikleri elde etmek için uygun geometrik tasarım sayesinde metamalzeme kırılma indisi pozitif, sıfıra yakın veya negatif değerlere ayarlanabilir. Oysa doğal maddeler pozitif kırılma indisine sahiptirler. Negatif kırılma indisine sahip malzemeler biyotıpta, ısı transferinde, uzay uygulamaları ve birçok alanda yeni uygulamalara olanak sağlamaktadır (Veselago 1968; Pendry 1996; Pendry vd. 1999; Smith v.d 2000).

Literatürde anten tasarımında sıklıkla kullanılan metamateryal rezonatör yapıları yarık halka rezonatör (split ring resonator: SRR), bütünleşik yarık halka rezonatör (complementary split ring resonator: CSRR), elektrik alan kuplajlı rezonatör (electric field coupled: ELC),

bütünleşik elektrik alan kuplajlı rezonatör (complementary electric field: CELC) ve iç içe geçen yarık halka rezonatör (nested split ring resonator: NSRR) yapılarıdır. Metamateryal yapılar pek çok anten uygulamasında ışıma örüntüsü, verimlilik, bantgenişliğini iyileştirmede ve hatta elektriksel olarak küçük antenler oluşturmada da kullanılmaktadır. Bilhassa SRR yapılar günümüze değin büyük rağbet görmüş ve mikrodalga frekanslarında yüksek kalite faktörlü küçük boyutlu metametaryal rezonatör olarak kullanılmışlardır. Ancak yüksek seviyeli küçültme uygulamalarında alışılagelmiş SRR yapıları özellikle düşük frekanslarda daha büyük ebat ve yüksek rezonans frekansları sergilemektedir. Bu nedenle bu tür uygulamalarda SRR yapıların sınırlı kalması sonucunda çoklu yarık halka rezonatörün kompakt iç içe geçen yapısı önerilmiştir. NSRR yapısı, SRR yapının şerit boşluklarını artırarak kalite faktörünün büyüyüp rezonans frekansının düşmesine ve rezonatör boyutunun küçülmesine neden olmaktadır (Rao vd. 2005; Hunt 2008; Odabasi vd. 2013; Ferchichi ve Gharsallah 2014; Razak vd. 2017). NSRR yapılar duyarlılık, kompakt tasarım, küçük boyut ve yüksek kalite faktörü özellikleri ile daha çok sensör (He vd. 2011; Ozbey vd. 2016; Ozbey vd. 2023), filtre (Liu vd. 2013) ve osilatör (Liu vd. 2016) tasarımlarında kullanılmıştır. NSSR yapısında anten tasarımı literatürde sınırlı sayıdadır (Li vd. 2013; Naoui vd. 2014; Naoui vd. 2015).

NSRR yapılı anten çalışmalardan Naoui vd. (2014)' de UHF bandında çalışan radyo frekans saptama (RFID) teknolojisi için metametaryal anten önerilmiştir. Bu dikey uyarlamalı dipol anten Rogers R03010 dielektrik alt katman üzerinde sekiz adet metametaryal tabanlı NSRR rezonatör hücresinden oluşmaktadır. Metametaryal etkisine bağlı olarak önerilen bu antenin boyutu azaltılabilmekte ve performansı artırılabilmektedir. Böylece RFID teknolojisinde kullanılan pek çok cihaza entegrasyonu kolaydır. Naoui vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada NSRR rezonatörün her bir geometrik parametresinin anten frekans karakteristiklerine olan etkisini incelemek için CST' de simülasyonlar yapılmıştır. Daha sonra yapısında sekiz adet NSRR rezonatör hücresi bir dipol mikroşerit anten yapısında birleştirilmiştir. Önerilen anten 2.5 GHz' de çalışmaktadır. Li vd. (2013) tarafından önerilen anten toprak düzleminde dairesel geniş yarık, dairesel ışıyan yama, bir NSRR rezonatör, bir çift T şeklinde ince yamalı yarık halka rezonatör (split ring resonator-SIR) ve CPW beslemeli toprak düzlemine sahiptir. Anten çift bant çentik karakteristikli geniş bant anten olarak görev yapmaktadır. Düşük çentik bandı NSRR parametrelerini ayarlayarak akortlanabilirken yüksek çentik bandı SIR boyutları ile kontrol edilmektedir.

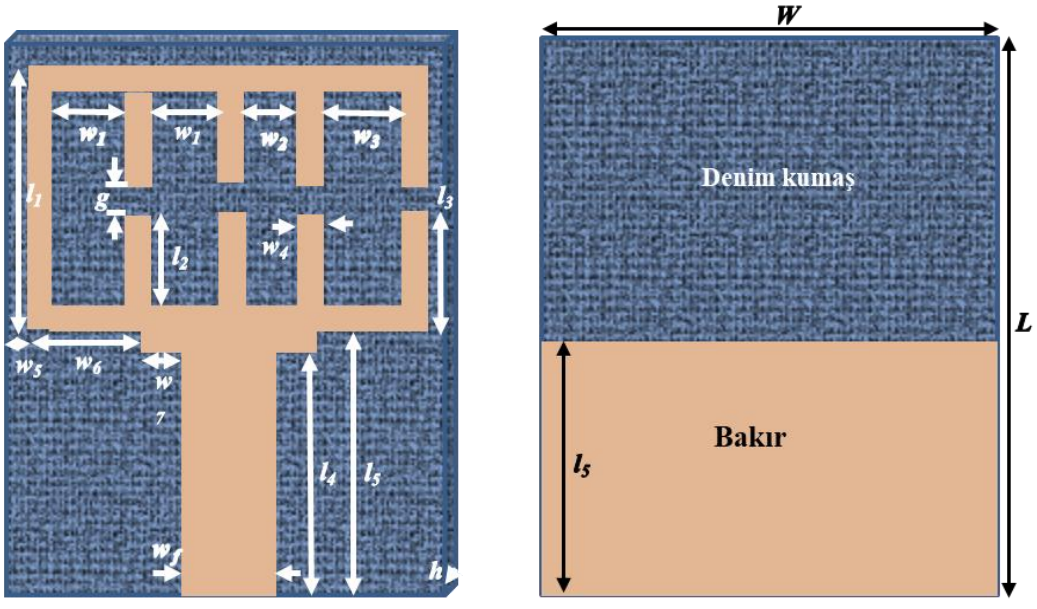
NSRR yapısının bahsedilen avantajlarından ve daha önce literatürde NSRR yapısında tasarlanan tekstil anten tasarımının hiç bulunmamasından dolayı bu çalışmada NSRR rezonatör yapısında tekstil mikroşerit anten tasarımları yapılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Tez kapsamında NSRR temelli çift bant tekstil anten, kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çift bant ve çoklu bant tekstil antenler ile optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarlanmıştır. Tasarlanan dört tekstil anten de mikroşerit hat beslemeli monopol anten yapısındadır. Yama ve toprak düzlemi için kalınlığı 200 mikron(µm) olan bakır levha, alt katman için bağıl dielektrik sabiti (Ɛr) 1.8, bağıl geçirgenliği (µr) 1, dielektrik kayıp tanjantı (tan δ) 0.03 ve kalınlığı 0.7 mm olan denim kumaş kullanılmıştır. Ancak bu dört tekstil antenden NSRR temelli çift bant tekstil anten ile optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenlerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

3.1. NSRR Temelli Çift Bant Tekstil Anten Tasarımı

Önerilen NSRR temelli çift bant tekstil antenin radyatörü iç içe formda bütünleşen yarık halkalardan oluşmaktadır. Sol taraftaki hat haricindeki üst ve alt hatlar tarak diş olarak adlandırılan halkalara birleştirilmiştir. Bu monopol anten Şekil 3.1'de gösterildiği üzere üst ve altta simetrik olarak yerleştirilmiş üç adet tarak dişine sahiptir. Her bir diş eşit l_2 uzunluğu ve eşit w_4 genişliğine sahiptir. Üst ve alt kısımdaki tarak dişleri birbirlerinden g boşluğu ile ayrılmaktadır. Radyatörün sol tarafında yer alan boşluksuz hat ise sürekli akım yolunu sağlamaktadır. Anten iki bölümlü mikroşerit hat ile beslenmektedir. Mikroşerit hattın radyatöre bağlanan üstteki bölümünün genişliği 1 mm iken alt bölümün üst bölümün iki katı genişliğe sahip olması empedans uyumunu sağlamaktadır. Toprak düzlemi de denim kumaştan yapılmış alt katmanın arka tarafında mikroşerit besleme hattının altında radyatör bitiminden itibaren parçalı olarak yerleştirilmiştir. Çift bant tekstil antenin toplam boyutu 27x31x0.7 mm^3 dür.



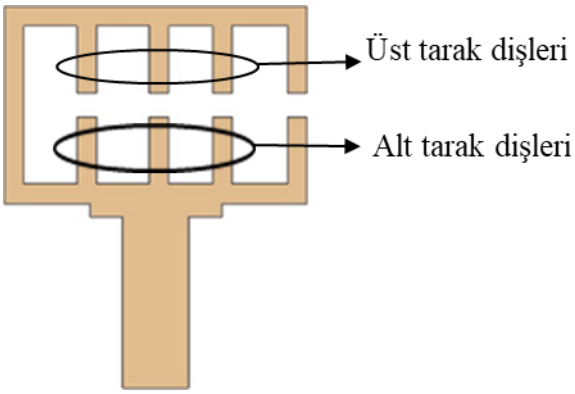
(a) **(b)**

Şekil 3.1. NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm

Anten tasarım ve simülasyonları CST Microwave Studio (v.2020) benzetim programıyla gerçekleştirilmiştir. CST programında antenin rezonans frekanslarındaki akım dağılımları gözlenerek optimal anten tasarımı elde edilmiştir. Bunun için ilgili frekansta yüksek yüzey akım dağılımına sahip radyatör kısımları istenen rezonans frekansı ve bant genişlikleri elde edilene kadar çok sayıda simülasyona tabii tutularak ince ayar yapılmıştır. Yapılan çok sayıdaki optimizasyonlar neticesinde istenen anten performansını sağlayan optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm tasarım parametreleri ve karşılık gelen değerleri çizelge 3.1' de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarım parametreleri ve değerleri

Sembol	Değeri (mm)	Sembol	Değeri(mm)	Sembol	Değeri (mm)
L	31	l_5	14	w_4	1.5
W	27	g	1.8	w_5	2
l_1	15	h	0.7	w_6	6.5
l_2	5.1	w_1	4	w_7	2.5
l_3	6.6	w_2	3.3	w_f	5
l_4	13	w_3	4.2		



Şekil 3.2. NSRR rezonatörü tarak dişleri

NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarımındaki hedef GPS ve WLAN uygulama bantlarını kapsayacak şekilde 1.575 GHz ve 5.2 GHz rezonans frekanslarında çalışmayı gerçekleştirmektir. Bunun için geliştirilen anten yapısında NSRR temelli radyatör çift bant karakteristik sağlarken mikroşerit besleme hattı ve toprak düzlemi birlikte empedans uyumunu iyileştirerek ilgili frekans bantlarındaki bantgenişliğini artırmaktadır. Radyatörün rezonans davranışı tipik LC rezonatörün rezonans frekansını tanımlayan eşitlik (3.1) nolu ile açıklanabilmektedir.

$$f_r = \frac{c}{2\pi\sqrt{L_{eff} \times C_{eff}}} \tag{3.1}$$

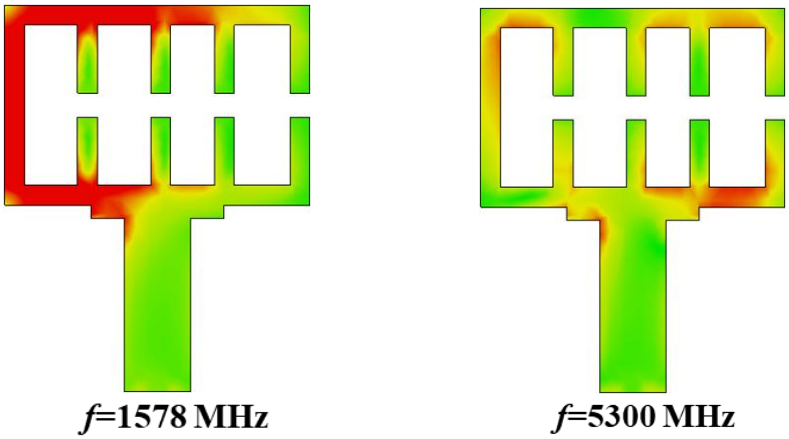
Eşitlik (3.1)'de c, f_r sırasıyla açık uzay dalga hızını ve rezonans frekansını temsil etmektedir. L_{eff} akımın taşınmasından sorumlu radyatör iletken elemanının efektif uzunluğunu göstermek için kullanılmaktadır. c_{eff} radyatörün toplam kapasitesini temsil etmekte ve değeri SRR 'lerin yarık boşluk sayısına bağlıdır. Boşluklu SRR sayısı arttıkça toplam kapasitans değeri artmaktadır. Öte yandan SRR' nin boşluk boyutu kapasitans değerini etkilemektedir. Bilindiği üzere tipik bir kapasitörün kapasitans değeri eşitlik (3.2) ile ifade edilmektedir.

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \tag{3.2}$$

Eşitlik (3.2)' de C kapasitörün kapasitans değerini, S paralel levha alanını ve ε iki paralel levha arasındaki malzemenin dielektrik sabitini göstermekte, d ise SRR' lerin boşluk mesafesine karşılık gelerek kapasitörün iki metal levhası arasındaki mesafeyi temsil etmektedir.

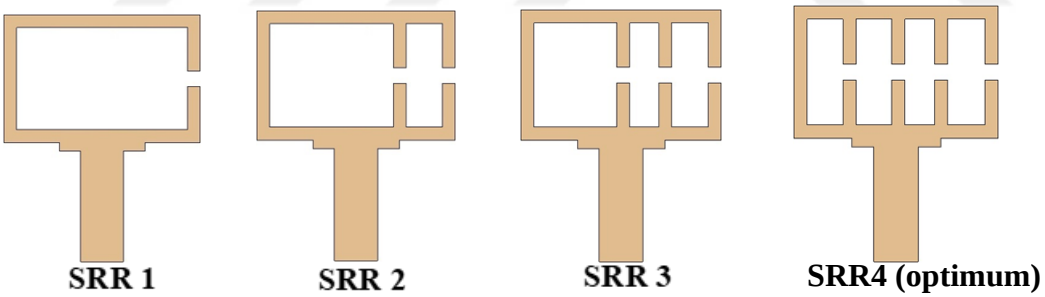
3.1.1. NSRR temelli çift bant tekstil antenin nümerik analizi

Daha önce belirtildiği üzere NSRR temelli çift bant tekstil antenin rezonans frekansı akım yolunun efektif uzunluğu, yarık boşluk sayısı ve boşluk mesafesi ile kontrol edilmektedir. Bu varsayımı kanıtlamak için öncelikle antenin yüzey akım dağılımları karşılık gelen bantların merkez frekans değerlerinde CST programında çizdirilerek alınan sonuçlar şekil 3.3' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere uzun akım yolları ilk rezonans modunu uyarırken kısa akım yolları daha büyük rezonans modunu uyarmaktadır.



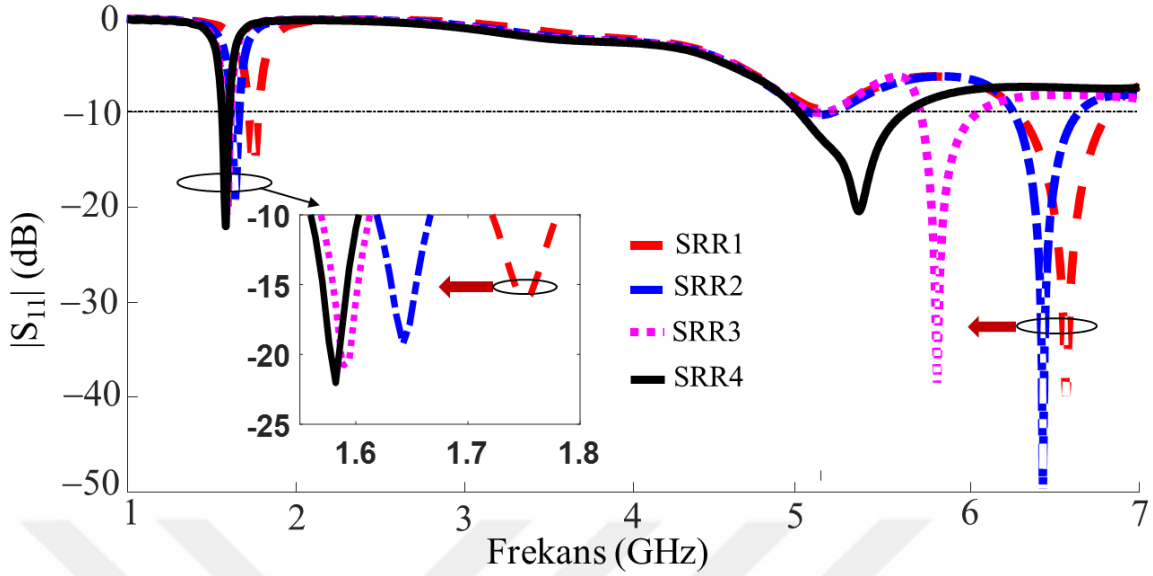
Şekil 3.3. Önerilen antenin yüzey akım dağılımları

Nümerik analizin ikinci adımında SRR (kıvrımlı şerit halka) ların sayısını ilgilendiren anten geri dönüş kayıp analizi yapılmıştır. Böylece her bir SRR' in anten rezonans frekansına olan katkısı incelenmiştir. Şekil 3.4 anten yapısında SRR sayılarının değiştirilme durumlarını ve Şekil 3.5 bu durumlara karşılık gelen frekans cevaplarını göstermektedir.



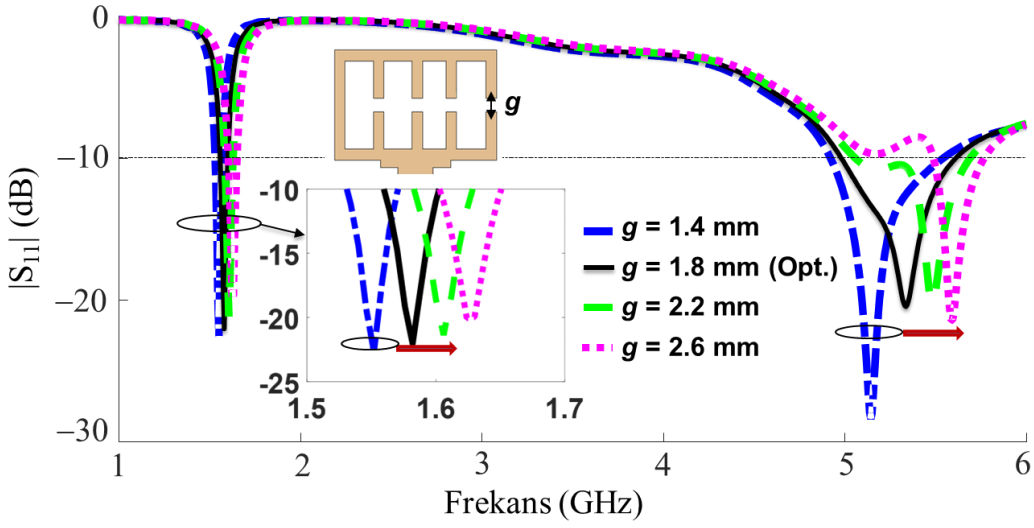
Şekil 3.4. Önerilen anten için dört farklı SRR yapısı

Şekil 3.5 incelendiğinde SRR sayısındaki artışın her iki banttaki rezonans frekanslarını daha küçük değere kaydırdığı gözlenmektedir.



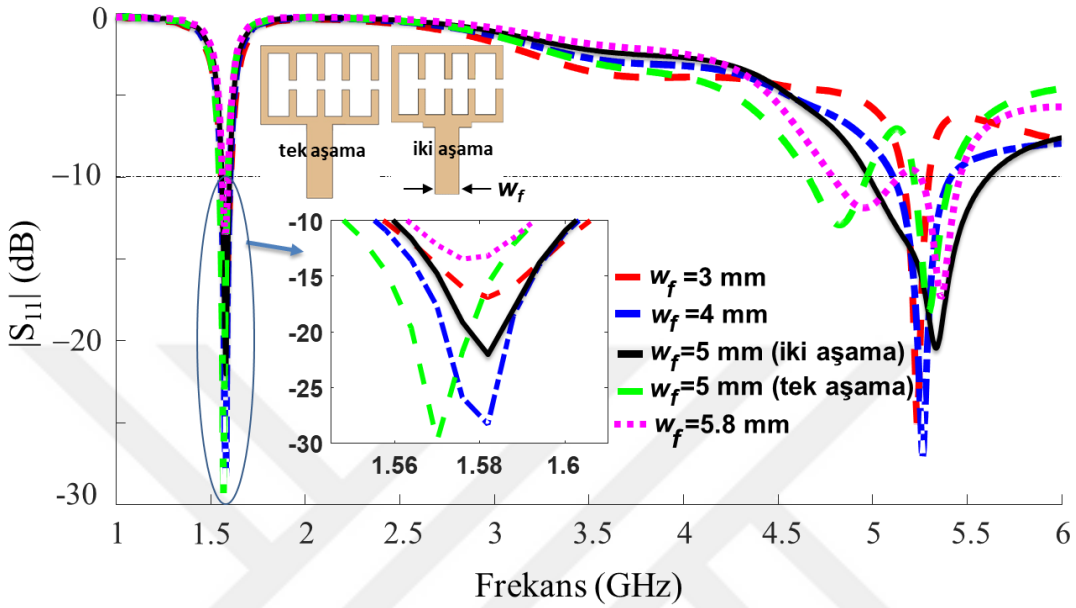
Şekil 3.5. Önerilen antenin her bir SRR durumu için geri dönüş kaybı

Bir sonraki analizde SRR' lerdeki yarık boşluklarının mesafesinin rezonans frekansına olan etkisi incelenmiştir. Şekil 3.6 farklı boşluk mesafeleri için antenin geri dönüş kayıp karakteristiğini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere (g) boşluk mesafesi arttıkça antenin rezonans frekansı her iki bantta yukarı kaymaktadır.



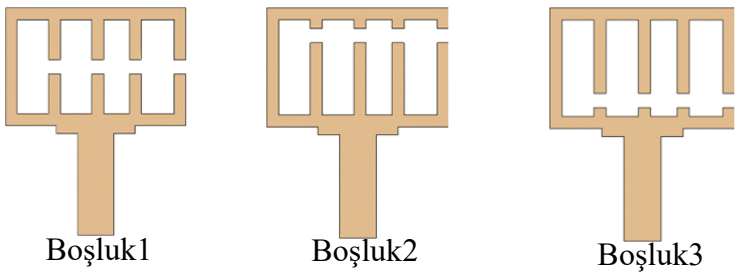
Şekil 3.6. Önerilen antenin dört farklı yarık boşluk mesafeleri için elde edilen geri dönüş kayıp değerleri

Sonraki analizde ise ilgili bantlarda en geniş bantgenişliğini elde edecek mikroşerit besleme hattının optimal boyutunu elde etmek amacıyla parametrik çalışma yapılmıştır. Şekil 3.7 tek aşamalı ve iki aşamalı mikroşerit besleme hattı yapısı ve genişlikleri için elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerini göstermektedir. Görüldüğü üzere iki aşamalı 5mm genişlikli besleme hattı biçimi her iki bantta da optimal bantgenişliği sergilemektedir.

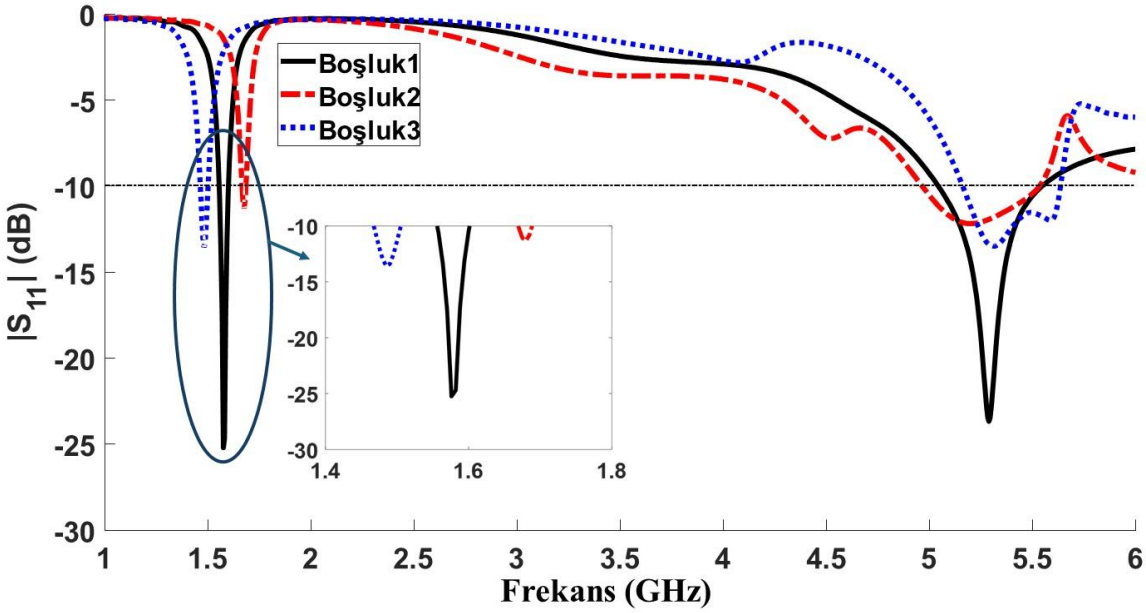


Şekil 3.7. Mikroşerit besleme hattının geri dönüş kayıp karakteristiği ve anten bant genişliğine etkisi

Nümerik analizin son adımında ise antenin hedeflenen uygulama bantlarında optimum rezonans frekansını gerçekleştirecek NSRR rezonatör tarak dişleri arasındaki boşlukların optimum konumu belirlenmektedir. Şekil 3.8 NSRR rezonatörün tarak dişleri arasındaki boşlukların üç farklı konumunu, şekil 3.9 ise rezonatör tarak dişleri arasındaki boşlukların farklı konumları için elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere rezonatör tarak diş boşluklarının orta konumu her iki bantta da optimal rezonans frekansı ve optimal bantgenişliği sergilemektedir.



Şekil 3.8. Önerilen anten rezonatör tarak dişleri arasındaki boşlukların üç farklı konumu

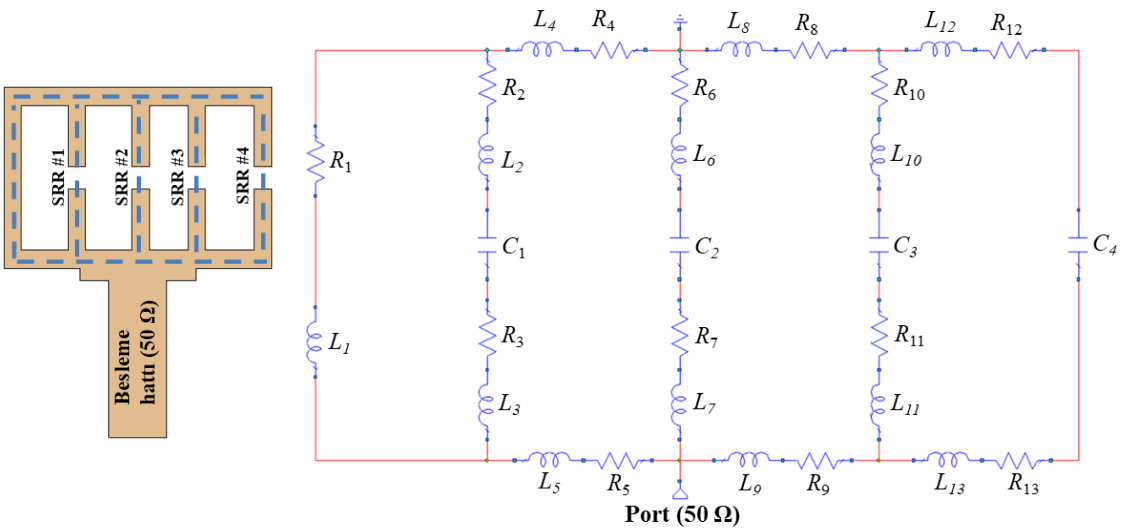


Şekil 3.9. Önerilen antenin rezonatör tarak dişlerinin boşluk1, boşluk2 ve boşluk3 konumları için elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiği

3.1.2. NSRR temelli çift bant tekstil anten eşdeğer devre modeli

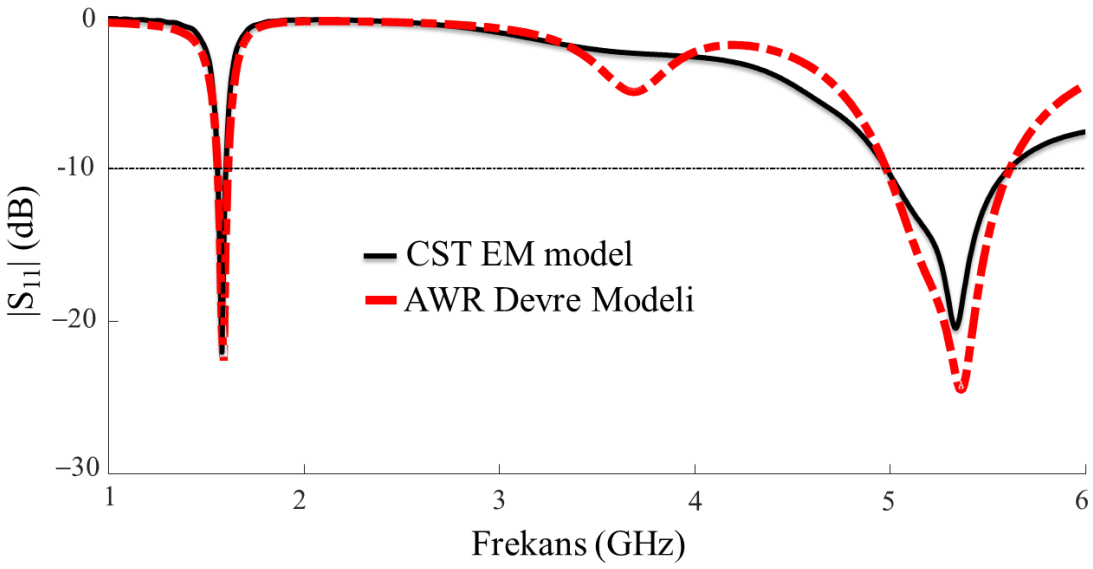
Önerilen antenin çalışma mekanizması hakkında detaylı bir değerlendirme yapabilmek için Şekil 3.10'de gösterilen eşdeğer devre modeli AWR-Microwave Office Circuit Design Software kullanılarak elde edilmiştir. Anten konfigürasyonundaki iletken yolları oluşturan her bir parça eşdeğer devrede seri bağlı R, L elemanları ile temsil edilmektedir. C1- C4 kapasitörleri sırasıyla alt ve üst tarak dişleri arasındaki yarık boşluklarını temsil etmektedir. İstenen frekans cevabını elde etmek için gereken R, L, C değerleri AWR simülatör yardımıyla şu şekilde belirlenmiştir:

R1=0.76 Ω, L1=0.35 nH, R2=3.45 Ω, L2=1.24 nH, R3=0.02 Ω, L3=0.64 nH, R4=0.08 Ω, L4=0.96 nH, R5=0.09Ω, L5=0.1 nH, R6=2.37 Ω, L6=0.22 nH, R7=2.18 Ω, L7=0.66 nH, R8=1.22 Ω, L8=1.36 nH, R9=1.2 Ω, L9=1.54 nH, R10=0.38 Ω, L10=0.45 nH, R11=1.17 Ω, L11=0.5 nH R12=0.56 Ω, L12=3.4 nH, R13=0.2 Ω, L13=3.87 nH, C1=0.42 pF, C2=0.55 pF, C3=0.55 pF, C4=0.76 pF



Şekil 3.10. NSRR temelli çift bant tekstil anten eşdeğer devre modeli

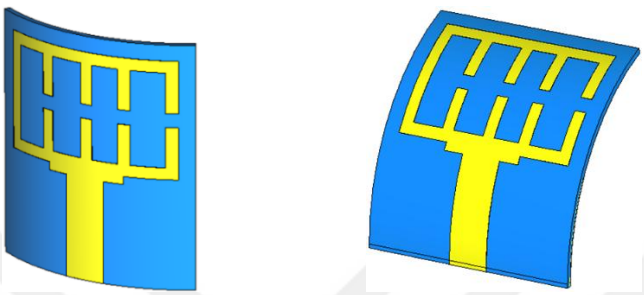
Şekil 3.11 CSR ve AWR simülatörlerinden yararlanılarak elde edilen geri dönüş kayıp karakteristik ölçümlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Görüldüğü üzere her iki simülatör geri dönüş kayıp karakteristiği birbiriyle mükemmel uyumludur.



Şekil 3.11. CST ve AWR simülatörlerde hesaplanan geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması

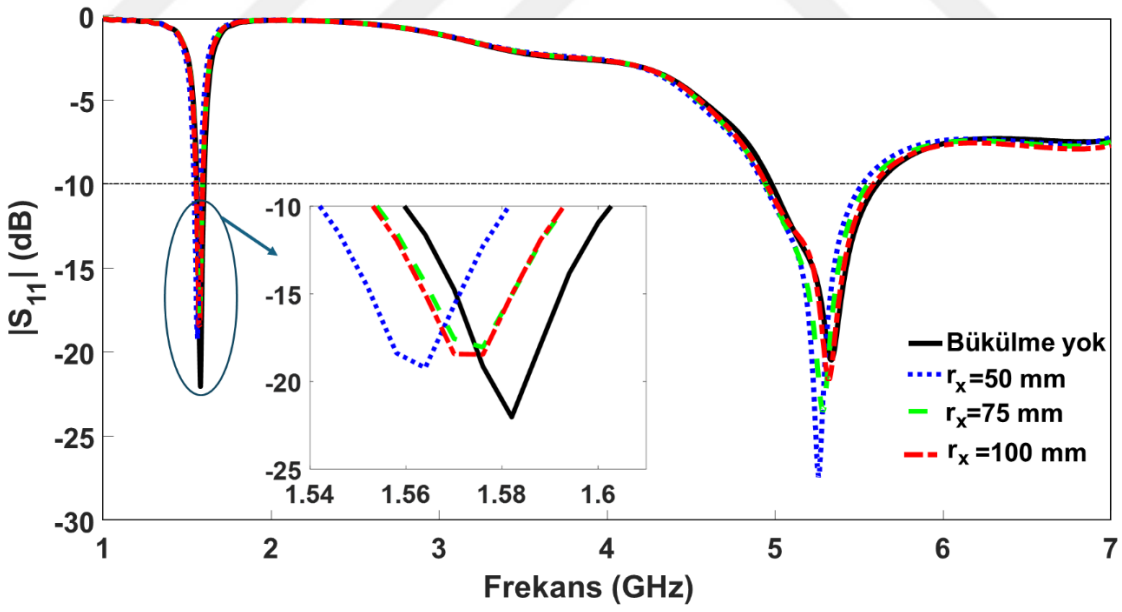
3.1.3. NSRR temelli çift bant tekstil anten bükülme testi

Tekstil antenlerin insan vücudu üzerindeki giysilere kolaylıkla entegrasyonu ve antenin belirli şekilde bükülme yeteneğine sahip olması giyilebilir antenlerin fiziksel uygunluğunu ve esnekliğini göstermektedir. NSRR temelli çift bant tekstil antenin bu özelliklerini ortaya koymak için anten x ve y eksenleri etrafında belirli açılarla şekil 3.12' de gösterildiği gibi bükülmüştür.



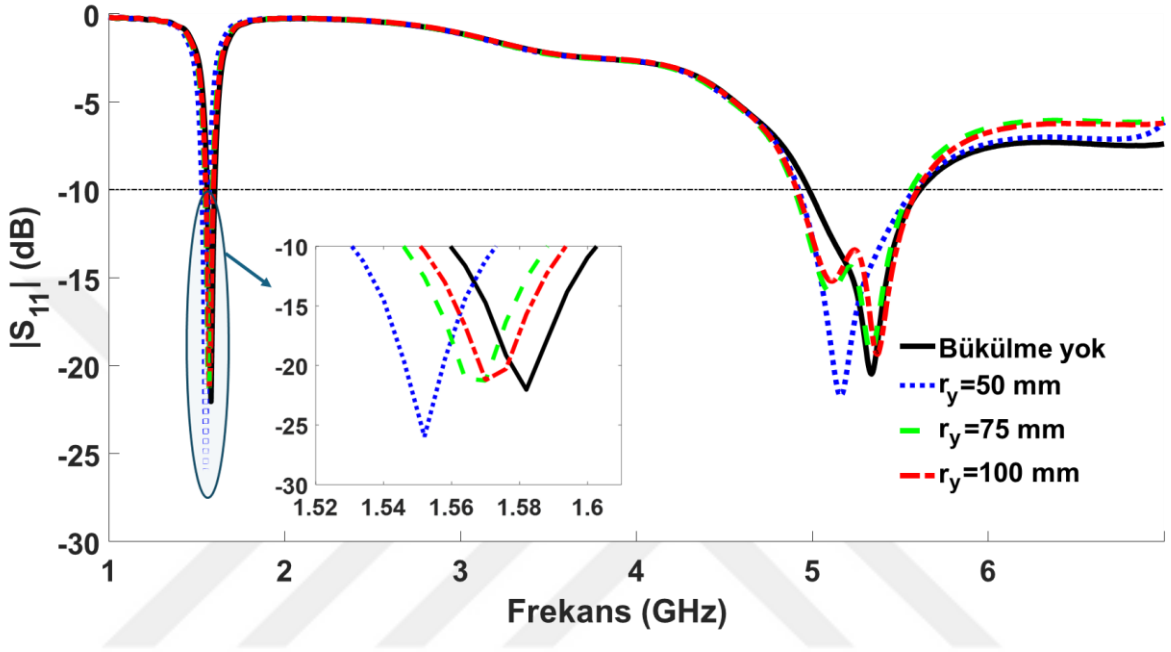
(a) **(b)**

Şekil 3.12. NSRR temelli çift bant tekstil antenin a) x ekseni etrafında bükülmesi; b) y ekseni etrafında bükülmesi



Şekil 3.13. Önerilen antenin x ekseni etrafında farklı yarıçap kavisli bükülme ve bükülme olmaması durumlarındaki geri dönüş kayıp karakteristikleri

Antenin x ekseni etrafında 50 mm, 75 mm ve 100 mm yarıçapındaki kavislerle bükülmesi ve bükülme olmaması durumlarında elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri karşılaştırılmalı olarak şekil 3.13'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere antenin x ekseni etrafında tüm bükülme koşullarında frekans cevabında ihmal edilebilir düzeyde kayma oluşmuştur.



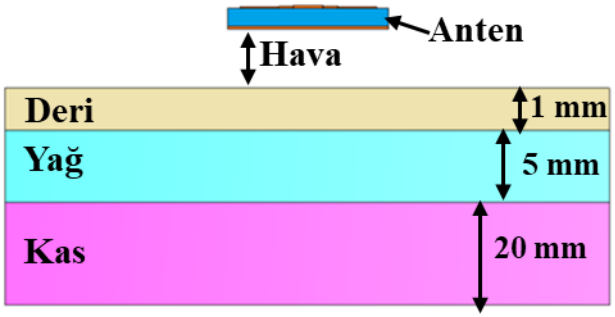
Şekil 3.14. Önerilen antenin y ekseni etrafında farklı yarıçap kavisli bükülme ve bükülme olmaması durumlarındaki geri dönüş kayıp karakteristikleri

NSRR temelli çift bant tekstil antenin y ekseni etrafında 50 mm, 75 mm ve 100 mm yarıçapındaki kavislerle bükülmesi ve bükülme olmaması durumlarında elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri karşılaştırılmalı olarak şekil 3.14'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere antenin y ekseni etrafında tüm bükülme koşullarında frekans cevabında ihmal edilebilir düzeyde kayma oluşmuştur. Neticede anten hem x hem de y ekseni etrafındaki bükülme koşullarında GPS ve WLAN empedans bantlarını kapsamaktadır. Önerilen anten bu çalışma bantlarında giyilebilir tekstillere entegre edilerek kullanılmaya uygundur.

3.1.4. NSRR temelli çift bant tekstil antenin insan vücut modeli üzerinde SAR analizi

NSRR temelli çift bant antenin giyilebilir anten olarak kullanılabilmesi için insan vücut dokusu tarafından emilen elektromanyetik dalga düzeyini de analiz etmek gerekir. Analizi gerçekleştirmek için kullanılan gerçek insan vücut modeli şekil 3.15'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere gerçek insan modeli değişik kalınlıktaki deri,kas ve yağ dokularından oluşan

üç katmanlı yapıya sahiptir. Çizelge 3.2'de ise insan vücut dokularının frekansa bağlı elektriksel özellikleri verilmiştir.

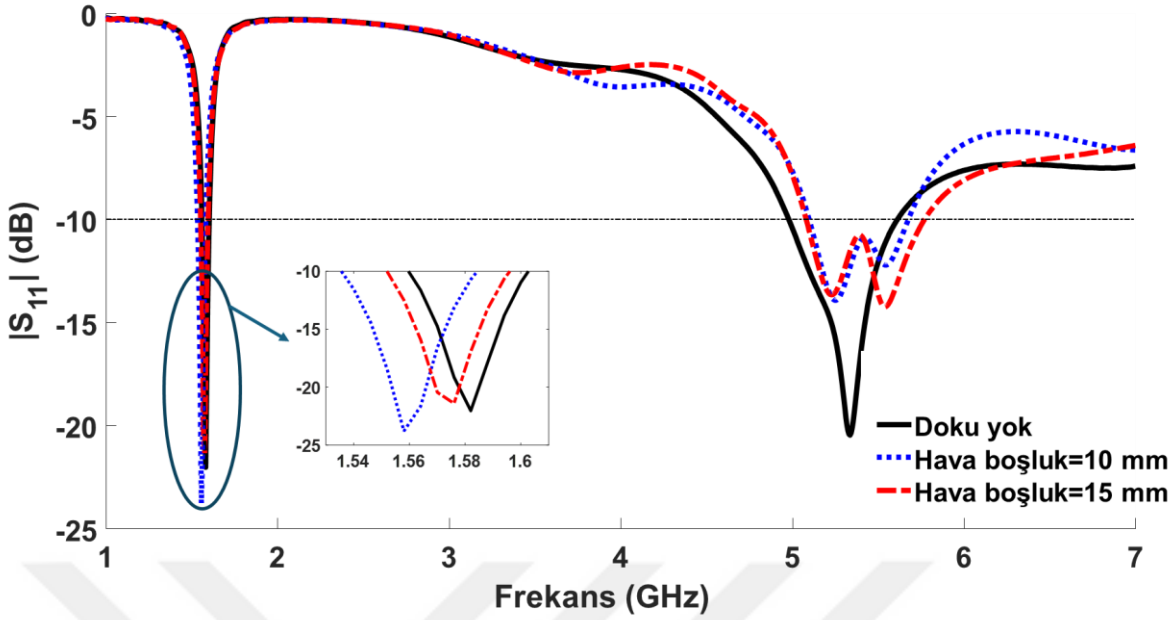


Şekil 3.15. Üç katmanlı insan vücut modeli

Çizelge 3.2. Karşılık gelen frekans değerleri için insan vücut modelinin elektriksel özellikleri

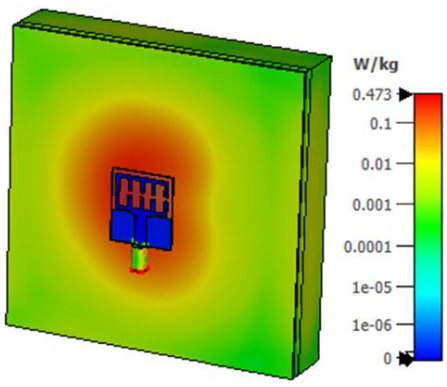
Doku	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (kg/m^3)	1.575 GHz			5.2 GHz		
			ε_r	tan δ	σ (S/m)	ε_r	tan δ	σ (S/m)
Deri	1	1001	39.28	0.32	1.1	35.61	0.31	3.22
Yağ	5	900	5.37	0.15	0.07	5.01	0.18	0.25
Kas	20	1006	53.86	0.26	1.22	49.28	0.3	4.27

Şekil 3.16'de insan vücut modeli ile anten arasındaki hava boşluğunun 10 mm, 15 mm değerleri ve antenin insan vücut üzerinde bulunmamasına bağlı olarak elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere insan doku modeli anten geri dönüş kayıp performansı üzerinde ihmal edilebilir bir etki yaratmaktadır. Hatta anten ve insan dokusu arasındaki uzaklık 10 mm iken bile her iki frekans bantları antenin çalışma aralığı arasında kalmaktadır.



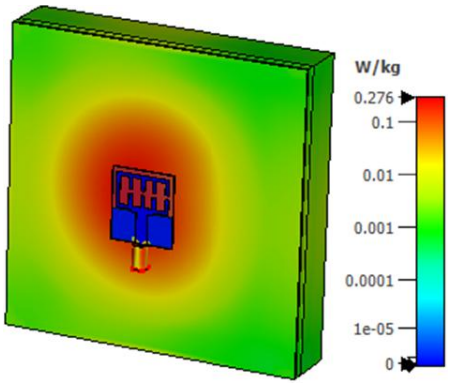
Şekil 3.16. İnsan vücut modeline bağlı olarak geri dönüş kayıp karakteristiği değişimi

Şekil 3.17 23.5 mW giriş gücü ile SAR dağılım analiz modelini göstermektedir. Analiz 1gr. ve 10 gr. dokular için karşılık gelen frekanslar için SAR değerlerini hesaplamak için yapılmıştır. 1 gr. doku için 1.575 GHz ve 5.250 GHz de elde edilen maksimum SAR değerleri sırasıyla 0.473 ve 1.59 W/kg'dır. Benzer şekilde 10 gr. doku için 1.575 GHz ve 5.250 GHz'de elde edilen maksimum SAR değerleri sırasıyla 0.276 ve 0.497 W/kg'dır. Böylece Avrupa standartlarının belirlediği 10 gr. doku başına 2W/kg SAR limit değeri göz önüne alındığında önerilen anten her iki bantta da 94.5 mW giriş gücü için çalışmada güvenilirdir.



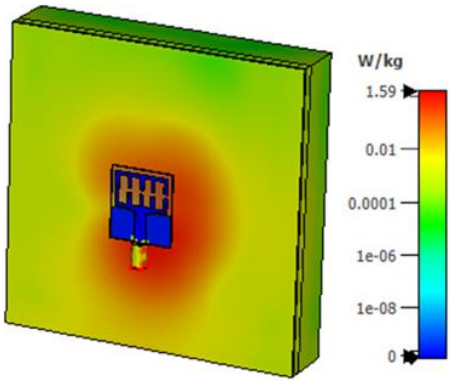
@1575 GHz (1 g)

(a)



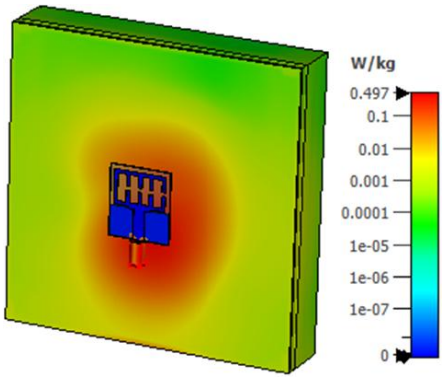
@ 1.575 GHz (10 g)

(b)



@5.250 GHz (1 g)

(c)



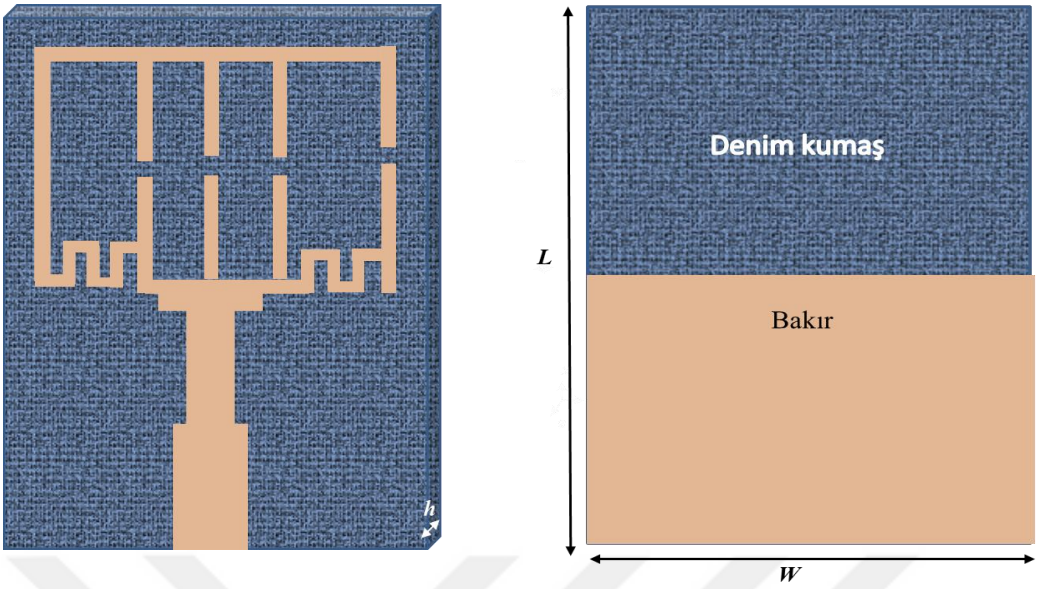
@5.250 GHz (10 g)

(d)

Şekil 3.17. Antenin insan vücut dokusunun 10 mm üzerine yerleştirilmesiyle oluşan SAR dağılımları; **a)** 1575 GHz' de 1 g doku için; **b)** 1575 GHz'de 10 g doku için; **c)**5250 GHz'de 1 g doku için; **d)** 5250 GHz'de 10 g doku için

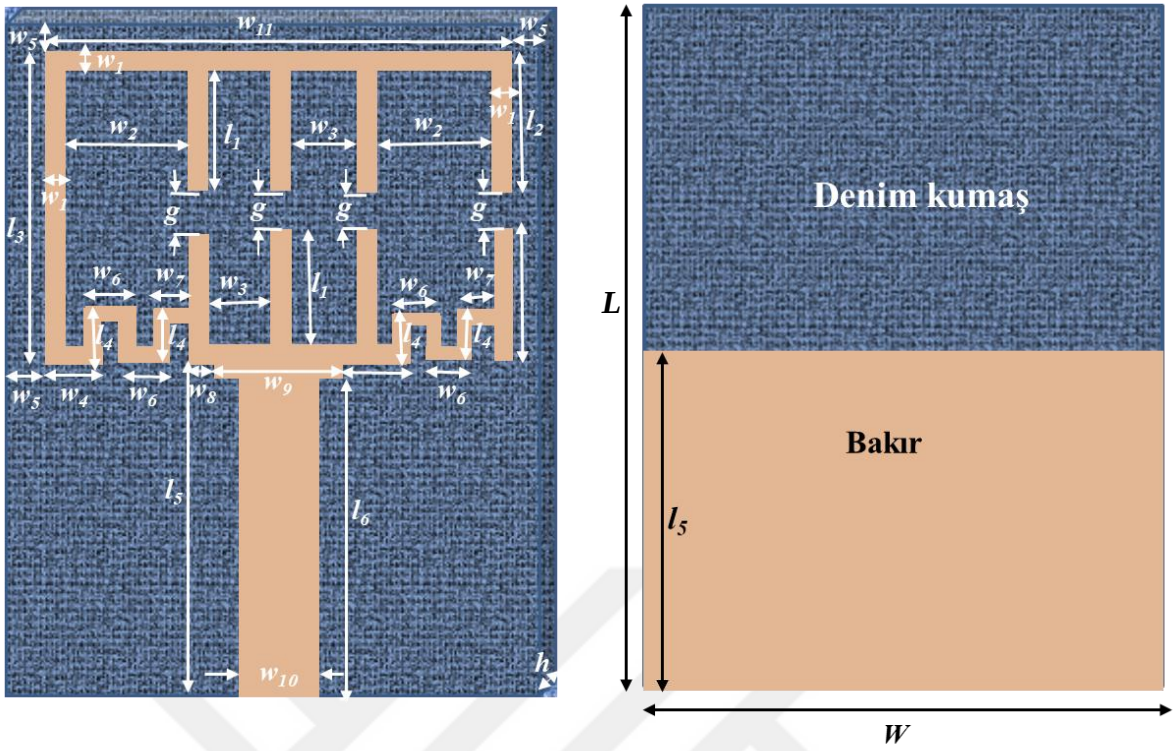
3.2. Kıvrımlı Şerit Eklemeli NSRR Temelli Tekstil Anten Tasarımları

Şekil 3.18' de kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çift bant tekstil antenin üst ve arka görünümü gösterilmektedir. Her biri eşit boşluklu altta ve üstte üçer adet tarak dişine sahip NSRR rezonatörün sağ ve sol taraflarına kıvrımlı şerit hat eklenmesi suretiyle tekstil antenin akım yolu uzatılarak rezonans frekansı daha küçük değere indirilmiştir. Bu sayede antenin birinci çalışma bandı (1.551-1.599) GHz değerine indirilmiş, (4.289-4.525) GHz 'de değeri -10 dB nin çok az altında ikinci bir frekans bandı ve (5.136-5.340) GHz frekans aralığında da değeri -18 dB' ye ulaşan üçüncü frekans bandı elde edilmiştir. Ancak ikinci frekans bandının -10 dB' ye çok yakın olması nedeniyle bir çalışma bandı olarak alınması sakınca yaratacağı için tasarlanan bu anteni çift bant tekstil anten olarak tanımlamak daha doğru olmaktadır. Tekstil antenin denim kumaştan oluşan alt katman boyu (*L)* 30 mm, eni (*W*) 25 mm ve yüksekliği (*h*) 0.7 mm olup 200 µm kalınlıklı bakır levhadan oluşan toprak düzleminin boyu 14 mm, eni 25 mm'dir.



Şekil 3.18. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çift bant tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm

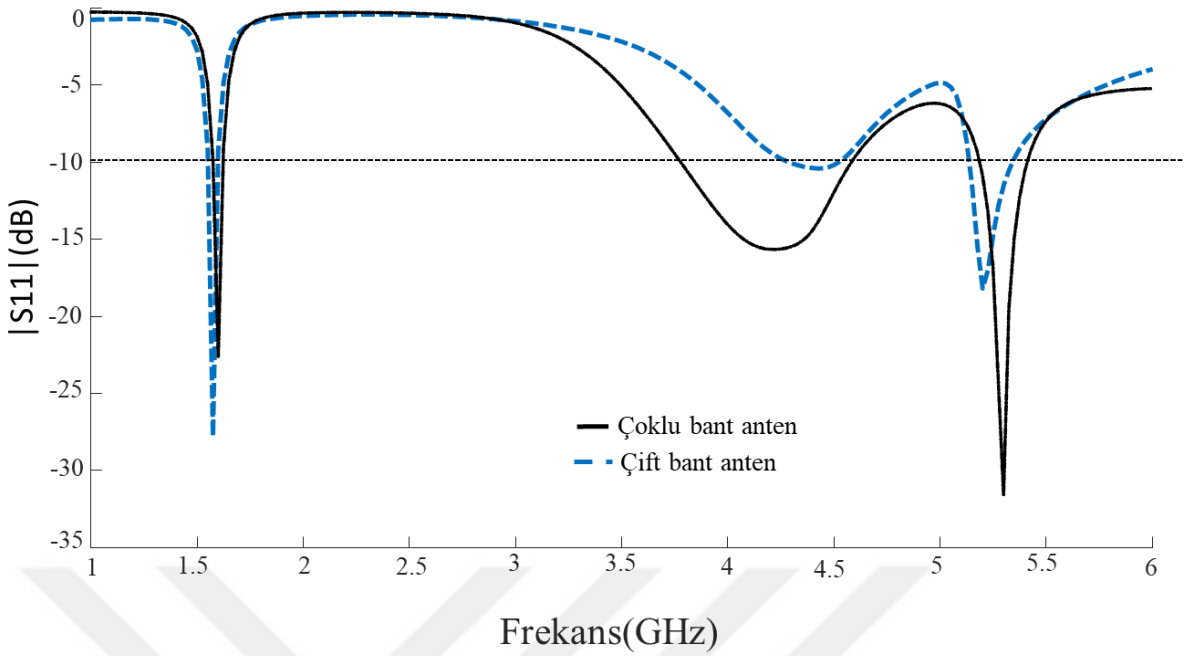
Şekil 3.18'de elde edilen tekstil antenin ikinci frekansı bandını iyileştirebilmek için mevcut anten üzerinde boyutsal ve şekilsel değişiklikler yapmak suretiyle HFSS programında çok sayıda simülasyonlar yapılmış ve nihai olarak üç frekans bandında çalışma gösteren bir tekstil anten konfigürasyonu elde edilmiştir. Elde edilen tekstil antenin tasarım konfigürasyonu şekil 3.19' da anten parametre değerleri de çizelge 3.3' te gösterilmektedir. Tasarlanan tekstil anten (1.57-1.62) GHz, (3.79-4.57) GHz ve (5.21-5.41) GHz bant aralıklarında olmak üzere üç frekans bandında çalışma sergilemektedir. Yapı incelendiğinde rezonatörün alt ve üst kısımda eşit genişlikli ve eşit boşluklu simetrik üçer adet tarak dişi ve iki aşamalı mikroşerit besleme hattının varlığı gözlenmektedir.



Şekil 3.19. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çoklu bant tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm

Çizelge 3.3. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çoklu bant tekstil anten tasarım parametreleri ve değerleri

Sembol	Değeri (mm)	Sembol	Değeri (mm)	Sembol	Değeri (mm)
L	35	l_6	18	w_5	2
W	25	g	2	w_6	2.46
l_1	5.2	h	0.7	w_7	1.52
l_2	6	w_1	0.8	w_8	1
l_3	14	w_2	5.7	w_9	6
l_4	2.5	w_3	2.8	w_{10}	4.5
l_5	19	w_4	1.66	w_{11}	21

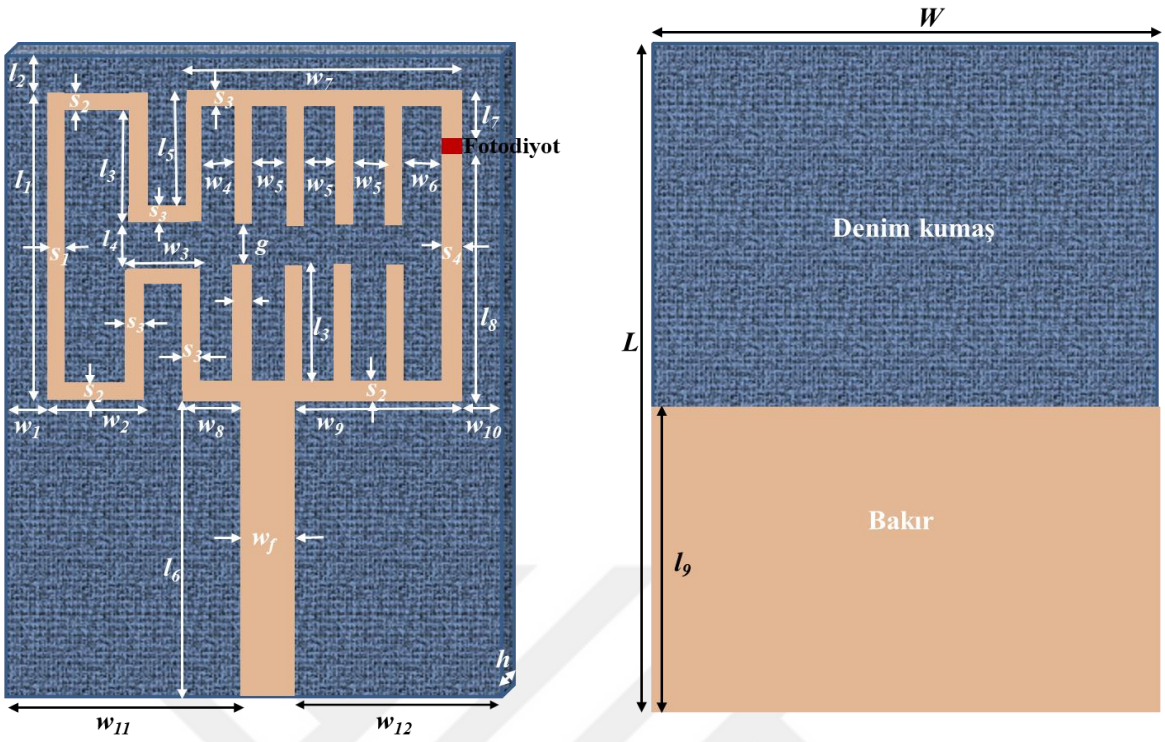


Şekil 3.20. Kıvrımlı şerit eklemeli NSRR temelli çift bant ve çoklu bant tekstil antenlerin geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması

Şekil 3.20 incelendiğinde NSRR yapısındaki rezonatörde kıvrımlı şerit hatların ilave edilmesi sonucunda anten rezonans frekansı 1.55 GHz değerine indirilerek elektriksel olarak küçük tekstil anten tasarımı elde edilmiştir. Tasarlanan anten tam anlamıyla çift bant çalışma sergilemektedir. Bu anten geri dönüş kayıp karakteristiği çift bant anten olarak izlenmektedir. Mevcut anten yapısında mikroşerit besleme hattı yapısında ve rezonatör boyutlarında değişiklikler yapılarak üç frekans bandında çalışma sergileyen tekstil anten tasarımı elde edilmiştir. Bu antenin geri dönüş kayıp karakteristiği şekil 3.20' de çoklu bant anten olarak görülmektedir.

3.3. Optik Olarak Frekansı Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Anten Tasarımı

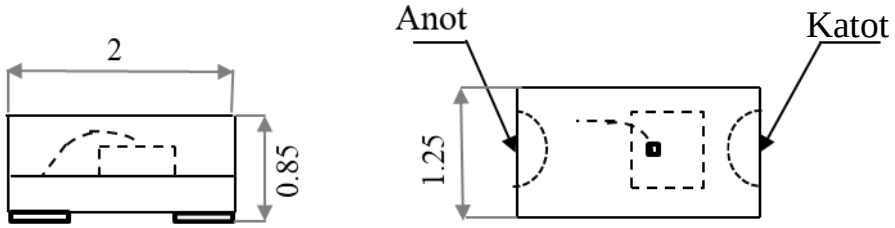
Şekil 3.21' de alt katmanı denim kumaş, toprak ve rezonatörü 200 µm kalınlıklı bakır levhadan oluşan tekstil anten konfigürasyonu verilmiştir. Rezonatör alt ve üst kısmında simetrik eşit en, boya sahip ve eşit boşluk mesafeli dörder adet tarak dişi bulunmaktadır. Rezonatör alt ve üst kısmı birbiriyle simetriktir. NSRR yapısındaki rezonatörün alt ve üst tarak dişlerinin sol tarafına kıvrımlı şerit eklemek suretiyle akım yolu uzatılarak antenin daha düşük frekans bandında çalışması sağlanmıştır. Şekilden görüldüğü üzere anten tek aşamalı mikroşerit besleme hattı ile uyarılmıştır. Antene ait parametre değerleri çizelge 3.4 'de ve tasarımda yer alan fotodiyot ebatları şekil 3.22' de gösterilmektedir. Kullanılan TEMD7100X01 silikon pin fotodiyot yüksek hızlı, yüksek hassasiyetli yüzey montajlı bir fotodiyot olup 830 nm ile 950 nm dalga boyunda çalışmaktadır. Fotodiyot ebatları (LxWxh) olarak (2x1.25x0.85) mm' dir.



Şekil 3.21. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarım konfigürasyonu; **a)** Üst görünüm; **b)** Arka görünüm

Çizelge 3.4. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarım parametreleri ve değerleri

Sembol	Değeri (mm)	Sembol	Değeri (mm)	Sembol	Değeri (mm)
L	40	l_9	19.4	w_4	1.7
W	31	g	1.9	w_5	1.8
l_1	18.2	h	0.7	w_6	2.7
l_2	2.3	s_1	1.1	w_7	17.6
l_3	6.9	s_2	1.2	w_8	3.4
l_4	2	s_3	1.3	w_9	10.2
l_5	6.8	w_f	4	w_{10}	2.2
l_6	19.5	w_1	2.4	w_{11}	14.6
l_7	3.6	w_2	5.8	w_{12}	12.4
l_8	13.6	w_3	4.3		

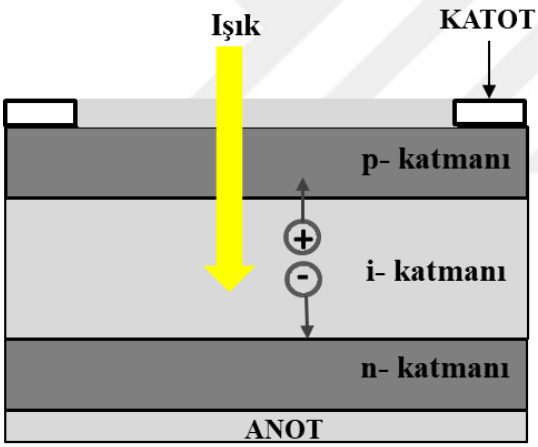


(a) **(b)**

Şekil 3.22. TEMD7100X01 fotodiyotun mm cinsinden ebatları; **a)** Ön görünüm; **b)** Üst görünüm

Fotodiyotlar P-N eklemine sahip bir optoelektronik eleman olup ışığı elektrik akımına dönüştürürler. Fotodiyotun ışığa duyarlı olan yüzeyine uygulanan ışık fotonlarının emilmesi sonucunda ortaya çıkan serbest elektronların emilmesi sonucunda oluşan serbest taşıyıcıların hareket etmesiyle elektrik akımı doğar. Fotodiyotlar ultraviyole bölgesinden kızıl ötesi bölgesine uzanan geniş bir spektrum aralığında kullanılabilmektedirler. Fotodiyotun ışın spektrumundaki çalışma bölgesi fotodiyot yapısında kullanılan yarı iletken malzemeye bağlıdır. En çok kullanılan foto diyot çeşitleri planar, pin, çığ ve Schottky fotodiyotlardır.

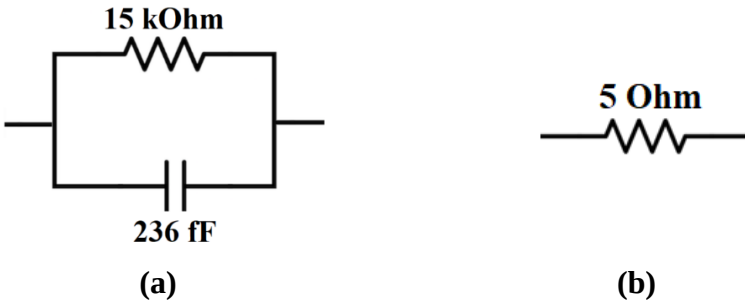
Burada frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarımında silikon pin fotodiyot kullanılmıştır. Bu fotodiyotun eşik gerilimi 0.7 Volt' tur. Şekil 3.23' de yapısı gösterilen pin fotodiyot p ve n tipi yarı iletken katmanlar arasında içsel yarı iletken adı verilen ek katmandan oluşmaktadır. Pin fotodiyota ışık ya da foton enerjisi uygulandığında enerjinin büyük bir kısmı içsel veya tükenme bölgesi tarafından gözlemlenir. Sonuç olarak içsel bölgede çok sayıda elektron boşluk çifti üretilir. İç bölgede üretilen serbest elektronlar n katmanına doğru hareket ederken, içsel bölgede üretilen delikler p katmanına doğru hareket ederler. Bir bölgeden başka bölgeye taşınan serbest elektronlar ve boşluklar elektrik akımı taşırlar. Serbest elektronlar ve delikler n bölgesine ve p bölgesine ulaşınca üretecin art ve eksi kutuplarına doğru çekilirler. Fotodiyot üzerine düşen ışık şiddeti ile orantılı olarak voltaj üretir ve katottan anoda doğru akım geçirir. Fotodiyotlar ters polarlama ile beslenir, yani anoduna negatif, katoduna ise pozitif gerilim uygulanır. Doğru polarmada fotodiyot iletkendir ve bu durum fotodiyotun iletimde olması (ON konumu) olarak adlandırılır. Ters polarmada ise N ve P eklemlerinin birleşim yüzeyine ışık düşene kadar fotodiyot kesimdedir ve bu durum fotodiyotun (OFF konumu) olarak adlandırılır. Fotodiyotun duyarlı yüzeyine ışık düşmediğinde fotodiyot üzerinden akan akım ısıl yoldan üretilmiş olan azınlık taşıyıcılarının akıttığı akımdır. Bu akıma karanlık akımı denir. Fotodiyot üzerine ışık düşürülmediği karanlık ortamda açık devre kabul edilirken üzerine ışık düşürüldüğü aydınlık ortamda kısa devre kabul edilir.



Şekil 3.23. Pin fotodiyot yapısı

Tasarlanan tekstil antende fotodiyot kullanmak suretiyle giyilebilir uygulamalar başta olmak üzere pek çok uygulamada farklı frekans bantları elde edilmektedir. Yüksek dalga boyuna duyarlı fotodiyot aracılığı ile ışığın olup olmamasına bağlı olarak fotodiyotun iletim ve kesim durumları için tek bir anten elemanı birden çok antenin yapacağı görevi yapmaktadır. Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten olarak tanımlanan bu tür antenlerde pin diyot, varaktor ve FET gibi aktif devre elemanları kullanılmakta olup bunlar DC ön gerilimleme devreleri ile DC/AC sinyal izolasyon için gerekli ilave kapasitör ve indüktörlere ihtiyaç duymaktadır. Bu durumdan dolayı antenin fiziksel hacmi büyümekle birlikte ışıma performansında da girişim nedeniyle bozucu etkiler oluşabilmektedir. Buradaki frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten tasarımında optik anahtarlama elemanı olan fotodiyot

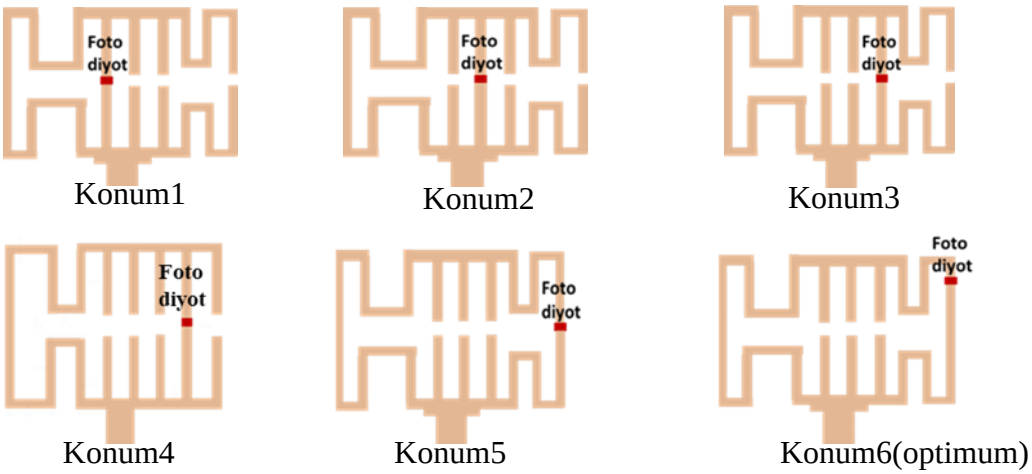
kullanmak suretiyle söz konusu dezavantajlar bertaraf edilmiştir. Kullanılan TEMD7100X01 fotodiyotun iletim ve kesim durumlarında gösterdiği empedans değerleri AWR programı ile fotodiyotun S11 ve S21 sonuçlarını gerçekleştiren analizlerden elde edilmiştir. Fotodiyot iletim durumunda iken 5 Ω luk bir direnç davranışı sergilerken kesim durumunda 236 fF lik bir kapasitör davranışı sergilemektedir.



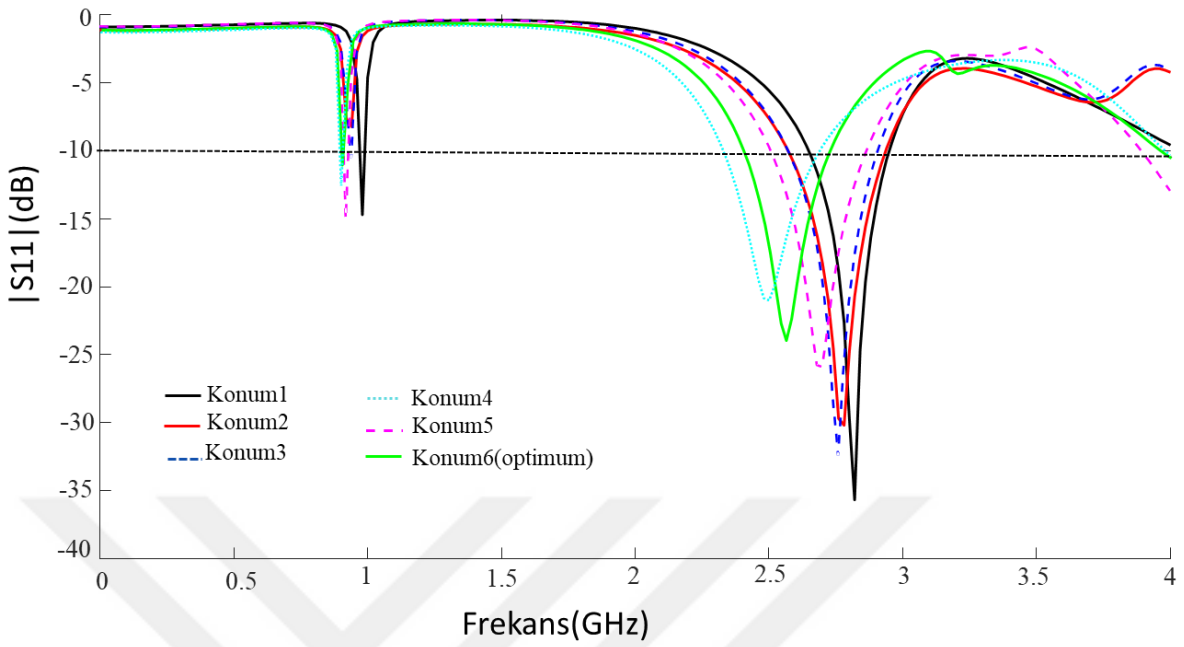
Şekil 3.24. TEMD7100X01 fotodiyot eşdeğer devresi; **a)** Kesim durumu için; **b)** İletim durumu için

3.3.1. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antende fotodiyot konumunun belirlenmesi

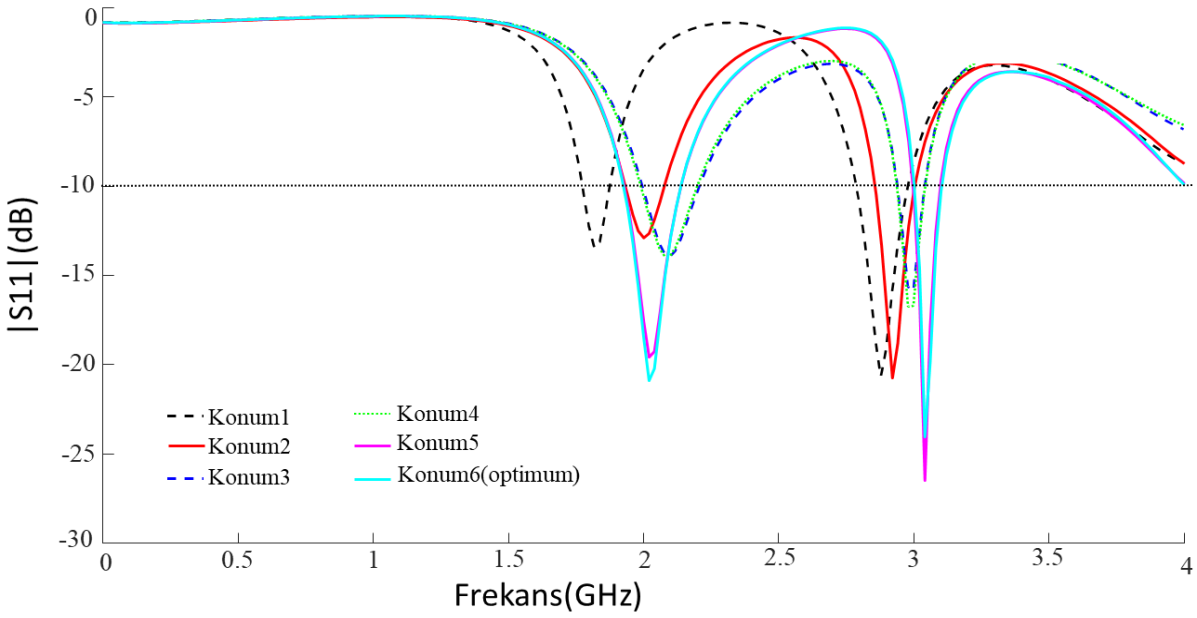
Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin elektriksel boyutunun küçük olması amacıyla rezonans frekansının düşük değer alması ve frekansı yeniden yapılandırılabilirlik sergilemesi için kullanılan fotodiyot rezonatör tarak dişleri arasındaki boşluklara ve tarak dişi iletkenine yerleştirilerek analiz edilmiştir. Fotodiyotun yerleştirildiği altı farklı konum şekil 3.25' da ve fotodiyotun bu konumlardaki iletim ve kesim durumlarında elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırmalı çizimleri sırasıyla şekil 3.26 ve şekil 3.27' de gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antende fotodiyotun altı farklı konumları



Şekil 3.26. Fotodiyotun altı farklı konumları için kesim durumunda elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması



Şekil 3.27. Fotodiyotun altı farklı konumları için iletim durumunda elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması

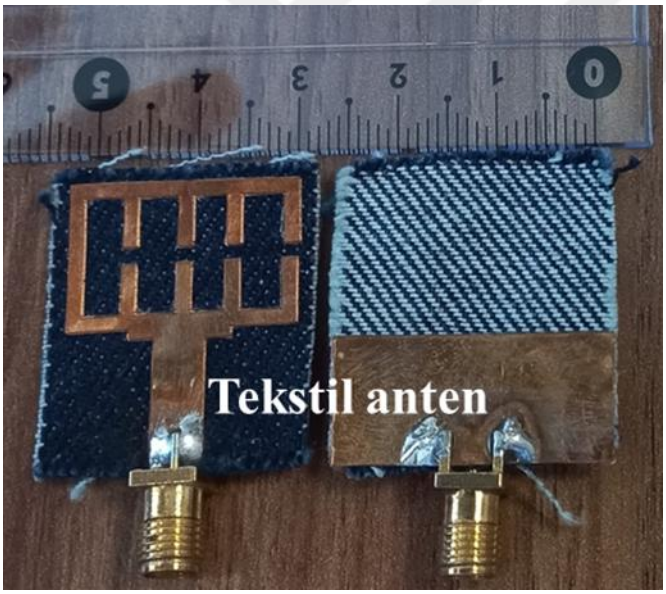
Şekil 3.26 incelendiğinde en düşük rezonans frekansını sağlayan optimum bantgenişlik konum6' de elde edilmiştir. Öte yandan şekil 3.27 incelendiğinde konum6 için fotodiyotun kesim durumunda elde edilen frekans bantları iletim durumunda elde edilen frekans bantları ile örtüşmemektedir. Yani önerilen tekstil anten frekansı yeniden yapılandırılabilir anten olarak görev yapmakta olup dört ayrı frekans bandında çalışma performansına sahiptir. Öte yandan antenin elektriksel boyutu oldukça küçük olup toplam hacmi (0.093x 0.068x 0.016) λ_g dir. Buradaki λ_g en düşük frekans bandında hesaplanan kılavuz dalga boyudur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

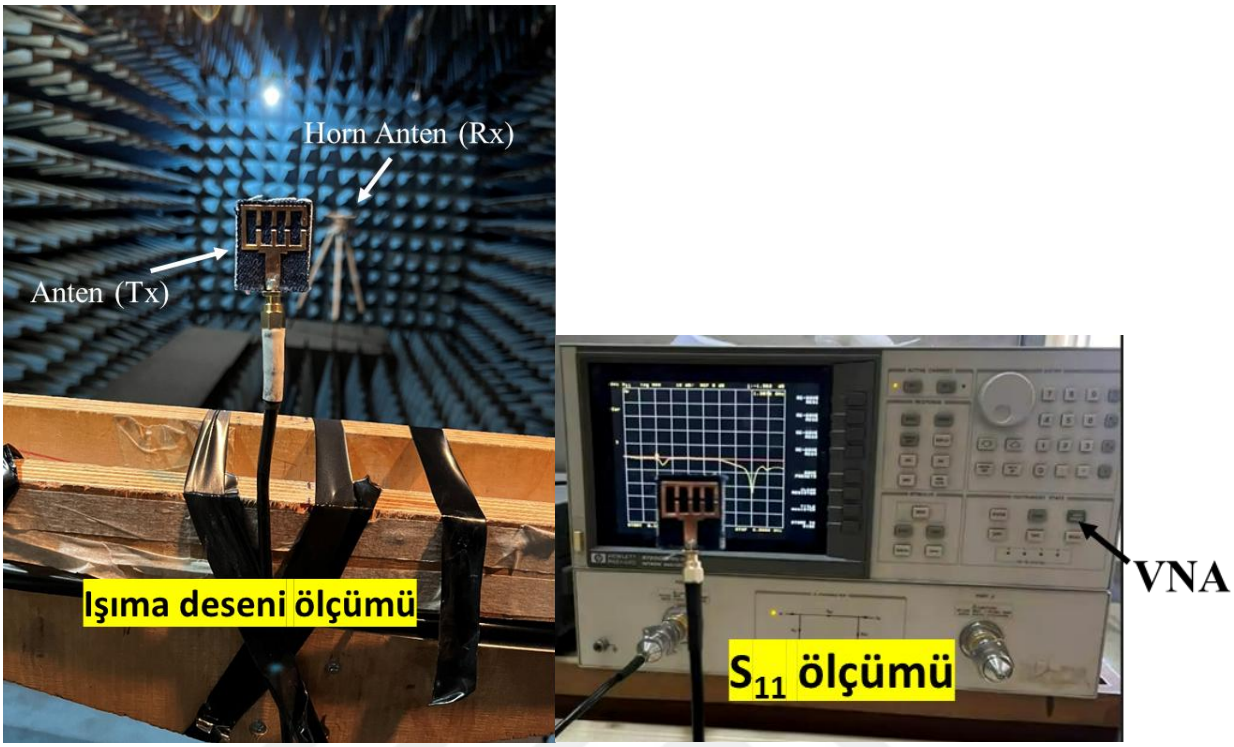
Tez kapsamındaki her iki anten prototiplerinin üretimleri Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölüm laboratuvarında yapılmıştır. Üretim aşamasında antenler titizlikle baskı devre kazıma cihazı (LKPF cihazı) ile radyatör ve toprak düzlemi için 200 µm kalınlığında bakır levha kullanılarak kesilmiş ve sonrasında kesilen bakır levhalar denim kumaş içeren alt katmanın ön ve arka kısmına düzgün bir şekilde tutturulmuştur. Anten geri dönüş kaybı ölçümü için HP 8720B 20GHz VNA cihazı kullanılmıştır. Aşağıdaki her bir antene ait bulgular ayrı ayrı verilmiştir.

4.1. NSRR Temelli Çift Bant Tekstil Anten Üretim ve Ölçümü

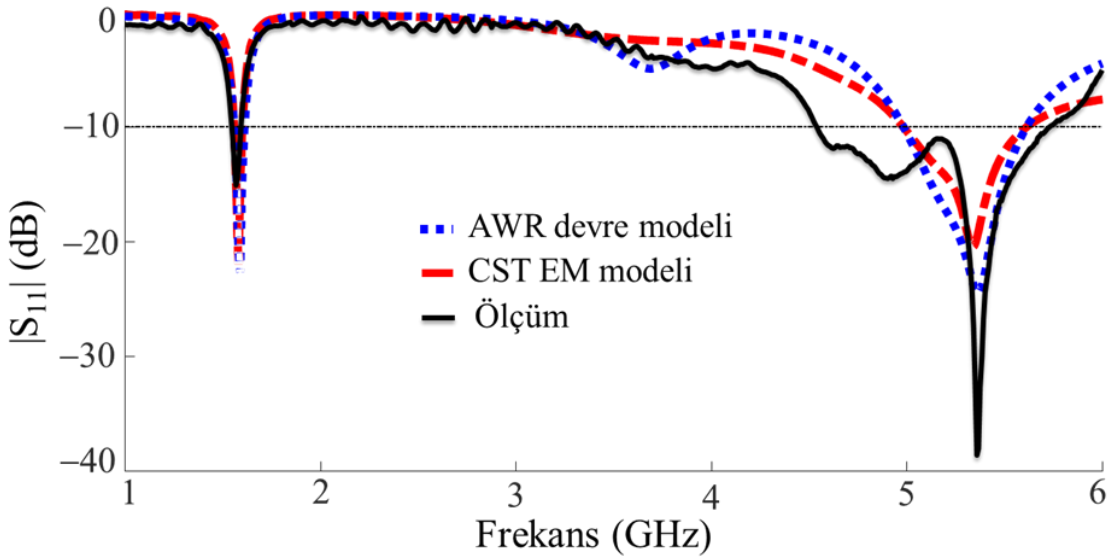
NSRR temelli çift bant tekstil antenin ölçümü Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1 NSRR temelli çift bant tekstil anten prototipinin ön ve arka yüzünü, şekil 4.2 bu antenin geri dönüş kayıp ile ışıma örüntüsü ölçüm düzeneklerini göstermektedir.



Şekil 4.1. NSRR temelli çift bant tekstil anten prototipi

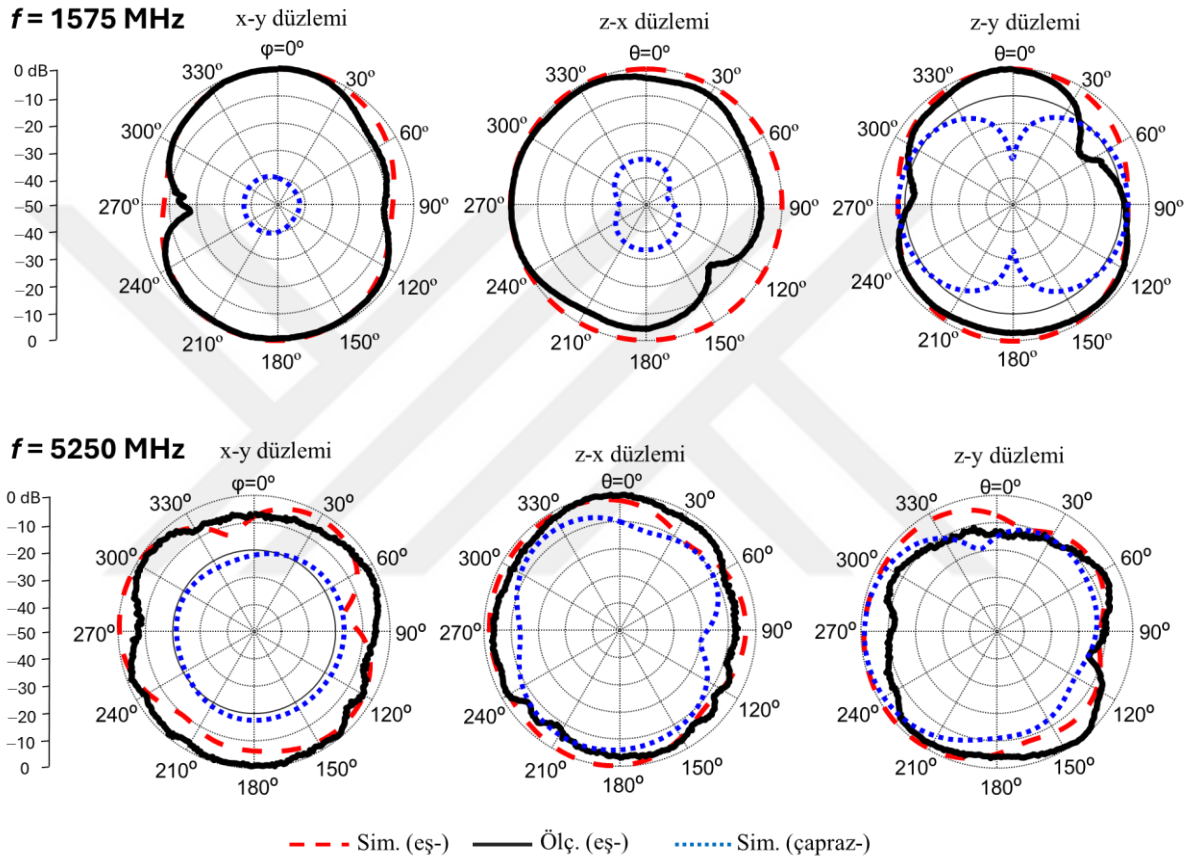


Şekil 4.2. NSRR temelli çift bant tekstil anten ölçüm düzenekleri



Şekil 4.3. Önerilen anten için nümerik ve ölçülen geri dönüş kayıp karakteristiklerinin karşılaştırması

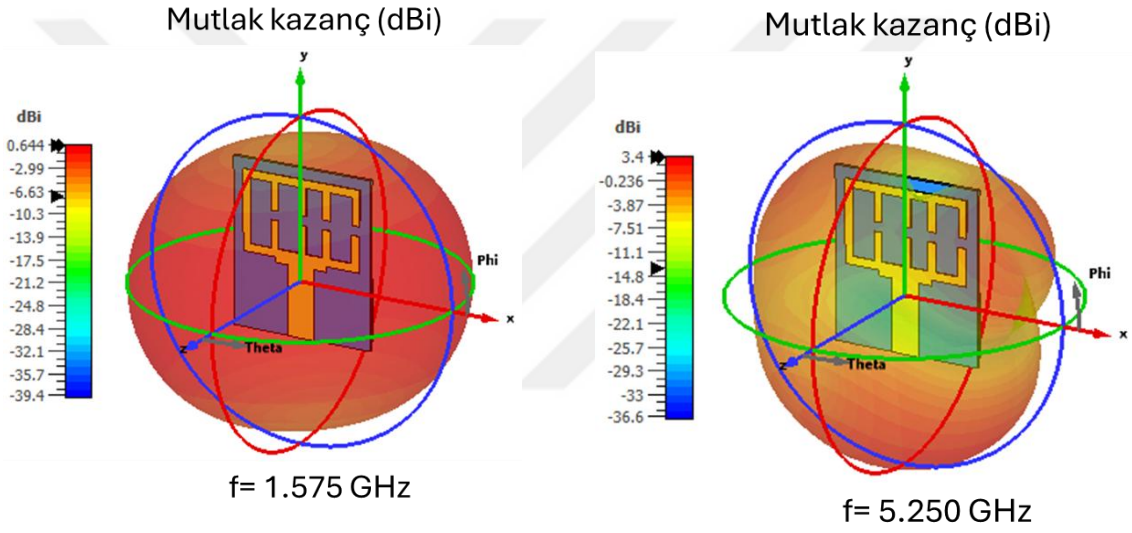
Antenin nümerik ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri şekil 4.3' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere nümerik sonuçlar birbiriyle ve ölçüm sonucuyla iyi bir uyum sergilemektedir. Ancak üretim ve ölçüm tolerans farklarına bağlı olarak ölçüm sonucu yüksek frekans bandında biraz daha geniş bant işgal etmektedir. CST simülasyon sonucuna göre önerilen anten 1578 MHz ve 5300 MHz frekanslarında sırasıyla %2.8 ve %9.4 bantgenişliği ile çift bant performans sergilemektedir. Böylece anten (1568- 1583) MHz GPS bandı ile (5150-5350) MHz WLAN bantlarını kapsamaktadır.



Şekil 4.4. NSRR temelli çift bant tekstil anten için simülasyon ve ölçüm ile elde edilen ışıma örüntülerinin karşılaştırması

NSRR temelli çift bant tekstil antenin uzak alan eş ve çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri nümerik olarak CST simülatörde hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için eş ve çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri ayrıca EMUMAM laboratuvarı yankısız odada ölçülmüştür. Şekil 4.4 önerilen anten için ana hüzmede simüle edilmiş ve ölçülmüş ışıma örüntülerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Görüldüğü üzere ölçülen eş polarizasyon ışıma örüntüleri simülasyon sonuçları ile kabul edilebilir uyum içindedir ve sonuçlar monopol anten yapısına bağlı olarak hemen hemen ana hüzme yönünde yön bağımsız

ışıma örüntüsü göstermektedir. Antenin çapraz polarizasyon ışıma örüntüleri düzlem kesimlerine ve frekansa bağlı olarak değişik seviyeler ve davranışlar sergilemektedir. Şekil 4.4' den görüldüğü üzere anten düzlemlerdeki düşük ışıma örüntü seviyelerine bağlı olarak 1.575 GHz' de xy ve zx düzlemleri boyunca lineer olarak kutuplanmıştır. Diğer düzlemlerdeki çapraz polarizasyonlar standart lineer polarize olmuş bir antene kıyasla nispeten yüksektir. Ancak gerçek dünyada insan duruşu sıklıkla değiştiğinden giyilebilir uygulamalar için bu düşük çapraz polarizasyon kritik bir sorun değildir. Şekil 4.5 önerilen antenin simüle edilmiş üç boyutlu mutlak kazanç ışıma örüntülerini göstermektedir. Görüldüğü üzere 1.575 GHz ve 5.250 GHz 'de önerilen antenin maksimum mutlak kazanç değerleri sırasıyla yaklaşık 0.64 ve 3.4 dBi' dır. 1.575 GHz' de simüle edilen ve ölçülen kazançlar arasındaki uyuşmazlık muhtemelen bu frekanstaki ışıma verimlilik farklarından kaynaklanmaktadır. Ölçüm işlemi sırasında esnek anten alt katmanın bükülmesi ve deformasyonu antenin ışıma verimini azaltmıştır.



Şekil 4.5. NSRR temelli çift bant tekstil antenin üç boyutlu mutlak kazanç ışıma örüntüleri

Bu bölümde önerilen tekstil anten literatürde son yıllarda tasarlanan benzer tekstil antenlerle rezonatör şekli, alt katman malzeme, dielektrik malzeme, dielektrik sabit, büyüklük, çalışma frekansı, % bantgenişlik ve mutlak kazanç karakteristikleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu amaç için antenlerin kapsamlı bir performans karşılaştırması çizelge 4.1' de verilmektedir. Çizelge incelendiğinde birinci rezonans frekansı açısından bu çalışmada önerilen tekstil anten en küçük elektriksel boyuta sahiptir. Öte yandan sadece önerilen tekstil anten hem GPS (1.575 GHz) hem de WLAN (5.2 GHz) bantlarını aynı anda kapsamaktadır.

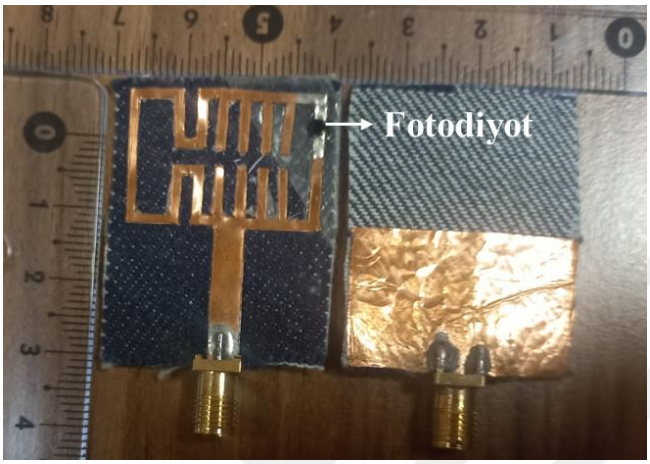
Çizelge 4.1. Tekstil antenlerin performans karşılaştırması

Kaynak	**Rezonatör şekli**	**Alt katman malzeme**	**Di elektrik sabit**	**Büyüklük**	**Frekans (GHz)**	**% Bantgenişlik (GHz)**	**Mutlak Kazanç (dBi)**
Mao vd. 2020	Çift port dikdörtgen	Evolon	1.7	(0.547x0.229x0.020) λ_g (0.0025 λ_g^3)	2.45	3.27	NG
Anbalagan vd.2020	Ters U&T şekilli	Dokuma pamuk	1.51	(0.574x0,623x0.019) λ_g (0.0067λ_g^3)	2.45	20.39	NG
Xu vd.2019	Dikdörtgen yama	100 % pamuk	1.7	(0.967x0.967x0.006) λ_g (0.0056 λ_g^3)	2.45	3	2
Roshni vd.2017	E-şekilli yama	Polyester	1.4	0.689x0.689x0.014) λ_g (0.0066 λ_g^3)	3.37	7.12	3.6
Mohammad vd.2018	Boşluklu yarık halka	Keçe	1.44	(0.492x0.492x0.021) λ_g (0.0050λ_g^3)	1.8/2.45	3.89/15.62	NG / 3.2
Thaiwirot vd.2024	Dairesel yarıklı yama	Jean	1.7	(0.772x0.855x0.010) λ_g (0.0066λ_g^3)	2.45/5.8	3.68/3.81	3.08/ 2.15
Liu vd. 2022	Eliptik&C şekilli yarık	Denim	1.75	(0.640x0.640x0.012) λ_g (0.0049λ_g^3)	2.45/3.32/ 3.93/5.8	3.7/5.7/ 5.85/9.5	2.81/-1.16 /2.83
Abdelghany vd.2024	Yarıklı dikdörtgen yama	Denim	1.78	(0.220x0.424x0.003) λ_g (0.0007λ_g^3)	2.45/3.5/5.8	58.06/61.43	2.5/4.5/3.1
Sharma vd. 2024	Kıvrımlı yarıklı yama	Denim	1.72	(0.274x0.274x0.045) λ_g (0.0033 λ_g^3)	1.8/2.45/5.8	17.2/ 39.1/19.6	3.7/ 5.3/ 9.6
Samal vd. 2023	Uçları kesik &yarıklı yama	PF-4 Köpük	1.06	(0.653x0.536x0.027) λ_g (0.009λ_g^3)	2.45/ 5/ 7/ 9	40.81/ 26.41/50.93	5.8/ 8/ 9.4/ 9
Al-Gburi vd.2024	Şeritli dikdörtgen yama	Deri	2.09	(0.486x0.730x0.021) λ_g (0.007λ_g^3)	7.2	48.17	12.2
Bu çalışma	NSRR temelli	Denim	1.8	(0.187x0.215x0.004) λ_g (0.0001λg^3)	1.575/5.2	2.8/9.4	0.64/3.4

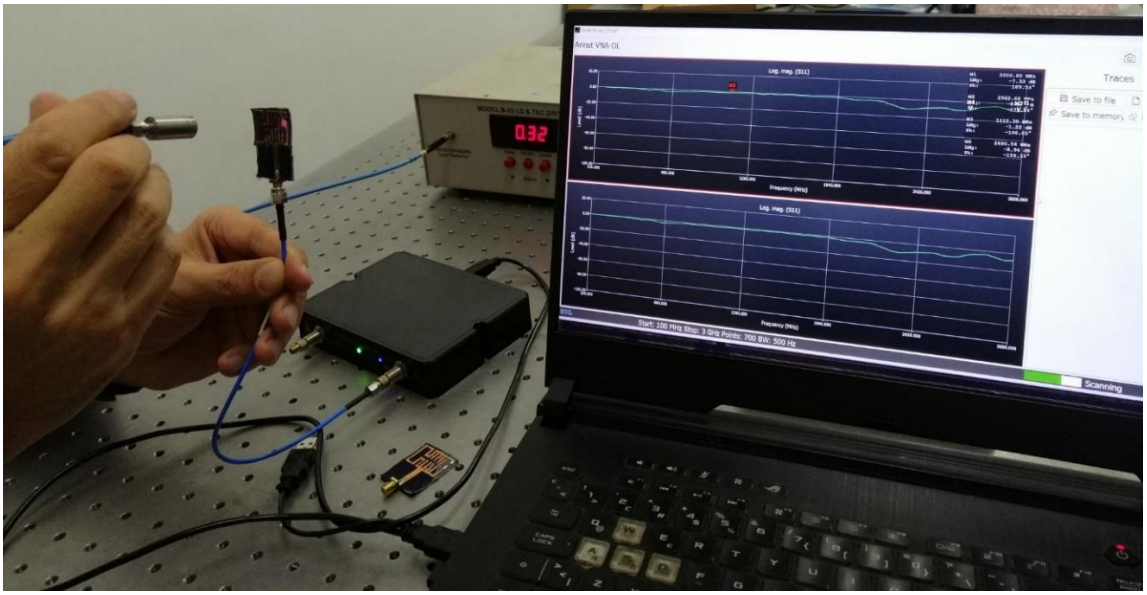
λ_g en düşük frekans bandında hesaplanan kılavuz dalga boyudur.

4.2. Optik Olarak Frekansı Yeniden Yapılandırılabilir Tekstil Anten Üretim ve Ölçümü

Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten ölçümü Akdeniz Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyofizik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Foto diyotun çalışması için gerekli lazer kaynak 960 nm dalga boyunda ışık üretmektedir. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten prototipinin ön ve arka yüzü şekil 4.6'da ve geri dönüş kayıp ölçüm düzeneği şekil 4.7'de gösterilmektedir.

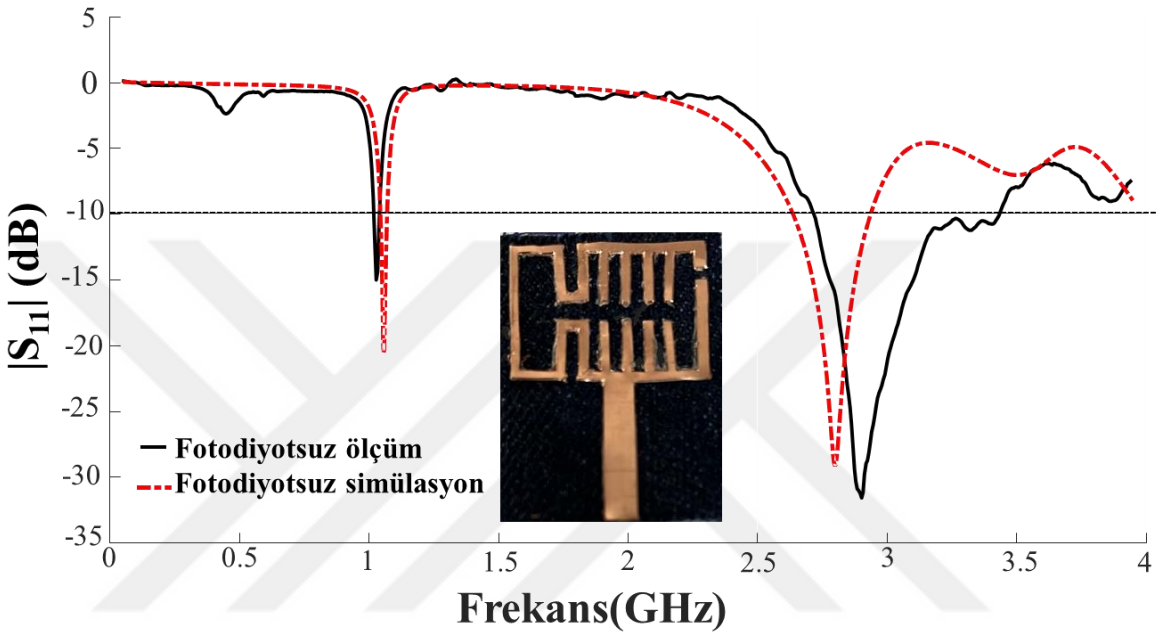


Şekil 4.6. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten prototipi



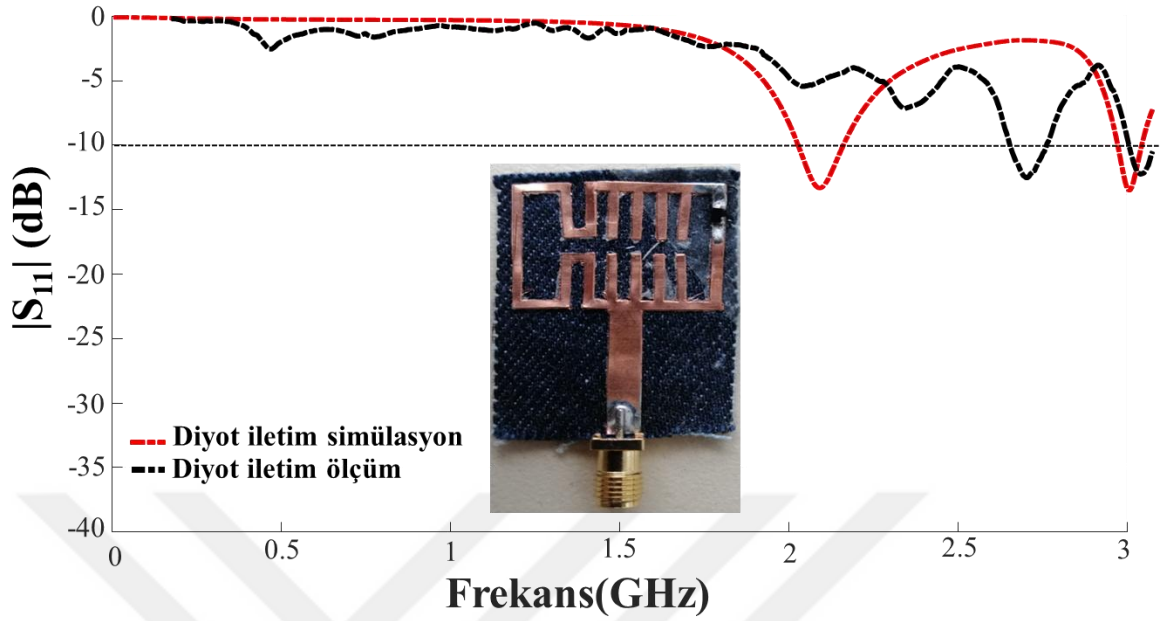
Şekil 4.7. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil anten ölçüm düzeneği

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere yeniden yapılandırılabilir tekstil anten yüzeyine monte edilen fotodiyota laboratuvarda bulunan lazer kaynaktan ışık düşürüldüğünde fotodiyot iletime geçmekte ve ışık düşürülmediğinde fotodiyot kesimde kalmaktadır. Üretilen antenin fotodiyotsuz durumu ile fotodiyotun iletim ve kesim durumlarında CST programıyla yapılan simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri karşılaştırılmalı olarak çizdirilmiştir.



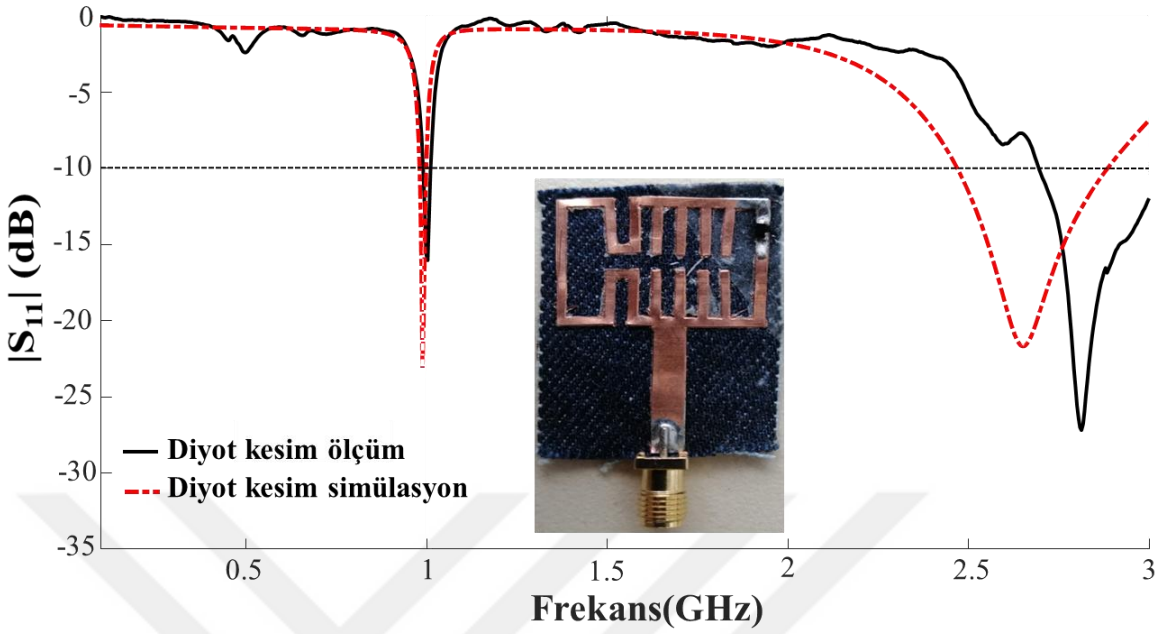
Şekil 4.8. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin fotodiyotsuz simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri

Şekil 4.8'den görüldüğü üzere antenin fotodiyot monte edilmediği durumda yapılan simülasyon sonucundaki geri dönüş kayıp karakteristiği ile ölçüm sonucundaki karakteristik birbiriyle uyumludur. Ancak ölçümde özellikle ikinci frekans bandında meydana gelen kayma simülasyon ortamının ideal, ölçüm ortamının ise ideal olmamasından ve anten üretim, ölçüm hassasiyeti ile tolerans farklarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.9. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin fotodiyot iletim durumu için simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri

Şekil 4.9' dan görüldüğü üzere antene monte edilen fotodiyot üzerine ışık düşürülerek fotodiyotun iletime geçmesi durumunda simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristiği üst üste çizdirilmiştir. İki grafik arasında oluşan kaymanın fotodiyottan kaynaklı olmadığı şekil 4.8 ve şekil 4.10' dan açıkça görülmektedir. Çünkü fotodiyotsuz ve fotodiyotun kesim durumu için elde edilen karşılaştırmalı grafikler benzer davranış sergilemektedir. Fotodiyotun iletim durumunda simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen geri dönüş kayıp karakteristik eğrisindeki kaymalar anten üretim ve ölçüm hassasiyeti ile tolerans farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Fotodiyot iletim durumu için anten iki frekans bandında çalışma sergilemektedir. Birinci rezonans frekansı 2.08 GHz, ikinci rezonans frekansı 2.93 GHz dir.



Şekil 4.10. Optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil antenin fotodiyot kesim durumu için simülasyon ve ölçüm sonucu elde edilen geri dönüş kayıp karakteristikleri

Antene monte edilen fotodiyot üzerine ışık düşürülmediğinde fotodiyot kesimde kalmaktadır (OFF konumu). Bu durumda fotodiyot açık devre gibi davranmaktadır. Yani bu durum fotodiyotun anten üzerinde monte edildiği yerden çıkarılarak açık devre haline getirilmesi demektir. Dolayısıyla fotodiyotsuz sonucu gösteren şekil 4.8 ile fotodiyotun OFF konum sonucunu gösteren şekil 4.10' un benzer olması beklenen bir durumdur. Şekil 4.10'da da ölçüm ve simülasyon grafiğinin özellikle ikici bantta kayma göstermesi diğer grafiklerde olduğu gibi anten üretim ve ölçüm hassasiyeti ile tolerans farklarından kaynaklanmaktadır. Fotodiyot OFF konumu için birinci rezonans frekansı 0.92 GHz, ikinci rezonans frekansı 2.67 GHz' dir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada iki farklı tekstil anten tasarım, üretim ve ölçümü gerçekleştirilmiştir. İlk olarak modern giyilebilir uygulamalar ve kompakt WBAN sistemler için 1.575 GHz GPS ve 5.2 GHz WLAN uygulamalarında çalışan minyatür bir çift bant tekstil anten tasarlanmıştır. Minyatür boyutlu anten konfigürasyonu yarım toprak düzlemi ve iki aşamalı besleme hattı ile uyarılan etkin bir iç içe geçen yarık halka rezonatör temelli radyatör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen antenin eşdeğer modeli çıkarılmış ve çalışma prensibi geniş kapsamlı olarak açıklanmıştır. Deneysel doğrulama için önerilen anten üretilerek ölçüm yapılmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak önerilen tekstil anten geçerli bir çift bantgenişliği sağlamakta ve karşılık gelen frekans bantlarında kabul edilebilir mutlak kazanç değerleri ile tek düze ışıma örüntü karakteristikleri sergilemektedir. Öte yandan üretilen anten giyilebilir uygulamalarda kullanıldığında antenden yayılan elektromanyetik radyasyonun insan vücudu tarafından soğurulacak miktarı Avrupa Standartlarının belirlediği sınır değerinin çok altında kalmaktadır. Ayrıca anten x ekseni ve y ekseni etrafında büküldüğünde frekans cevabında ihmal edilebilir düzeyde kayma meydana gelmiştir. Dolayısıyla üretilen antenin giyilebilir anten olarak kullanılması uygundur. Üretilen bu tekstil anten literatürde mevcut güncel tekstil antenlerle karşılaştırıldığında en küçük elektriksel boyuta sahip olup NSRR rezonatör yapısının literatürde bugüne kadar hiçbir tekstil anten tasarımında kullanılmamış olması nedeniyle üstün özellikli yenilikçi bir tekstil anten tasarımı olarak yerini almıştır.

Tezde yer alan ikinci anten optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir tekstil bir antendir. NSRR rezonatörlü çift bant tekstil anten yapısı baz alınarak kıvrımlı şerit eklenerek rezonatörün iletken uzunluğu artırılarak akım yolu uzatılmıştır. Böylece elektriksel olarak küçük boyutlu tekstil anten elde edilmiştir. Her iki anten üretimi de benzer şekilde bakır levhanın istenen şekilde kazınıp denim alt katman üzerine tutturulmasıyla yarım topraklı monopol anten yapıları elde edilmiştir. Burada bugüne kadar literatürde yer almayan kıvrımlı şerit eklemeli NSRR rezonatöre sahip olan fotodiyotla optik olarak frekansı yeniden yapılandırılabilir anten üretimi yapılmıştır. Kullanılan fotodiyot yüzey montajlı olup oldukça yüksek (nanosaniye mertebesinde) anahtarlama hızına sahiptir. Fotodiyotun bias devre kullanımına ihtiyaç duymaması ve modülasyonlar arası distorsiyona neden olmaması açısından anten tasarımında büyük avantaj sağlamaktadır. Fotodiyot üzerine 950 nm dalga boyunda ışığın düşürülmesiyle iletime, ışığın düşürülmemesiyle kesime geçmesi neticesinde dört farklı frekans bandı elde edilmiştir. Böylelikle tek bir anten elemanı ile kablosuz iletişim sistemlerinde dört ayrı uygulama bandında çalışma yapacak kompakt anten üretimi gerçekleştirilmiştir.

Her iki anten tasarımı da literatüre çok fonksiyonlu, yenilikçi anten konfigürasyonları kazandırmış ve tekstil antende fotodiyotla frekans yapılandırma metodunun uygulanabilirliğini göstermiştir. Dolayısıyla bu tez çalışması bundan sonra yapılacak anten tasarımlarına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır.

6. KAYNAKLAR

Abdelghany, M.A., Ahmed M.I., Ibrahim A.A., Desai A. and Ahmed M.F. 2024. Textile antenna with dual bands and SAR measurements for wearable communication. *Electronics*, 13, 2251.

Abutarboush, H.F. 2022. Silver nanoparticle inkjet-printed multiband antenna on synthetic paper material for flexible devices. *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 8, pp. 6349–6355.

Ahmad, S., Cherif, Naseer, N., Ijaz, U. and Faouri, Y.S. 2022. A wideband circularly polarized CPW-fed substrate integrated waveguide based antenna array for ISM band applications. *Heliyon*, vol. 8, no. 8, Art. no. e10058.

Al-Gburi, A.J.A., Radi, N.H.M., Saeidi, T, Mohammed N.S., Zakaria, Z., Das G.S., Buragohain, A., Ismail, M.M. 2024. Superconductive and flexible antenna based on a tri-nanocomposite of graphene nanoplatets, silver and copper for wearable electronic devices. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 9, 100773.

Ali, S., Sovuthy, C., Imran, M., Socheatra, S., Abbasi, Q. and Abidin, Z. 2020. Recent advances of wearable antennas in materials, fabrication methods, designs, and their applications: State-of-the-art, *Micromachines*, vol. 11, no. 10, p. 888.

Ali, U., Ullah, S., Kamal, B., Matekovits, L. and Altaf, A. 2023. Design, analysis and applications of wearable antennas: A review. *IEEE Access*, vol.11, pp. 14458-14486.

Al-Naiemy, Y., Elwi, T.A., Khaleel, H.R. and Al-Rizzo, H. 2012. A systematic approach for the design, fabrication, and testing of microstrip antennas using inkjet printing technology. *ISRN Communications and Networking*, volume 2012, Article ID 132465, 11 pages.

Anbalagan, A., Sundarsingh, E.F., Ramalingam, V.S. 2020. Design and experimental evaluation of a novel on-body textile antenna for unicast applications. *Microw. Opt. Technol. Letters*, vol. 62, no. 2, pp. 789-799.

Andrade, A. C., Fonseca, I. P., Jilani, S. F., Alomainy, A. 2016. Reconfigurable textile based ultra-wideband antenna for wearable applications. 10th European Conference on Antennas and Propogation (EuCAP), pp.1-4, 10-15 April, Davos, Switzerland.

Bahaa, A., Alyani, I., Aduwati, S. 2021. Electro-textile wearable antennas in wireless body area networks: materials, antenna design, manufacturing techniques and human body consideration- a review. *Sage Textile Research Journal*, vol.91(5-6) 646-663.

Bonefačić, D. and Bartolić, J. 2021. Embroidered textile antennas: Influence of moisture in communication and sensor applications, *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 3988.

Che, W., Li, C., Deng, K., Yang, L. 2008. A novel bandpass filter based on complementary split ring resonators and substrate integrated waveguide. *Microwave and Optical Technology Letters*, volume 50, issue 3, p.699-701.

Dang, Q.C. 2022. Reconfigurable wearable antennas for body-centric communications, PhD Thesis, The University of Adeilade, Australia, 261 p.

Dang, Q.H., Trong, N.N., Fumeaux, C. and Chen, S.J. 2023. Tuning range extension strategies for varactor- based frequency –reconfigurable antennas. *IEEE Open Journal of Antennas and Propogation*, volume 4, 1087- 1094.

Ferchichi, A. and Gharsallah, A. 2013. A circuit model to an encoche coplanar antenna for a radio frequency identification TAG. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 3, no.3, p.386–391.

Gamota, D.R., Brazis, P., Kalyanasundaram, K., and Zhang, J. 2013. Printed Organic and Molecular Electronics. Springer Science & Business Media, New York, 679 p.

Ghodake, A.P. and Hogade, B.G. 2022. Textile antenna-structure, material and applications. Proceedings of The International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS 2022).

Hester J.G.D. and Tentzeris, M.M. 2016. Inkjet-printed flexible mm-wave Van-Atta reflectarrays: A solution for ultralong-range dense multitag and multisensing chipless RFID implementations for IoT smart skins. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 12, pp. 4763–4773.

He, X., Qiu, L., Wang, Y., Geng, Z., Wang, J. and Gui, T. 2011. A compact thin-film sensor based on nested split ring resonator (SRR) metamaterials for microwave applications. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol.32, p.902- 913.

Hunt, D.V. 2008. RFID a guide to radio frequency identification. *IEEE Antennas Propag Mag* 50, p.146–147.

Jiang, X., Li, W., Hai, T., Yue, R., Chen, Z., Lao, C., Ge, Y., Xie, G., Wen, Q. and Zhang, H. 2019. Inkjet-printed MXene micro-scale devices for integrated broadband ultrafast photonics. *Npj 2D Mater. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9.

Jilani, S.F., Abbasi, Q.H. and Alomainy, A. 2018. Inkjet-printed millimetrewave PET-based flexible antenna for 5G wireless applications. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. (IMWS-5G), pp. 1–3, 30-31 August, Dublin, Ireland.

Joler M, Kolonic´, A., Boljkovac M. 2020. A wideband circularly polarized jeans-based antenna at 2.54 GHz. *Open Journal of Antennas and Propogation*, vol.8, no.1, 1-18.

Joshi, R., Hussin, E.F.N.M., Soh, P.J. and Podilchak, S.K. 2020. Dual band dual sense textile antenna with AMC backing for localization using GPS and WBAN/WLAN. *IEEE Open Access Journal*, vol.8, pp (99):1-1.

Kaur, H., Chawla, P. 2022. Performance analysis of novel wearable textile antenna design for medical and wireless applications. *Wireless Personal Communications,* pp.1-17.

Mao, C.X., Zhou, Y., Wu, Y., Soewardiman H., Werner D.H. and Jur, J.S. 2020. Low-profile strip- loaded textile antenna with enhanced bandwidth and isolation for full-duplex wearable applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 9, pp. 6527-6537.

Mohammad, E.A., Rahim, H.A., Soh, P.J., Jamlos, M.F., Abdulmalek, M., Lee, Y.S. 2018. Dual-band circularly polarized textile antenna with split ring slot for off-body 4G LTE and WLAN applications. *Applied Physics A., Solids Surf.*, vol.124, no.8, p. 568.

Le, T.T., Kim, Y.-D. and Yun, T.-Y. 2022. Wearable pattern-diversity dual polarized button antenna for versatile on-/off-body communications,'' *IEEE Open Access Journal,* vol.10, pp (99):1-1.

Li, E., Li, X. J, Seet, B-C, Lin, X. 2020. Ink-printed flexible wideband dipole array antenna for 5G applications. *Physical Communication*, vol. 43, Art. no. 101193.

Li, H., Du, J., Yang, X.X. and Gao, S. 2022. Low-profile all-textile multiband microstrip circular patch antenna for WBAN applications. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.21(4):1-1.

Li, J., Jiang, Y., Zhao, X. 2019. Circularly polarized wearable antenna based on ninja flex-embedded conductive fabric. *International Journal of Antennas and Propogation*, volume 2019: 1-8.

Lin, X., Chen, Y., Gong, Z., Seet, B-C., Huang, L. and Lu, Y. 2020. Ultrawideband textile antenna for wearable microwave medical imaging applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no.6, pp. 4238–424.

Liu, Y., Xie, N., Tang, X., Xiao, F. 2016. A compact low phase noise oscillator with a superior harmonic suppression characteristics based on novel nested split ring resonator. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol.8, issue 8, p.1155-1161.

Liu, Y., Tang, X., Zhang, Z. and Huang X. 2013. Novel nested split ring resonator for compact filter application. *Progress in Electromagnetics Research,* vol.136, 765- 773.

Li, Y., Li, W., Ye, Q. 2013. A compact UWB antenna with dual band-notch characteristics using nested split ring resonator and stepped impedance resonator. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, No.12: 2827-2830.

Mahfuz, M.M.H., Islam, M.R, Sakib, N., Habaebi, M.H., Raad, R., Sakib, M.A.T. 2021. Design of wearable textile patch antenna using C-shape etching slot for Wi-MAX and 5G

lower band applications. In Proc.8th Int. Conf. Comput. Commun. Eng. (ICCCE), Jun., pp. 168-172.

Mohamadzade, B., Hashmi, R.M., Simorangkir, R.B.V.B., Gharaei, R., Ur Rehman, S. And Abbasi, Q.H. 2019. Recent advances in fabrication methods for flexible antennas in wearable devices: State of the art. *Sensors*, vol.19, no.10, p. 2312.

Musa, U., Shah, S.M., Majid, H.A., Abidin, Z.Z., Yahya, M.S., Babani, S., Yunusa Z. 2022. Recent advancement of wearable reconfigurable antenna technologies: A review. *IEEE Access Journal*, volume 10, 121831-121862.

Naoui, S., Latrach, L., Gharsallah, A. 2014. Nested metamaterials antenna for Rfid Traceability. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.56, no.7, p.1622- 1626.

Naoui, S., Latrach, L., Gharsallah, A. 2015. Improvement Rfid antenna by using nested split ring resonators. Conference Microwave Techniques (COMITE), pp.1-5, April, Pardubice, Czech Republic.

Odabasi, H., Teixeira, F.L. and Guney, D.O. 2013. Electrically small complementary electric field coupled resonator antennas. *Journal of Applied Physics*, vol.113, issue:8, 084903.

Osman, M.A.R., Rahim, M.K.A., Samsuri, N.A., H. A. M. Salim, H.A.M. and Ali, M.F. 2011. Embroidered fully textile wearable antenna for medical monitoring applications. *Prog. Electromagn. Res.*, vol.117, pp. 321–337.

Ozbey, B. and Eibert, T.F. 2021. Wireless non-destructive moisture content characterization of trees by highly –sensitive compact resonating probes. *IEEE Sensors Journal*, vol.21, issue:5, p:6125-6132.

Ozbey, B., Erturk, V.B, Kurc, O., Altintas, A. and Demir, H.V. 2016. Multi point single antenna sensing enabled by wireless nested split- ring resonator sensors. *IEEE Sensors Journal*, vol.16, no.21, p.7744-7752.

Ozbey, B. 2023. A novel alternative in wireless and passive sensing: The bended nested split -ring resonator. *Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Ser.* A2-A3, vol:65, No:2, pages: 152-165.

Ozbey, B., Unal, E., Ertugrul, H., Kurc, O., Puttlitz, C.M., Erturk, V.B., Altintas, A. and Demir, H.V. 2014. Wireless displacement sensing enabled by metamaterial probes for remote structural health monitoring. *Open Access Sensors*, vol.14. p.1691-1704.

Pandimadevi, M., Tamilselvi R., Beham M.P. 2021. Design and simulation of flexible jute antenna with performance validation on bending and soaking conditions. *Textile Research Journal*, Vol.91(1-2) 219-231.

Pervez, F., Qadir, J., Khalil, M., Yaqoob, T., Ashraf, U. and Younis, S. 2018. Wireless technologies for emergency response: A comprehensive review and some guidelines. *IEEE Open Access Journal*, vol.6, pp. (99):1-1.

Phan, H.P. 2018. Design of 2D and 3D antennas on flexible materials,''PhD. dissertation, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, 196 p.

Rao, K.V.S., Nikitin, K.V.S. and Lam, S.F.M. 2005. Antenna design for UHF RFID tags: A review and a practical application. *IEEE Trans Antennas Propag*. Vol.53, issue:12, p.3870–3876.

Razak, A., Rahim, M.K.A., Majid, H.A., Murad, N.A. 2017. Frequency reconfigurable epsilon negative metamaterial antenna based on coupled electric field resonator. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* Vol.7, No.3, June 2017, p.1473-1479.

Regina, S., Merline, A. 2021. Flexible leather substrate dual band wearable antenna with impact analysis on testing under wet conditions for human rescue system. *Textile Research Journal*, vol.91(17-18): 1927-1942.

Roshni S.B., Jayakrishnan M.P., Mohanan P., and Surendran, K.P. 2017. Design and fabrication of an E-shaped wearable textile antenna on PVB-coated hydrophobic polyester fabric. *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 10(8 pp).

Roy, S., Ghosh, S., Pattanayak S.S., Chakarborty, U. 2020 a. Dual polarized textile based two/four element MIMO antenna with improved isolation for dual wideband application. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol.30, issue 9, e22292.

Roy, S., Guru, S., Debnath, S. 2020 b. Design and performance analysis of textile antennas for wearable applications. *2020 Advanced Communication Technologies and Signal Processing (ACTS)*, Silchar, India, pp.1-4.

Salonen, P. 2001. A low-cost 2.45 GHz photonic band-gap patch antenna for wearable systems. Proc. 11th Int. Conf. Antennas Propag. (ICAP), pp. 719–723.

Samal P.B., Chen S.J. and Fumeaux C. 2023. Wearable textile multiband antenna for WBAN applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propogation*, Vol.71, No.2.

Schaubert, D.H., Farrar, F.G., Hayes, S.T. and Sindoris, A.R. 1983. Frequency agile polarization diversity microstrip antennas and frequency scanned arrays. *U.S. Patent* 4367474.

Shamim, A. 2017. 3D inkjet printed flexible and wearable antenna systems. International Symposium on Antennas Propagation. (ISAP), pp. 1–2, Phuket, Thailand.

Sharma D, Tiwari R.N, Kumar S, Sharma S. and Matekovits, L. 2024. A Compact wearable textile antenna for NB- IoT and ISM band patient tracking applications. *Sensors*, 24, 5077.

Sharma, N., Goen, A. 2015. Circularly polarized square patch antenna with trimmed corners using textile material. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol.4, 422-426.

Sharma, N.H., Garg, A.A., Gupta, A.A., Pal, J. and Agrawal, A. 2022. A review on wearable microstrip antenna. 2nd International Conference on "Advan. in Elec. and Commun. Engineer (AECE 2022), pp. 600–607, July 14-15.

Singh, V.K., Dhupkariya, S., Bangari, N. 2017. Wearable ultra wide dual band flexible textile antenna for WiMax/WLAN application. *Wireless Pers. Commun.,* vol.95, no.2, pp. 1075-1086.

Suikkola, J., Björninen, T., Mosallaei, M., Kankkunen, T., Iso-Ketola, P., Ukkonen, L., Vanhala, J. and Mäntysalo, M. 2016. Screen-printing fabrication and characterization of stretchable electronics. *Sci. Rep.,* vol. 6, no. 1, pp. 1–8.

Thaiwirot, W., Hengroemyat, Y., Kaewthai, T., Akkaraekthalin, P., and Chalermwisutkul S. 2024. A dual band low SAR microstrip patch antenna with jean substrate for WBAN applications. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering,* volume 2024, article ID 5076232.

Veselago, V.G. 1968. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic properties. *Sov. Phys. Usp*., p.509-517.
Wang, Y., Yan, C., Cheng, S.Y. and Xu, Z.Q. 2019. Flexible RFID tag metal antenna on paper-based substrate by inkjet printing technology,'' *Adv. Funct. Mater*., vol. 29, no. 29, Art. no. 1902579.

Wang, Z., Lee, L.Z., Psychoudakis, D. and Volakis, J.L. 2014. Embroidered multiband body-worn antenna for GSM/PCS/WLAN communications. *IEEE Trans. Antennas Propag.,* vol. 62, no. 6, pp. 3321–3329.

Wang, Z., Volakis, J.L. and Kiourti, A. 2015. Embroidered antennas for communication systems. Electronic Textiles. Cambridge, U.K Woodhead, pp. 201–237.

Xu, B., Eike, R.J., Cliett, A., Ni, L., and Li, Y. 2019. Durability testing of electronic textile surface resistivity and textile antenna performance. *Textile Research Journal*, vol. 89, no. 18, pp. 3708-3721.

Yadav, A., Singh, V.K., Bhoi, A.K., Marques, G., Zapirain, B.G., Dıˊez, I.T. 2020. Wireless body area networks: UWB wearable textile antenna for telemedicine and mobile health systems. *Micromachines,* vol.11, no.6, p.558.

Yadav, A., Singh, V.K, Yadav, P., Beliya, A.K., Bhoi, A.K. and Barsocchi, P. 2020. Design of circularly polarized triple-band wearable textile antenna with safe low SAR for human health. *Electronics,* vol.9, no.9, p. 1366.

Zhang, S., Seager, R., Chauraya, A., Whittow, W. and Vardaxoglou Y., 2014. Textile manufacturing techniques in RF devices. Proc. Loughborough Antennas Propag. Conf. (LAPC), pp. 182–186, 29 December.

Zhang, S., Whittow, W., Seager, R., Chauraya, A. and Vardaxoglou, J.Y.C. 2017. Non-uniform mesh for embroidered microstrip antennas. *IET Microw., Antennas Propag.*, vol.11, no.8, pp.1086–1091.

Zhou, L., Fang, S., Jia, X. 2020. Dual-band and dual-polarised circular patch textile antenna for on-/off-body WBAN applications. *IET Microw., Antennas Propag.*, vol.14, no.7, pp. 643-648.

ÖZGEÇMİŞ

Güzin TEKNECİ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 1990-1995	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi 1995-Devam Ediyor	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik Haberleşme Teknolojisi Programı, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Tekneci, G., Cinar, A., Gorgun, A.R. and Basaran, C. 2025. Dual-band compact textile antenna design based on nested split-ring resonators. *International Journal of Electronics and Communications,* volume 191(5-6):155654. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155654