

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RADAR SOĞURUCU KUMAŞ TASARIMI VE
ELEKTROMANYETİK KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz ÇİĞDEM

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : Dr.Öğr.Üyesi Muhammet Hilmi NİŞANCI

Ocak 2021

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Yılmaz ÇİĞDEM

30/12/2020

TEŞEKKÜR

Bugüne kadar üzerimde emeği geçen tüm öğretmenlerime ve öğretim elamanlarına teşekkür ederim. Ayrıca Yüksek Lisansa baŐladığım tarihte İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Dođa Bilimleri Fakóltesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanları olan Prof. Dr. Emin Ünal ve Doç. Dr. Muharrem Karaarslan'a, danışman hocam Doç Dr. Ođuzhan Akgöl'e ve diğer bölüm hocalarıma, çok değerli mesai arkadaşşıma çok teşekkür ederim.

Yatay geçişte ve sonrasında her türlü desteklerinden dolayı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Ertan Yanıkoğlu Hocam'a, gerek tezle alakalı gerekse usulle alakalı bana büyük desteği olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hilmi Nişancı Hocam'a teŐekkürlerimi ve minnettarlığımı saygılarımla sunarım.

Eğitim öğretim süresince sabırla beni destekleyen aileme, Sakarya Üniversitesinin diğer akademik ve idari birimlerine de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	1
BÖLÜM 2.	
TEMEL İFADELER	5
2.1. Elektromanyetik Dalga Yaklaşımları	7
2.1.1. Ortamın öz empedansı	7
2.1.2. Yayılma sabiti.....	8
2.1.3. Deri kalınlığı.....	8
2.1.4. Ekranlama Özelliği.....	9
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Tasarım ve Benzetim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler.....	11
3.2. Üretim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler.....	12
3.3. Elektriksel Testler için Kullanılan Gereç ve Yöntemler.....	12

BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI	16
BÖLÜM 5.	
SONUÇ	29
KAYNAKÇA	30
ÖZGEÇMİŞ	34

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Soğurma katsayısı
\vec{B}	: Manyetik akı yoğunluğu
\vec{D}	: Elektrik akı yoğunluğu
\vec{E}	: Elektrik alan şiddeti
EM	: Elektromanyetik
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
\vec{H}	: Manyetik alan şiddeti
\vec{j}	: Akım yoğunluğu
MTM	: Metamalzeme
SE	: Ekranlama etkinliği
SHM	: Tek negatif malzeme
R	: Yansıma katsayısı
T	: İletim katsayısı
δ	: Deri kalınlığı
γ	: Yayılma sabiti
α	: Zayıflama sabiti
β	: Faz sabiti
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
μ_r	: Bağıl geçirgenlik
σ	: İletkenlik
ω	: Açısal frekans
ρ_s	: Yüzey yük yoğunluğu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektromanyetik yayılım.....	5
Şekil 2.2. Elektromanyetik dalganın bir malzeme ortamında yayılımı.....	10
Şekil 3.1. Radar soğurucu kumaşın prototip üretim aşamaları.	12
Şekil 3.2. Neopren kumaşın frekansa bağlı kompleks dielektrik geçirgenliği ölçüm düzeneği.....	13
Şekil 3.3. Radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma ve iletim parametre ölçümleri.....	14
Şekil 3.4. VNA'nın (a) short-open-load ve (b) thru yöntemi ile kalibrasyonu.....	14
Şekil 3.5. Kavisli soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma parametre ölçümleri.....	15
Şekil 4.1. Dairesel şekilli yama dizisi içeren radar soğurucu kumaş tasarımı.	16
Şekil 4.2. Dairesel şekilli yama dizisi içeren radar soğurucu kumaşın tasarım parametreleri (a) perspektif görünüş, (b) ön görünüş.....	17
Şekil 4.3. Radar soğurucu kumaş tasarımının nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim (T), yansıma (R) ve emilim (A) parametre değerleri.....	18
Şekil 4.4. Elektromanyetik dalganın farklı geliş açıları ve polarizasyonları	19
Şekil 4.5. Elektromanyetik dalganın farklı geliş açlarına karşılık radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma katsayıları.	19
Şekil 4.6. Elektromanyetik dalganın farklı polarizasyonlarına karşılık radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma katsayıları.	20
Şekil 4.7. Radar soğurucu kumaşın çalışma frekans değerindeki 2D yüzey akım dağılımı.....	20
Şekil 4.8. Dairesel şekilli yamaların farklı birim eleman uzunlukları için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.....	21

Şekil 4.9. İletken yamalar arasındaki farklı boşluk genişlikleri için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.....	22
Şekil 4.10. Dielektrik alttaşın farklı kalınlıkları için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.....	23
Şekil 4.11. Alttaşın farklı bağıl dielektrik geçirgenlikleri için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.....	23
Şekil 4.12. Radar soğurucu kumaşın kavisli yapılar üzerine konumlandırılması...	24
Şekil 4.13. Kavisli yapılar üzerine konumlandırılan radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma katsayıları.....	25
Şekil 4.14. Neopren kumaşın frekansa bağlı kompleks dielektrik geçirgenliği.....	25
Şekil 4.15. Radar soğurucu kumaşın elektriksel testler sonucu elde edilen yansıma parametrelerinin nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	26
Şekil 4.16. Kavisli yapılar üzerine konumlandırılan radar soğurucu kumaşın elektriksel testler sonucu elde edilen yansıma parametrelerinin nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması.....	27

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Maxwell denklemleri ve açıklamaları.....	6
Tablo 4.1. Dairesel şekilli yama dizisi içeren radar soğurucu kumaşın tasarım parametre değerleri.	17
Tablo 4.2. Radar soğurucu kumaşın parametre analizlerinde kullanılan değerler..	21
Tablo 4.3. Farklı tasarım parametre değerlerine karşılık radar soğurucu kumaşın elektriksel karakteristikleri.....	24
Tablo 4.4. Elektriksel testler sonucu elde edilen yansıma parametre değerlerinin nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması.	28

ÖZET

Anahtar kelimeler: Radar emici kumaş, Metamalzemeler, Frekans seçici yüzeyler

Radar emiciler, üretim sistemleri ve teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak günümüzde başta elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference, EMI), elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility, EMC), radar kesit alanınının (Radar cross section, RCS) azaltılması, gizlilik teknolojisi vb. birçok sivil ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Radar emiciler gelen dalganın elektrik ve/veya manyetik alanlarını ısıya dönüştürerek yansıyan elektromanyetik enerjiyi bastırmak için özel olarak tasarlanmış metamalzemelerdir. Tez çalışmasında merkez çalışma frekans değerinde band durduran filtre karakteristiğine sahip neopren kumaş üzerine konumlandırılmış dairesel şekilli iletken yama dizisi içeren radar soğurucu kumaş tasarımı yapılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak elektromanyetik dalganın farklı geliş açılara ve polarizasyonlarına karşılık radar soğurucu kumaşın elektriksel performansı incelenmiş ve normal elektromanyetik dalga uyarımı için soğurucu kumaşın çalışma frekans değerindeki iki boyutlu (2D) yüzey akım dağılımı analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca tasarım parametre değerlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin irdelenmesi amacıyla parametre analizleri yapılmıştır. Elektriksel testlere başlamadan önce son olarak tasarımları yapılan radar soğurucu kumaşın dışbükey şekilli kavisli yapılar üzerindeki elektriksel performansı incelenmiştir. Nümerik analiz sonuçlarının doğruluklarının gösterilmesi için tez çalışmasına radar soğurucu kumaşın prototip üretiminin yapılması ile devam edilmiştir. Prototip üretimi tamamlanan soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma parametre değerleri serbest uzay ölçüm düzeneği kullanılarak ölçülmüş ve elde edilen ölçüm sonuçlarının nümerik analiz sonuçlarını doğruladıkları görülmüştür.

RADAR ABSORBENT FABRIC DESIGN AND ELECTROMAGNETIC CHARACTERIZATION

SUMMARY

Keywords: Radar absorber fabric, Metamaterials, Frequency selective surfaces.

Due to the developments in production systems and related technologies regarding Radar Absorbers, they are widely used in many civil and military applications; such as electromagnetic interference (Electromagnetic Interference, EMI), electromagnetic compatibility (EMC), reduction of radar cross-section areas, (RCS), and privacy technology, etc. Radar absorbers are metamaterials specially designed to suppress the reflected electromagnetic energy by converting the electric and / or magnetic fields of the incoming wave into heat. In this study, a radar absorbing fabric with a circular shaped conductive patch array positioned on a neoprene fabric with a band-stopping filter characteristic at the central operating frequency was designed. Within the scope of the study, firstly, the electrical performance of the radar absorbent fabric was examined against the different angles and polarizations of the electromagnetic wave, and the two-dimensional (2D) surface current distribution in the operating frequency of the absorber fabric for normal electromagnetic wave stimulation was analysed. In addition, parameter analyses were also carried out in order to investigate the effects of design parameter values on operating frequency. Before starting the electrical tests, at the final stage, the electrical performance of the designed radar absorber fabric on the convex shaped curved structures was examined. In order to demonstrate the accuracy of the results of the numerical analysis, the study continued with the prototype production of the radar absorbent fabric. The frequency-dependent reflection parameter values of the absorbent fabric, whose prototype production was completed, were measured using a free space measurement mechanism and it was observed that the obtained measurement results confirmed the numerical analysis results.

BÖLÜM 1. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Metamalzemeler, plastik ve metal gibi geleneksel malzemeler kullanılarak yeni veya geliştirilmiş özellikler sergilemek üzere tasarlanmış yapay malzemelerdir. Metamalzemeler için geliştirme stratejileri ışığı ve radyo dalgalarını doğal olarak asla mümkün olmayan şekillerde manipüle ederek alışılmadık elektromanyetik özellikler üreten yapılara odaklanır. Bu yapılar genellikle optik filtreler, tıbbi cihazlar, uzak havacılık uygulamaları, sensör algılama ve altyapı izleme, akıllı güneş enerjisi yönetimi, kalabalık kontrolü, radomlar, yüksek frekanslı savaş alanı iletişimi ve yüksek kazançlı anten uygulamaları gibi birçok sivil ve askeri alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Metamalzemelerin tarihi, II.Dünya Savaşı'ndan hemen sonra gelişen mikrodalga mühendisliğinde yapay dielektriklerle başlar. 1968 yılında V. Veselago bir ortama ait dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin aynı anda negatif bir değer alabileceği konusundaki teorisini ortaya atmıştır ancak bu teori uzun yıllar boyunca araştırmacıların ilgisini çekmemiştir (Veselago, 1968). 1996 yılında bir grup araştırmacı bir ortama ait dielektrik ve manyetik geçirgenlik sabitlerini negatifleştirmek için ince bir şerit tel kümesi kullanarak deneyler yapmışlardır. Yapılan çalışma ile negatif dielektrik sabiti üretmeyi başarmışlardır ancak ince tel dizileri kullanılarak ürettikleri bu negatif dielektrik sabitli malzeme Tek Negatif Malzemelerin (SHM) temelini oluşturmuştur (Pendry ve ark, 1996). 1999 yılına gelindiğinde ayrık halka rezonatör (SRR) kullanılarak bir ortama ait negatif manyetik geçirgenlik sabiti elde edilmiştir (Pendry ve ark,1999). Metamalzemelere ait ilk tek boyutlu deneysel çalışmayı Smith ve ark. 2000 yılında yapmışlardır ve bu çalışma ileriki yıllarda yapılacak MTM çalışmaları için öncü niteliğinde olmuştur (Smith ve ark, 2000a). Shelby ve ark. iki ayrık halka rezonatör ve düz bir iletken tel ile oluşturulan birim hücrelerin bir araya gelmesi ile elde edilen ortam ile hem negatif

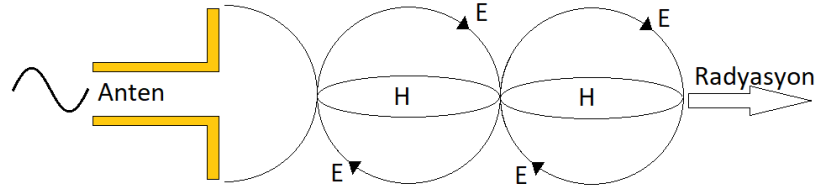
dielektrik katsayısı hem de negatif manyetik geçirgenlik katsayısı elde etmişlerdir. Oluşturulan bu MTM yapısı ile deneyler yapılarak negatif kırılma indisi (NIM) özelliği saptanmış ve Maxwell Denklemleri doğrulanmıştır (Shelby ve ark, 2001). 2003 yılında Ziolkowski tarafından yapılan çalışma ile Sol Elli Metamalzemelerin (LHM) ya da başka bir deyişle Çift Negatif Malzemelerin (DNM) tasarımı, üretimi ve test edilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Ziolkowski, 2003). Engetha ve Ziolkowski, DNM ortamlar üzerine detaylı çalışmalar yapmışlardır (Engetha ve Ziolkowski 2006). 2006 yılında Schuring ve ark. dar bir frekans bant bölgesinde görünmezlik pelerinin prensip olarak mümkün olduğunu teorik olarak ileri sürmüşlerdir (Schuring ve ark. 2006). Majid ve ark., mikroşerit yama anten ile kesikli kare daire MTM'leri birleştirmişler ve bu birleşim ile 2.1 GHz frekansındaki mikroşerit yama antenin performansını önemli bir ölçüde iyileştirmişlerdir (Majid ve ark. 2007). 2008 yılına gelindiğinde Erentok ve Ziolkowski, kolay tasarlanan ve test edilebilen MTM tabanlı küçük elektriksel anten yapıları üretmişler ve testlerini yapmışlardır (Erentok ve Ziolkowski 2008). Landy ve ark. tek bir birim hücre tabakasının tüm ışınım emilimini sağlayacak şekilde tasarımını yapmışlardır, yapılan bu tasarım sonucunda mükemmel sinyal emilimi yapıldığı görülmüştür. Çift rezonatör yapısının bulunduğu bu çalışma için 11-12GHz bantı seçilmiştir ve simülasyon çalışmaları deneysel çalışmalarla da desteklenmiştir (Landy ve ark. 2008). 2008 yılında Tao ve ark. tarafından yapılan çalışma ile elektrik ve manyetik geçirgenlik sabiti birbirinden bağımsız bir şekilde ayarlanmıştır ve 1,3THz frekansında iyi bir emilim yapan bir yapı oluşturulmuştur (Tao ve ark. 2008). Melik ve ark. (2009a), SRR yapıları kullanarak MTM tabanlı kablosuz gerinim sensörü yapısı tasarlamışlardır (Melik ve ark. 2009a). 2010 yılında Tao ve ark. 1,4THz ve 3,0THz frekans bölgelerinde sırasıyla %85 ve %94'lük sinyal emilimi yapabilen çift bantlı bir sinyal emici tasarımını yapmıştır. Bu çalışmanın öne çıkan özelliği ise tasarlanan sinyal emici yapısının imalatının da gerçekleştirilmesi ve deneysel olarak desteklenmesidir (Tao ve ark. 2010). Zhu ve ark. yaptıkları çalışma ile ayarlanabilir bir MTM yapısının emilim ve yansımaya elektromanyetik bir dalganın polarizasyon modülasyon şemasını önermişlerdir. Diyotların kullanıldığı bu çalışma ile EM dalgaların, rezonant frekansta 0 ile 90 derece arasında sürekli olarak ayarlanabilirliği kanıtlanmıştır (Zhu ve ark. 2010). 2011 yılında Chao ve ark. çok bantlı MTM sinyal emici yapısını başarı ile

üretmişlerdir. Geliştirdikleri bu emici yapısı 1,69, 2,76, 3,41 ve 5,06THz frekanslarında gelen dalgaları toplama kapasitesine sahiptir. Ayrıntılı şekilde inceledikleri MTM yapısının mükemmel bir dalga emici olduğunu göstermişlerdir (Chao ve ark. 2011). Sun ve ark. çok katlı kesikli halka rezonatör yapıları ile geniş bir frekans aralığına sahip bir MTM yapısı geliştirmişlerdir. Geliştirilen MTM yapısı yaklaşık 60GHz'lik ultra geniş bantlı bir emici özelliğine sahiptir. Yapılan bu geniş bantlı MTM tasarımının gizli teknolojilerde kullanılmak üzere geliştirilecek iletim cihazlarında kullanılabilirliğine değinilmiştir (Sun ve ark. 2011). Lee ve Lim, çift rezonantlı metamalzeme yapısı ile bant genişliği arttırılmış mikrodalga emici yapısını literatüre kazandırmışlardır. Geliştirilen emici yapısı önceki çalışmalara göre daha iyi performans göstermektedir ve polarizasyondan bağımsız olarak sinyal emilimini geniş bir bant aralığında yapmaktadır. Deneysel çalışma ile de bu emicinin performansını desteklemişlerdir (Lee ve Lim 2011). Jun ve ark. X-band frekans bölgesinde çalışan ve dikdörtgen dalga kılavuzu içerisine uygun olacak şekilde altı farklı MTM sinyal emici yapısı tasarlamışlardır ve üretmişlerdir. Yapılan bu çalışma ile metamalzeme yapılarının mikrodalga frekanslarında uyumlu sonlandırmalar için kullanılmasını öngörmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, geliştirilen altı farklı metamalzeme yapısının tümünün serbest alan içinde %98 civarında emilim yaptığı görülmüştür (Jun ve ark. 2012). Abdalla ve Hu 2012 yılında yaptıkları çalışma ile X bandında çalışan bir metamalzeme tabanlı radar sinyal emici yapısı tasarlamışlardır. Yüksek empedansa sahip metamalzeme yapısının kullanıldığı bu çalışmada bant genişliğinin 8 kat arttığını ispatlamışlardır (Abdalla ve Hu 2012). Alves ve ark. 2013 yılında 3,8THz frekans bandında farklı konfigürasyonlara sahip sensör yapıları geliştirmişlerdir ve karakterizasyonunu yapmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda sensörlerdeki emilim miktarının %100 noktasına çıktığı gözlenmiştir (Alves ve ark. 2013). Ebrahimi ve ark. 2014 yılında yaptıkları çalışmada metamalzemelerden esinlenerek mikrodalga frekansı için mikro-akışkan sensör yapısı geliştirmişlerdir (Ebrahimi ve ark. 2014). Lalj ve ark. tarafından 2015 yılında polarizasyon bağımsız sinyal emici ve enerji hasatlayıcı yapısının literatüre sunmuşlardır. Yapılan bu çalışmada 10GHz merkez frekansında çalışan metamalzeme tabanlı sinyal emici yapısı geliştirilmiştir ve enerji hasatlayıcı uygulamaları için yüksek verimli bir çözüm sunmaktadır (Lalj ve ark. 2015). Benzer olarak 2016 yılında Cheng ve ark. metamalzeme tabanlı olarak

polarizasyon bağımsız sinyal emici yapısı geliştirmişlerdir ve enerji hasadı uygulamasını yapmışlardır (Cheng ve ark. 2016). Küçük metal rezonatörlerin bulunduğu periyodik metamalzeme hücre yapıları ile gelen sinyalin büyük çoğunluğunun emildiği çalışma literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmada, gelen dalganın bir kısmının ısıya diğer kısmının da emilip elektrik enerjisine dönüştürmesi ile kullanılabilir elektrik enerjisi açığa çıkmıştır. Schottky diyotlarla da gerilim doğrultma işlemi gerçekleştirilmiştir (Xie, 2016). 2016 yılında yapılan bir çalışmada yopun bir EM kirliliğinin olduğu bölgelere metamalzeme tabanlı sinyal emici yapıları ile enerji hasatı başarı ile yapılmıştır (Mulaimoğlu ve ark, 2016). 2017 yılında Karaaslan ve Ark. çok katmanlı SRR yapısını ile çok bantlı elektromanyetik dalga emici ve enerji hasatlayıcı yapısını literatüre kazandırmışlardır. Önerilen bu sinyal emici yapı metamalzeme tabanlıdır ve WIMAX, WLAN ve uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabilir bir düzeydedir. Geliştirilen metamalzeme tabanlı sinyal emicinin emilim özelliği açı bağımsızdır ve %90'ın üzerindedir. Ayrıca bu yapının enerji hasadı uygulaması da bu çalışmada verilmiştir (Karaaslan ve ark. 2017). 3-8 GHz band aralığı için metamalzeme tabanlı sinyal emici yapısı 2017 yılında Akgol ve ark. tarafından geliştirilmiştir ve bu geliştirilen yapı ile aynı zamanda enerji hasatı da yapılabilmektedir. Bu metamalzeme tabanlı yapı üç farklı dairesel rezonatörden oluşmaktadır ve bu sayede çok geniş bir bant elde edilmektedir (Akgol ve ark, 2017). Huang ve ark. 2018 yılında grafen metamalzeme tabanlı çift bantlı sinyal emici yapısını THz frekansları için geliştirmiştir. Geliştirilen sinyal emici yapısı 0,85-1,01THz ve 2,84-3,37THz aralığında ayarlanabilir rezonans özelliğine sahiptir (Huang ve ark. 2018). Benzer olarak Zhang ve ark. 2019 yılında anahtarlanabilir çift bantlı metamalzeme tabanlı sinyal emici yapısını 3,5-4,1THz frekans aralığı için geliştirmişlerdir ve tasarım aşamasında metal nano yapılar kullanmışlardır (Zhang ve ark. 2019).

BÖLÜM 2. TEMEL İFADELER

Elektromanyetik teoride bulunan temel yaklaşım, zamanla değişen bir akım veya gerilim kaynağının zamanla değişen elektrik ve manyetik alan oluşturmasıdır. Buna göre Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi bir anten elemanına zamanla değişen bir gerilim uygulandığında zamanla değişen aynı frekanslı ve tekrar eden bir radyasyon meydana gelmektedir. Bu radyasyonun iki bileşeni elektrik alan şiddeti \vec{E} ve manyetik alan şiddeti \vec{H} 'dir.



Şekil 2.1. Elektromanyetik yayılım.

Şekil 2.1.'deki radyasyonun açıklaması James Clerk Maxwell tarafından formülüne edilmiş ve eşitliklerin genelleştirilmiş hali Tablo 2.1.'de verilmiştir. Tabloda verilen eşitliklerden ilki bir kapalı yüzeyden geçen elektrik akısının (\vec{D}) aynı yüzey tarafından çevrelenmiş net yük arasındaki ilişkiyi vermektedir ve bu eşitlik Gauss yasası olarak adlandırılmaktadır. İkinci eşitliğe göre ise kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı (\vec{B}) sıfırdır ve bu eşitlikte manyetik alan için Gauss yasası olarak bilinmektedir. Üçüncü eşitlik zamanla değişen manyetik akı olan bir bölgede elektrik alan şiddetinin korunumlu olmadığını gösteren Faraday yasasıdır. Dördüncü ve son eşitlik ise, zamanla değişen bir elektrik alanın serbest akım akışı olmadığında dahi ($\vec{J} = 0$) bir manyetik alan oluşturduğunu gösteren Amper devre yasasıdır.

Tablo 2.1. Maxwell denklemleri ve açıklamaları.

Diferansiyel Biçim	İntegral Biçim	Açıklamalar
$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint_s \vec{D} \cdot \vec{ds} = Q$	Gauss Yasası
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_s \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0$	Manyetik alan için Gauss Yasası
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}$	Faraday Yasası
$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{H} \cdot \vec{dl} = I + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \vec{ds}$	Amper Devre Yasası

Tablo 2.1.'de verilen eşitliklerde ρ_v serbest yüklerin hacim yük yoğunluğunu (C/m^3) gösterirken \vec{J} hacim akım yoğunluğunu (A/m^2) göstermektedir.

Bölüm 1'de açıklandığı gibi metalmalzemeye tasarımlarında genellikle plastik ve metal gibi farklı fiziksel ve elektriksel özellikleri olan ortamlar bir arada kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla, bu farklı ortamlar arasındaki elektromanyetik alanları analiz edebilmek için arayüzlerde alanların birbiri ile ilişkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla Tablo 2.1.'de verilen Maxwell denklemlerinin integral biçimleri farklı ortamlar arasındaki küçük bir bölgeye uyguladığında elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin teğet bileşenleri ile elektrik ve manyetik akı yoğunluklarının normal bileşenleri için sınır koşulları sırasıyla Eşitlik 2.1.-Eşitlik 2.4.'te verildiği şekilde elde edilir.

$$E_{1t} = E_{2t} \text{ (V/m)} \quad (2.1)$$

$$\hat{a}_{n2} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \text{ (A/m)} \quad (2.2)$$

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (2.3)$$

$$B_{1n} = B_{2n} \text{ (T)} \quad (2.4)$$

Eşitliklerde ρ_s ve \vec{J}_s sırasıyla arayüz üzerindeki kapalı yüzeyin yüzey yük yoğunluğu (C/m^2) ve kapalı çevrime dik yüzeyin yüzey akım yoğunluğu (A/m) iken \hat{a}_{n2} ikinci

ortamdan dışarı doğru birim normaldir. Yukarıda verilen eşitlikler incelendiğinde herhangi iki ortam arasındaki arayüzde \vec{E} 'nin teğet bileşeni ile \vec{B} 'nin normal bileşeninin sürekli olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

2.1. Elektromanyetik Dalga Yaklaşımları

2.1.1. Ortamın öz empedansı

Bilindiği gibi elektromanyetik bir dalganın oluşabilmesi için bir kaynağa ihtiyaç vardır ve elektromanyetik dalgalar bu kaynağın uzak alan bölgesinde düzlem dalga davranışı sergilemektedirler (Pozar, 2006). Bir düzlem dalganın empedansı (Z_w) elektrik alan bileşeni \vec{E} 'nin manyetik alan bileşeni \vec{H} 'ye oranı şeklinde tanımlanır ve Eşitlik 2.5.'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (2.5)$$

Ortama ait karakteristik empedans ise Eşitlik 2.6.'dan hesaplanır.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6. göz önüne alındığında yalıtkan malzemeler ($\sigma=0$) için dalga empedansının sadece ortamın manyetik ve elektrik geçirgenliklerine bağlı olurken frekanstan bağımsız olduğu görülmektedir. Ancak iletken malzemelerde empedans frekansa bağlıdır ve frekans ile doğru orantılı olarak değişirken iletkenlik ile ters orantılı olarak değişmektedir.

2.1.2. Yayılma sabiti

Bir elektromanyetik dalganın yayılma sabiti, verilen yönde yayılan dalganın belli bir uzaklıktaki genliğinin kaynağındaki genliğine oranı şeklinde tanımlanır ve Eşitlik 2.7.'de gösterildiği şekilde hesaplanır (Pozar, 2006).

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7.'de α ve β sırasıyla γ yayılma sabitinin reel ve imajiner kısımlarını gösterirler ve zayıflama sabiti (Np/m) ve faz sabiti (rad/m) olarak isimlendirilirler. Zayıflama sabiti ve faz sabiti sırasıyla Eşitlik 2.8. ve Eşitlik 2.9. kullanılarak hesaplanır.

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left[\frac{1}{2}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1\right]\right]^{1/2} \quad (2.8)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left[\frac{1}{2}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1\right]\right]^{1/2} \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.8. göz önüne alındığında kayıpsız bir ortamda ε'' 'nin değeri 0 olduğundan dolayı zayıflama katsayısının değerinin de 0 olacağı görülmektedir.

2.1.3. Deri kalınlığı

İlerleyen bir elektromanyetik dalganın genliğinin e^{-1} (0.368) çarpanı ile azaldığı mesafeye deri kalınlığı denir ve Eşitlik 2.10'da gösterildiği şekilde hesaplanır. Eşitlik 2.10. incelendiğinde deri kalınlığının hem frekansla hem de iletkenlikle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla yüksek frekanslarda alanların ve akımların iyi iletkenlerin yüzeyinde sınırlandığı kabul edilir (Cheng, 2015).

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.10)$$

2.1.4. Ekranlama Özelliği

Yayılan bir elektromanyetik girişimi ekranlama işlemi, elektromanyetik dalgayı bir malzemeyle emme veya geri yansıtma ile yapılmaktadır. Ekranlamadaki amaç girişim oluşturan elektromanyetik dalganın sistem içerisine girmesi engellenerek iki ortam arasındaki izolasyonun sağlanmasıdır. Problem oluşturabilecek istenmeyen elektromanyetik dalgaların olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi için gerekli olan ekranlama işlemi tasarlanan cihazın uygun şartlarda çalışması için oldukça önemlidir.

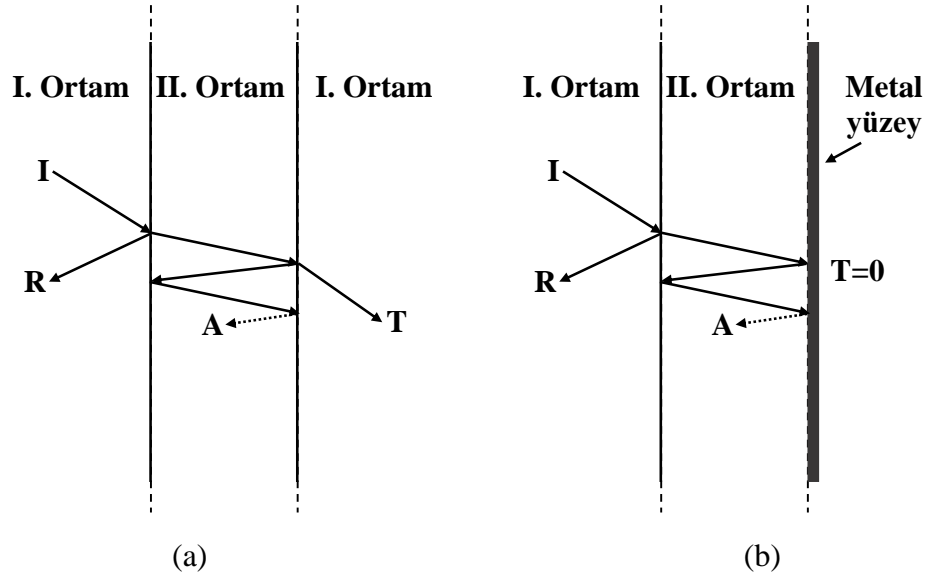
Herhangi bir ekranın performansı ekranlama etkinliği (SE-Shielding Effectiveness) değeri ile ifade edilir. Ekranlama etkinliği Eşitlik 2.11.'de verildiği gibi kaynak ile sistem arasında ekran yokken oluşan alan şiddetinin ($E_{ekransız}$), ekran varken oluşan alan şiddetine ($E_{ekranlı}$) oranına şeklinde hesaplanır.

$$SE = -20 \log_{10} \left(\frac{E_{ekransız}}{E_{ekranlı}} \right) \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11.'den yüksek ekranlama etkinliği değerinin yüksek izolasyon sağladığı görülmektedir.

Şekil 2.2.a.'da şematik olarak gösterildiği gibi bir elektromanyetik dalga bir ortam ile karşılaştığında ortam elektromanyetik dalgayı kısmen yansıtılabilir, iletilebilir veya soğurabilir. Ortamdan kaynaklanan yansıma (R), iletim (T) ve soğurma (A) parametrelerinin genlikleri toplamı bire eşittir. Ancak Şekil 2.2.b.'de gösterildiği gibi ekranlama yapmak amacıyla ortamın bir yüzeyi tamamen metal ile kaplandığında iletim parametrelerinin genlik değeri sıfıra eşit olur ve bu durumda yansıma ve soğurma parametrelerinin genlikleri toplamı bire eşittir.

$$T + R + A = 1 \quad (2.12)$$



Şekil 2.2. Elektromanyetik dalganın bir malzeme ortamında yayılımı.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tasarım ve Benzetim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler

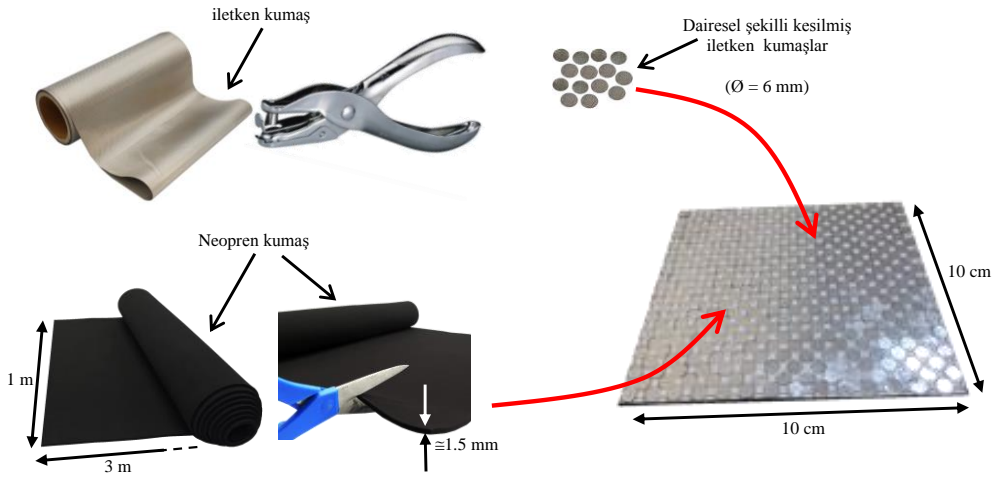
Tez çalışması kapsamında çalışma frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiğine sahip dairesel şekilli iletken yama dizisi içeren radar soğurucu kumaş tasarımları yapılmıştır. Tasarımlarda elektromanyetik (EM) bileşenleri ve sistemleri modellemek, analiz etmek ve optimize etmek için yüksek performanslı bir 3D EM analiz yazılım paketi olan CST Studio Suite® kullanılmıştır (Computer Simulation Technology, 2019). CST Studio Suite® içinde sonlu elemanlar yöntemi (finite element method, FEM), sonlu entegrasyon tekniği (Finite Integration Technique, FIT) ve iletim hattı matrisi (transmission-line matrix, TLM) gibi farklı yöntemleri kullanan çoklu EM simülasyon çözücülerini barındırır. Bu sayede farklı fiziksel ve elektriksel özelliklere sahip tasarımların hızlı ve etkili bir şekilde analiz edilmelerine olanak sağlar. CST Studio Suite® genelde EM analizinin ortak konuları arasında yer alan antenlerin ve filtrelerin performansı ve verimliliği, elektromanyetik uyumluluk ve girişim (EMC / EMI), insan vücudunun EM alanlara maruz kalması, motorlarda ve jeneratörlerde elektromekanik etkiler ve yüksek güçte termal etkiler gibi konularda daha kısa geliştirme döngüleri ve daha düşük maliyetler sağlayarak önemli sanal prototipleme avantajları sunar (Computer Simulation Technology, 2019).

Tez çalışmasında tasarımları yapılan radar soğurucuların filtre karakteristiklerinin nümerik olarak belirlenmesi için frekans bölgesi çözümleyicisi kullanılmıştır. Ayrıca uzun analiz sürelerinden kaçınmak için elektrik alan vektör yönünde manyetik akıların teğet bileşenlerinin ve elektrik alanlarının normal bileşenlerinin sıfır olduğu mükemmel bir manyetik iletken sınır koşulu tanımlanırken manyetik alan vektör yönünde ise elektrik alanlarının teğet bileşenlerinin ve manyetik akıların normal

bileşenlerinin sıfır olduğu mükemmel bir elektrik iletken sınır koşulu tanımlanmıştır. Son olarak benzetim modeli 50 Ω 'luk düzlem dalga portu ile uyarılmıştır.

3.2. Üretim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler

Radar soğurucu kumaş tasarımının prototip üretimlerinde toprak iletkeni ile dairesel şekilli yama dizileri için 10 MHz-30 GHz frekans aralığında 70-90 dB ekranlama etkinliğine sahip %62 oranında polyester, %25 oranında bakır ve %13 oranında nikel malzemelerden oluşan 0,1 mm kalınlıkta iletken kumaş kullanılırken dielektrik alttaşı için ise 1.5mm kalınlığa sahip neopren kumaş kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak nümerik analizler sonucu elde edilen tasarım parametre değerlerine uygun olarak iletken kumaşlar kesilmiş daha sonra neopren kumaş üzerine benzetim modeline uygun olarak konumlandırılmışlardır. Radar soğurucu kumaşın üretim aşamaları Şekil 3.1.'de şematik olarak gösterilmiştir.



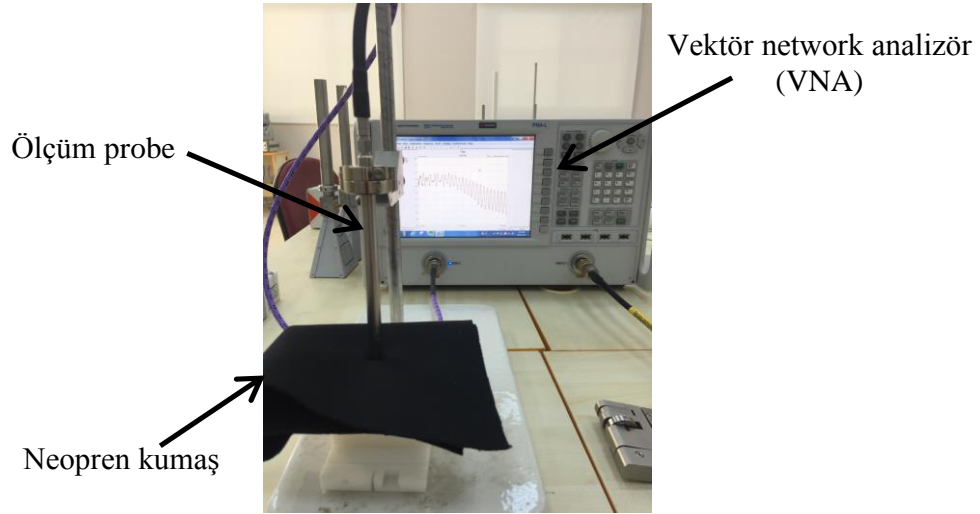
Şekil 3.1. Radar soğurucu kumaşın prototip üretim aşamaları.

3.3. Elektriksel Testler için Kullanılan Gereç ve Yöntemler

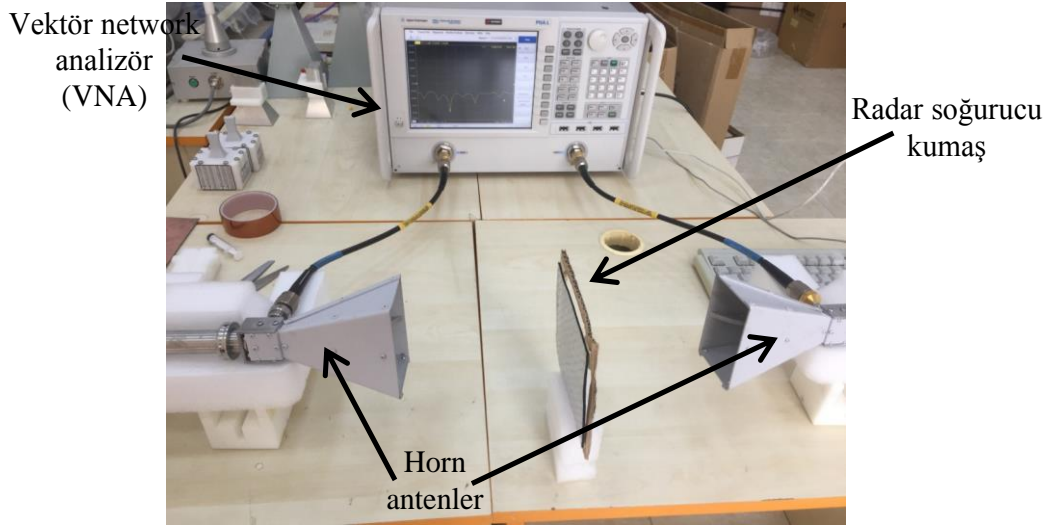
Prototip üretimleri tamamlanan radar soğurucu kumaşın elektriksel testlerine ilk olarak neopren kumaşın frekansa bağlı kompleks dielektrik geçirgenliğinin ölçülmesi ile başlanmıştır. Ölçümlerde Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi Agilent 85070E dielektrik ölçüm kiti ile birlikte 10 MHz to 43.5 GHz çalışma frekans aralığına sahip Agilent

N5234A PNA-L mikrodalga vektör network analizör (VNA) kullanılmıştır. Dielektrik ölçüm düzeneğine ait görsel Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

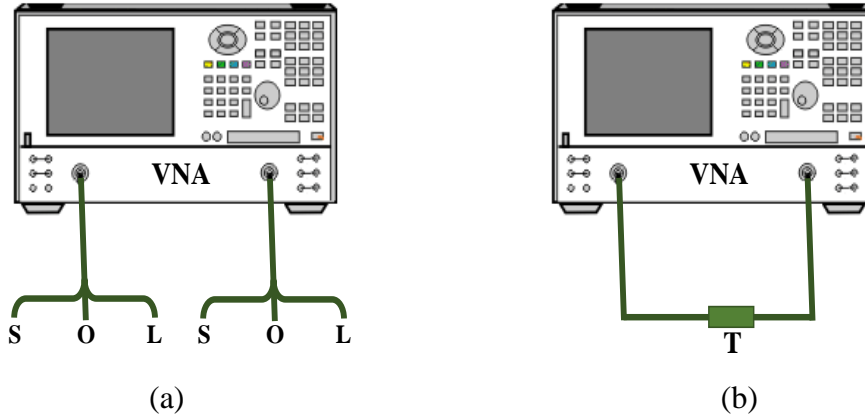
Prototip üretimleri tamamlanan radar soğurucu kumaşın elektriksel testlerine düzlemsel yapının frekansa bağlı yansıma ve iletim parametrelerinin ölçülmesi ile devam edilmiştir. Ölçümlerde Şekil 3.3.'te gösterilen serbest uzay ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Şekil 3.3.'ten açıkça görüldüğü gibi kumaşın yansıma ve iletim parametre ölçümleri VNA ve genişbant horn antenler yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Alıcı ve verici horn antenler radar soğurucu kumaşın her iki tarafına konumlandırılmış ve faz kararlılığına sahip 50 Ω 'luk yarı esnek koaksiyel kablolar ile VNA'ya bağlanmışlardır. Ölçümlere başlamadan önce Şekil 3.4.'te şematik olarak gösterildiği gibi VNA'nın kısa-açık-yük-direkt (short-open-load-thru, SOLT) yöntemi ile kalibrasyonu yapılmış daha sonra prototip üretimi tamamlanan düzlemsel radar soğurucu kumaşın yansıma parametreleri ölçülmüştür.



Şekil 3.2. Neopren kumaşın frekansa bağlı kompleks dielektrik geçirgenliği ölçüm düzeneği.

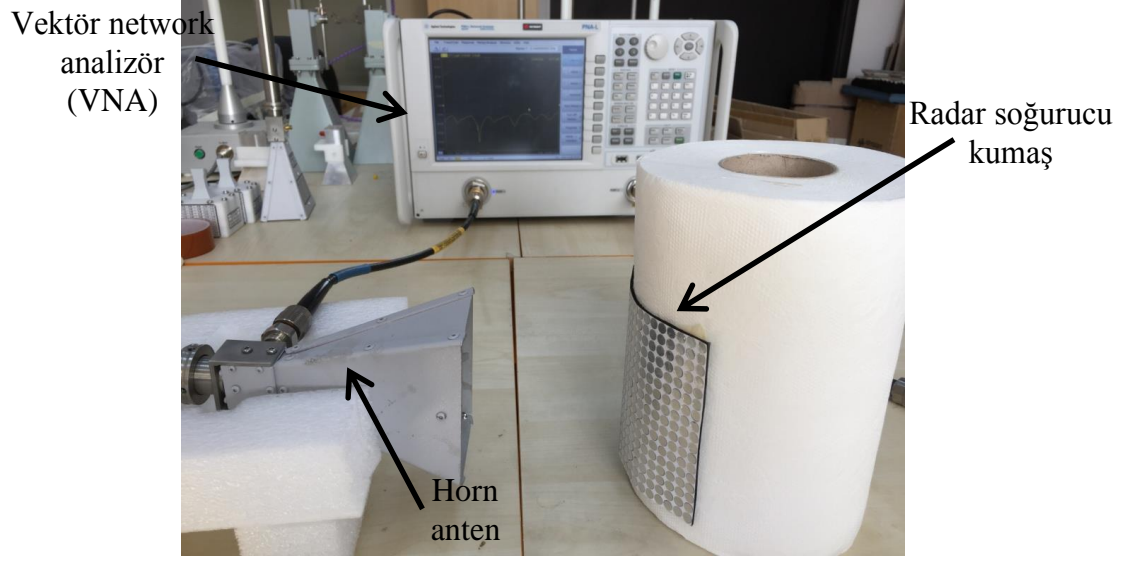


Şekil 3.3. Radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansımaya ve iletim parametre ölçümleri.



Şekil 3.4. VNA'nın (a) short-open-load ve (b) thru yöntemi ile kalibrasyonu.

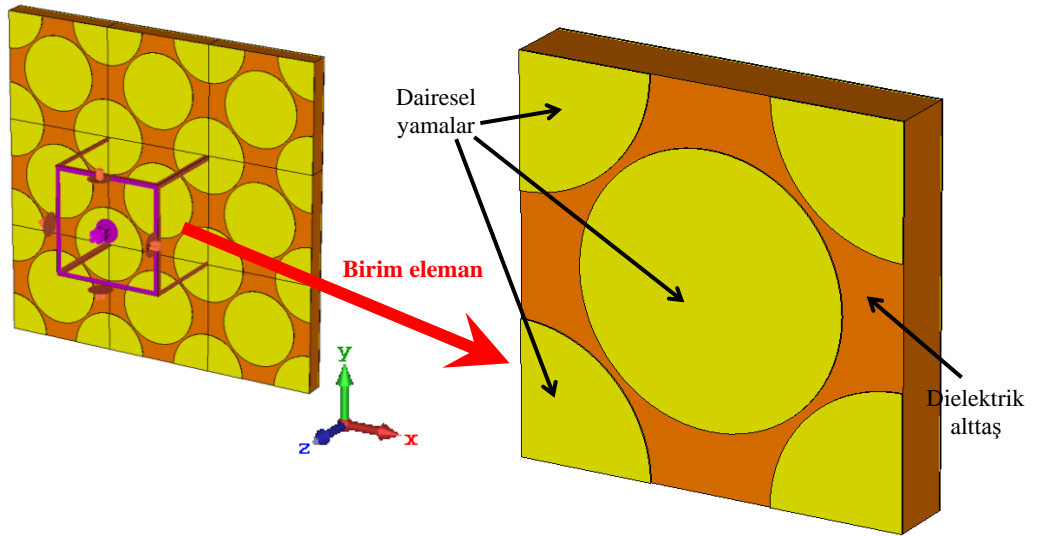
Prototip üretimleri tamamlanan radar soğurucu kumaşın elektriksel testlerinde son olarak dışbükey şekilli kavisli soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansımaya katsayısı ölçülmüştür. Elektriksel testlerde soğurucu kumaş Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi ortalama yarıçapı 8 cm olan kağıt rulo üzerine konumlandırılmıştır. Ölçümlerde kağıt rulonun tercih edilme sebebi hem kavisli yüzeye sahip olması hem de dielektrik geçirgenliğinin 1'e yakın olmasıdır.



Şekil 3.5. Kavisli soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansıma parametre ölçümleri.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

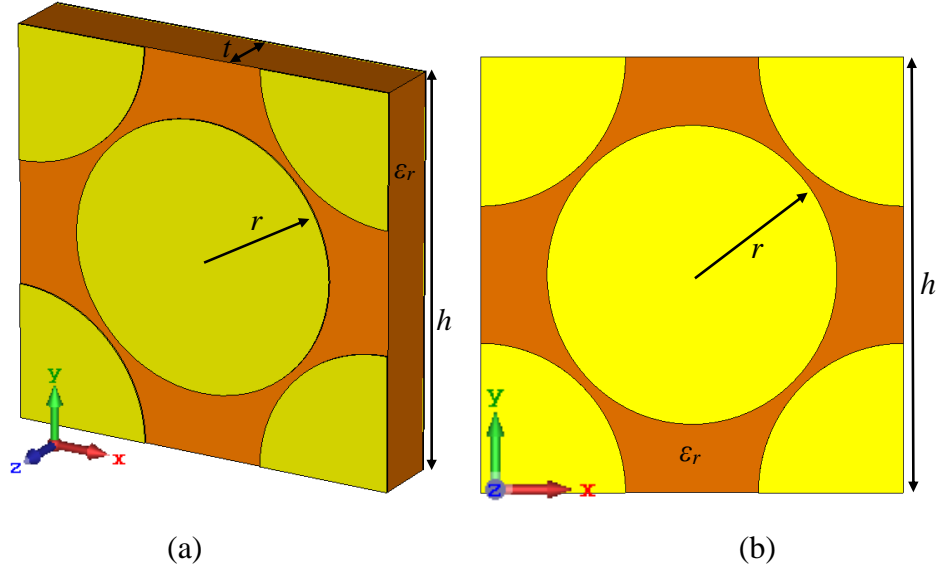
Tez çalışmasında Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi çalışma frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiğine sahip dairesel şekilli iletken yama dizisi içeren radar soğurucu kumaş tasarımı göz önüne alınmıştır. Bilindiği gibi dairesel yapılar simetrik şekillerinden dolayı elektromanyetik dalgaların farklı geliş açılarında karşılık polarizasyon bağımsız filtre karakteristiği gösterirler. Şekil 4.1.'den görüldüğü gibi tasarımlarda göz önüne alınan yapı toprak iletkeni ile dairesel şekilli yama dizilerinin arasına konumlandırılan 3,5 bağıl geçirgenliğe ve 0,327 kayıp faktörüne sahip 1,5 mm kalınlıkta dielektrik alttaş malzemedir.



Şekil 4.1. Dairesel şekilli yama dizisi içeren radar soğurucu kumaş tasarımı.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak Şekil 4.1.'de gösterilen birim elemanın Computer Simulation Technology (CST) programı yardımı ile benzetim modeli oluşturulmuştur. Benzetimlerde radar soğurucu kumaş tasarımının analiz sonuçlarının ideal koşullardaki sonuçlara daha yakın olarak elde edilmesi için x ve y -eksenlerinin sınır koşulları sırasıyla elektrik ve manyetik iletken seçilmiş, z -ekseni üzerine

konumlandırılan düzlem dalga kılavuz portları ile benzetim modeli uyarılmıştır. Seçilen sınır koşulları sayesinde tüm yapının yerine sadece birim elemanın nümerik analizleri yapıldığından dolayı simülasyon sürelerinin kısaltılması sağlanmıştır.



Şekil 4.2. Dairesel şekilli yama dizisi içeren radar soğurucu kumaşın tasarım parametreleri (a) perspektif görünüş, (b) ön görünüş.

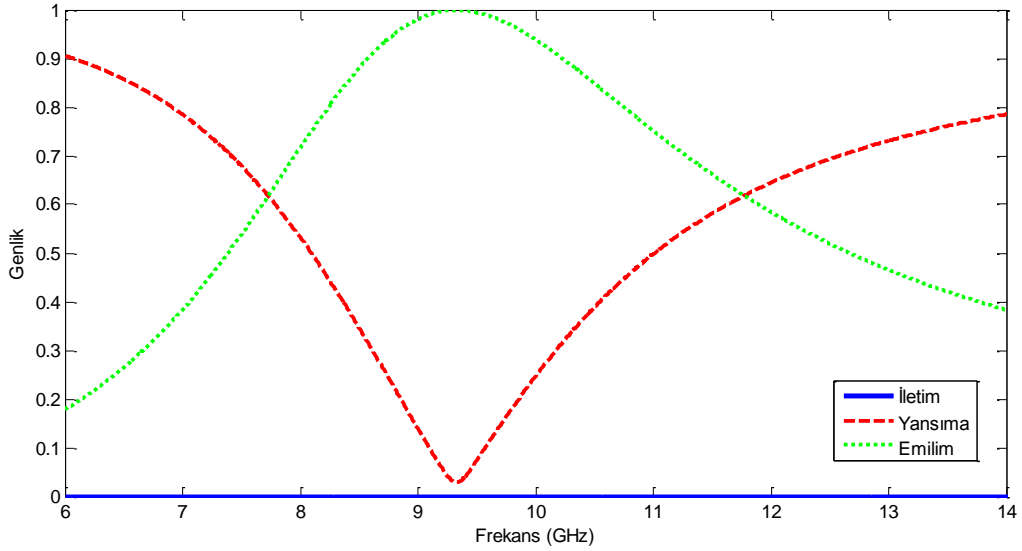
Çalışmanın devamında Şekil 4.2.'de verilen birim elemanın 9.33 GHz merkez frekans değeri için tasarım parametre değerleri CST programının optimizasyon menüsü kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen parametre değerleri Tablo 4.1.'de listelenmiştir.

Tablo 4.1. Dairesel şekilli yama dizisi içeren radar soğurucu kumaşın tasarım parametre değerleri.

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
r	Dairesel yamaların yarıçapı	3 mm
t	İletken yamalar arasına konumlandırılan kumaşın kalınlığı	1.5 mm
h	Birim elemanın kenar uzunluğu	8,75 mm
ϵ_r	İletken yamalar arasına konumlandırılan kumaşın bağlı geçirgenliği	3,5

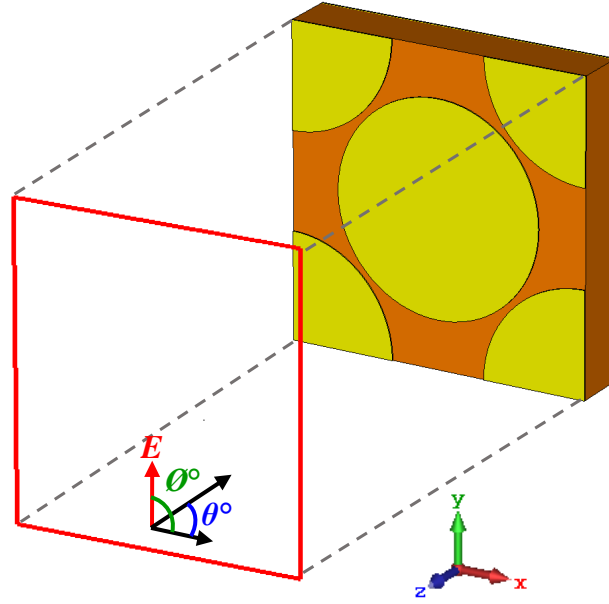
Tablo 4.1.'de verilen parametre değerlerine sahip radar soğurucu kumaş tasarımının nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim (T), yansımaya (R) ve soğurma (A) parametre değerleri Şekil 4.3.'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3.'ten tasarımlarda kullanılan toprak iletkeninden dolayı iletim parametre değerlerinin 0

çıkacağı görülürken yansıma ve emilim katsayılarının genlik değerlerinin merkez çalışma frekansı olan 9.33 GHz’de sırası ile minimum ve maksimum olduğu görülmektedir. Bu durum Eşitlik 2.12. göz önüne alınarak açıklanabilir. Eşitlik 2.12. incelendiğinde iletim, yansıma ve emilim katsayılarının genlik değerlerinin toplamalarının 1’e eşit olduğu görülmektedir. Eşitlik 2.12.’de iletim katsayılarının genlik değerleri 0 olarak tanımlandığında yansıma ve emilim katsayılarının yaklaşık 0.5’e göre birbirinin simetriği olması gerektiği açıkça görülmektedir. Bundan dolayı tez çalışması kapsamında yapılan nümerik analizlerde sadece yansıma parametre değerleri göz önüne alınmıştır.

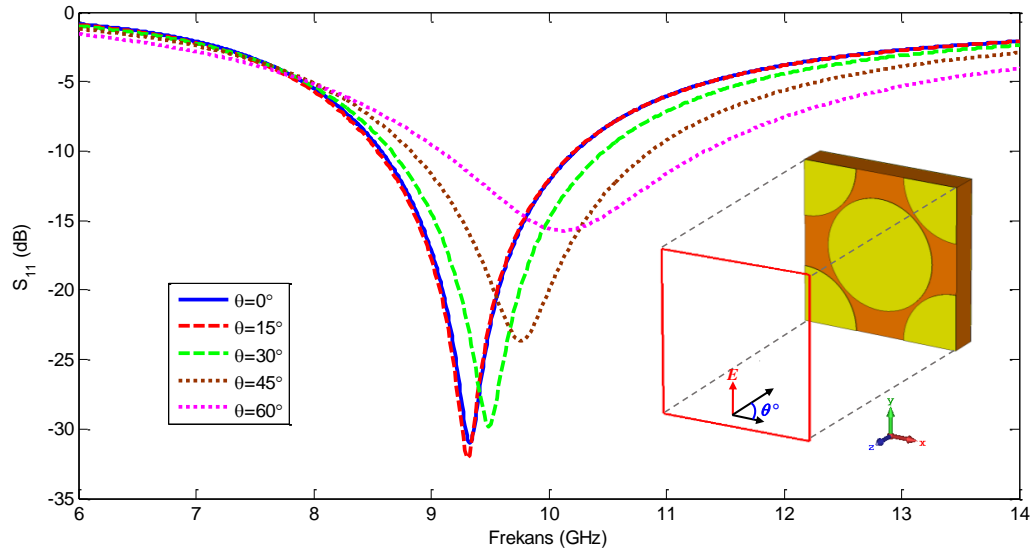


Şekil 4.3. Radar soğurucu kumaş tasarımının nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim (T), yansıma (R) ve emilim (A) parametre değerleri.

Tez çalışması kapsamında ikinci olarak elektromanyetik dalganın farklı geliş açlarına ve polarizasyonlarına karşılık radar soğurucu kumaşın elektriksel performansı incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle Şekil 4.4.’te gösterildiği gibi elektromanyetik dalganın geliş açısı 0° – 60° arasında 15° lik açı adımları ile değiştirilerek analizler tekrarlanmış ve elde edilen frekansa bağlı yansıma parametreleri Şekil 4.5.’te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.5.’te verilen karşılaştırmadan geliş açısının artmasına bağlı olarak radar soğurucu kumaşın çalışma frekans değerinin yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmektedir.

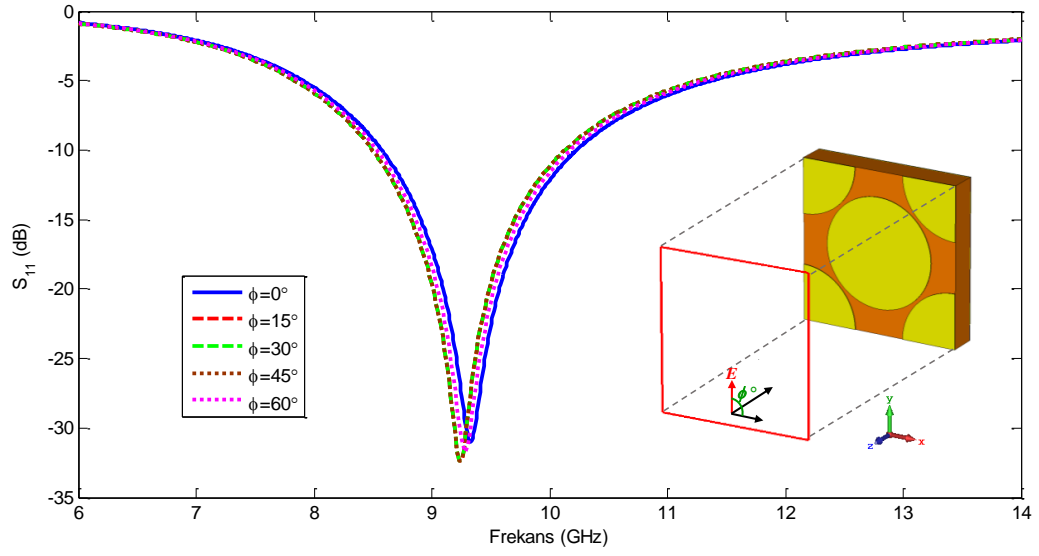


Şekil 4.4. Elektromanyetik dalganın farklı geliş açıları ve polarizasyonları



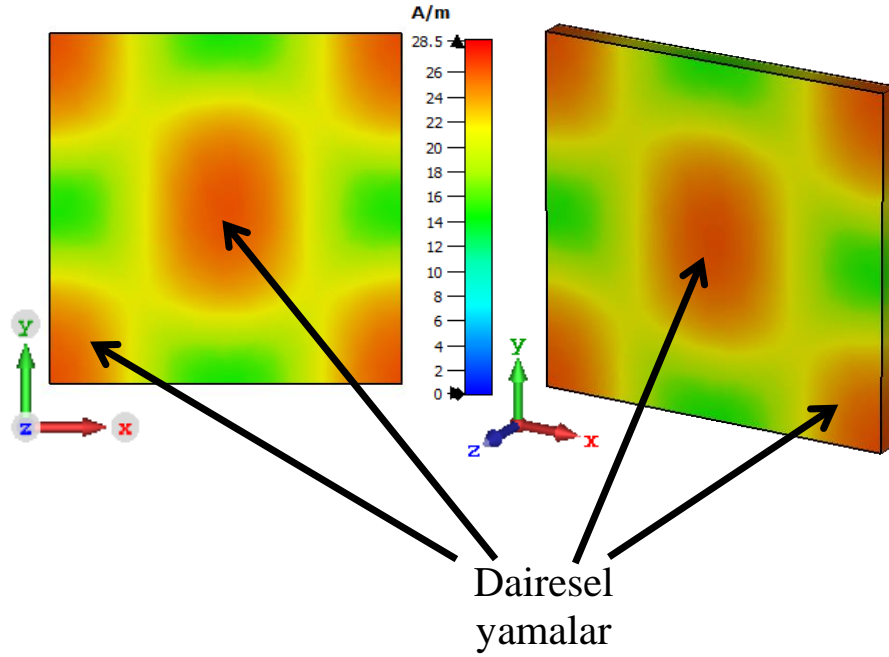
Şekil 4.5. Elektromanyetik dalganın farklı geliş açlarına karşılık radar soğurucu kumaşın frekansa bağı yansımaya katsayıları.

Elektromanyetik dalganın farklı polarizasyonlarına karşılık radar soğurucu kumaşın elektriksel performansının incelenmesi için dalganın x -ekseni ile yaptığı açı 0° – 60° arasında 15° lik açı adımları ile değiştirilmiş ve elde edilen frekansa bağı yansımaya parametreleri Şekil 4.6.'da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6.'dan önerilen radar soğurucu kumaş tasarımının polarizasyon bağımsız bir karakteristik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.6. Elektromanyetik dalga'nın farklı polarizasyonlarına karşılık radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansımaya katsayıları.

Çalışma kapsamında parametre analizlerine başlamadan önce son olarak normal elektromanyetik dalga uyarımı ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$) ile radar soğurucu kumaşın çalışma frekans değerindeki 2D yüzey akım yoğunluğu incelenmiştir. Şekil 4.7.'den görüldüğü üzere çalışma frekans değerinde iletken dairesel yamalar rezonansa geçmektedir.

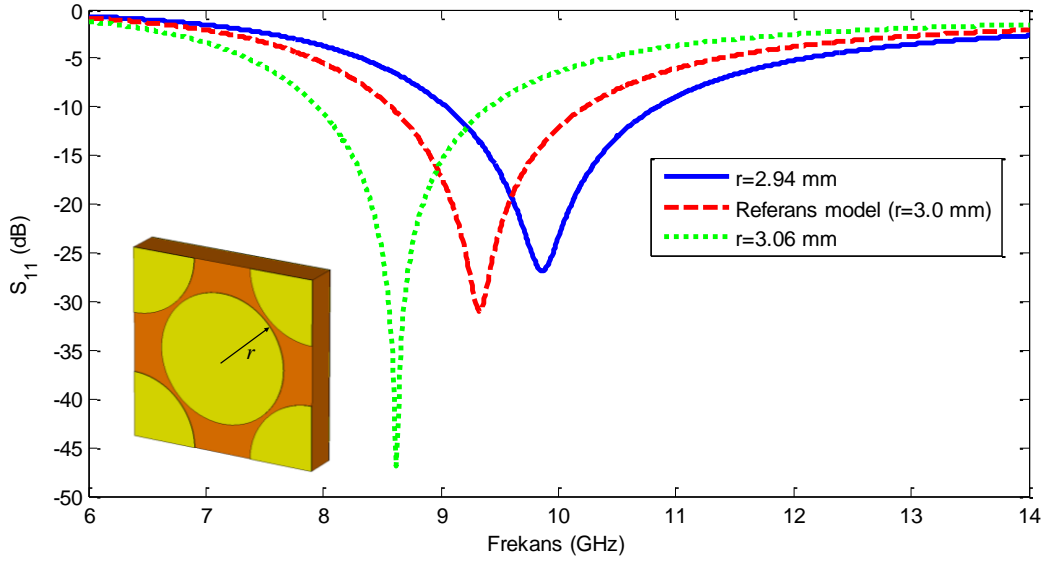


Şekil 4.7. Radar soğurucu kumaşın çalışma frekans değerindeki 2D yüzey akım dağılımı.

Radar soğurucu kumaşın tasarım parametre değerlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin irdelenmesi için tez çalışmasına parametre analizleri ile devam edilmiştir. Parametre analizlerinde göz önüne alınan tasarım parametre değerleri Tablo 4.2.'de listelenmiştir.

Tablo 4.2. Radar soğurucu kumaşın parametre analizlerinde kullanılan değerler.

Model	r	t	h	ϵ_r
Referans model	3 mm	1,5 mm	8,75 mm	3,5
Model-1 ($r = 2,94$ mm)	2,94 mm	1,5 mm	8,75 mm	3,5
Model-2 ($r = 3,06$ mm)	3,06 mm	1,5 mm	8,75 mm	3,5
Model-3 ($t = 1,3$ mm)	3 mm	1,3 mm	8,75 mm	3,5
Model-4 ($t = 1,7$ mm)	3 mm	1,7 mm	8,75 mm	3,5
Model-5 ($h = 8,55$ mm)	3 mm	1,5 mm	8,55 mm	3,5
Model-6 ($h = 8,95$ mm)	3 mm	1,5 mm	8,95 mm	3,5
Model-7 ($\epsilon_r = 2,5$)	3 mm	1,5 mm	8,75 mm	2,5
Model-8 ($\epsilon_r = 4,5$)	3 mm	1,5 mm	8,75 mm	4,5



Şekil 4.8. Dairesel şekilli yamaların farklı birim eleman uzunlukları için elde edilen frekansa bağlı yansımaya katsayıları.

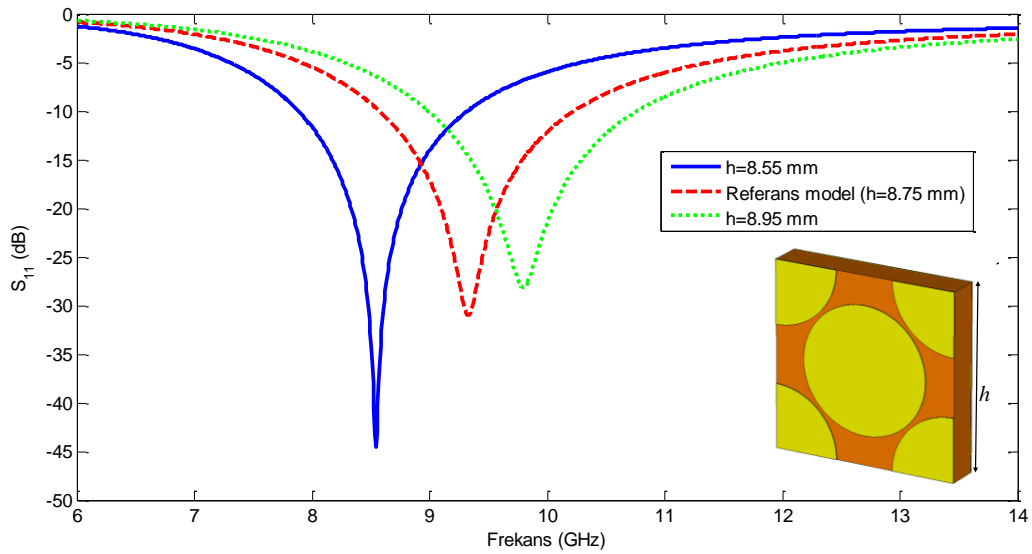
Dairesel şekilli yamaların farklı yarıçap değerleri için elde edilen frekansa bağlı yansımaya katsayıları Şekil 4.8.'de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8.'den yamaların yarıçap uzunlukları kısaldığında radar soğurucu kumaşın çalışma frekansının yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum Eşitlik 4.1. ve Eşitlik 4.2. göz önüne alınarak açıklanabilir. Eşitlik 4.21. ve Eşitlik 3.2.'de verildiği gibi paralel plakalı kapasitörlerin kapasitans değerleri yüzey alanı ile doğru orantılı olarak

değişirken rezonans frekansları ters orantılı olarak değişmektedir. Dolayısıyla yamaların yarıçap uzunluklarının kısalması yamaların yüzey alanlarını azaltarak soğurucu kumaşın eşdeğer kapasitans değerinin azalmasına dolayısıyla rezonans frekansının artmasına sebep olmaktadır.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h} \quad (4.1)$$

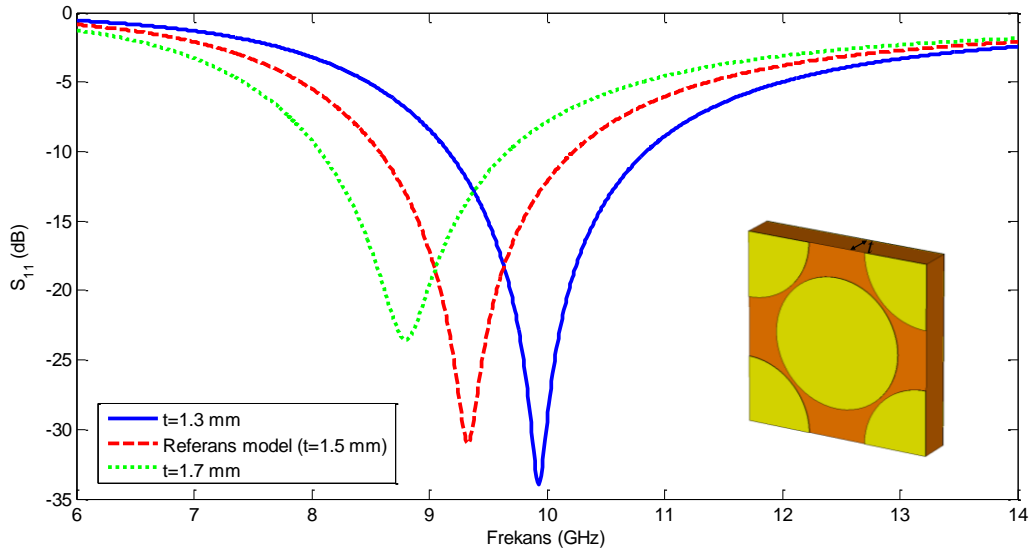
$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.2)$$

Şekil 4.9.'da verilen frekansa bağlı yansıma katsayıları incelendiğinde iletken yamalar arasındaki boşluk genişliklerinin artması ile rezonans frekans değerinin de arttığı görülmektedir. Boşluklardaki değişim yamalar arasında oluşan ortak kapasitansın değişmesine sebep olmaktadır.



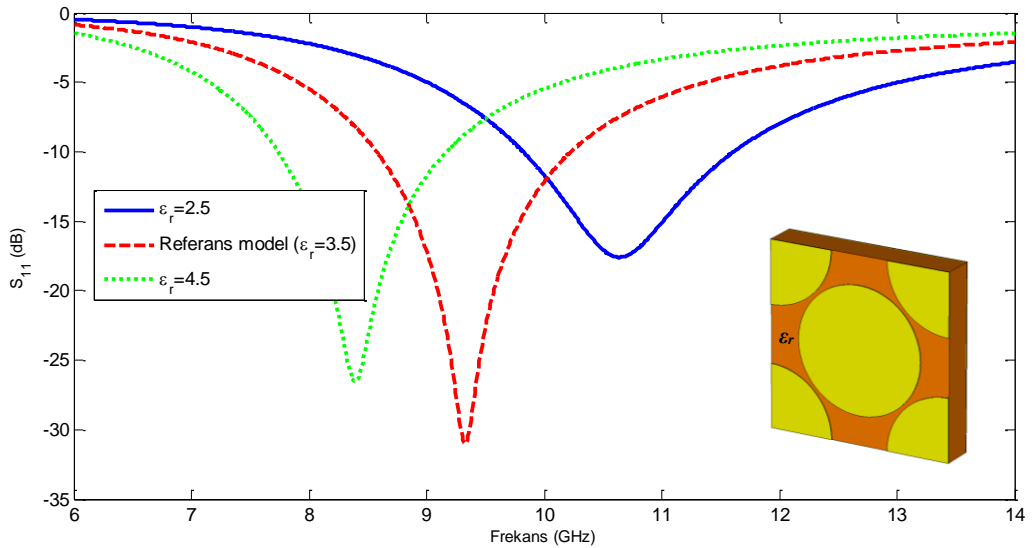
Şekil 4.9. İletken yamalar arasındaki farklı boşluk genişlikleri için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.

Şekil 4.10. radar soğurucu kumaşın yansıma parametre değerlerini toprak iletkeni ile dairesel şekilli yama dizilerinin arasına konumlandırılan dielektrik alttaşı kalınlığına bağlı olarak karşılaştırmaktadır. Şekil 4.10.'dan dielektrik alttaşı kalınlığının azalması ile soğurucu kumaşın çalışma frekansının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.10. Dielektrik alttaşın farklı kalınlıkları için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.

Son olarak, dielektrik alttaşın bağıl geçirgenliğinin yansıma parametre değerleri üzerine etkileri Şekil 4.11.'de gösterilmiştir. Şekil 4.11. incelendiğinde bağıl geçirgenliğin artması ile çalışma frekansının düşük frekanslara doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum Eşitlik 4.1. ve Eşitlik 4.2. göz önüne alınarak açıklanabilir. Dielektrik alttaşın bağıl geçirgenliğinin artması soğurucu kumaşın eşdeğer kapasitans değerinin artmasına dolayısıyla rezonans frekansının azalmasına sebep olmaktadır.



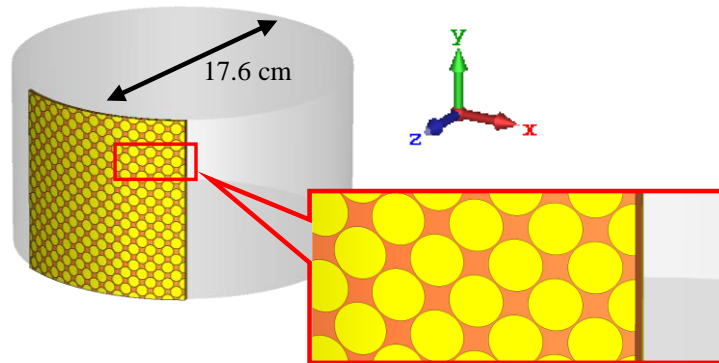
Şekil 4.11. Alttaşın farklı bağıl dielektrik geçirgenlikleri için elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayıları.

Tasarım parametre değerlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin daha iyi irdelenmesi için farklı parametre değerlerine karşılık soğurucu kumaşın rezonans frekanslarındaki değişimleri ile birlikte -10 dB için bant genişlikleri Tablo 4.3.'te sunulmuştur.

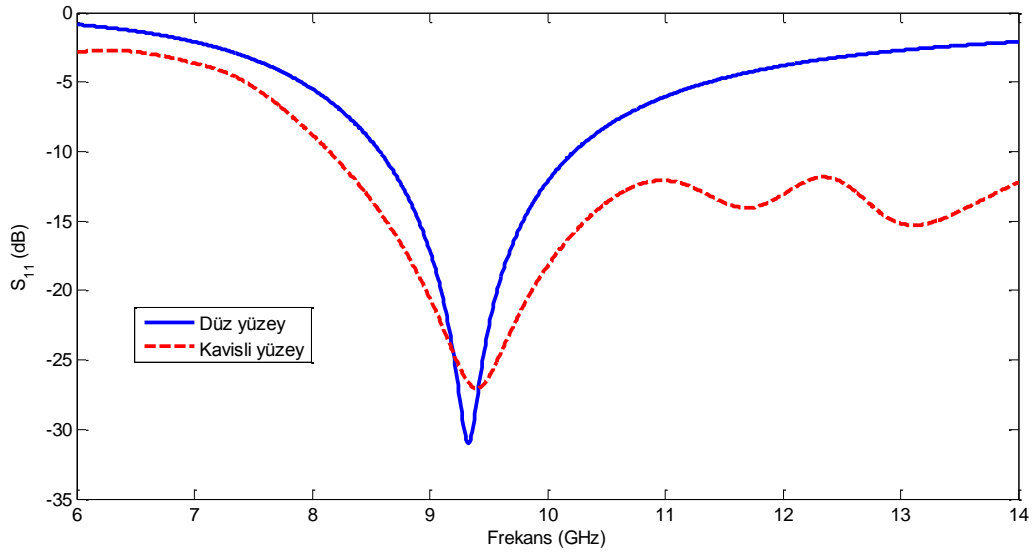
Tablo 4.3. Farklı tasarım parametre değerlerine karşılık radar soğurucu kumaşın elektriksel karakteristikleri.

Model	Merkez frekansı	Bant genişliği
Referans model	9,33 GHz	1,65 GHz
Model-1 ($r = 2,94$ mm)	9,85 GHz	1,80 GHz
Model-2 ($r = 3,06$ mm)	8,62 GHz	1,45 GHz
Model-3 ($t = 1,3$ mm)	9,92 GHz	1,69 GHz
Model-4 ($t = 1,7$ mm)	8,8 GHz	1,58 GHz
Model-5 ($h = 8,55$ mm)	8,54 GHz	1,44 GHz
Model-6 ($h = 8,95$ mm)	9,79 GHz	1,78 GHz
Model-7 ($\epsilon_r = 2,5$)	10,65 GHz	1,79 GHz
Model-8 ($\epsilon_r = 4,5$)	8,39 GHz	1,42 GHz

Çalışma kapsamında elektriksel testlere başlamadan önce son olarak tasarımları yapılan radar soğurucu kumaşın dışbükey şekilli kavisli yapılar üzerindeki elektriksel performansı incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 4.12.'de gösterildiği gibi iç yarıçapı 8.8 cm olan silindir üzerine soğurucu kumaş yerleştirilmiş ve düşey eksen boyunca periyodik sınır koşulları uygulanarak nümerik analizler yapılmıştır. Nümerik analizlerde benzetim modeli düzlem dalga kılavuz portu ile uyarılarak yansıma parametreleri elde edilmiştir. Şekil 4.13.'te verilen frekansa bağlı yansıma parametrelerinden soğurucu kumaşın kavisli yapılar üzerine konumlandırılması durumunda merkez çalışma frekansının değişmemekle birlikte yüksek frekanslarda yansıma katsayılarının genlik değerlerinin azaldığı görülmüştür.

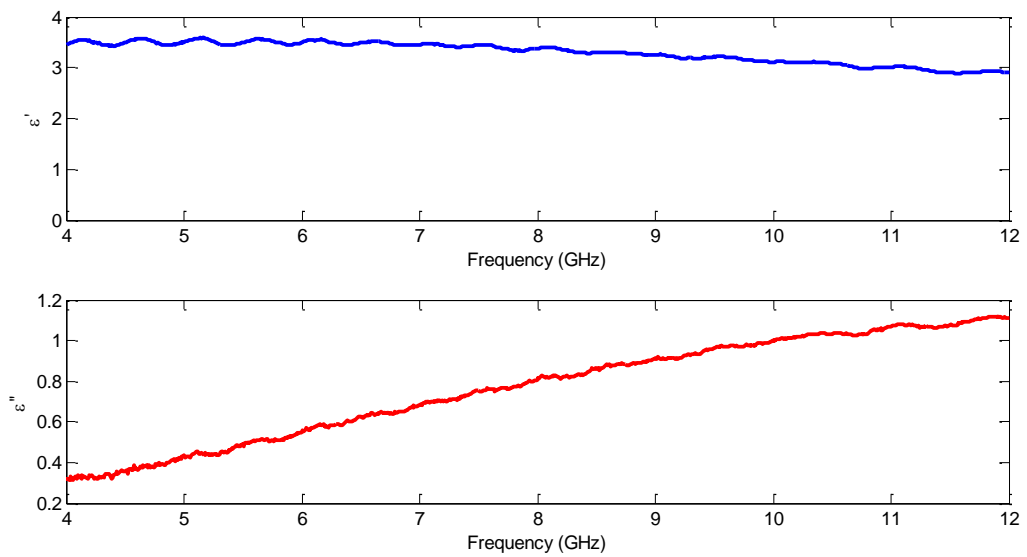


Şekil 4.12. Radar soğurucu kumaşın kavisli yapılar üzerine konumlandırılması.



Şekil 4.13. Kavisli yapılar üzerine konumlandırılan radar soğurucu kumaşın frekansa bağlı yansımaya katsayıları.

Nümerik analiz sonuçlarının doğruluklarının gösterilmesi için tez çalışmasına radar soğurucu kumaşın prototip üretimlerinin yapılması ile devam edilmiştir. Bu amaçla ilk olarak Bölüm 3.2.'de detaylı olarak açıklandığı gibi toprak iletkeni ile dairesel şekilli yama dizileri için iletken kumaş kullanılırken dielektrik alttaş için neopren kumaş kullanılmıştır. Neopren kumaşın frekansa bağlı kompleks dielektrik geçirgenliği Şekil 3.2.'de gösterilen ölçüm düzeneği kullanılarak 4GHz-12GHz frekans aralığı için elde edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4.14.'te verilmiştir.

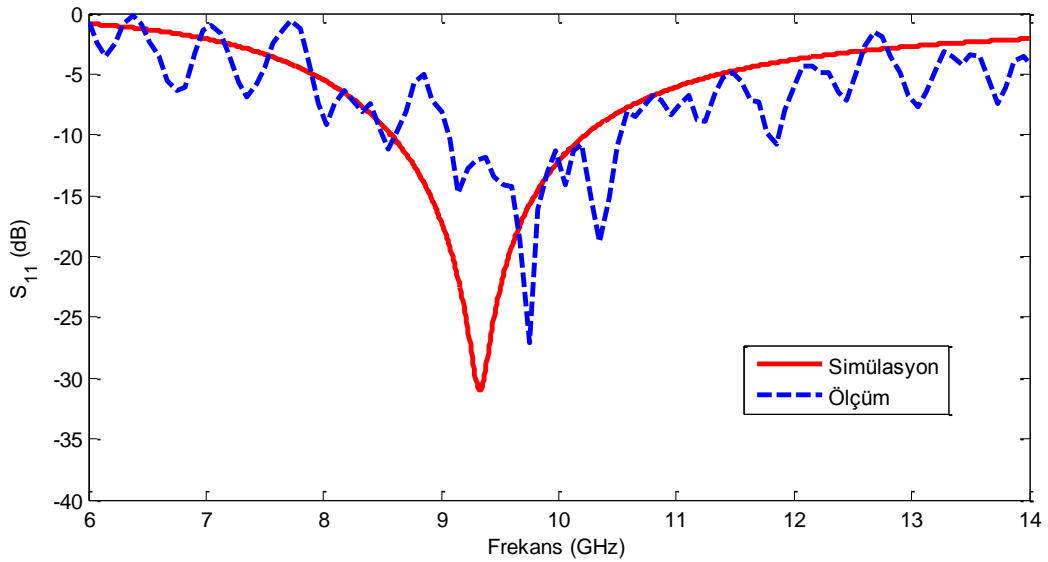


Şekil 4.14. Neopren kumaşın frekansa bağlı kompleks dielektrik geçirgenliği.

Şekil 4.14.'ten neopren kumaşın merkez çalışma frekans değerindeki bağıl geçirgenliğinin reel ve imajiner kısımlarının sırasıyla 3,5 ve 0,9 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Elde edilen bağıl geçirgenlik değerleri ile neopren kumaşın kalınlığı Tablo 4.1.'de listelenen tasarım parametre değerlerini sağlamaktadır.

Çalışmanın devamında iletken kumaş nümerik analizlerde elde edilen dairesel şekilli yamaların tasarım parametre değerlerine uygun olarak kesilmiş ve neoren kumaş üzerine konumlandırılmıştır.

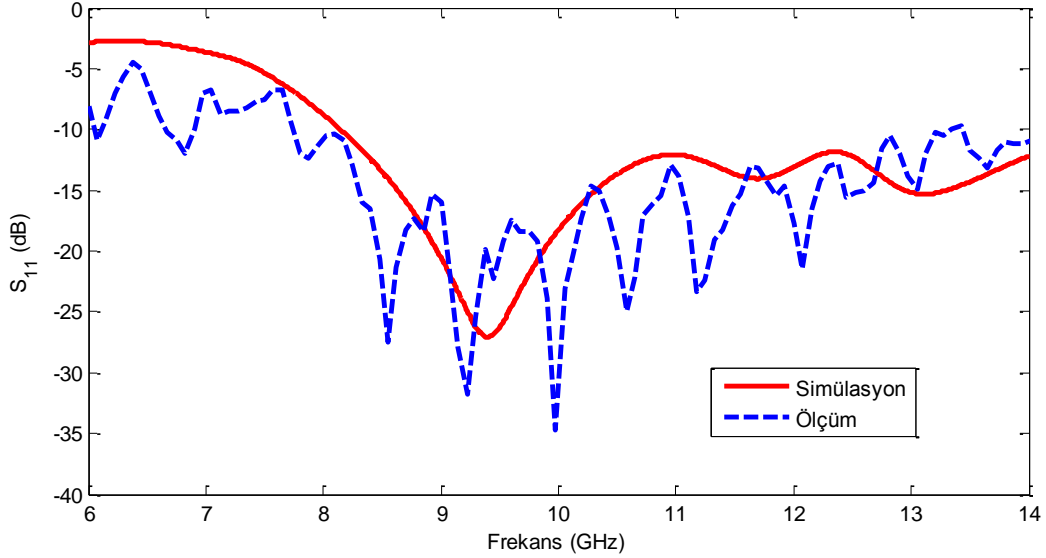
Tez çalışması kapsamında prototip üretimi tamamlanan radar soğurucu kumaşın elektriksel testlerine başlanmıştır. Elektriksel testlerde ilk olarak düzlemsel soğurucu kumaş göz önüne alınmıştır. Düzlemsel soğurucu kumaşın elektriksel testlerinde Şekil 3.3.'de gösterilen serbest uzay ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen yansıma parametre değerleri nümerik analiz sonuçları ile Şekil 4.15.'de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.15.'den ölçüm sonuçlarının nümerik analiz sonuçlarını desteklediği görülmektedir.



Şekil 4.15. Radar soğurucu kumaşın elektriksel testler sonucu elde edilen yansıma parametrelerinin nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması.

Çalışma kapsamında son olarak dışbükey şekilli kavisli soğurucu kumaşların elektriksel testleri yapılmıştır. Bu amaçla soğurucu kumaş Şekil 3.5.'de gösterildiği

gibi 8 cm ortalama yarıçapa sahip silindir kağıt rulo üzerine konumlandırılmış ve ölçümler tekrarlanmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı yansıma parametre değerleri ile nümerik analiz sonuçları Şekli 4.16.'da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.16.'dan ölçüm sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının benzer oldukları görülmektedir.



Şekil 4.16. Kavisli yapılar üzerine konumlandırılan radar soğurucu kumaşın elektriksel testler sonucu elde edilen yansıma parametrelerinin nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması.

Nümerik analiz ve ölçüm sonuçlarının daha iyi irdelenebilmesi amacıyla çalışma kapsamında elde edilen tüm sonuçların merkez çalışma frekans değerleri ile -10 dB bant genişlikleri Tablo 4.4.'de listelenmiştir. Tablo 4.4'den hem nümerik olarak hem de ölçümler ile elde edilen merkez çalışma frekans değerlerinin 9.33 GHz olduğu görülmekle birlikte ölçümler sonucu elde edilen bant genişliklerinin nümerik analizler sonucu elde edilen bant genişliklerinden daha dar olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak üretimden kaynaklı hatalar olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.4. Elektriksel testler sonucu elde edilen yansıma parametre değerlerinin nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması.

Model	Merkez frekansı	Bant genişliği
Düzlemsel yüzeye sahip radar soğurucu kumaşın nümerik analiz sonuçları	9,33 GHz	1,65 GHz
Düzlemsel yüzeye sahip radar soğurucu kumaşın elektriksel analiz sonuçları	9,86 GHz	1,57 GHz
Kavisli yüzeye sahip radar soğurucu kumaşın nümerik analiz sonuçları	9,39 GHz	5,86 GHz
Kavisli yüzeye sahip radar soğurucu kumaşın elektriksel analiz sonuçları	9,86 GHz	4,95 GHz

BÖLÜM 5. SONUÇ

Tez çalışması kapsamında ilk olarak 9.33 GHz merkez çalışma frekans değerine sahip dairesel şekilli iletken yama dizisi içeren radar soğurucu kumaş tasarımı yapılmıştır.

Tasarımlarda elektromanyetik dalganın hem geliş açısı hem depolarizasyonu 0° – 60° arasında 15° lik açı adımları ile değiştirilerek radar soğurucu kumaşın elektriksel performansı incelenmiş ve geliş açısının artmasına bağlı olarak soğurucu kumaşın çalışma frekans değerinin yüksek frekanslara doğru kaydığı görülürken farklı polarizasyon açılarında çalışma frekans değerinin değişmediği ve polarizasyon bağımsız bir karakteristik gösterdiği görülmüştür. Çalışmanın devamında radar soğurucu kumaşın elektriksel performansının daha iyi analiz edilebilmesi amacıyla normal elektromanyetik dalga uyarımı ($\phi=0^{\circ}$, $\theta=0^{\circ}$) için çalışma frekans değerindeki 2D yüzey akım dağılımı analiz edilmiştir. Nümerik analizler kapsamında son olarak tasarımları yapılan düzlemsel radar soğurucu kumaşın 8.8 cm iç yarıçap uzunluğuna sahip silindirik yüzey üzerine konumlandırılarak elde edilen kavisli yapının elektriksel performansı analiz edilmiş ve merkez çalışma frekans değerinin 60 MHz yüksek frekansa doğru kaydığı görülmüştür. Tez çalışmasının ikinci adımında nümerik analiz sonuçlarının doğrulanması için düzlemsel radar soğurucu kumaşın prototip üretimi gerçekleştirilerek serbest uzay ölçüm düzeneği ile frekansa bağlı yansımaya parametre değerleri elde edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları ile nümerik analiz sonuçları arasında %0,1 oranında bağıl hata olduğu görülmüştür. Tez çalışmasında son olarak kavisli yüzeye sahip soğurucu kumaşın elektriksel testleri yapılmış ve elde edilen yansımaya parametre değerlerinden ölçüm sonuçlarının nümerik analiz sonuçları ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Akgol, O., Bağmancı, M., Karaaslan, M., & Ünal, E. (2017). Broad band MA-based on three-type resonator having resistor for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1-16.
- Alves F., Grbovic D., Kearney B., Lavrik N. V. and Karunasiri G., 2013. Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures. *Optics Express*. 21:13256-13271.
- Cengiz, S. (2009). Elektromanyetik girişimden korunmada ekranlama etkinliği ve elektromanyetik ekranlama uygulamaları (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Chao, G., Bo, Q. S., Bin, P. Z., Zhuo, X., Jia, L., Wei, G., 2011. Multiband terahertz metamaterial absorber. *Chin. Phys. B*. 20: 017801-5.
- Cheng, Y. Z., Fang, C., Zhang, Z., Wang, B., Chen, J., & Gong, R. Z. (2016, August). A compact and polarization-insensitive perfect metamaterial absorber for electromagnetic energy harvesting application. In *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)* (pp. 1910-1914). IEEE.
- Choi, J., H., Itoh, T., 2012. Dual-Band Composite Right-Left-Handed (CRLH) Phased Array Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 11:732-735.
- CST-Computer Simulation Technology. "CST Microwave Studio". <https://www.cst.com/product/estmws>, Son Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2019
- Demirsoy T., 2016. Yapay Periyodik Yapılarda Işığın Davranışının Sayısal Ve Deneysel Çözömlenmesi (Doktora Tezi) Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ebrahimi A., Withayachumnankul W., Al-Sarawi S.F. ve Abbott D., "Metamaterial-Inspired Rotation Sensor With Wide Dynamic Range", *IEEE Sens. J.*, cilt.14 no.8, s.2609-2613, 2014
- Engheta, N., Ziolkowski, R., W., 2006. *Metamaterials — Physics and Engineering Explorations*. IEEE-Wiley Press, Piscataway, NJ.
- Erentok, A., Luljak, P., L., Ziolkowski, R., W., 2005. Characterization of a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor for antenna applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1: 160-172.

- Erentok, A., Ziolkowski, R., W., 2008. Metamaterial-inspired efficient electrically-small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(3):691-707.
- Hao, J., Wang, J., Liu, X., Padilla, W. J., Zhou, L., Qiu, M., 2010. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial. *Applied Physics Letters*. 96: 251104-3.
- He X. J., Qiu L., Wang Y., Geng Z. X., Wang J. M., and Gui T. L., 2011b. A compact thin film sensor based on nested split-ring-resonator (SRR) metamaterials for microwave applications. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 32:902-913.
- Huang M., Yang J., Jun S., Mu S. and Lan Y., 2011. Simulation and analysis of a metamaterial sensor based on a microring resonator. *Sensors*. 11:5886–5899.
- Huang, M., Cheng, Y., Cheng, Z., Chen, H., Mao, X., & Gong, R. (2018). Based on graphene tunable dual-band terahertz metamaterial absorber with wide-angle. *Optics Communications*, 415, 194-201.
- Jeppesen C., Xiao S., Mortensen N. A., Kristensen A., 2010. Metamaterial localized resonance sensors: prospects and limitations. *Optics Express*. 18:25075.
- Johnson, H. W., & Graham, M. (1993). *High-speed digital design: a handbook of black magic* (Vol. 155). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Jun, H. Y., Jun, W. G., Jian, L., Ping, Z. J., Ping, W., Hua, S. Y., Gordon, O., Ren, Z. W., 2012. Metamaterial absorbers realized in an X-band rectangular waveguide. *Chin. Phys. B*. 21: 117801-5.
- Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C., 2017. Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31-38.
- Lalj, H., Griguer, H., Benfetah, M. A., & Drissi, M. H. (2015, December). Polarization insensitive metamaterial absorber for energy harvesting. In *Microelectronics (ICM), 2015 27th International Conference on* (pp. 284-286). IEEE.
- Landy, N., I., Sajuyigbe, S., Mock, J., J., Smith, D., R., Padilla, W., J., 2008. A perfect metamaterial absorber. *Phys. Rev. Lett.*,100:207402-4.
- Lee, J., Lim, S., 2011. Bandwidth-enhanced and polarization-insensitive metamaterial absorber using double resonance. *Electronics Letters*, 47:8-9.
- Majid, H., A., Rahim, M., K., A., 2007. Investigation of Left Handed Metamaterial In Microstrip Antenna Application, *Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings*, Malaysia.
- Melik R., Unal E., Perkgoz N. K., Puttlitz C. and Demir H. V., 2009a. Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*. 95:181105.

- Melik R. Unal E., Perkgoz N.K., Puttlitz C. and Demir H.V., 2009b. Metamaterial-based wireless strain sensors. *Applied Physics Letters*. 95:011106.
- Mulazimoglu, C., Karakaya, E., Can, S., Yilmaz, A. E., & Akaoglu, B. (2016, September). Hexagonal-shaped metamaterial energy harvester design. In *Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS)*, 2016 10th International Congress on (pp. 82-84). IEEE.
- Pendry, J., B., Holden, A., J., Stewart, W., J., Youngs, I., 1996. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. *Physical Review Letters*. 76:4773-4776.
- Pendry, J., B., Holden, A., J., Robbins, D., J., Stewart, W., J., 1999. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 47:2075-2084.
- Pryce, M., Aydin, K., Kelaita, Y. A., Briggs, R. M., Atwater, H. A., 2011. Characterization of the tunable response of highly strained compliant optical metamaterials. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*. 369:3447.
- Pozar, D. M. (2006). *Microwave Engineering* 3e (pp. 470-472). Wiley.
- Schuring D., Mock J.J., Justice B.J., Cummer S.A., Pendry B., Starr A.F., Smith D.R., 2006. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science* 314, 977 (2006); DOI: 10.1126/science.1133628
- Shelby, R., A., Smith, D., R., Schultz, S., 2001. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*. 292:77-79.
- Smith, D., R., Kroll, N., 2000a. Negative refraction index in left-handed materials. *Phys. Rev. Lett.* 85:2933–2936.
- Sun, J., Liu, L., Dong, G., Zhou, J., 2011. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference. *Opt. Express*, 19:21155-62.
- Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., Padilla, W. J., 2008. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization. *Optics Express*. 16: 7181-7188.
- Tao, H., Bingham, C. M., Pilon, D., Fan, K., Strikwerda, C. M., Shrekenhamer, D., Padilla, W. J., Zhang, X., Averitt, R. D., 2010. A dual band terahertz metamaterial absorber. *J. Phys. D: Appl. Phys.*43: 225102-5.
- Veselago, V., G., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*. 10:509–514.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K. C., Tuantranont, A., Fumeaux, C., Abbott, D., 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization, *Sensors and Actuators A*;189,233– 237.

- Xie, Y. (2016). Designing nanostructured materials and metamaterials for energy applications (Doctoral dissertation, University of Delaware).
- Xu X., Peng B., Li D., Zhang J., Wong L.M., Zhang Q., Wang S., Xiong Q., 2011. Flexible Visible–Infrared Metamaterials and Their Applications in Highly Sensitive Chemical and Biological Sensing. *Nano Lett.* 11:3232.
- Zhang, Y., Fiddy, M., A., 2013. Covered image of super lens, *Progress In Electromagnetics Research*, 136, 225-238.
- Zhang, Y., Cen, C., Liang, C., Yi, Z., Chen, X., Li, M., ... & Zhang, G. (2019). Dual-band switchable terahertz metamaterial absorber based on metal nanostructure. *Results in Physics*, 14, 102422.
- Zhu, B., Feng, Y., Zhao, J., Huang, C., Wang, Z., Jiang, T., 2010. Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector-absorber. *Optics Express*. 18: 23196-23203.
- Ziolkowski, R., W., 2003. Designs, fabrication, and testing of double negative metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(7):1516-1529. Stutzman, W.L. Ve G.A. Thiele. 1998. *Antenna Theory And Design*. Usa: John Wiley & Sons, Inc.

ÖZGEÇMİŞ

Yılmaz Çiğdem 09.01.1970 Orta/Çankırı'da doğmuştur. İlk ve ortaokulu Arifiye'de, liseyi Sakarya 1. Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü'nde okumuştur. Gazi Üniversitesi ve Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümünü bitirmiştir. 1990-2006 yılları arasında Gaziantep, Adıyaman ve Sakarya illerinde Teknik Öğretmen olarak çalışmış, daha çok deneye ve uygulamaya dönük eğitim vermeye gayret etmiştir. 2006 yılında şimdi ki adıyla SASKİ olan Sakarya Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanal İdaresi Genel Müdürlüğünde dört ayrı daire başkanlığı görevlerinde bulunmuştur. Bu esnada mesleği ile ilgili RF Sayaç Okuma Sistemleri, Mekatronik Sayaçlar ve Elektronik Kayıp Kaçak çalışmalarını yürütmüş bu konularda yurtiçi ve yurtdışı toplantı ve çalıştaylara katılarak sunumlar yapmış ve çeşitli ödüller almıştır. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Çevre Dairesi Başkanı olarak atanması ile beraber çöp gazından elektrik üretme tesisi ön çalışmalarını yürütmüştür. 2015 yılına gelindiğinde İskenderun Teknik Üniversitesi Genel Sekreteri olarak atanmış ve yeni bir üniversitenin alt yapı, üst yapı çalışmalarında bulunmuştur. Genel Sekreterlik görevinden sonra 2018 yılında Enerji Bakanlığı Elektrik Üretim AŞ (EÜAŞ) Genel Müdür Yardımcısı olarak atanmıştır. An itibariyle Sakarya Büyükşehir Belediyesi'nde Daire Başkanı olarak çalışmaya devam etmektedir.