

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ELEKTRONİK SOĞUTUCULAR İÇİN GENİŞ BANTLI YAMA TİPİ
SOĞURUCU KUŞAK TASARIMI**

Zeynep KOCAMAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2021

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ELEKTRONİK SOĞUTUCULAR İÇİN GENİŞ BANTLI YAMA TİPİ
SOĞURUCU KUŞAK TASARIMI**

Zeynep KOCAMAN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

EKİM 2021

ANTALYA

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

**ELEKTRONİK SOĞUTUCULAR İÇİN GENİŞ BANTLI YAMA TİPİ
SOĞURUCU KUŞAK TASARIMI**

**Zeynep KOCAMAN
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
tarafından FYL-2020-5111 nolu proje ile desteklenmiştir.**

EKİM 2021

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK SOĞUTUCULAR İÇİN GENİŞ BANTLI YAMA TİPİ
SOĞURUCU KUŞAK TASARIMI

Zeynep KOCAMAN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 22/Ekim/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selçuk HELHEL (Danışman)

Doç. Dr. S. Cumhuri BAŞARAN

Doç. Dr. İ. Bahadır BAŞYİĞİT

ÖZET

ELEKTRONİK SOĞUTUCULAR İÇİN GENİŞ BANTLI YAMA TİPİ SOĞURUCU KUŞAK TASARIMI

Zeynep KOCAMAN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

II. Danışman: Dr. Habib DOĞAN

Ekim 2021; 55 sayfa

Metamalzemeler, bilinen doğal malzemelerin aksine farklı elektromanyetik özellikler gösteren yapay malzemelerdir. Son yıllarda keşfedilen özelliklerinden önemli bir tanesi de gelen elektromanyetik dalgaya karşı mükemmel soğurma performansı göstermeleridir. Bu özellikleri sayesinde mikrodalga bandından optik banda kadar pek çok farklı uygulamada kullanılabilecekleri değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, elektronik soğutucular için geniş bantlı yama tipi metamalzeme tabanlı elektromanyetik soğurucu yapının mikrodalga frekanslarda tasarım, benzetim, optimizasyon, üretim ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Metamalzeme soğurucu yapının ve elektronik soğutucunun sayısal analizi ve tasarımında, CST Microwave Studio benzetim programı kullanılmıştır.

Benzetim ortamında tasarlanan yapının soğurma etkisi incelendikten sonra, istenilen frekans aralığında elektronik soğutucuyla birlikte optimizasyonu gerçekleştirilerek, baskı devre teknolojisi ile soğurucunun üretimi yapıldıktan sonra seçilen elektronik soğutucu ile testleri tamamlanmıştır. Geniş bantlı metamalzeme tabanlı soğurucunun elektronik soğutucu ile birlikte oluşturulan tümleşik yapısı anten davranışı sergilemesi sebebiyle ortaya çıkardığı ışınım örüntüsü, benzetim ve deneysel ortamda elde edilen uzak alan ölçüm sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Tasarlanan soğurucunun katman sayısı değişimine ilişkin fiziki şartlarda göz önünde bulundurularak en iyi değeri saptanmıştır. Daha sonra soğurucu kuşağın elektronik soğutucu üzerinde konumunun elektromanyetik ışınım bastırma veya lens davranışı göstererek kazanç/yönlendirmeye neden olma derecesi belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında elektronik soğutucuların neden olduğu girişim etkilerini bastırmak veya yönlendirmek amacı ile soğutucuların etrafında kullanılmak üzere metamalzeme tabanlı bir soğurucu kuşak tasarlanmıştır. Tek kat olarak seçilen kuşak en iyi bastırmayı uzak alan $\theta=90^\circ$ 'de kuşak Konum-6'dayken %75,6 oranında ortalama 6,73 dB olarak soğutucunun taban seviyesindeyken yakalamıştır. Soğurucu kuşak soğutucu üzerinde Konum-2'de konumlandırıldığında ise uzak alan $\theta=90^\circ$ 'de %89,81

oranında ortalama 4,92 dB değerinde kazanç sağlayarak, ışımayı yönlendirerek kazancı artırmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: C-Bandı Uygulamaları, Elektronik Soğutucular, Geniş Bant Soğurucular, Metamalzeme Soğurucular

JÜRİ: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. S. Cumhuri BAŞARAN

Doç. Dr. İ. Bahadır BAŞYİĞİT

ABSTRACT

WIDEBAND PATCH-TYPE EMW ABSORBING BELT DESIGN FOR ELECTRONIC HEAT SINKS

Zeynep KOCAMAN

MSc Thesis in Electrical & Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selcuk HELHEL

Co-Supervisor: Dr. Habib DOGAN

October 2021; 55 pages

Metamaterials are artificial materials that show different electromagnetic properties, unlike known natural materials. One of the most important features discovered in recent years is that they show excellent absorption against the incoming electromagnetic wave. Thanks to these features, it is evaluated that they can be used in many different applications from microwave band to optical band.

In this thesis, the design, simulation, optimization, fabrication, and measurements of a broadband patch type metamaterial-based electromagnetic absorber structure for electronic heat sinks were carried out at microwave frequencies. The CST Microwave Studio simulation program was used in the numerical analysis and design of the metamaterial absorber structure and the electronic heat sinks.

After examining the absorption effect of the designed structure in the simulation environment, optimization was carried out with the electronic heat sinks in the desired frequency range, the absorber was produced with the printed circuit technology and then the tests were completed with the selected electronic heat sinks. Since the integrated structure of the broadband metamaterial-based absorber together with the electronic heat sinks exhibits antenna behavior, the radiation pattern revealed by the simulation and far-field measurement results obtained in the experimental environment has been obtained. The best value of the designed absorber was determined by considering the physical conditions regarding the change in the number of layers. Then, the degree to which the position of the absorber belt on the electronic heat sinks causes electromagnetic radiation suppression or lens behavior to cause gain/direction was determined.

In this thesis, a metamaterial-based absorber belt is designed to be used around electronic heat sinks to suppress or direct the interference effects caused by electronic heat sinks. The band selected as a single layer achieved the best suppression in the far area $\theta=90^\circ$, while the band was in Position-6, with an average of 6,73 dB at a rate of 75,6% when it was at the base level of the electronic heat sink. When the absorber belt was positioned in Position-2 on the electronic heat sink, it increased the gain by directing the radiation, providing an average gain of 4,92 dB at the rate of 89,81% in the far field $\theta=90^\circ$.

KEYWORDS: C-Band Applications, Electronic Heat Sinks, Metamaterial Absorbers, Wideband Absorbers.

COMMITTEE: Prof. Dr. Selcuk HELHEL

Assoc. Prof. Dr. S. Cumhur BASARAN

Assoc. Prof. Dr. I. Bahadir BASYIGIT

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında elektronik soğutucuların anten davranışı göstermeleri nedeniyle elektromanyetik uyumluluk testlerinde sorun yaşayan cihaz tasarımcılarına, uygun elektronik soğutucuyu seçtikten sonra muhtemel oluşabilecek ısıma problemlerini metalmalzeme soğurucu kuşak kullanarak iyileştirilebileceği ya da tamamen ortadan kaldırabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın konusunun belirlenmesinde ve hazırlanma sürecinin her aşamasında değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyerek her fırsatta çalışmamla yakından ilgilenen, eleştirileriyle yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Selçuk HELHEL' e teşekkür ve minnetimi sunarım.

Bu çalışmanın uygulama ve ölçüm kısımları kalkınma bakanlığının desteğiyle kurulan DPT-2007K120530 proje numaralı Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş ve proje de ihtiyaç duyulan sarf malzeme ekipmanları Akdeniz Üniversitesi BAP tarafından desteklenen FYL-2020-5111 numaralı proje bütçesi kullanılarak temin edilmiştir. Bu imkânları sağlayan EMUMAM müdürlüğüne, uygulama ve ölçüm kısmında tecrübe ve desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Atalay KOCAKUŞAK hocama teşekkür ederim.

Son olarak, beni sadece bu günlere değil her zaman daha da ileriye götürecek olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Metamalzemeler	3
2.2. Metamalzeme Soğurucular	3
2.2.1. Metamalzeme soğurucuların teorik şeması	3
2.2.1.1. Empedans eşleştirme teorisi	4
2.2.1.2. Girişim teorisi.....	5
2.2.2. Dar bant metamalzeme soğurucular	7
2.2.3. Geniş bant metamalzeme soğurucular.....	9
2.2.4. Frekansı ayarlanabilir metamalzeme soğurucular	12
2.2.5. Tutarlı metamalzeme soğurucular.....	14
2.3. Elektronik Soğutucular	15
3. METARYAL VE METOT.....	18
3.1. Benzetim ve Modelleme	18
3.1.1. Metamalzeme soğurucu tasarımı	18
3.1.2. Elektronik soğutucu seçimi	20
3.1.3. Soğurucu ve soğutucunun birleştirilmesi	20
3.2. Soğurucu Kuşağın Rezonans Etkisi.....	23
3.3 Ölçme Yöntemi	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27
4.1. Tasarım ve Benzetime Dayalı Bulgular.....	27
4.1.1. Soğurucu kuşağın konumuna göre uzak alanın benzetim ile analizi	28
4.1.1.1. Konuma göre uzak alan ($\theta=90^\circ$) benzetim analizi.....	28
4.1.1.2. Konuma göre uzak alan ($\phi=90^\circ$) benzetim analizi	33

4.2. Ölçmeye Dayalı Bulgular	38
4.2.1. Soğurucu ve soğutucunun tümleşik ışıma performans ölçümleri	38
4.2.1.1. Konuma göre uzak alan ($\theta=90^\circ$) ölçüm analizi	38
4.2.1.2. Konuma göre uzak alan ($\phi=90^\circ$) ölçüm analizi	43
5. SONUÇLAR.....	48
6. KAYNAKLAR.....	50
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Elektronik Soğutucular İçin Geniş Bantlı Yama Tipi Soğurucu Kuşak 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.

22/10/2021

Zeynep KOCAMAN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Hz	: Hertz (1/ saniye)
MHz	: Megahertz
GHz	: Gigahertz
THz	: Terahertz
ϵ	: Elektrik geçirgenlik
ϵ_0	: Boş alanın elektrik geçirgenliği
ϵ_r	: Göreli elektrik geçirgenlik
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boş alanın manyetik geçirgenliği
μ_r	: Göreli manyetik geçirgenlik
σ	: Elektrik iletkenliği
$\tan\delta$: Dielektrik kayıp
h	: Alttaş kalınlığı
ω	: Faz hızı
R	: Gelen yansıma
θ	: Geliş açısı
n	: Etkin kırılma indisi
Z	: Empedans
Z_0	: Boş alanın empedansı
A	: Soğurma
Γ	: Yansıma katsayısı
τ	: İletim katsayısı
β	: Yayılma fazı gecikmesi
k	: Boş uzayın dalga sayısı

t	: Bakır kalınlığı
d	: Alt tabakanın kalınlığı
β_1	: Yayılma fazı
β_2	: Dielektrik alt tabakadaki soğurma
d'	: Yayılma uzunluğu
mm	: Milimetre
dB	: Desibel
Ω	: Ohm
W	: Watt
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

Kısaltmalar

CST	: Elektromanyetik Benzetim Yazılımı
RF	: Radyo Frekansı
C-Bandı	: 4.0 ile 8.0 Gigahertz Frekans Aralığı
EM	: Elektromanyetik
TE	: Enine Elektrik Polarize Dalga
TM	: Enine Manyetik Polarize Dalga
FR-4	: Flame Retardant (Alev Geciktirici Dielektrik Malzeme)
S11	: Giriş Kapısı Gerilim Yansıma Katsayısı
EMG	: Elektromanyetik Girişim
TMS	: Tutarlı Metamalzeme Soğurucular
SRR	: Split Ring Resonator (Bölünmüş Halka Rezonatör)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Metamalzeme soğurucunun çoklu yansımaları ve girişim modeli	5
Şekil 2.2. a) İlk düzlemsel metamalzeme soğurucunun birim hücresi; b) Mikrodalga frekansında simüle edilmiş yansıma, iletim ve soğurma	7
Şekil 2.3. a) Ağaçsı metamalzeme soğurucunun birim hücresi; b) Simüle edilmiş ve ölçülmüş soğurma spektrumları.....	8
Şekil 2.4. Testere dişli metamalzeme soğurucu ve soğurma spektrumunun şematik görünümü	9
Şekil 2.5. a) Su metamalzeme soğurucusun şematik görünümü, birim hücrenin katman görünümü ve su tabakasının kesilmiş düzlem görünüşü; b) Su metamalzeme soğurucusunun, metal bir zeminle desteklenen tam su tabakasının ve su içermeyen metamalzemenin soğurma spektrumları	10
Şekil 2.6. a) Silikon bazlı metamalzeme soğurucunun şematik görünümü; b) Birim hücresi; c) Konik ve silindirik deliklere sahip silikon bazlı metamalzemelerin soğurma spektrumları.....	11
Şekil 2.7. a) Deneysel; b) Mekanik olarak gerilebilir dielektrik metamalzeme soğurucunun benzetilmiş soğurma spektrumları; c) Dielektrik rezonatörlerin ince bir iletken kauçuk tabaka üzerinde gerilmesinin şeması; d) Rezonans frekansında manyetik alan dağılımı.....	13
Şekil 2.8. a) Grafen telli çapraz şekilli birim hücre; b) Metamalzeme soğurucunun şematik görünümü; c) Farklı ön gerilim voltajları altında metamalzeme soğurucunun soğurma performansı	14
Şekil 2.9. Soğutucuda hava akışı.....	16
Şekil 3.1. Geniş bant metamalzeme soğurucu birim hücresi	19
Şekil 3.2. Geniş bant metamalzeme soğurucu kuşak yapısı	19
Şekil 3.3. Silindirik taban elektronik soğutucu	20
Şekil 3.4. a) Soğutucu ve tek katlı kuşak; b) Çift katlı kuşak; c) Üç katlı kuşak	20
Şekil 3.5. Soğutucu, tek katlı kuşak, çift katlı kuşak ve üç katlı kuşak S11 grafiği.....	21
Şekil 3.6. Kuşakların konumu a) Konum-1; b) Konum-2; c) Konum-3; d) Konum-4; e) Konum-5; f) Konum-6; g) Konum-7	22
Şekil 3.7. Soğutucu ve 7 farklı konumdaki soğurucunun S11 grafikleri.....	23
Şekil 3.8. Ölçümde kullanılan spektrum analizör ve RF işaret üretici	25
Şekil 3.9. Ölçüm ortamı olarak tam yansız oda	25

Şekil 4.1. Soğurucu birim hücresinin S11 grafiği	27
Şekil 4.2. Uzak alan ($\theta=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi.....	29
Şekil 4.3. Konuma göre ana huzme açıları	30
Şekil 4.4. Konuma göre uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerinin benzetim sonuçları ...	31
Şekil 4.5. Uzak alan ($\phi=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi	34
Şekil 4.6. Konuma göre ana huzme açıları	35
Şekil 4.7. Konuma göre uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerinin benzetim sonuçları.....	36
Şekil 4.8. Uzak alan ($\theta=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi.....	39
Şekil 4.9. Konuma göre soğutucu-kuşak ölçüm sonuçları.....	41
Şekil 4.10. Uzak alan ($\phi=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi	44
Şekil 4.11. Konuma göre soğutucu-kuşak ölçüm sonuçları.....	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Benzetimin uzak alan ($\theta=90^\circ$) değerleri	28
Çizelge 4.2. Benzetimin uzak alan ($\phi=90^\circ$) değerleri.....	33
Çizelge 4.3. Ölçümün uzak alan ($\theta=90^\circ$) değerleri	38
Çizelge 4.4. Ölçümün uzak alan ($\theta=90^\circ$) bastırma değerleri	40
Çizelge 4.5. Ölçümün uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri.....	40
Çizelge 4.6. Ölçümün uzak alan ($\phi=90^\circ$) değerleri	43
Çizelge 4.7. Ölçümün uzak alan ($\phi=90^\circ$) bastırma değerleri.....	45
Çizelge 4.8. Ölçümün uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerleri	45

1. GİRİŞ

Yapay olarak yapılandırılmış malzemeler olarak da bilinen metamalzemeler, doğada kolayca bulunmayan egzotik özellikleri nedeniyle son on yılda yoğun ilgi görmüştür (Shelby vd. 2001; Engheta ve Ziolkowski 2006; Valentine vd. 2008; Baimuratov vd. 2017). Bir metamalzemenin temel fikri, meta-atomlar veya meta-moleküller olarak da bilinen, gelen elektromanyetik dalgalara yeni elektrik ve/veya manyetik tepkilere sahip dalga boyu altı birim hücreleri tasarlamaktır (Zhang ve Liu 2008; Zhu vd. 2014; Kang 2017).

Metamalzemeler sayesinde yapay ortamlar daha kullanışlı hale getirilebilir. Metamalzemelerin geliştirilmesi, görünmezlik pelerini (Schurig vd. 2006), dev optik kiralite (Zhu vd. 2013), dalga cephesinin kontrolü (Kang vd. 2017), yüzey plazmon manipülasyonları (Zhu vd. 2012) gibi bir dizi ilgi çekici uygulama ile sonuçlanır ve ayrıca kompakt boyutlara ve gelişmiş yönlere sahip antenler için de kullanılır (Hong vd. 2017; Lin ve Chen 2017).

Pratik mühendislik uygulamalarının önündeki en büyük engellerden birinin metamalzemelerdeki kaçınılmaz içsel kayıp olduğu iyi bilinmektedir. Yapısal geometrileri optimize ederek düşük kayıplı cihazlar elde etmek için büyük çaba harcanmıştır (Cao vd. 2012; Zhu ve Zhao 2009). Diğer taraftan, termal algılama (Guddala vd. 2015), enerji hasadı (Wang vd. 2015), saçılmayı düşürme (Culhaoglu vd. 2013) vb. gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir. Kaybın tam faydasını kullanarak, elektrik ve manyetik rezonansları uygun şekilde tasarlayarak neredeyse tek tip soğurmaya sahip metamalzemeler elde edilebilir (Landy vd. 2008; Watts vd. 2012; Huang vd. 2012; Ra'di vd. 2015).

Landy vd. (2008) tarafından tasarlanan ilk metamalzeme soğurucu yapı polarizasyona karşı duyarlı ve dar bir bant genişliğine sahiptir. Bu nedenle kısıtlı sayıda uygulamada kullanılabilmektedir. Metalmalzeme tabanlı soğurucuların kullanım alanlarını ve bant genişliğini artırmak için çok çaba sarf edilmiştir. Farklı frekans bantlarında ve değerlerinde tasarlanan farklı birim hücreler aynı düzlem üzerinde uygun pozisyonlarda bir araya getirilerek geniş bantlı soğurucu metamalzeme yapısı elde edilmeye çalışılmıştır (Zhou vd. 2015).

Bu rezonanslar frekans olarak birbirine kapatıldığında geniş bantlı soğurma elde edilebilir (Gu vd. 2013). Geniş bantlı soğurma, çok katmanlı yapılara sahip metamalzeme soğurucularda (Cui vd. 2012) veya dikey olarak duran nanoteller (Shen vd. 2015) kullanılarak da elde edilebilir. Ayrıca, aktif ortamları dâhil ederek, metamalzeme soğurucuların soğurmaları ve frekansları, harici sapmalar yoluyla ayarlanabilir (Yao vd. 2016).

Bu tez çalışmasının kaynak taraması kısmında, çalışma frekansları mikrodalga, THz, kızılötesinden görünür rejimlere kadar uzanan elektromanyetik metamalzeme

soğurucularının araştırma alanındaki temel teoriler ve son gelişmeler hakkında kısa bir inceleme sunulacaktır. Metamalzeme tasarımında kullanılan genel teoriler, empedans eşleştirme ve girişim teorisi ile açıklanmaktadır. Tek tip soğurma performansına sahip dar bant metamalzeme soğurucu tasarımları değerlendirilmiştir. Sonrasında, bant genişliğini artırmak için kullanılan teknikler yer almaktadır. Devamında ise ayarlanabilir soğurma kapasitesi olan metamalzeme soğurucular gözden geçirilmiştir. Faz modülasyonu yoluyla metamalzeme soğurucunun soğurmasının tutarlı kontrolü de tartışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında elektronik soğutucuların neden olduğu girişim etkilerini bastırmak veya yönlendirmek amacı ile soğutucuların etrafında kullanılmak üzere metamalzeme tabanlı bir soğurucu kuşak tasarımı hedeflenmiştir. Ayrıca bir anten gibi davranış gösterebilen elektronik metal soğutucuların neden olduğu ışıma kaynaklı elektromanyetik girişimlerin bastırılması için soğurucu kuşağın konumunun etkisi/katkısı incelenmiştir.

Bu çalışmanın 2. Bölümünde kaynak taraması, 3. Bölümünde ölçüm yönteminin bahsedildiği materyal ve metot kısmı, 4. Bölümünde çalışmaya ait benzetim ile ölçüm bulguları ve tartışma, 5. Bölümünde çıkarılan sonuçlar, 6. Bölümde çalışmada referans gösterilen kaynaklar ve 7. Bölümünde ekler yer almaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölüm aracılığıyla, tezin dayandığı metamalzemeler, metamalzeme soğurucular, geniş bantlı metamalzemeler ve elektronik soğutucular ile ilgili kuramsal bilgiler verilerek bu konular ile ilgili olarak yapılan çalışmalardan ve yayınlardan bahsedilecektir.

2.1. Metamalzemeler

Elektromanyetik dalga emici yapılar, radar kesit alanının azaltılmasında, anten ışınım yan loblarının bastırılmasında ve elektromanyetik girişimin önlenmesinde kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar neticesinde metamalzeme tabanlı soğurucu yapıların da bu maksatla kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Metamalzemeler doğada bulunan malzemelerden farklı elektromanyetik özellikler gösteren yapay malzemelerdir. Negatif kırınım, ters Doppler kayması vb. sıra dışı özellikleri sayesinde metamalzemelerin, mikrodalga frekanslarından optik frekanslara kadar antenler, sensörler, filtreler, sinyal soğurucu yapılar gibi birçok alanda kullanım olanakları mevcuttur.

Metamalzemelerin kullanım alanlarından bir tanesi de gelen elektromanyetik dalgaya karşı mükemmel soğurma gösteren sinyal soğurucu olarak kullanımlarıdır. Mikrodalga bandında yüksek soğurma verimliliklerinin yanı sıra, düşük maliyetli ve kolay üretilebilir olmaları ile, metamalzeme tabanlı mükemmel sinyal soğurucu yapılar oldukça kullanışlıdır.

Özellikle metamalzeme sinyal soğurucu yapıların, sunmuş oldukları esneklik, geniş bantlı mükemmel soğurma ve elektromanyetik görüngenin her bir bölgesinde gerçekleştirilmeleri nedenleriyle, soğutucular için de istenmeyen ışınımın azaltılmasında karşı önlem olarak kullanılabilecekleri değerlendirilmektedir.

2.2. Metamalzeme Soğurucular

Bu bölümde metamalzeme soğurucuların teorik şeması ve dar bant, geniş bant, frekansı ayarlanabilir ve tutarlı metamalzeme soğuruculardan bahsedilmektedir.

2.2.1. Metamalzeme soğurucuların teorik şeması

Mükemmel soğurmayı elde edebilmek için metamalzemelerin temel fizik teorisini ve tarihsel gelişimini açıklayarak başlayalım. İlk teoriye göre, metamalzemelerin elektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliği boş alanda empedans eşlenmesini sağlaması için hem elektrik hem de manyetik rezonansları tasarlanmalıdır (Tao vd. 2008). Böyle bir durumda ara yüzde yansıma olmaz ve gelen tüm enerjinin metamalzeme soğurucu içinde soğurulma şansı vardır.

Diğer bir teoriye göre, dielektrik alttaşı içinde meydana gelen içsel yansımalar ve diğer sıralı yansımalar olası girişimlere neden olmaktadır.

2.2.1.1. Empedans eşleştirme teorisi

Bir metalmalzemeye soğurucu, tipik olarak, bir alt tabakanın bir tarafında bir dizi belirli metalik desenden oluşan ve oldukça iletken bir metalik zemin düzlemi ile desteklenen bir sandviç yapısıdır.

Metalmalzemenin elektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliği sırasıyla $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega)$ ve $\mu = \mu_0 \mu_r(\omega)$ şeklindedir. Burada ε_0 ve μ_0 boş alan elektrik ve manyetik geçirgenliğidir. $\varepsilon_r(\omega)$ ve $\mu_r(\omega)$, ortamın birimsiz ve boş alan değerlerine göre normalize edilmiş frekansa bağlı göreceli elektrik ve manyetik geçirgenliğidir.

Metalmalzemenin arka tarafında toprak düzlemi sayesinde herhangi bir geçirgenliğe rastlanmamıştır. Böylelikle de metalmalzeme üzerinde sadece yansıma faktörü etkili olacaktır.

Fresnel yansıma formülüne göre, metalmalzemedeki gelen yansıma (R)

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left| \frac{\mu_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\mu_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2 \quad (2.1)$$

$$R_{TM} = |r_{TM}|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\varepsilon_r \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right|^2 \quad (2.2)$$

TE ve TM alt simgelerinin enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) polarize dalgaları ifade ettiği yerde, θ geliş açısıdır ve $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ metalmalzemenin etkin kırılma indisidir.

Normal olay durumunda, $\theta = 0^\circ$ elde ederiz, böylece bu denklemler şuna indirgenir:

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\varepsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\varepsilon_r}} \right|^2 \quad (2.3)$$

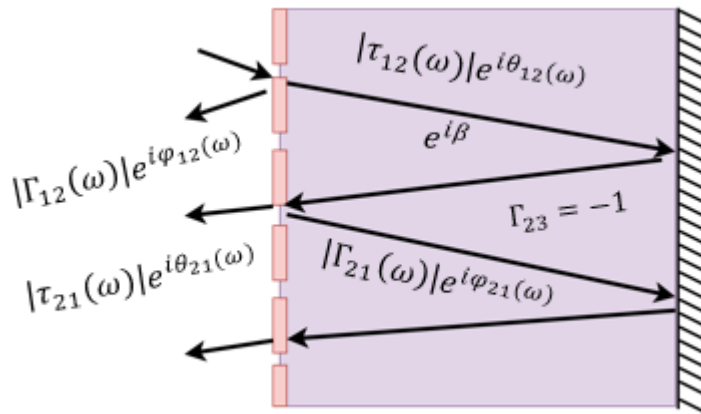
$Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ metalmalzemenin empedansı ve $Z_0 = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ boş alanın empedansıdır. Metalik zemin sıfır geçirgenliğe yol açtığından, soğurma şu sonuca ulaşır:

$$A = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (2.4)$$

Yukarıdaki denklem, empedans eşleşmesinin, $Z = Z_0$ veya $\mu_r = \epsilon_r$, mükemmel soğurma elde etmek için kritik bir koşul olduğunu gösterir. Bir metamalzeme soğurucu da empedans uyumu elde etmek için eşzamanlı elektrik ve manyetik rezonansların gerekli olduğunu belirtmekte fayda var. İster elektrik ister manyetik rezonans olsun, tek rezonansa sahip bir metamalzeme için empedansı, boş alanın empedansı ile güçlü bir uyumsuzluğa sebep olacaktır. Bu sebeple mükemmel bir soğurucu bulmak mümkün görünmemektedir.

2.2.1.2. Girişim teorisi

Aslında metamalzeme soğurucu yapıları alt metal, üst metal ve dielektrik katman olarak birleştirilmiş bir sistem olarak düşünürsek, alt ve üst katman arasındaki paralel olmayan akımlar sayesinde manyetik rezonans indüklenir. Bunun yanında, üst katmanın ve toprak düzlemin çalışmasının bağımsız olarak gerçekleştiğini söyleyebiliriz (Chen 2012). Bazı metalik şekillere dayanan üst katman yansıma ve iletim katsayılarını değiştirerek kısmen bir yansıma alanı görevini üstlenir. Diğer taraftan, tamamen iletken olan toprak düzlemine gelen EM dalga 180°'lik bir faz gecikmesi oluşturarak mükemmel bir yansıtıcı yüzey halini alır.



Şekil 2.1. Metamalzeme soğurucunun çoklu yansımaları ve girişim modeli

Gelen elektromanyetik dalga, yansımaya katsayısı $\Gamma_{12}(\omega) = |\Gamma_{12}(\omega)|e^{i\varphi_{12}(\omega)}$ ile kısmen havaya geri yansıtılır ve kısmen iletim katsayısı $\tau_{12}(\omega) = |\tau_{12}(\omega)|e^{i\theta_{12}(\omega)}$ ile alt tabakaya iletilir. İletilen dalga, metalik zemin düzlemine ulaşana kadar daha da yayılacaktır.

Dielektrik alt tabaka içindeki karmaşık yayılma sabiti $\beta = \beta_1 + i\beta_2 = \sqrt{\varepsilon_d}k_0d'$ dir, burada k_0 boş uzayın dalga sayısıdır, d alt tabakanın kalınlığıdır, β_1 yayılma fazını temsil eder ve β_2 , dielektrik alt tabakadaki soğurmaya işaret eder. Toprak katmanında, yansımaya katsayısı -1 olan toplam bir yansımaya oluşur. Direkt oluşan ayna yansımalarının yanında ek olarak yayılma fazı gecikmesi β , sonrasında ön ara katmanda kısmen yansımalar ve iletim ortaya çıkar.

Karşılık gelen yansımaya ve iletim katsayıları sırasıyla $\Gamma_{21}(\omega) = |\Gamma_{21}(\omega)|e^{i\varphi_{21}(\omega)}$ ve $\tau_{21}(\omega) = |\tau_{21}(\omega)|e^{i\theta_{21}(\omega)}$ 'dir. Dielektrik alt tabakanın içinde birden fazla yansımaya ve iletimin mevcut olduğunu ve metamalzemenin sol tarafındaki toplam çıkış enerjisinin tüm yansımalarının üst üste binmesi olduğunu belirtmekte fayda var.

$$\Gamma(\omega) = \Gamma_{12}(\omega) - \frac{\tau_{12}(\omega)\tau_{21}(\omega)e^{2i\beta}}{1 + \Gamma_{12}(\omega)(\omega)e^{2i\beta}} \quad (2.5)$$

Burada sağdaki ilk terim, doğrudan meta katmandan yansımadır ve ikinci terim, çoklu yüksek dereceli yansımaların üst üste bindirilmesinin katkısıdır. Toplam yansımaya Γ 'yi bildiğimiz sürece, metamalzemenin soğurma spektrumu $A(\omega) = 1 - |\Gamma_{12}(\omega)|^2$ ile elde edilebilir. Girişim teorisi, metalik zeminli bu metamalzeme soğurucularda gözlemlenen özellikleri iyi açıklayabilir ve ayrıca metamalzeme soğurucularının kökeni ve temel fiziği hakkında alternatif bir anlayış sağlar.

Yukarıdaki analizde metamalzemeye doğru gelen dalganın normal doğrultuda olduğunu belirtelim. Bir elektromanyetik dalga olayının θ açısı ile eğik olduğu durumda, dielektrik alt tabaka içindeki yayılma uzunluğu uzar. Bu nedenle, yayılma fazı gecikmesi $\beta = \sqrt{\varepsilon_d}k_0d'$ olarak değiştirilmelidir, burada $d' = d/\cos\theta'$ alt tabaka içindeki değiştirilmiş yayılma uzunluğudur ve kırılma açısı Snell kanunu $\sqrt{\varepsilon_d}\sin\theta' = \sin\theta$ izlenerek elde edilebilir.

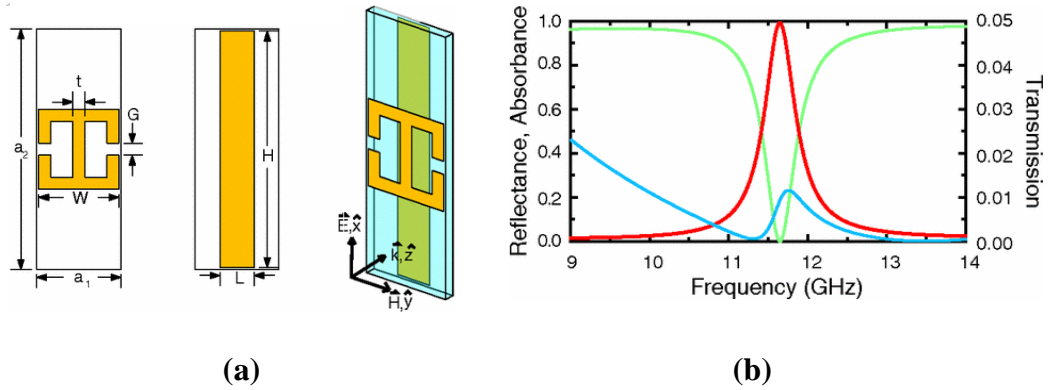
2.2.2. Dar bant metamalzeme soğurucular

SRR (Split Ring Resonator) dizileri Salisbury ekranındaki gibi boş alanda empedans uyumlandırması için (377Ω) levha üzerinde konumlandırılır. Görüldüğü üzere iletim ve yansıma değerleri 2 GHz civarında -20 dB den düşüktür. Bu frekansta mükemmel yakın bir soğurmanın gerçekleşmesinin sebebi oluşturulan yapıdaki güçlü rezonanslardır.

Bunun beraberinde düzlemsel yapılarla kıyaslandığında SRR dizilerinin bulunduğu düzlemin düzenlenmesinden dolayı üretim aşamasında zorluklara yol açar. Soğurma bant genişliği de belli sınırlarda kalmaktadır. Bu sınırları genişletmek istemek metamalzeme soğurucu tasarımına odaklanmasını sağlar. Şekil 2.2’de FR-4 alttaşı ile ayrılmış elektrikli halka rezonatörleri ve kesilmiş teller ile oluşturulan sandviç bir yapı önerilmiştir (Landy vd. 2008). Bu çalışma sunulan ilk metamalzeme soğurucudur.

Yapının soğurma performansı benzetimde 11,65 GHz’de %96 olarak gözlenmiş sonrasında yapılan deneyde ise 11,5 GHz’de %88’e düşmüş bant genişliği de yaklaşık olarak %4’tür. Üst katmanda yer alan tasarlanmış rezonatörlere gelen elektrik alan elektriksel bir tepki oluştururken, alt ve üst katmanda bulunan metal yüzeyler arasında ise paralel olmayan yüzey akımlarının akışı manyetik bir tepki oluşturur.

Bütün bunların neticesinde metamalzemenin soğurma performansı ve frekansı üst katmanda bulunan rezonatörlerin geometrisi ve alttaş kalınlığı değiştirilerek kontrolü sağlanabilir. Bu öncü çalışmadan esinlenerek, farklı spektral aralıklarda metamalzeme soğurucularının gerçekleştirilmesi için büyük miktarda çaba sarf edilmiştir.

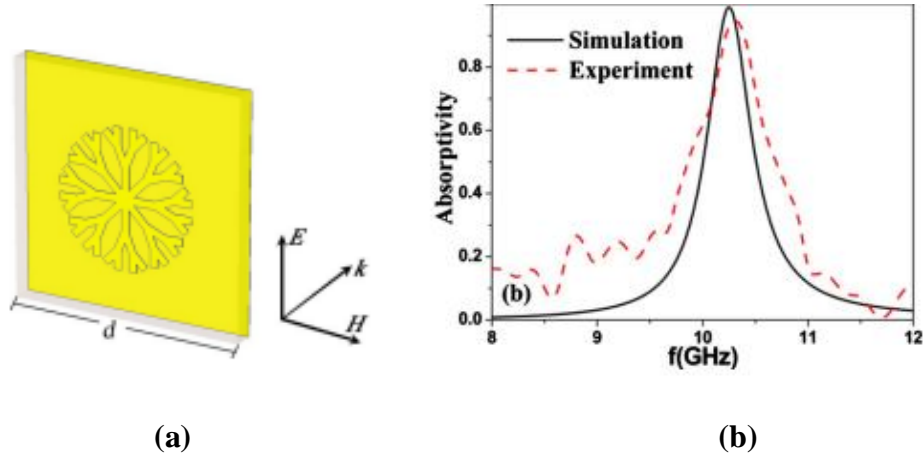


Şekil 2.2. a) İlk düzlemsel metamalzeme soğurucunun birim hücresi; b) Mikrodalga frekansında simüle edilmiş yansıma, iletim ve soğurma (Landy vd. 2008)

İlk metamalzeme soğurucular, yön bağımlı birim hücreler nedeniyle polarizasyona duyarlıdır (Landy vd. 2008; Diem vd. 2009). Sonraki çalışmalar silindirik yama dizileri (Zhu vd. 2010) ve kar tanesi şeklindeki hücreler (Huang vd. 2013) gibi simetrik yapılar polarizasyona bağımsız hale getirmek için metamalzeme soğurucular için tasarlanmıştır.

Şekil 2.3a'da gösterildiği gibi, periyodik metalik ağaçsı hücreler dizisi, FR-4 alttaşının ön tarafında tam bir zemin düzlemidir. Bu yapının hem benzetimde hem de deneyde birbirine uygun olarak 10,26 GHz frekansında %95'in üzerinde soğurma gerçekleştirdiği Şekil 2.3b'de gösterilmiştir.

Böyle bir meta malzeme soğurucu, rastgele polarizasyona sahip bir gelen dalga için eşit soğurma performansı gösteren düzlemsel yön bağımsız soğurma mükemmelliğine sahiptir. Ağaçsı metamalzeme soğurucunun boyutu nano ölçeğe göre küçültülürken, sayısal benzetimle de doğrulanmış olan optik rejimde mükemmel soğurma elde edebilmektedir (Zhu ve Zhao 2009).



Şekil 2.3. a) Ağaçsı metamalzeme soğurucunun birim hücresi; **b)** Simüle edilmiş ve ölçülmüş soğurma spektrumları (Zhu ve Zhao 2009)

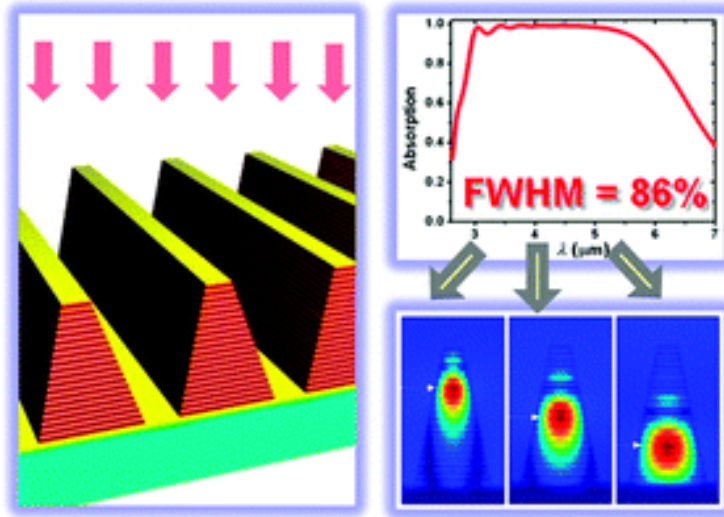
Genellikle metamalzemesler ve metamalzeme soğurucular periyodik olarak yerleştirilmiş birim hücrelerden meydana gelir. İmalattaki kusur, bir dereceye kadar metamalzemenin performansını etkileyecektir. Metamalzemenin periyodik olması optik alanında nano boyutlarda olduğu için ekstra önem arz eder. Bu durumun ortaya çıkardığı etkiyi gözlemlemek için metamalzeme soğurucu yapısındaki birim hücrelerin düzensiz bir şekilde yerleştirilerek sonuçları incelenmiştir (Zhu ve Zhao 2010).

Birim hücreler daha düzensiz hale geldikçe soğurmanın azaldığı ve soğurma frekansının kırmızıya kaydığı saptanmıştır. Buna rağmen, makul bir düzensizlik seviyesinde yine de %95'in üstünde soğurma performansı göstermiştir.

2.2.3. Geniş bant metamalzeme soğurucular

Metamalzeme soğurucuların bant genişliğini artırmak için farklı yöntemler bulunmuştur. Bant genişliğini artırmak için en çok kullanılan yöntemler, çok katmanlı yapılar (Cui vd. 2012) ve farklı frekanslardaki rezonans hücrelerinin bir birim hücrede birleştirilmesidir (Bouchon vd. 2012; Cheng vd. 2012). Yüksek oranda kayıplı dielektrikler veya yarı iletkenler de geniş bantlı metamalzeme soğurucuların tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Pu vd. 2012). Bu kısımda metamalzeme soğurucuların bant genişliğini artırmak için tasarımda uygulanan yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Geniş bantlı metamalzeme soğurucuları tasarlamak için en etkili yaklaşımlardan biri, farklı boyutlardaki rezonant yamaları istiflemektir.

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, kızılötesi dalga boylarında çok katmanlı, testere dişli bir yön bağımlı metamalzeme soğurucu önerilmiştir (Cui vd. 2012). Önerilen bu metamalzeme soğurucu 21 katlı metal yüzeyden oluştuğu halde toplam kalınlık çalışma dalga boyundan yine de incedir. Özellikle, yarı maksimumda nispi tam soğurma genişliğinin %86 gibi yüksek bir rakama ulaşabileceği gösterilmiştir. Oluşturulan katmanlı metamalzeme soğurucuda, farklı katmanlarda tasarlanan metal yamaların üst üste konulmasıyla oldukça geniş bant genişliği elde edilmiştir. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar üst kısımlarda emilirken, düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar alt kısımlarda yakalanır.



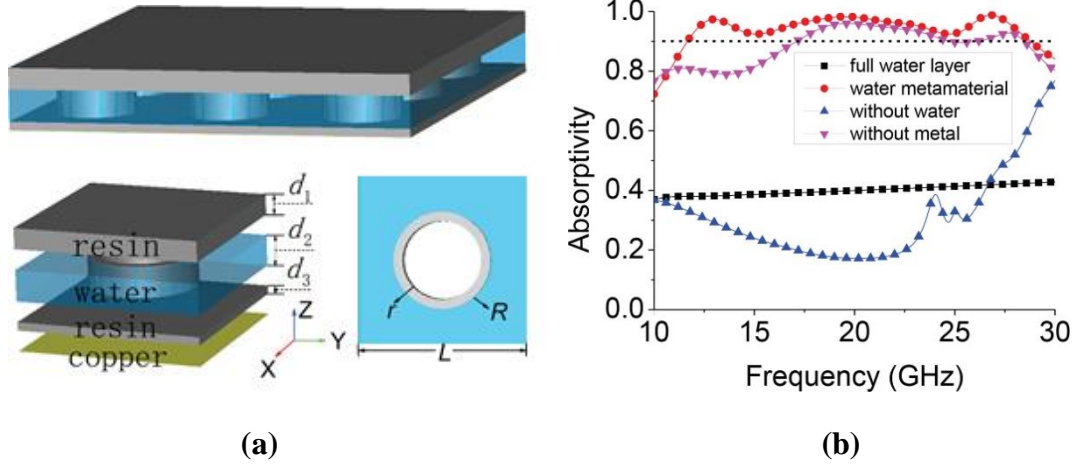
Şekil 2.4. Testere dişli metamalzeme soğurucu ve soğurma spektrumunun şematik görünümü (Cui vd. 2012)

Dielektriklerde veya yarı iletkenlerde içsel yüksek kayıp, basit yapılarda geniş bant soğurmanın tasarlanması için de kullanılabilir (Pu vd. 2012). Örnek vermek gerekirse su mikrodalga bandında iyi bir kayıplı dielektriktir.

Şekil 2.5'te en altta metal bir düzlem ile konumlandırılmış reçine kap içerisinde yerleştirilmiş periyodik su delikleri bulunan tabakadan yapılmış metamalzeme soğurucu yer almaktadır.

Böylelikle Xie vd. (2018) 12 GHz'den 29,6 GHz'e kadar olan frekans bandında %90'ın üzerinde bir geniş bant soğurma performansına sahip olduğunu ifade etmiştir. Bu tür bir su metamalzeme soğurucusundaki geniş bantlı soğurmanın ağırlıklı olarak içsel yüksek su kaybından kaynaklanıp kaynaklanmadığını anlamak için, su tabakasının deliksiz olduğu durum ile reçine kabının boş olduğu durum için soğurma spektrumlarını da karşılaştırmışlardır.

Şekil 2.5b'de gösterildiği gibi, tam bir su tabakasının soğuruculuğunun sadece %35-40 civarında olduğunu, su boşaltıldığında metamalzeme soğurucunun soğuruculuğunun ise sadece %20-40 civarına düştüğünü bulmuşlardır. Bu sonuçlar, ultra geniş bant soğurmanın temel olarak yapılandırılmış su rezonatörlerinden lokalize rezonanslara katkıda bulunduğunu doğrulamaktadır.



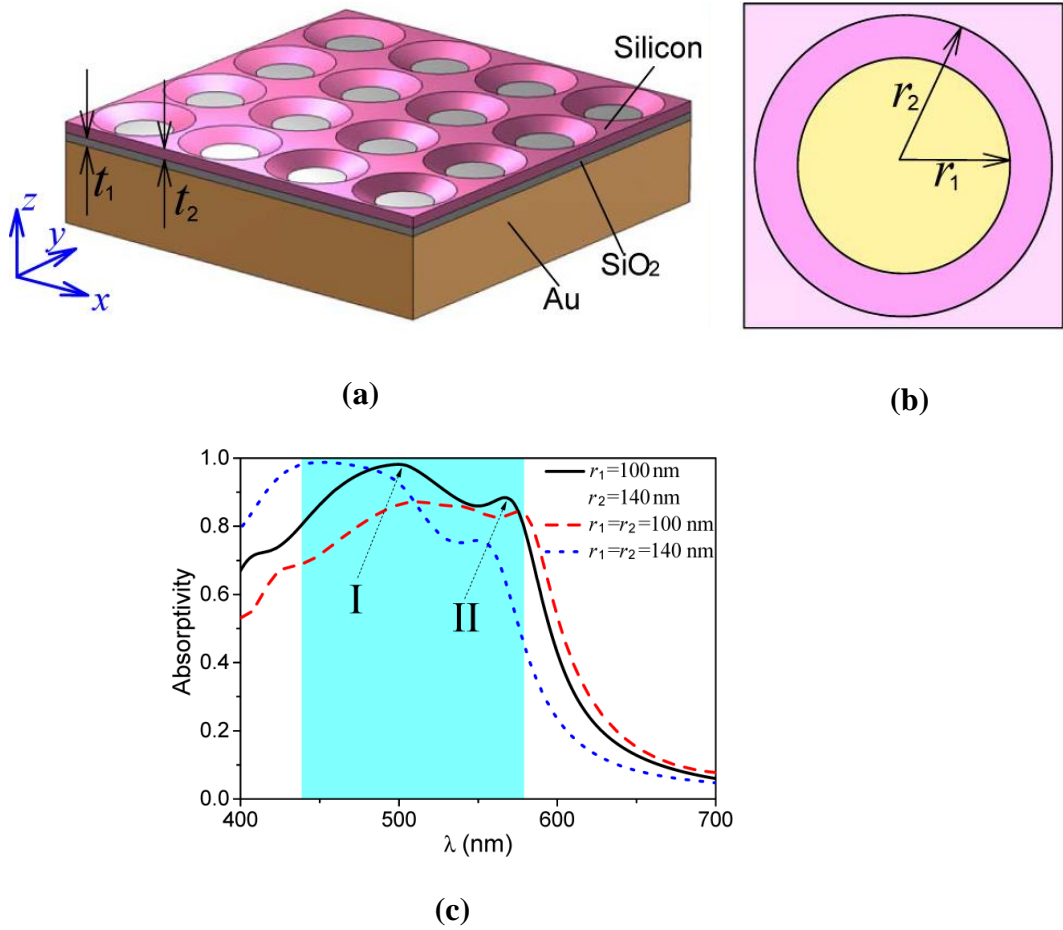
Şekil 2.5. a) Su metamalzeme soğurucusunun şematik görünümü, birim hücrenin katman görünümü ve su tabakasının kesilmiş düzlem görünüşü; **b)** Su metamalzeme soğurucusunun, metal bir zeminle desteklenen tam su tabakasının ve su içermeyen metamalzemenin soğurma spektrumları (Xie vd. 2018)

Yüksek katkılı silisyum nispeten düşük dirençliliğe sahiptir ve geniş bant soğurmayı sağlamak için kullanılan THz frekanslarında kayıplı bir dielektrik gibi davranır (Pu vd.

2012). Kayıplı bir alttaş kullanarak Yin vd. (2015) 0.9-2.5 THz çalışma bandında bir metamalzeme soğurucu tasarlamıştır.

Görünür dalga boyunda geniş bant yüksek soğurma performansı için Şekil 2.6a'daki gibi silikon bazlı bir metamalzeme soğurucu önerilmiştir (Zhu vd. 2017). Böyle bir metamalzeme soğurucunun 3 işlevsel katmanı vardır. Periyodik olarak kesik konik deliklere sahip dalga boyunun altında bir silikon katman, silikon dioksit ara katmanı ve kalın bir altın alttaş.

Şekil 2.6c'deki sonuçlara bakıldığında kesik konik deliklere sahip silikon metamalzeme soğurucu ilgili frekans aralığında diğerlerinden daha yüksek bir soğurma performansına ve daha geniş bir bant genişliğine sahiptir.



Şekil 2.6. a) Silikon bazlı metamalzeme soğurucunun şematik görünümü; b) Birim hücresi; c) Konik ve silindirik deliklere sahip silikon bazlı metamalzemelerin soğurma spektrumları

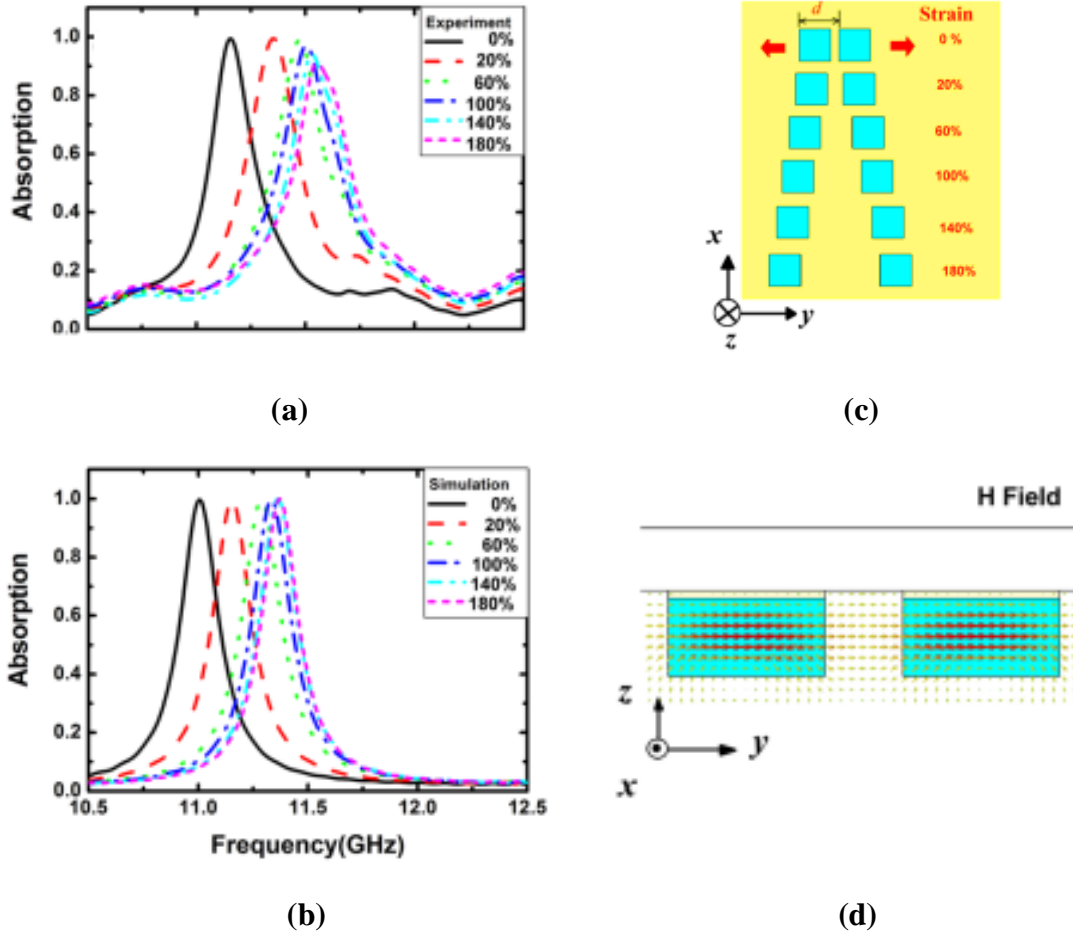
2.2.4. Frekansı ayarlanabilir metamalzeme soğurucular

Metamalzemeler istediğimiz elektromanyetik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilme esnekliğine sahip olsa da tasarımın ardından bu değerler sabitlenir (Smith vd. 2000; Zhong vd. 2012). Aynı zamanda çalışma frekansı sabit ve pratik uygulamaları kısıtlı metamalzeme tabanlı soğurucular içinde sabitlenir. Bu nedenle, frekansa göre ayarlanabilen özelliklere sahip metamalzeme soğurucular, daha verimli oldukları için uygulamada oldukça sık tercih edilir.

Bir metamalzeme soğurucuda ayarlanabilirliği sağlamak için, geleneksel bir pasif metamalzeme soğurucuya ayarlanabilir malzeme özelliklerine sahip bir ortam entegre edilebilir. Kanıtlanmış yöntemlerden bazıları, varaktör diyotlar (Wen vd. 2012), ferroelektrikler (Hand ve Cummer 2008), ferritler (Huang vd. 2014), grafen (Linder ve Halterman 2016), yön bağımlı sıvı kristaller (Shrekenhamer vd. 2013) ve faz geçiş malzemeleri (Mkhitaryan vd. 2017) gibi elementlere sahip olan malzemeleri içerir.

Ayarlanabilir metamalzeme soğurucular için mekanik bükme veya kaydırma da incelenmiştir. Zhang vd. (2015) tarafından deneysel olarak, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, ince bir iletken kauçuk tabaka üzerinde dielektrik rezonatörlerden oluşan mekanik olarak gerilebilir bir metamalzeme soğurucu sunulmuştur.

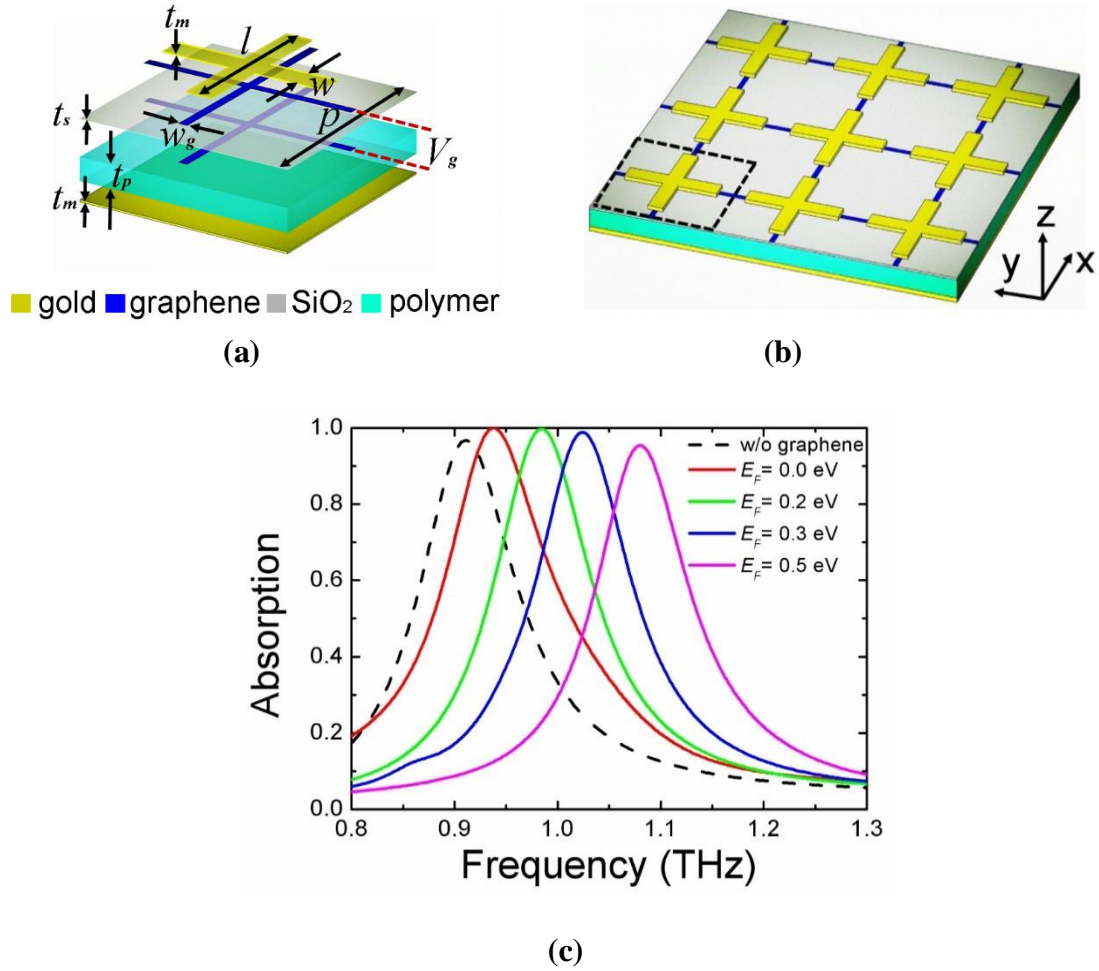
Şekil 2.7'de tek eksenli gerilim altında metamalzeme soğurucuyu gererken, dielektrik bloklar arasındaki boşluk kademeli olarak artar ve bu nedenle rezonans frekansı X bandında 410 MHz'lik bir kaymaya uğrar. Zhu vd. (2012), rezonans frekansı mekanik yollarla değiştirilebilen bir metamalzeme soğurucuyu deneysel olarak göstermişlerdir. Bu yapı metamalzeme soğurucuya paralel olarak yardımcı bir dielektrik katman eklenerek metamalzeme ile dielektrik katman arasındaki boşluk değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda dielektrik katmanın ölçülerinin ve şeklinin akıllıca ayarlandığında çoklu soğurma bantlarının oluştuğunu göstermişlerdir.



Şekil 2.7. a) Deneysel; b) Mekanik olarak gerilebilir dielektrik metamalzeme soğurucunun benzetilmiş soğurma spektrumları; c) Dielektrik rezonatörlerin ince bir iletken kauçuk tabaka üzerinde gerilmesinin şeması; d) Rezonans frekansında manyetik alan dağılımı (Zhang vd. 2015)

Grafen, yüzey iletkenliğinin ayarlanabilmesi nedeniyle ayarlanabilir metamalzeme soğurucuların tasarımında da kullanılmıştır (Zhu vd. 2013). Şekil 2.8a'da ve 8b'de gösterildiği gibi artı işaretli şekilde metalik birim hücrelere sahip metamalzeme soğurucu grafen tellerle birleştirilmiştir (Zhang vd. 2014). Bu yapı polarizasyona duyarlı soğurma için tasarlanmış ve soğurma performansı terahertz frekans bandında ayarlanabilmektedir.

Şekil 2.8c'de gösterildiği gibi, grafenin Fermi seviyesini basitçe kontrol ederek, soğurma tepe frekansının, neredeyse tek tip tepe soğurma değeri ile %15'lik bir frekans aralığında ayarlanabildiğini göstermişlerdir. Grafendeki Fermi seviyesi, grafen katmanlarındaki öngerilim voltajı ayarlanarak rahatlıkla kontrol edilebilir.



Şekil 2.8. a) Grafen telli çapraz şekilli birim hücre; b) Metamalzeme soğurucunun şematik görünümü; c) Farklı ön gerilim voltajları altında metamalzeme soğurucunun soğurma performansı (Zhang vd. 2014)

2.2.5. Tutarlı metamalzeme soğurucular

Tipik bir metamalzeme soğurucunun dezavantajlarından birinin, soğurmanın genel olarak metamalzeme soğurucunun ilk tasarımından sonra sabitlenmesi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle soğurma da esnek ayarlanabilirlik gerektiren ortamlar için kullanışlı değildir. Tutarlı mükemmel soğurma (TMS) bu sorunun çözümü için uygundur (Chong vd. 2010).

Matematiksel olarak, TMS, eşikte zamanla ters çevrilmiş kalıcı olarak kabul edilebilecek belirli bir frekansta saçılma matrisi S 'nin sıfır öz değerine karşılık gelir. Mükemmel soğurma, iki karşıt yayılan ışın tarafından oluşturulan bir duran dalga sisteminde yıkıcı girişim kullanılarak elde edilebilir (Kang vd. 2014). Bunun dışında bu

sistemdeki soğurma sadece iki karşıt yayılan gelen ışın arasındaki faz farkının kontrolüyle yaklaşık olarak %0'dan %100'e kadar modüle edilebilir (Pu vd. 2012).

Soğurucu yapısının sahip olduğu bu dinamik özellik, bu tür soğurucularda, dönüştürücülerde, modülatörlerde ve elektromanyetik anahtarlama oldukça sık tercih edilmektedir. TMS kavramı ile ilgili ilk çalışmaları (Chong vd. 2010) tarafından ortaya atılmış ve deneysel olarak sunulmuştur.

O zamandan beri, elektrik geçirgenliği (ϵ) sifıra yakın metamalzemelerde (Feng ve Halterman 2012), yavaş ışık dalga kılavuzlarında (Gutman vd. 2013), metalik çapraz antenlerden oluşan bir meta yüzeyde (Kang vd. 2013) ve bir Fano rezonans plazmonik sisteminde (Kang vd. 2014) TMS fenomenleri gözlemlenmiştir.

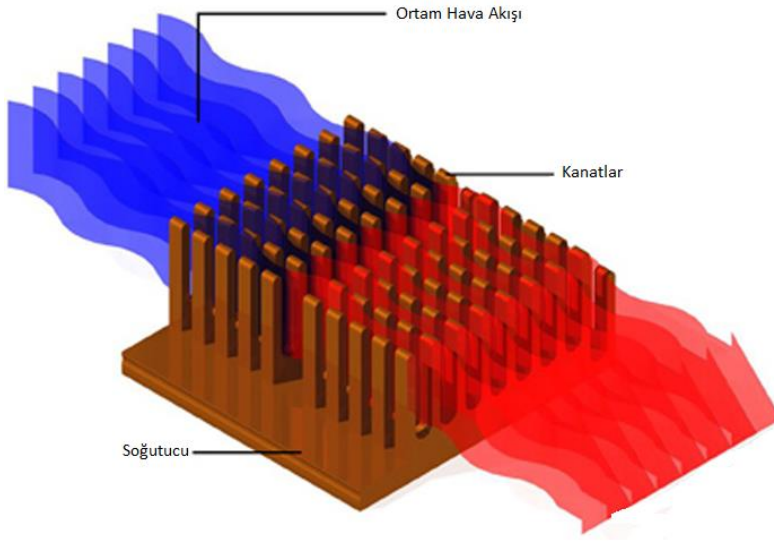
Tutarlı metamalzeme soğurucularının çoğu, metalik alt dalga boyu rezonatörlerine dayanmaktadır. Bununla birlikte son araştırmalarda TMS'nin metal yüzey içermeyen metamalzemelerde de elde edilebileceği ortaya konmuştur. Zhu vd. (2016) tarafından çalışma dalga boyundan iki seviye daha küçük bir kalınlığa sahip tamamıyla dielektrik seramikten yapılmış tek katmanlı bir balık ağı tasarlanmıştır.

TMS'nin böyle bir yapıda bulunabileceğini ve soğurmanın faz modülasyonu yoluyla %0,38 ila %99,85 arasında geniş bir aralıkta kontrol edilebileceğini göstermişlerdir. Sudan yapılmış benzer bir tek katmanlı balık ağı yapısı, çoklu frekans bantlarında yüksek tutarlı soğurma elde etmek için de kullanılabilir (Zhu vd. 2017). Ayrıca suyun sahip olduğu yüksek içsel kayıplar sebebiyle TMS daha geniş bant aralığında tasarlanabilir.

Yapay olarak tasarlanmış rezonatörlerden kaynaklanan güçlü elektrik ve manyetik rezonans gerektiren mükemmel metamalzeme soğurucuların aksine son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda TMS'nin derin alt dalga boyu kalınlığına sahip doğal olarak bulunan mevcut katman malzemelerinde de bulunabileceği sunulmuştur.

2.3. Elektronik Soğutucular

Bir devredeki her elektrikli ve elektronik bileşen, güç kaynağı kullanarak devreyi çalıştırırken bir miktar ısı üretir. Tipik olarak, yüksek güç, örneğin ışık yayan diyotlar gibi güç transistörleri ve optoelektronik gibi cihazlar, yarı iletken lazerler, önemli miktarlarda ısı üretirler. Isı dağıtma kabiliyetleri önemli ölçüde düşük olduğu için, bu bileşenler, devredeki ısının dağıtımında yetersiz kalmaktadırlar. Bu nedenle, bileşenlerin ısınması erken arızaya yol açar ve tüm devrenin veya sistemin performansının bozulmasına neden olabilir. Dolayısıyla, bu olumsuzlukları gidermek için ısının dağıtımını amaçlı soğutucular kullanılır.



Şekil 2.9. Soğutucuda hava akışı (Sunpower Electronics Ltd. uk)

Soğutucu, bir devrenin diğer bileşenlerinden ısıyı çevreleyen ortama yayan ve performanslarını, güvenilirliklerini artırmak için soğutan böylece bileşenlerin erken arızalanmasını önleyen bir elektronik bileşen veya bir elektronik devre cihazıdır. Genelde metal blokların farklı şekillerde tasarlanmasıyla oluşturulan soğutucuların termal performansları yüzey alanları ve akışkan miktarı artırılarak iyileştirilebilir. Doğal konveksiyon yönteminde soğutuculara dışardan herhangi bir destek verilmeyip soğutma işlemi metal iletkenlerin termal difüzyonu ile sağlanmaktadır. Bu tip soğutucular pasif soğutucular olarak adlandırılır. Aktif soğutucularda ise fan vb. elemanlarla akışkan miktarının artırılması söz konusudur (Mousavi vd. 2018). Termal performans açısından soğutucuların yüzey alanlarının artırılması avantaj gibi görünmekle birlikte, metal blokların boyutları çalışma frekansının dalga boyu ile kıyaslanabilir büyüklüğe ulaştığında soğutucuların anten gibi davranması söz konusu olmaktadır. Özellikle soğutuculara eklenen dikey kanatçıkların, monopol anten davranışı sergilediği değişik çalışmalarda ortaya konulmuştur (He ve Hubing 2012).

Anten gibi davranabilen soğutucuların devreye veya güç elemanlarına yakın bir biçimde monte edilmesi, soğutucularla diğer elemanlar arasında kapasitif ve endüktif bağlaşımına neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu bağlaşımınla soğutucu üzerine transfer edilen güç, soğutucular tarafından çevresindeki elemanları etkileyecek elektromanyetik yayıma dönüştürülebilir. Bunun sonucunda da diğer elemanlar üzerinde istenmeyen elektromanyetik girişimler meydana gelerek devrenin optimum çalışması engellenir. Böyle bir problem soğutucuların sadece termal parametrelerinin incelenmesi yanında, ortaya çıkarabilecekleri elektromanyetik girişimler yönünden de incelenmesini ve bu girişimlere çözüm bulunmasını zorunlu kılmaktadır.

Soğutuculardaki elektromanyetik girişim problemlerinin ana kaynakları olarak güç elektronik elemanlarının anahtarlama hızlarının çok yüksek olmasından kaynaklanan gerilim ve akım değişim hızları başta gelmektedir. Hızlı anahtarlardan dolayı oluşan anahtarlama kayıplarının soğutucuya gürültü olarak bağlanıp, onların bir anten olarak işlev görmesine ve anahtarlama frekansının bir veya daha fazla harmoniklerinde yayılım yapmasının önüne geçmek için soğutucu boyutlarının çalışılan en yüksek frekansın dalga boyuna göre elektriksel olarak sınırlandırılması gerekir. Bazı durumlarda soğutucuların ışımasının önüne geçmek için soğutucuların topraklanması tercih edilse de bu durumda da soğutucu ile toprak arasındaki kaçak kapasitansların azalmasına karşın, ortak modlu akımların artmasından dolayı elektromanyetik girişim (EMG) artmaktadır.

EMG problemlerine, soğutucuların konfigürasyonlarının etkisi değişik çalışmalarda (Karman vd. 2019; Genç vd. 2019; Doğan vd. 2019; Genç vd. 2020; Başyigit vd. 2020; Doğan vd. 2020; Başyigit vd. 2021; Helhel vd. 2021; Genç vd. 2021a,b) ortaya konulmuştur. Soğutucu geometrilerinden başka soğutuculardan kaynaklı EMG problemlerini azaltmanın farklı yöntemleri de vardır. Soğutucuyu topraklamak iletilen EMG'yi azaltma açısından bunların başında gelen bir çözüm olarak dursa da EMG azalmasını istenen oranda sağlamak için topraklama noktalarının iyi seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca soğutucu ile devre arasına RF soğurucu koymak EMG'yi azaltmak için kullanılan tekniklerdendir (Chikando vd. 2010; Ahn ve Oh 2014).

Soğutucular ile cihaz arasına termal yalıtıcı koymak kaçak kapasitelerin oluşumuna yol açmaktadır. Çünkü bu termal yalıtıcı, kapasitördeki dielektrik vazifesini görmektedir. Bu kaçak kapasiteler yoluyla ortak modlu akım akışı oluşur. Soğutucunun topraklanması kapasitelerin artmasını sağladığından ortak modlu akımlar, dolayısıyla iletilen EMG azalacak fakat bu durumda da soğutucu bir anten gibi davranacaktır. Soğutucu ile güç elemanları arasına bakır ekran konularak kaçak kapasiteler minimize edilebilir ve ışıma emisyonu azaltılabilir. Fakat bu ekranlama işlemi hem ekonomik olarak maliyetli hem de hava sirkülasyonunun engellediği için termal performansı negatif olarak etkilemektedir. Ayrıca haberleşme kablolarında kullanılan manyetik filtremelerin benzeri soğutucularda da kullanılarak yüksek frekanslı emisyonların zayıflatılması sağlanabilir.

Tüm bu çalışmalara alternatif bir yöntem olarak bu tezde, soğutucu etrafına meta malzeme tabanlı kuşaklar konularak soğutuculardan kaynaklı elektromanyetik girişimlerin soğutucu etrafındaki diğer bileşenlere ulaşmasının engellenmesi ve bileşenlerin bu girişimlerden etkilenmesinin azaltılması amaçlanmıştır.

3. METARYAL VE METOT

Çalışma benzetim ve benzetim performansına bağlı üretim ile test ve entegrasyon aşamalarından oluşmaktadır. Daha önce Hao vd. (2019) tarafından literatüre kazandırılmış olan geniş bant soğurucu yeniden modellenmiş ve benzetimi yapılmıştır. Benzetimi yapılan birim hücrelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan soğurucu kuşak ve tutucular üretilmiştir. Ardından da 117 W ısı atma kapasitesine sahip silindirik taban bir elektronik soğutucunun çevresine ısı atma performansını etkilemeyecek şekilde kuşak biçiminde yerleştirilerek gerçek senaryo performans ölçümleri standart bir tam yansız oda içerisinde tamamlanmıştır.

3.1. Benzetim ve Modelleme

Modelleme kısmında mikrodalga modelleme programları kullanılarak ölçme düzeneği kavramsal düzeyde oluşturulmuştur. Doğru frekans çalışma aralığının belirlenmesi bu aşamada tamamlanmıştır. C bandı içerisinde kullanışlı frekanslar ve/veya frekans aralıkları belirlenmiştir.

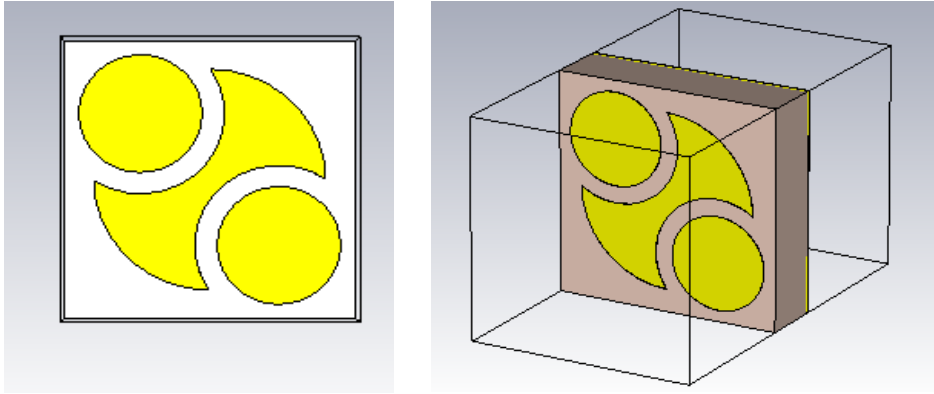
3.1.1. Metamalzeme soğurucu tasarımı

Denklemler 2.4 ile verilen klasik soğurma ifadesi herhangi bir polarizasyon bilgisini içermemektedir. Çalışmada ön görüldüğü biçimde metamalzeme üzerine düşen elektromanyetik dalga, kutuplanmayı bozucu etkiye sahip olması nedeniyle soğurma denklemi bu kutuplanmanın bozulma etkilerini de dikkate alacak şekilde Denklem 3.1’de verildiği gibi yeniden yazmayı gerektirmektedir (Ahmed vd. 2021).

$$A(\omega) = 1 - |R_{yy}|^2 - |R_{xy}|^2 - |T_{yy}|^2 - |T_{xy}|^2 \quad (3.1)$$

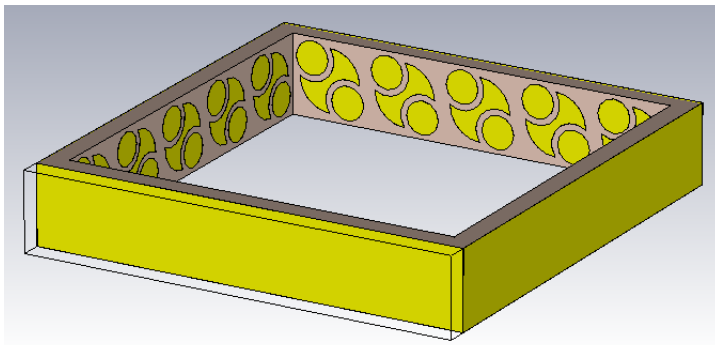
İlk kez Hoa vd. (2019) tarafından benzetimi yapılan fakat üretim ve testleri gerçekleştirilmeyen ve Şekil 3.1’de görülen geniş bant metamalzeme tabanlı soğurucunun aslında bir metamalzeme soğurucu olmadığını, önerilen yapının etkin bir soğurucudan ziyade ağırlıklı olarak “çapraz polarizör” gibi davrandığı Ahmed vd. (2021) tarafından kanıtlanmıştır. Çapraz polarizör etkisinin göz ardı edilmiş olması nedeniyle geri çekilen bu çalışmada (Hoa vd. 2021) kullanılan tasarım, bu tez çalışmasının konusunu oluşturmaktadır. Bu tercihin nedeni önerilen çalışmada tasarımın soğurma özelliğinden daha çok elektromanyetik girişimleri bastırabilme özelliğinin dikkate alınmış olmasıdır. Ayrıca gelme açısına bağlı olarak göstermiş olduğu cevap dikkate alındığında anten davranışı sergileyen soğutucunun örüntüsünü ve yönlülüğünü denetleme imkânı vermesi de dikkate alınmıştır.

Daha sonra bu tasarım benzetim programı üzerinde dielektrik sabiti (ϵ_r) 4,3 ve kayıp tanjantı ($\tan\delta$) 0,025 olan 4,2 mm kalınlığa (h) sahip FR-4 alttaşı ve kalınlığı (t) 0,035 mm ve elektrik iletkenliği (σ) $5,96 \times 10^7$ S/m olan bakır katmanlar kullanılmıştır. Birim hücre en ve boy yüksekliği ise 15,6 mm'dir. Tasarımla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Geniş bant metamalzeme soğurucu birim hücresi (Hoa vd. 2019)

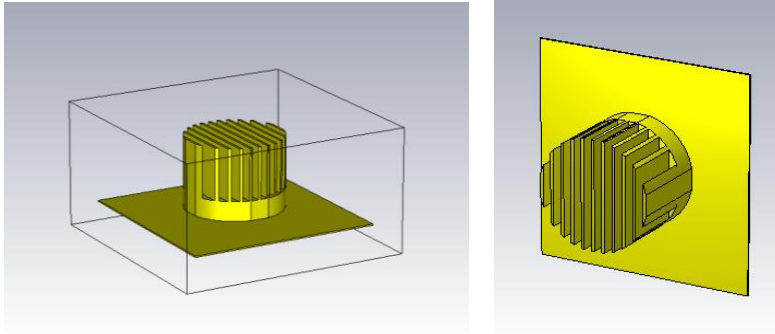
Tasarlanan birim hücre çoğaltılarak beş tanesi yan yana getirilmiştir. Ardından bu beşli yapıdan dört adet kullanılarak kare şeklinde Şekil 3.2'de görülen soğurucu kuşak yapısı oluşturulmuştur. Her birim hücreden beşer adet kullanılmasının sebebi ise soğutucu etrafına yerleştirildiğinde boyutlarının tam olarak soğutucuyu kapsamasıdır. Altı veya daha fazla kullanılmaması elektronik kart üzerine yerleştirilen soğutucuda olabildiğince küçük boyutlarda kalarak fiziksel performansının da etkilenmesini önlemektir.



Şekil 3.2. Geniş bant metamalzeme soğurucu kuşak yapısı

3.1.2. Elektronik soğutucu seçimi

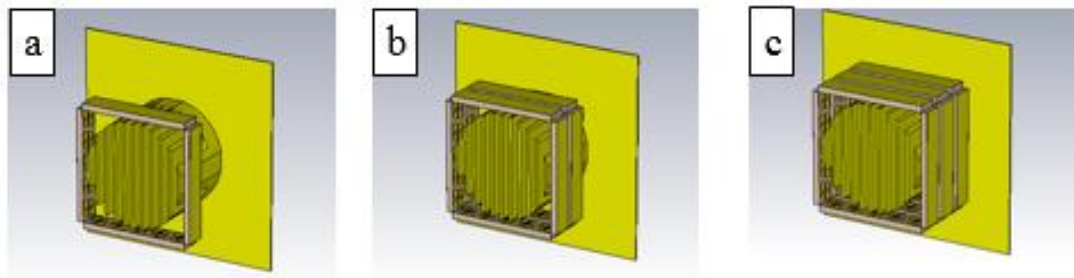
Bu tez çalışmasında daha önceden tasarlanmış silindir taban soğutucu kullanılmıştır (Karaman 2019). Silindir taban yapısı için taban yarıçapı 36.7 mm, yükseklik 55 mm'dir. 25°C sıcaklık farkında silindir tabanlı soğutucu 117 W değerindeki ısıyı uzaklaştırma performansına sahiptir. Bu soğutucu için problem teşkil eden 4,9 GHz'deki ışıma frekansı göz önünde bulundurularak soğurucu kuşak tasarımı yapılmıştır.



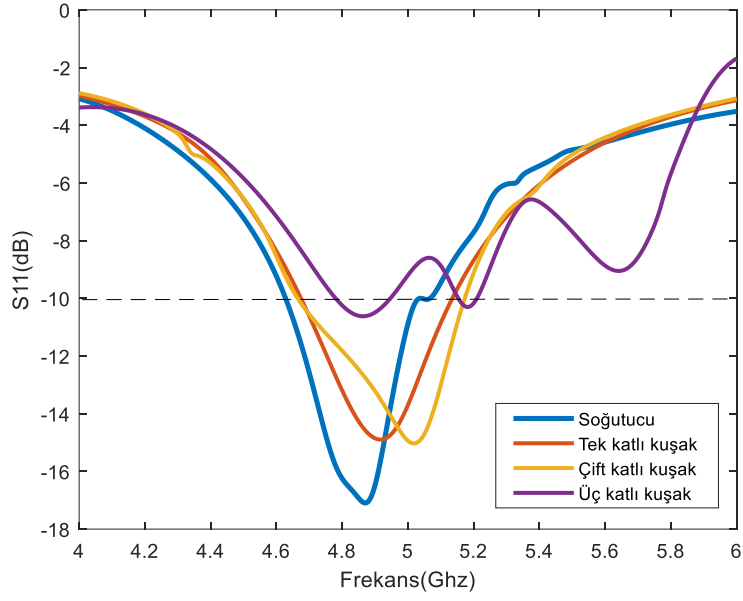
Şekil 3.3. Silindir taban elektronik soğutucu (Karaman 2019)

3.1.3. Soğurucu ve soğutucunun birleştirilmesi

Seçilen soğutucu için tasarlanan metamalzeme birim hücrelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan soğurucu kuşak farklı konumlarda soğutucu etrafına yerleştirilmiştir. Şekil 3.4'te önce tek kat sonra sırasıyla ikinci ve üçüncü katlar eklenerek katlı kuşak yapısı oluşturulmuştur. Şekil 3.5'te ise sahip oldukları S11 grafikleri verilmiştir. Bu denemenin amacı kuşak sayısı ile kuşağın toprak düzleme göre olan yüksekliğinin etkisini belirlemektir. Böylece en az sayıda kuşak kullanarak kuşağın en doğru yeri belirlenmiştir.

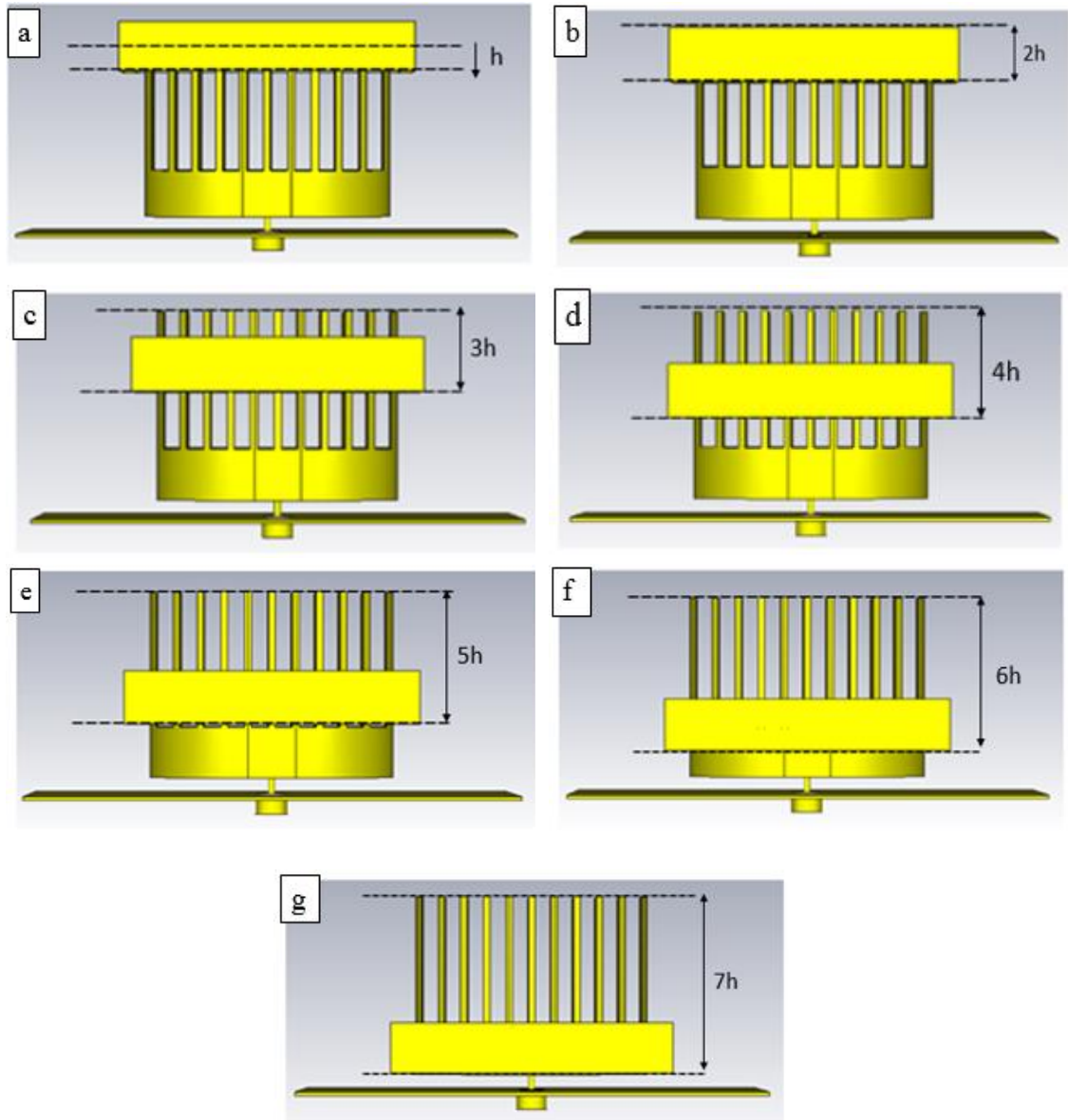


Şekil 3.4. a) Soğutucu ve tek katlı kuşak; b) Çift katlı kuşak; c) Üç katlı kuşak



Şekil 3.5. Soğutucu, tek katlı kuşak, çift katlı kuşak ve üç katlı kuşak S11 grafiği

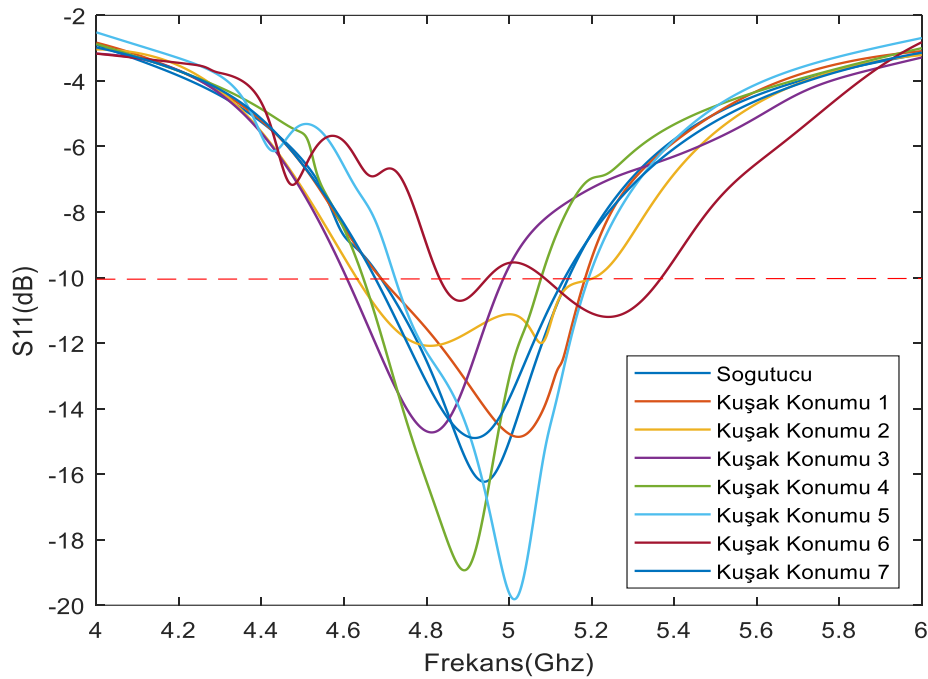
Şekil 3.6'da ise tek katlı kuşak yukarıdan aşağıya doğru soğurucu kuşağın yüksekliğinin yarısı kadar ($h=7.8$ mm) kaydırılarak Konum-1, Konum-2, Konum-3, Konum-4, Konum-5, Konum6 ve Konum-7 olmak üzere yedi durumda konumlandırılmıştır.



Şekil 3.6. Kuşakların konumu a) Konum-1; b) Konum-2; c) Konum-3; d) Konum-4; e) Konum-5; f) Konum-6; g) Konum-7

3.2. Soğurucu Kuşağın Rezonans Etkisi

Anten davranışı gösteren soğutucunun etrafına bir soğurucu kuşak takılmasıyla birlikte ortaya çıkan etkileşimler nedeni ile rezonans frekansının kayması ve toplam anten bant genişliğinin değişmesi (bant genişliği oranı) beklendiğinden tüm durumlar için S11 cevabına bakılmıştır (Şekil 3.7). Bu cevaplar incelendiğinde soğutucunun tek başına 4,9 GHz merkez olmak üzere 4,67 GHz ile 5,13 GHz aralığında iyi bir anten gibi davrandığı görülmektedir. Kuşak konumlarının rezonans frekansına olan etkisine bakıldığında 7 numaralı konum dışında soğutucunun anten davranışı sergilediği frekans alt ve üst sınırlarının 4,67 GHz ile 5,13 GHz aralığında kalarak korunduğu görülmektedir. Sadece Konum-7 için çalışma frekans aralığı üst frekansının bir miktar artarak 5,34 GHz' e kadar genişlediği görülmekle birlikte tüm durumlar için bant genişliği oranının $\%10\pm 1$ şeklinde korunduğu görülmektedir. Her ne kadar frekans kaymalarını da dikkate almak gerekiyor olsa da yukarıda sayılan koşulların yerine getirilmiş olması nedeni ile çalışma boyunca merkez frekansı 4,9 GHz olacak şekilde soğurucu kuşak yapısının etkilerini incelemeye odaklanmıştır.



Şekil 3.7. Soğutucu ve 7 farklı konumdaki soğurucunun S11 grafikleri

3.3 Ölçme Yöntemi

Elektromanyetik girişim, elektromanyetik uyumluluk, anten yayılım paterni, radar kesit alanı gibi ölçümlerin doğru ve güvenilir olarak yapılabilmesi için ölçülecek ekipman civarında, ölçümlerin doğruluğunu etkileyebilecek herhangi bir bozucu elektromanyetik dalga kaynağı veya kaynaktan gelen dalgaları yansıtan bir nesne bulunmamalıdır.

Genellikle elektronik cihazlardan yayılan istenmeyen veya kaçak elektromanyetik sinyal radyasyonu, yayılan radyasyon güçlü olduğunda canlılar için de ciddi tehlike oluşturabilir ve yakınlarda bulunan diğer elektronik cihazlarda arızalara sebep olabilir.

İşte bütün bu nedenlerden dolayı istenmeyen veya kaçak elektromanyetik sinyal yayılımının tespiti çok önemlidir. Doğru ve güvenilir ölçüm sonuçları elde etmek, ölçümlerin bozucu elektromanyetik dalga kaynağı veya yansımaya sebep olabilecek nesnelerin bulunmadığı açık bir alanda yapılması ile mümkündür.

Ancak günümüzde bütün frekans bantlarının yoğun olarak kullanılması nedeniyle ölçüm yapılacak noktada çok fazla bozucu elektromanyetik dalga kaynağının bulunması, yansımaya sebep olabilecek nesnelerin bulunmadığı böylesi bir açık alan bulmanın zorluğu, açık alandaki ölçümün doğruluğunu etkileyebilecek sıcaklık, nem vb. gibi çevresel etmenlerin çok değişken olması gibi nedenlerden dolayı ölçümlerin açık alanda yapılması pek mümkün değildir.

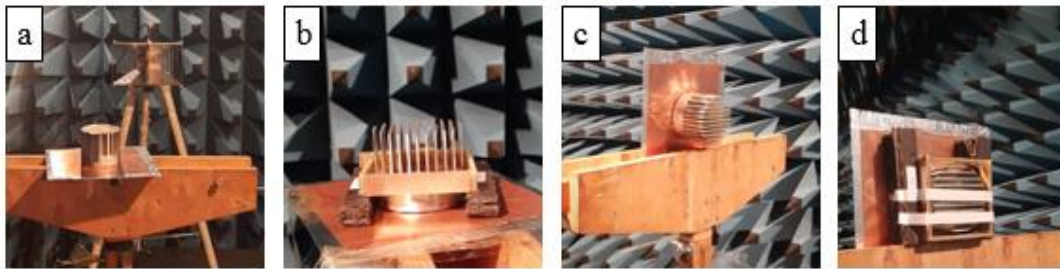
Bu halde ölçümler, yansıyan veya saçılan dalgaların sebep olduğu hatalı ölçüm sonuçlarını önlemek, doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için duvarları, tavan ve tabanı EM soğurucularla kaplanmış, kapalı bir alanda çalışılmasına olanak sağlayan, yansımaz oda olarak adlandırılan kapalı ortamlarda yapılır. Yansımaz odalar, serbest uzay şartlarını kapalı bir ortamda elde etmek için oluşturulmuş yapılardır.

Elektrik alanın uzak alanda ölçümü gerçekleştirilirken bazı ekipmanlar ve cihazlar gereklidir. Bunlar frekans bandına göre bir alıcı anten, spektrum analizör, RF işaret üretici ve gerekli kablolar ile konektörler. Bu ekipmanlardan spektrum analizör belirli bir frekans aralığında girişine uygulanan sinyalin hangi frekansta ne kadar güce sahip olduğunu ölçmemizi sağlar. RF işaret üretici ise özellikle yüksek frekans bölgesinde istediğimiz frekans değerinde cihazın sınırları içerisinde istediğimiz gücü çıkışına vererek aktarmamıza olanak tanır. Şekil 3.8’te ölçümde kullanılan spektrum analizör ve RF işaret üretici görülmektedir.



Şekil 3.8. Ölçümde kullanılan spektrum analizör ve RF işaret üretici

Bu tezde yapılan ölçümlerde soğutucunun tek başına ve soğurucu kuşakla birlikte oluşturulan tümleşik yapının anten ışınma örüntüsü çıkarılmıştır. Ölçümü açıklamak gerekirse soğutucu ve toprak düzlemi hazırlanan bir düzenek vasıtasıyla döner masa üzerine yerleştirilir. Soğutucunun karşısına alıcı anten yerleştirilir. Antenin girişi RF kablolar vasıtasıyla spektrum analizöre bağlanır. Spektrum analizörün frekans aralığı ayarlanır. Döner masa üzerine yerleştirilen soğutucunun toprak düzleminde bulunan SMA konektör girişine RF kablo bağlanır. Bu konektörün iğne kısmı soğutucuya toprak kısmı bakır plakadan olan toprak düzlemine temas etmektedir. RF kablunun diğer ucu RF işaret üretici takılır. İşaret üreticiden istenilen frekansta bir güç uygulanarak soğutucuya aktarılır. Aktarılan güç neticesinde soğutucunun üzerinde bir akım indüklenir ve soğutucu anten gibi davranarak ışımaya başlar. Döner masanın hassasiyeti ayarlanarak adım adım kendi etrafında bir tur dönecek şekilde soğurucu kuşağında konumlandırılmasıyla her durum için tek tek ölçüm tamamlanır. Her adımda yaydığı elektrik alan alıcı anten tarafından algılanarak spektrum analizörün ekranından gözlemlenerek kaydedilir. Tur tamamlandığında alınan veriler bir programda işlenir ve polar grafiğe dökülerek ışınma örüntüsü elde edilir.



Şekil 3.9. Ölçüm ortamı olarak tam yansısız oda

Ölçüm düzeneği Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.9a'da döner masa üzerine yerleştirilen soğutucu ve alıcı anten yer almaktadır. Şekil 3.9b'de ise soğutucu ve etrafına geçirilen soğurucu kuşak gösterilmiştir. Şekil 3.9c'de soğutucu yön değiştirerek konumlandırılmıştır. Şekil 3.9d'de ise tekrardan soğutucu etrafına kuşak geçirilerek ölçüm düzeneği hazır hale getirilmiş ölçümler tamamlanmıştır.

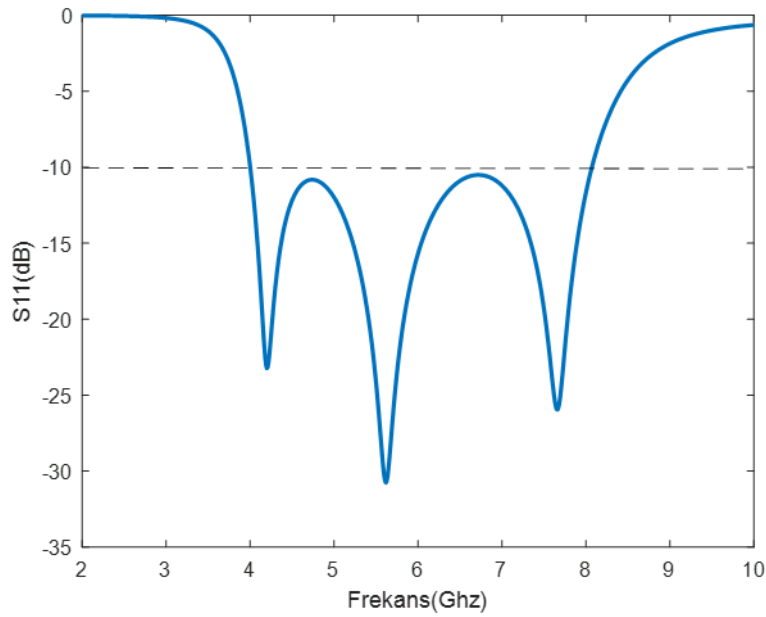
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm iki alt başlığa ayrılmıştır. Bunlar; tasarım ve benzetime dayalı bulgular ve ölçmeye dayalı bulgular şeklindedir.

4.1. Tasarım ve Benzetime Dayalı Bulgular

Bu kısımda tasarımı yapılan metalmalzeme soğurucunun soğurmaya ilişkin sonuçları ve soğutucunun yapılan konumlandırmaya göre benzetimde elde edilen uzak alan analizi yer almaktadır. Bu başlıkların yorumlanması için benzetimleri CST benzetim programında yapılmıştır. Benzetimler için soğurucuların frekans aralığı 4 – 8 GHz'dir.

Şekil 4.1'de soğurucu birim hücrenin S11 grafiği yer almaktadır. 4-8 GHz frekans aralığında -10 dB nin altında soğurma gerçekleştirilmektedir. Geniş bant olarak seçilen bu tasarım silindir taban soğutucunun ışınma yaptığı (4,9 GHz rezonans frekansında) aralığı kapsamaktadır.



Şekil 4.1. Soğurucu birim hücrenin S11 grafiği

4.1.1. Soğurucu kuşağın konumuna göre uzak alanın benzetim ile analizi

Bu kısımda uzak alan $\theta=90^\circ$ ve uzak alan $\phi=90^\circ$ 'deki kazançlarının benzetim sonuçları verilmiştir.

4.1.1.1. Konuma göre uzak alan ($\theta=90^\circ$) benzetim analizi

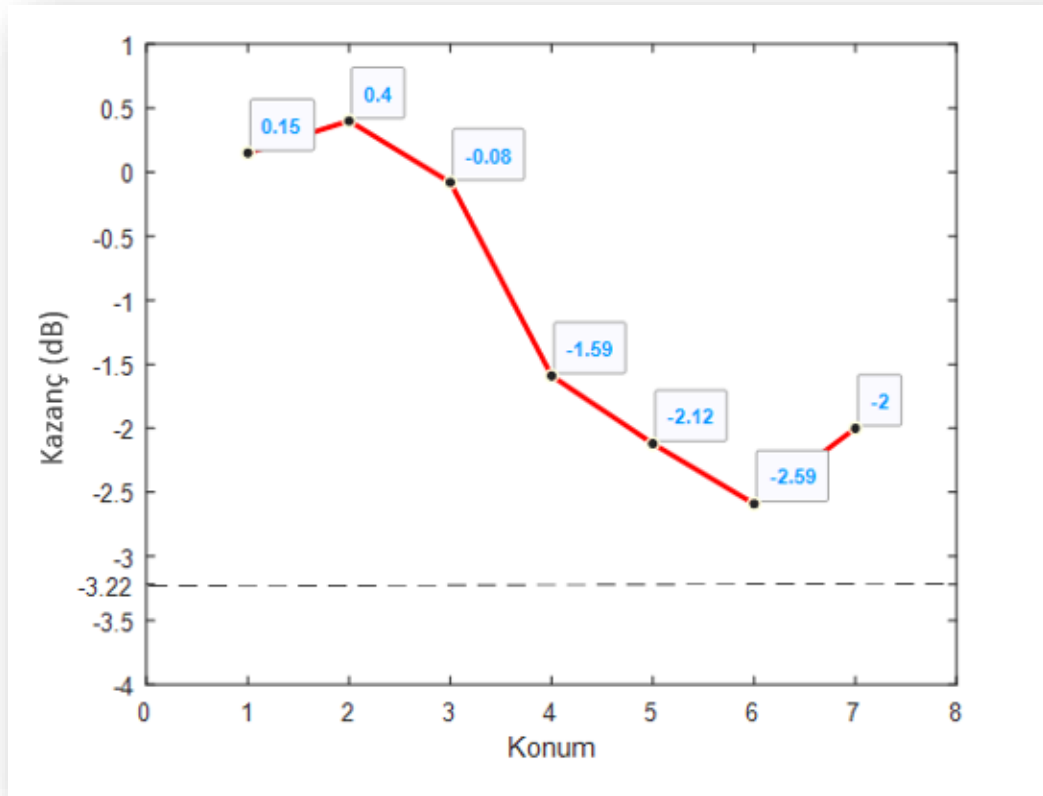
Çizelge 4.1'de kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun benzetim programındaki kaymış frekans değerleri, ana huzme açıları ve rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri yer almaktadır. Kuşaksız soğutucunun 4,9 GHz rezonans frekansında uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değeri -3,22 dB iken soğurucu kuşak Konum-1'e getirildiğinde yeni kaymış frekans değeri 4,93 GHz'e kayarken 4,9 GHz'deki kazanç değeri 0,15 dB'ye ulaşmıştır ve yaklaşık olarak 3,5 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir.

Konum-2'de ise yeni kaymış frekans 5,02 GHz olurken 4,9 GHz rezonans frekansında uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değeri 0,40 dB'ye ulaşarak yaklaşık 4 dB'lik bir kazanç sağlanmıştır. Aynı şekilde Konum-3'te yaklaşık 3 dB, Konum-4'te yaklaşık 1,5 dB, Konum-5'te 1 dB ve Konum-6'da yaklaşık 0,5 dB olurken Konum-7 ise yaklaşık 1,5 dB'lik bir kazanç neden olmuştur. Fakat kuşakların kaymış frekanstaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri incelendiğinde Konum-5'e kadar kazanç sağlanmaya devam ederken, Konum-6'da yaklaşık 1,5 dB'lik, Konum-7'de ise yaklaşık 3,5 dB'lik bir bastırma gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.1. Benzetimin uzak alan ($\theta=90^\circ$) değerleri

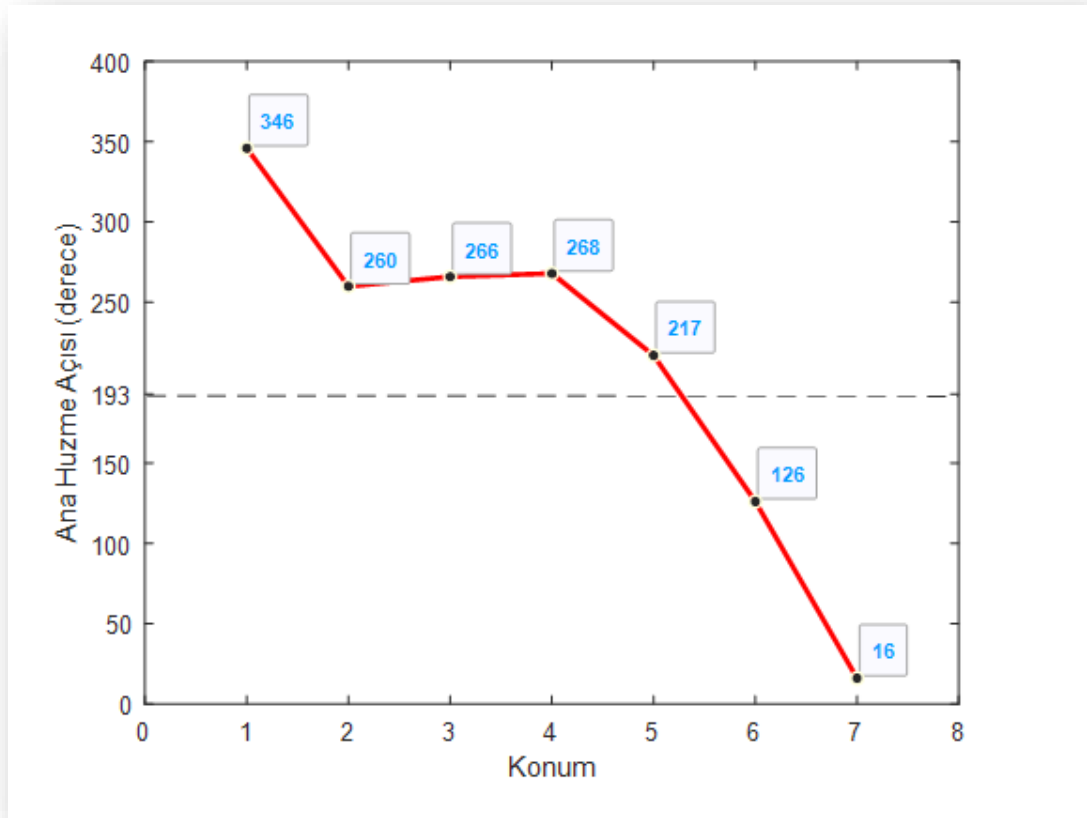
BENZETİM ($\theta=90^\circ$)					
Konum	Kuşaksız Soğutucu (dB)	Kaymış Frekanstaki Değeri (dB)	Yeni Kaymış Frekans (GHz)	Rezonans Frekansındaki Değeri (dB)	Ana Huzme Açısı
1	-3,22	0,19	4,93	0,15	346°
2	-3,22	0,69	5,02	0,40	260°
3	-3,22	-0,04	5,08	-0,08	266°
4	-3,22	-0,44	4,81	-1,59	268°
5	-3,22	-1,71	4,89	-2,12	217°
6	-3,22	-4,48	5,01	-2,59	126°
7	-3,22	-6,74	5,24	-2,00	16°

Çizelge 4.1'de yer alan değerlere göre Şekil 4.2'de soğurucu kuşağın konumuna göre rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri dinamik olarak gösterilmiştir. Konum-2'de 0,40 dB ile en yüksek kazanç yaklaşık 4 dB olmuştur. Konum-6'da ise -2,59 dB ile yaklaşık 1 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir.



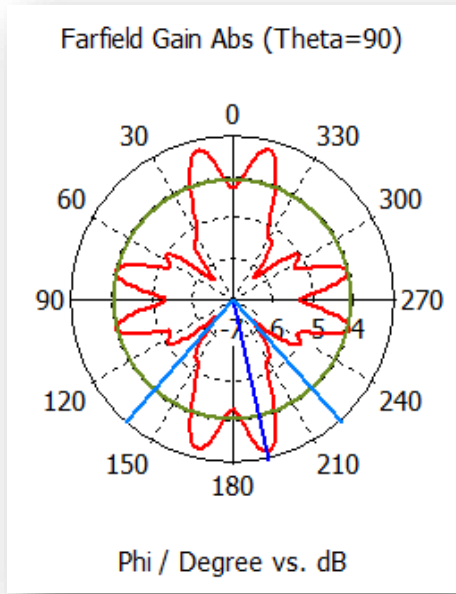
Şekil 4.2. Uzak alan ($\theta=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi

Benzer şekilde Şekil 4.3'te soğurucu kuşağın konumuna göre ana huzme açıları dinamik olarak gösterilmiştir. Kuşaksız soğutucunun ana huzme açısı 193° iken Konum-1'den Konum-5'e kadar ana huzme açısı 193° 'den büyük değer olarak sırasıyla 346° , 260° , 266° , 268° ve 217° olmuştur. Konum-6'da ise 126° olurken Konum-7'de 16° 'ye kadar düşüş göstermiştir. Ana huzme açısındaki bu sapmalar elektronik kart üzerinde yer alan diğer elektronik elemanların konumunu değiştirmeye gerek kalmadan sadece ana huzme açısını değiştirerek ışımayı yönlendirme olanağına sahip olmamızı sağlamıştır.

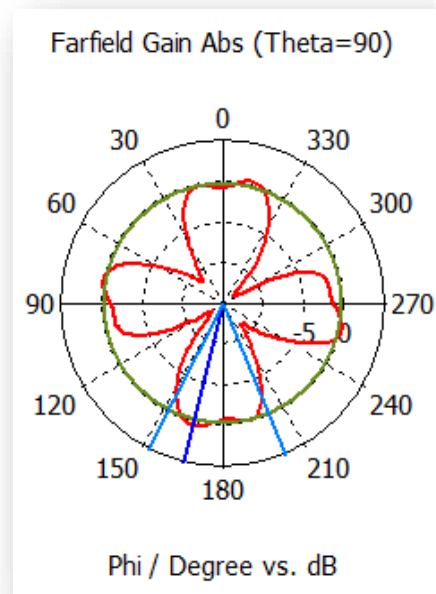


Şekil 4.3. Konuma göre ana huzme açıları

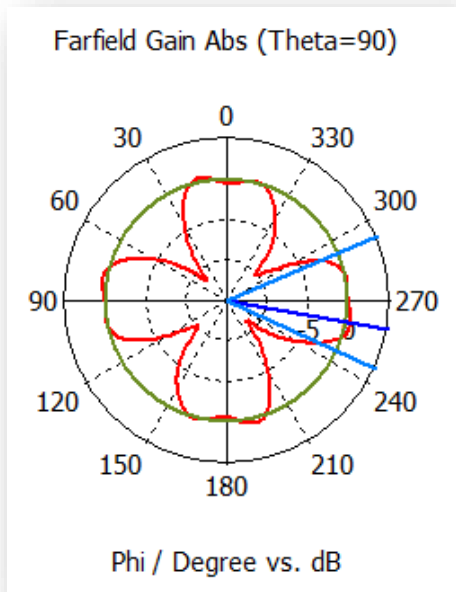
Şekil 4.4'te kuşaksız soğutucunun ve kuşak geçirilmiş soğutucunun yerleştirilen konumlarda sahip olduğu benzetim programında elde edilen 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerlerinin polar grafikleri yer almaktadır.



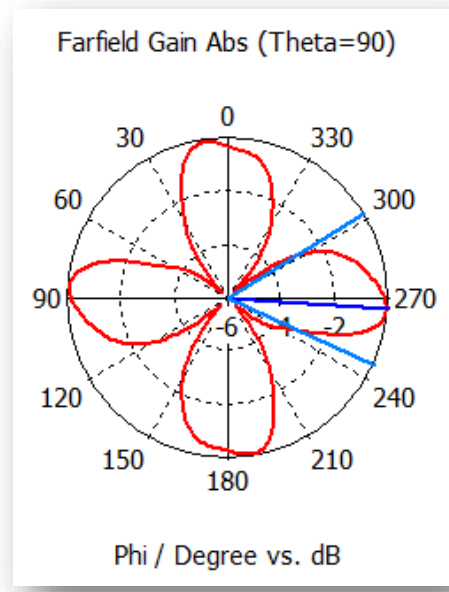
(a) Soğutucu



(b) Konum-1

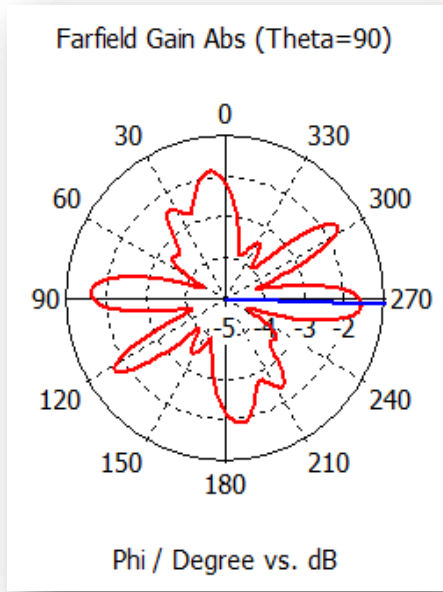


(c) Konum-2

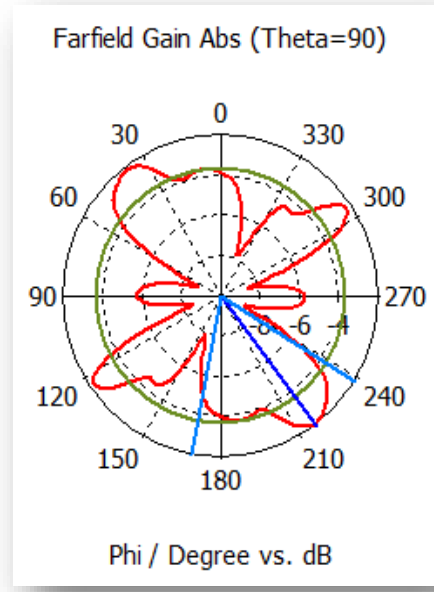


(d) Konum-3

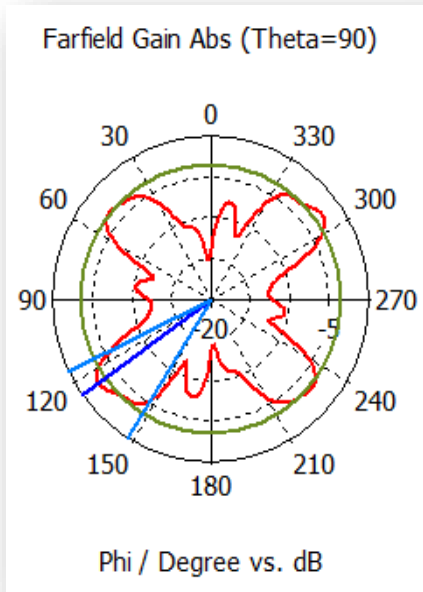
Şekil 4.4. Konuma göre uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerinin benzetim sonuçları



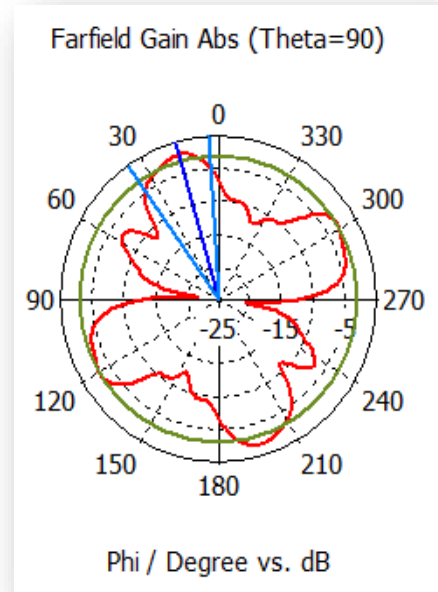
(e) Konum-4



(f) Konum-5



(g) Konum-6



(h) Konum-7

Şekil 4.4' ün devamı

4.1.1.2. Konuma göre uzak alan ($\phi=90^\circ$) benzetim analizi

Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun benzetim programındaki kaymış frekans değerleri, ana huzme açıları ve rezonans frekansındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerleri verilmiştir. Kuşaksız soğutucunun uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değeri 7,19 dB iken kuşak geçirilerek Konum-4’e getirildiğinde kaymış frekanstaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değeri en yüksek değerine ulaşarak 7,36 dB olmuştur. Bu konumdaki kaymış frekans değeri ise 4,9 GHz olan rezonans frekansının altına düşerek 4,81 GHz’de kalmıştır. Böylelikle 0,2 dB’lik bir kazanca neden olmuştur.

Soğurucu kuşak Konum-2’ye getirildiğinde kaymış frekans değeri 5,02 GHz olurken bu frekanstaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değeri rezonans frekansındaki 5,06 dB’lik kazançtan 4,65 dB ’ye düşmüştür. Burada da 0,4 dB’lik bir bastırmadan söz edebiliriz.

Genel çizelgeye bakıldığında konuma göre soğurucu kuşakların rezonans frekansı 4,9 GHz kabul ettiğimizden en yüksek kazancı Konum-5’te 0,2 dB olarak en yüksek bastırmayı ise Konum-7’de yaklaşık 4 dB olarak saptanmıştır.

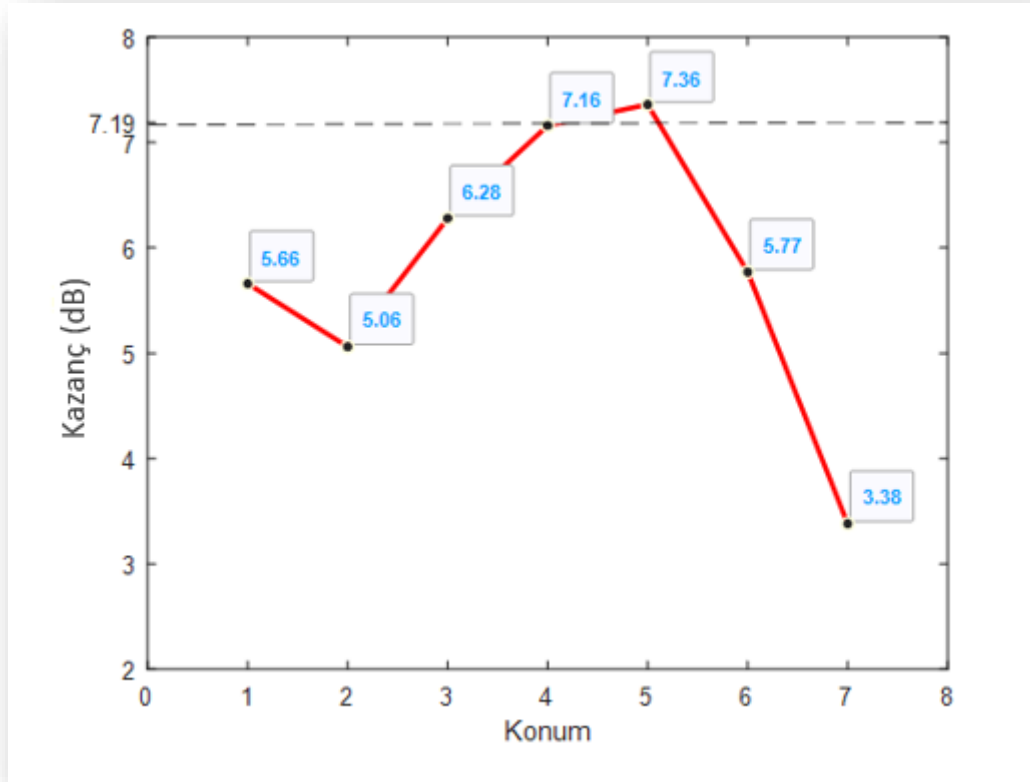
Ana huzme açısı ise 20 derece civarında kalmıştır. Böylelikle de uzak alanda ($\phi=90^\circ$) ana huzme açısından çok sapmadan problemlili bölgede çalışmalar tamamlanmıştır.

Çizelge 4.2. Benzetimin uzak alan ($\phi=90^\circ$) değerleri

BENZETİM ($\Phi=90^\circ$)					
Konum	Kuşaksız Soğutucu (dB)	Kaymış Frekanstaki Değeri (dB)	Yeni Kaymış Frekans (GHz)	Rezonans Frekansındaki Değeri (dB)	Ana Huzme Açısı
1	7,19	5,98	4,93	5,66	21°
2	7,19	4,65	5,02	5,06	23°
3	7,19	5,55	5,08	6,28	22°
4	7,19	7,36	4,81	7,16	20°
5	7,19	7,27	4,89	7,36	19°
6	7,19	6,57	5,01	5,77	20°
7	7,19	7,19	5,24	3,38	21°

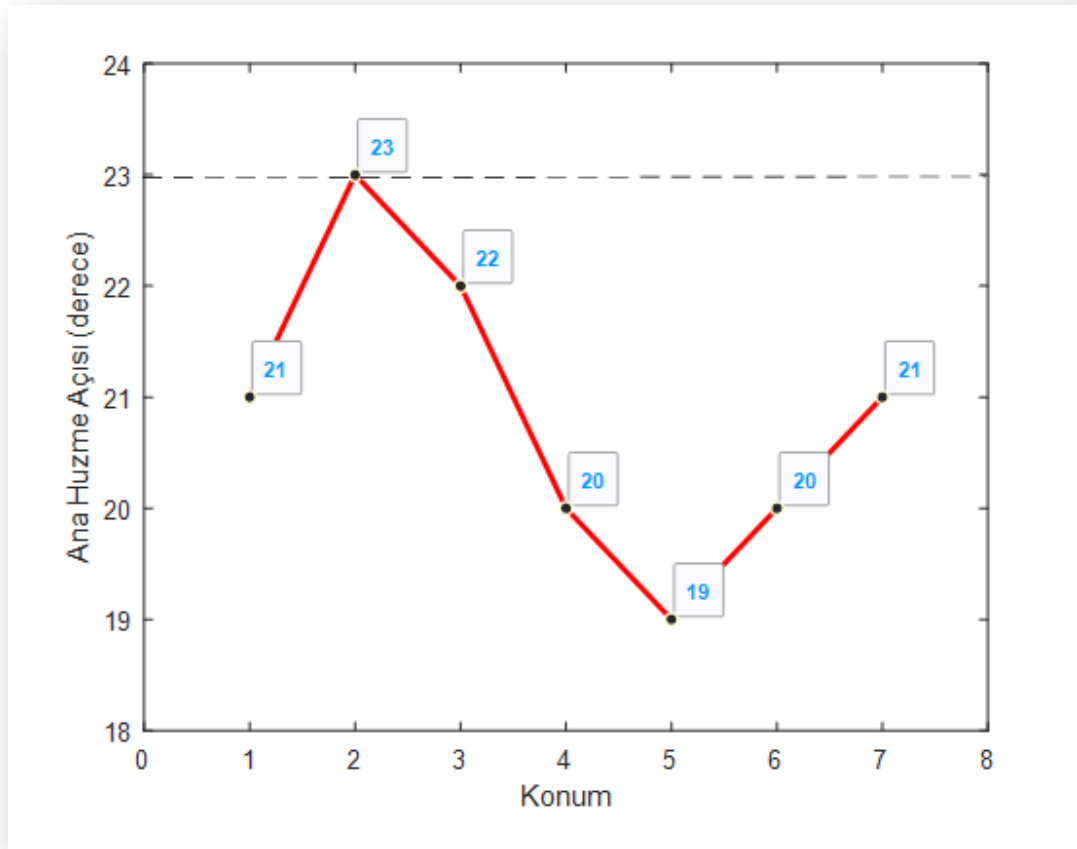
Çizelge 4.2’de yer alan değerlere göre Şekil 4.5’te soğurucu kuşağın konumuna göre rezonans frekansındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerleri dinamik olarak gösterilmiştir. Konum-5’te 4,9 GHz rezonans frekansında uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değeri 7,36 dB ile en yüksek değere sahiptir ve kuşaksız soğutucunun 4,9 GHz’deki 7,19 dB değerinin üstüne çıkarak yaklaşık 0,2 dB’lik bir kazanç sağlamıştır. Konum-7’de ise

3,38 dB değeri ile yaklaşık 4 dB'lik bir bastırma sağlamıştır. Sadece Konum-5'te kazançca neden olurken diğer tüm konumlarda ana huzme açısındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerinde bastırma görülmektedir.



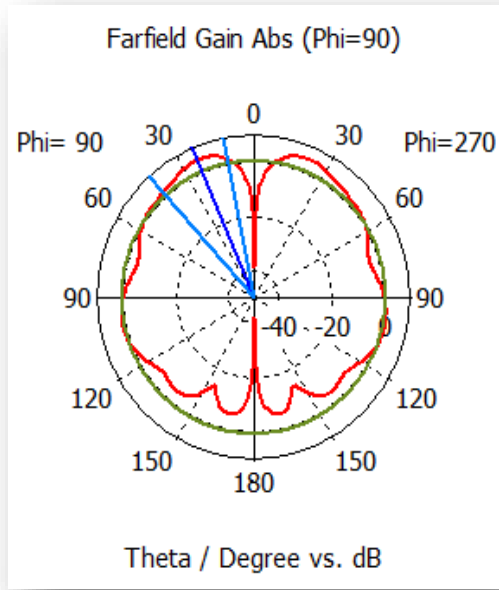
Şekil 4.5. Uzak alan ($\phi=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi

Aynı şekilde Şekil 4.6'da soğurucu kuşağın konumuna göre ana huzme açıları dinamik olarak gösterilmiştir. Kuşaksız soğutucuda ana huzme açısı 23° iken Konum-2'de aynı kalmış, Konum-3'te 22° 'ye, Konum-1 ve Konum-7'de 21° 'ye, Konum-4 ve Konum-6'da 20° 'ye ve Konum-5'te 19° 'ye saptığı gözlemlenmiştir.

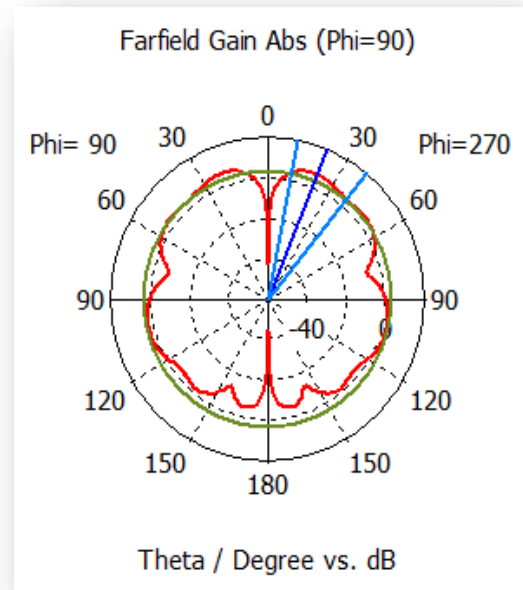


Şekil 4.6. Konuma göre ana huzme açıları

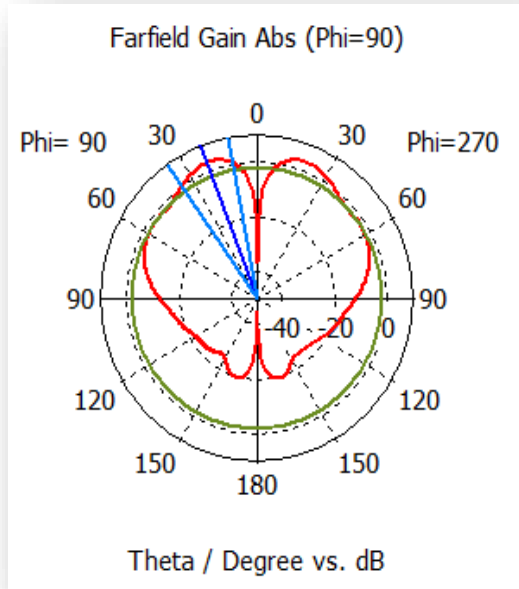
Şekil 4.7’de ise kuşaksız soğutucunun ve kuşak geçirilmiş soğutucunun yerleştirilen konumlarda sahip olduğu, benzetim programında elde edilen 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerlerinin polar grafikleri yer almaktadır.



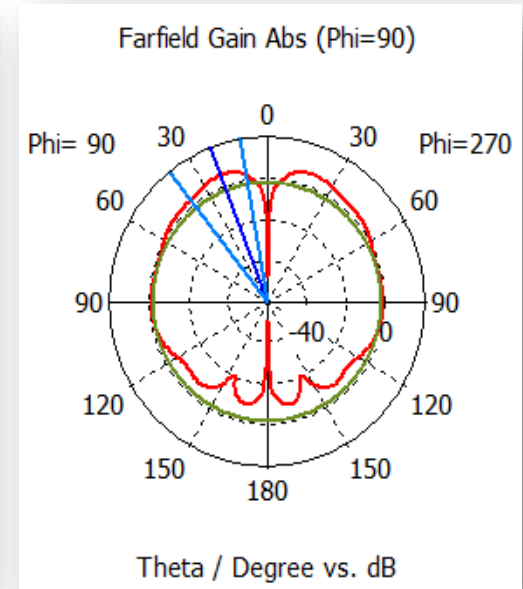
(a) Soğutucu



(b) Konum-1

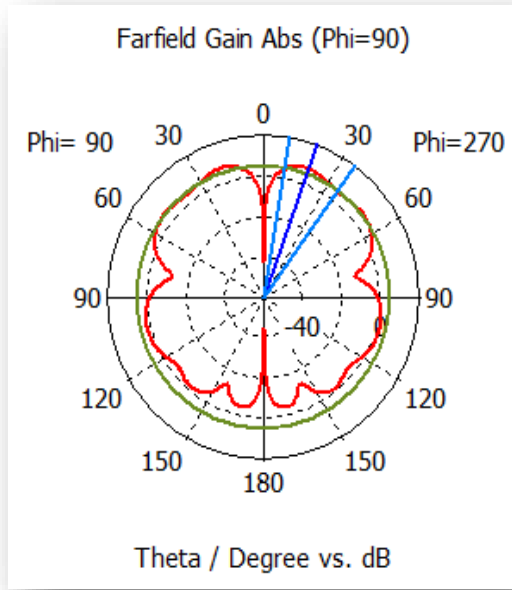


(c) Konum-2

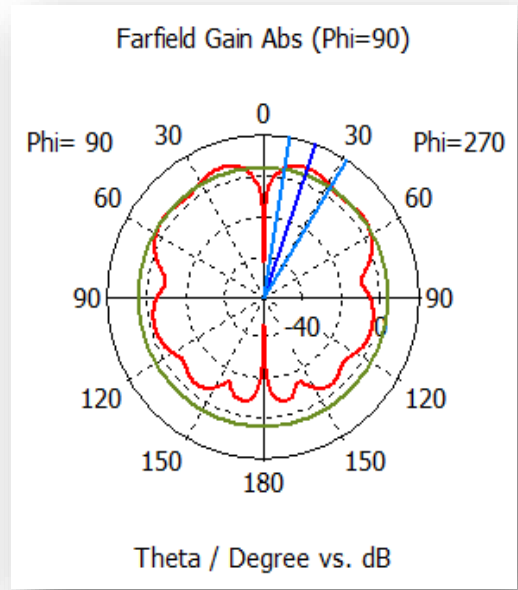


(d) Konum-3

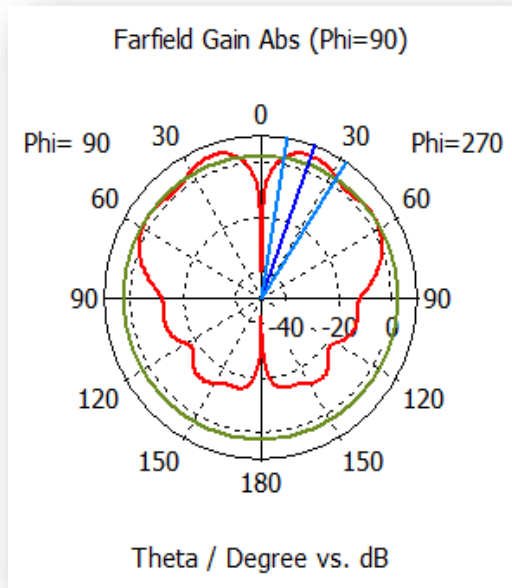
Şekil 4.7. Konuma göre uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerinin benzetim sonuçları



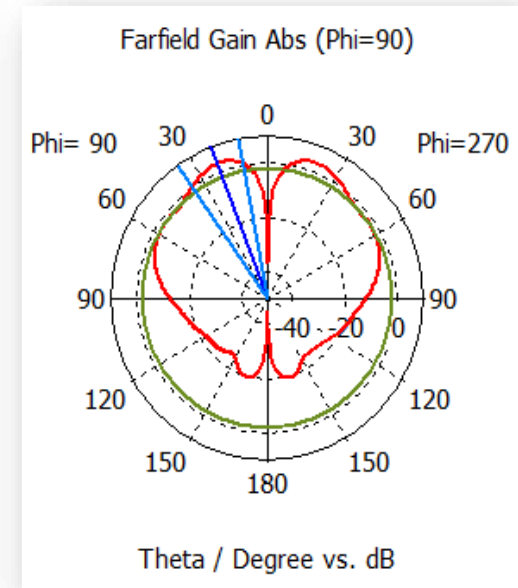
(e) Konum-4



(f) Konum-5



(g) Konum-6



(h) Konum-7

Şekil 4.7' nin devamı

4.2. Ölçmeye Dayalı Bulgular

4.2.1. Soğurucu ve soğutucunun tümleşik ışıma performans ölçümleri

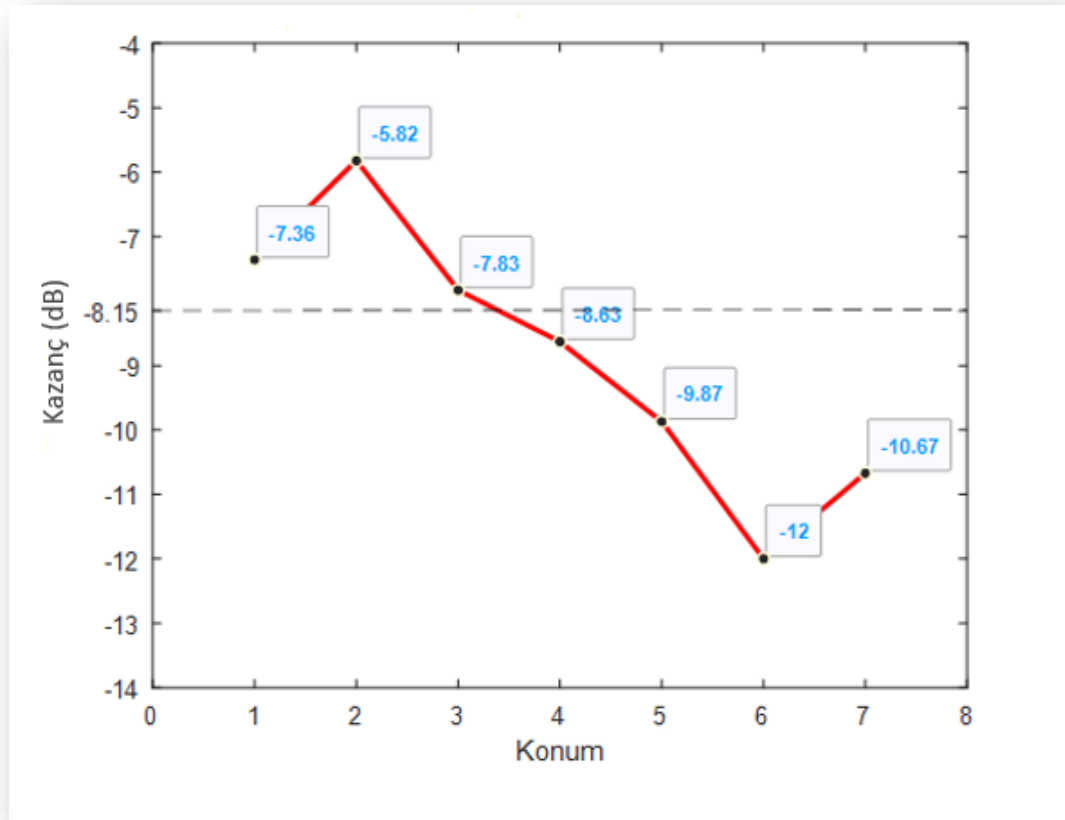
Öncelikle CST benzetim programında tasarımı yapılan ardından da ölçümleri gerçekleştirilen soğurucu kuşak bu bölümde soğutucuyla birlikte bir araya getirilerek tümleşik bir yapı oluşturulmuştur. Yerleştirilen her konum için ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.1.1. Konuma göre uzak alan ($\theta=90^\circ$) ölçüm analizi

Çizelge 4.3'te kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun ölçüm sonuçlarına göre 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri yer almaktadır. Kuşaksız soğutucunun rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değeri -8,15 dB olurken kuşak Konum-1'e getirildiğinde rezonans frekansındaki kazanç değeri -7,36 dB olmuştur ve yaklaşık olarak 1,5 dB'lik kazançta neden olmuştur. Kuşak Konum-2'deyken ise -5,82 dB kazanç değerine ulaşarak yaklaşık 2,5 dB'lik kazanç artışına neden olmuştur. Aynı şekilde Konum-3'teyken -7,83 dB ile yaklaşık 0,5 dB'lik artışa neden olmuştur. Fakat kuşak Konum-4'e kaydırıldığında rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değeri -8,63 dB' ye düşerek 0,5 dB'lik bir bastırma sağlamıştır. Konum-5'te -9,87 dB' ye düşerek yaklaşık 2 dB'lik bir bastırma sağlarken en yüksek bastırmayı kuşak Konum-6'ya yerleştirildiğinde yaklaşık 4 dB olarak göstermiştir. Kuşak son olarak Konum-7'ye getirildiğinde ise yine 2,5 dB'lik bir bastırma sağlamıştır. Şekil 4.8'de ise soğurucu kuşağın konumuna göre rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri dinamik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Ölçümün uzak alan ($\theta=90^\circ$) değerleri

ÖLÇÜM ($\theta=90^\circ$)		
Konum	Kuşaksız Soğutucu Kazanç Değeri (dB)	Rezonans Frekansındaki Kazanç Değeri (dB)
1	-8,15	-7,36
2	-8,15	-5,82
3	-8,15	-7,83
4	-8,15	-8,63
5	-8,15	-9,87
6	-8,15	-12,00
7	-8,15	-10,67



Şekil 4.8. Konum-kazanç ilişkisi ($\theta=90^\circ$)

Çizelge 4.4'te kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun ölçüm sonuçlarına göre 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) bastırma değerleri yer almaktadır.

Kuşak Konum-6'da %75,6 oranında en yüksek bastırmayı sağlarken, kuşak Konum-2'ye getirildiğinde %10,19 oranıyla en düşük bastırmayı gerçekleştirmiştir. Ortalama olarak kuşak Konum-5'te en yüksek 7,48 dB'lik bir bastırma sağlarken Konum-2'de ise 3,63 dB ile en az bastırmayı sağlamıştır. En yüksek bastırma değerine Konum-1'de ulaşırken diğer konumlarda en düşük 0,01 dB'lik bastırma sağlamıştır. Standart sapması Konum-1'de 8,55 dB seviyesine çıkarken en düşük standart sapmaya ise Konum-4'te 3,89 dB' ye ulaşmıştır.

Çizelge 4.4. Ölçümün uzak alan ($\theta=90^\circ$) bastırma değerleri

ÖLÇÜM ($\theta=90^\circ$)					
Konum	Bastırma Oranı (%)	Ortalama Bastırma (dB)	En Yüksek Bastırma (dB)	En Düşük Bastırma (dB)	Standart Sapma (dB)
1	46,92	4,98	19,53	0,01	8,55
2	10,19	3,63	10,80	0,23	3,73
3	19,57	3,72	15,35	0,01	6,45
4	37,00	4,33	13,15	0,01	3,89
5	63,81	7,48	15,65	0,01	7,95
6	75,60	6,73	12,93	0,08	6,48
7	64,88	6,38	14,44	0,02	5,64

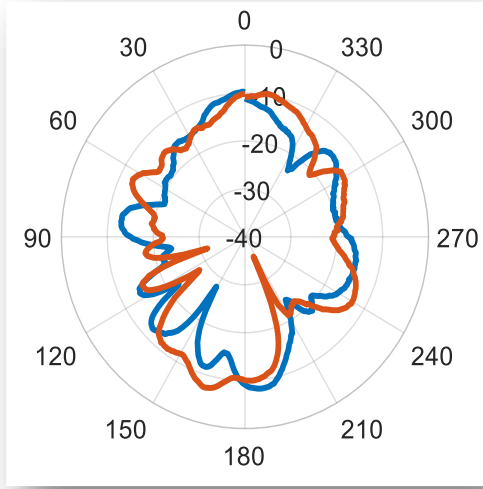
Çizelge 4.5’ te kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun ölçüm sonuçlarına göre 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri yer almaktadır.

Kuşak Konum-2’de en yüksek %89,81 oranında bir kazanç sağlarken, Konum-6 ‘da %24,4 oranına düşmüştür. Ortalama kazanç değeri en yüksek Konum-4’te 5,28 dB olurken en düşük ortalama kazanç değeri ise Konum-5’te 3,74 dB olmuştur. En yüksek kazancı yine Konum-2’de 17,04 dB ile sağlarken Konum-1,2 ve 3’te en düşük kazanç değeri 0,01 dB ve Konum-4,5 ve 6’da 0,03 dB olmuştur. Son olarak konumların standart sapması ise en yüksek Konum-2’de 6,05 dB ve en düşük Konum-5’te 1,48 dB değerinde olmuştur.

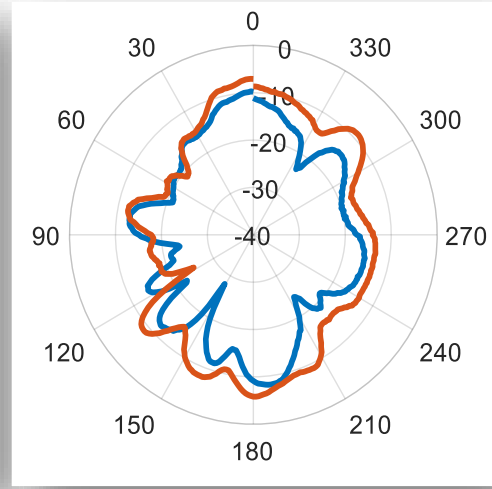
Çizelge 4.5. Ölçümün uzak alan ($\theta=90^\circ$) kazanç değerleri

ÖLÇÜM ($\theta=90^\circ$)					
Konum	Kazanç Oranı (%)	Ortalama Kazanç (dB)	En Yüksek Kazanç (dB)	En Düşük Kazanç (dB)	Standart Sapma (dB)
1	53,08	4,81	16,17	0,01	5,95
2	89,81	4,92	17,04	0,01	6,05
3	80,43	4,79	13,94	0,01	4,56
4	63,00	5,28	12,23	0,03	4,51
5	36,19	3,74	8,75	0,03	1,48
6	24,40	4,13	9,46	0,03	2,16
7	35,12	5,07	12,44	0,03	4,53

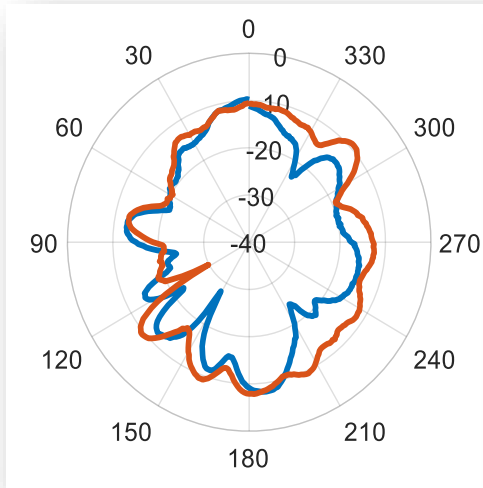
Yukarıdaki çizelgelerde (Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5) yer alan uzak alandaki ($\theta=90^\circ$) bastırma değerlerinin elde edildiği ölçüm sonuçlarının polar grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Mavi renk ile gösterilen grafik kuşaksız soğutucuyu kırmızı renkteki ise konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun grafiğini göstermektedir.



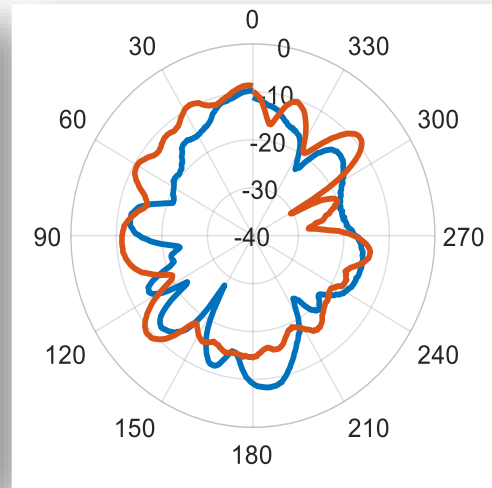
(a) Konum-1



(b) Konum-2

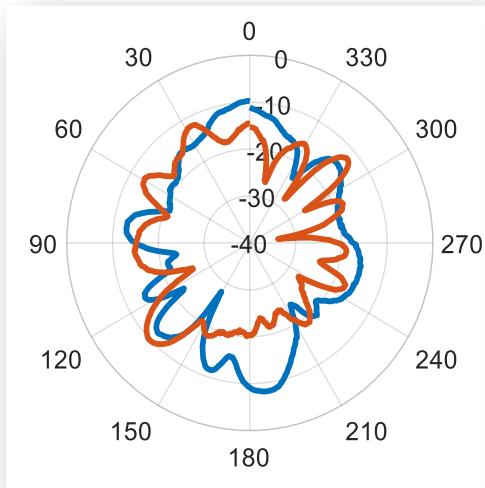


(c) Konum-3

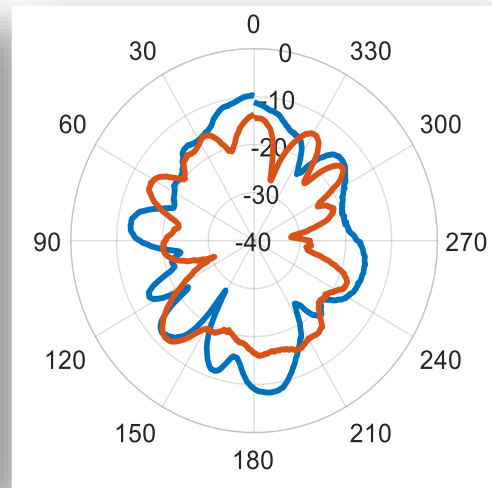


(d) Konum-4

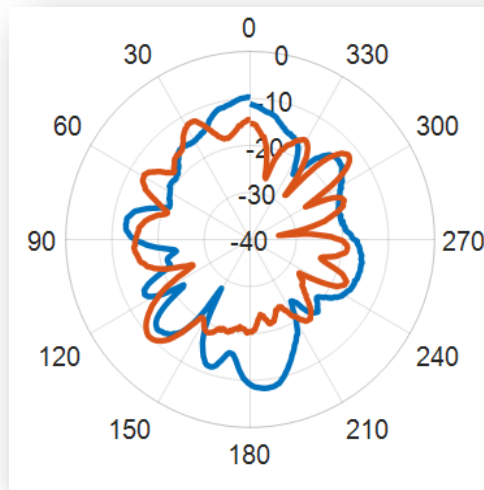
Şekil 4.9. Konuma göre soğutucu-kuşak ölçüm sonuçları



(e) Konum-5



(f) Konum-6



(g) Konum-7

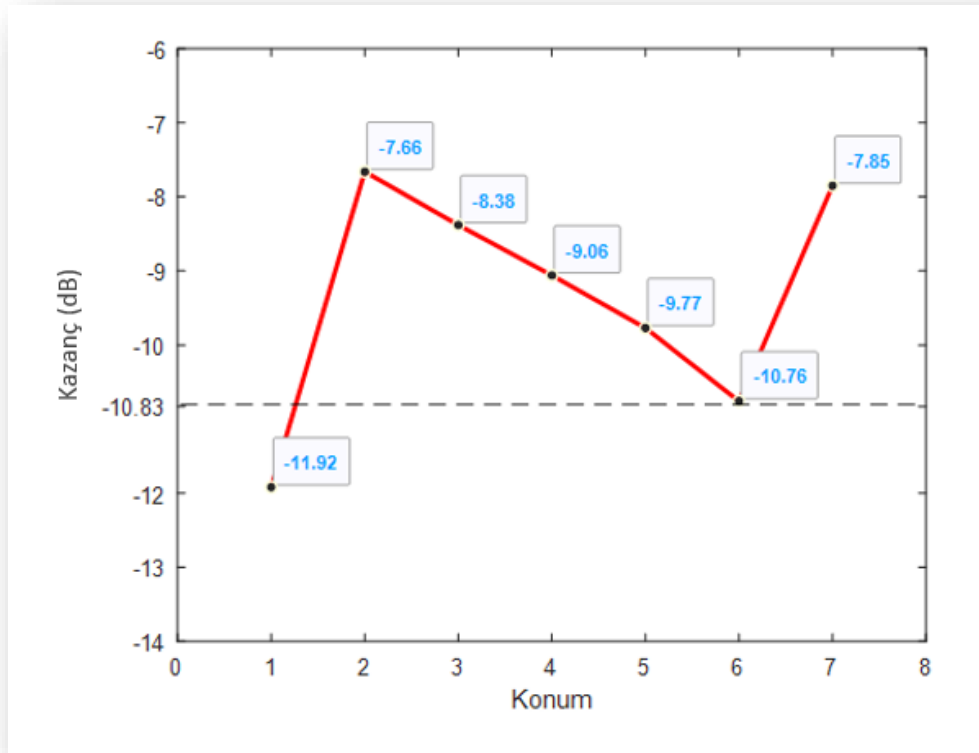
Şekil 4.9' un devamı

4.2.1.2. Konuma göre uzak alan ($\phi=90^\circ$) ölçüm analizi

Çizelge 4.6’ da kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun ölçüm sonuçlarına göre rezonans frekansındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerleri yer almaktadır. Kuşaksız soğutucunun 4,9 GHz’deki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değeri -10,83 dB olurken sadece kuşak Konum-1’e yerleştirildiği zaman ana huzmedeki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değeri -11,92 dB ’ye düşerek yaklaşık 1 dB’lik bir bastırmayı gerçekleştirmiştir. Kuşak diğer konumlardayken ise kazanca neden olmuştur. Konum-2’ de -7,66 dB’ ye yükselerek yaklaşık 3,5 dB’lik kazanç, Konum-3’ te iken -8,38 dB’ ye yükselerek yaklaşık 2,5 B’ lik kazanç, Konum-4’ te yaklaşık 2 dB’ lik kazanç, Konum-5’ e yerleştirildiğinde yaklaşık 1 dB’ lik kazanç, Konum-6’ da 0,07 dB ile neredeyse hiç kazanç veya bastırma elde edilmezken Konum-7’de 3 dB kazanç değerine sahip olmuştur. Şekil 4.10’da ise Çizelge 4.6’daki değerlere göre dinamik olarak uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerinin grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Ölçümün uzak alandaki ($\phi=90^\circ$) değerleri

ÖLÇÜM ($\Phi=90^\circ$)		
Konum	Kuşaksız Soğutucu Kazanç Değeri (dB)	Rezonans Frekansındaki Kazanç Değeri (dB)
1	-10,83	-11,92
2	-10,83	-7,66
3	-10,83	-8,38
4	-10,83	-9,06
5	-10,83	-9,77
6	-10,83	-10,76
7	-10,83	-7,85



Şekil 4.10. Uzak alan ($\phi=90^\circ$) konum-kazanç ilişkisi

Çizelge 4.7’de kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun ölçüm sonuçlarına göre 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) bastırma değerleri yer almaktadır.

Kuşak Konum-5’te %28,95 oranında uzak alanda ($\phi=90^\circ$) en yüksek bastırma oranına, Konum-2’de ise %22,52 oranıyla en düşük bastırma oranına sahiptir. Ortalama bastırma Konum-5’te 8,14 dB ile en yüksek Konum-6’da 1,25 dB ile en düşük değere sahiptir. En yüksek bastırma Konum-5’te 21,03 dB olurken, en düşük bastırma Konum-1’de 0,01 dB, Konum-2’de 0,16 dB, Konum-3,5,7’de 0,02 dB, Konum-4 ve Konum-6’da 0 dB ’dir. Standart sapma Konum-5’te en yüksek 11,82 dB olurken Konum-6’da -4,27 dB (standart sapmanın lineer değeri 0,37’dir bu yüzden eksi bir değer almıştır) olmuştur.

Çizelge 4.7. Ölçümün uzak alan ($\phi=90^\circ$) bastırma değerleri

ÖLÇÜM ($\Phi=90^\circ$)					
Konum	Bastırma Oranı (%)	Ortalama Bastırma (dB)	En Yüksek Bastırma (dB)	En Düşük Bastırma (dB)	Standart Sapma (dB)
1	27,34	2,28	9,18	0,01	0,71
2	22,52	2,88	8,59	0,16	1,17
3	23,06	4,70	13,29	0,02	5,79
4	24,40	3,61	8,60	0,00	0,94
5	28,95	8,14	21,03	0,02	11,82
6	22,79	1,25	4,13	0,00	-4,27
7	24,66	2,80	9,65	0,02	1,00

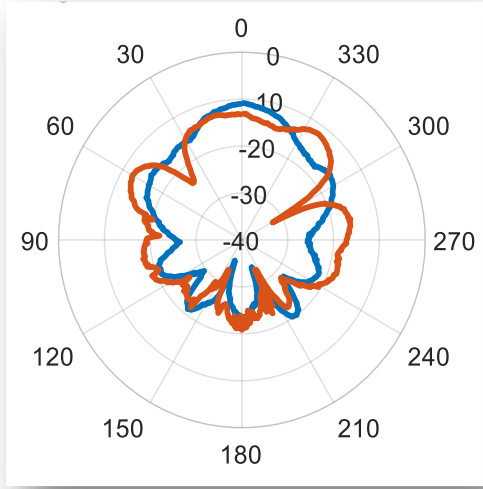
Çizelge 4.8' de kuşaksız soğutucun ve konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun ölçüm sonuçlarına göre 4,9 GHz rezonans frekansındaki uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerleri yer almaktadır.

Kuşak bütün konumlarda %70'in üzerinde kazanç sağlarken Konum-2'de %77,48 oranıyla en yüksek oranda kazanç sağlamıştır. Ortalama kazanç en yüksek Konum-1'deyken 10,05 dB olmuştur. En yüksek kazanç yine Konum-1'deyken 18,43 dB olmuştur. En düşük kazanç değeri Konum-1 ve Konum-3'te 0 dB ile gerçekleşmiştir. Standart sapma en yüksek Konum-1'de 10,98 dB değerine ulaşırken en düşük ise Konum-6'da 3,39 dB ile gerçekleşmiştir.

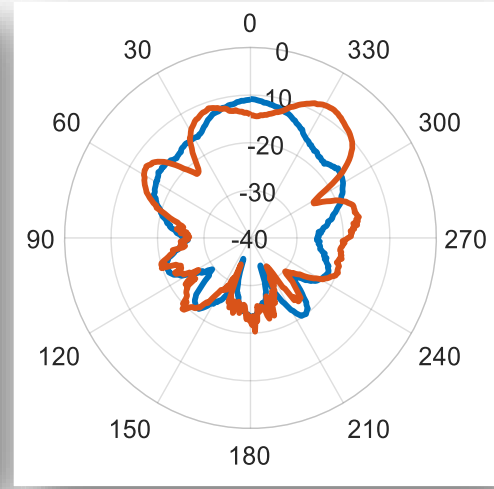
Çizelge 4.8. Ölçümün uzak alan ($\phi=90^\circ$) kazanç değerleri

ÖLÇÜM ($\Phi=90^\circ$)					
Konum	Kazanç Oranı (%)	Ortalama Kazanç (dB)	En Yüksek Kazanç (dB)	En Düşük Kazanç (dB)	Standart Sapma (dB)
1	72,65	10,05	18,43	0,00	10,98
2	77,48	8,53	17,78	0,01	9,45
3	76,94	7,07	16,49	0,00	8,13
4	75,60	4,80	11,01	0,01	4,03
5	71,05	6,59	12,37	0,11	5,51
6	77,21	4,78	10,74	0,02	3,39
7	75,34	5,88	12,52	0,04	3,94

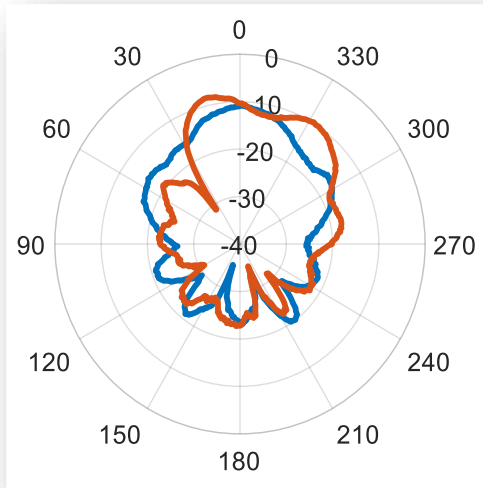
Yukarıdaki çizelgelerde (Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8) yer alan uzak alandaki ($\phi=90^\circ$) kazanç değerlerinin elde edildiği ölçüm sonuçlarının polar grafikleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Mavi renk ile gösterilen grafik kuşaksız soğutucuyu kırmızı renkteki ise konuma göre kuşak geçirilmiş soğutucunun grafiğini göstermektedir.



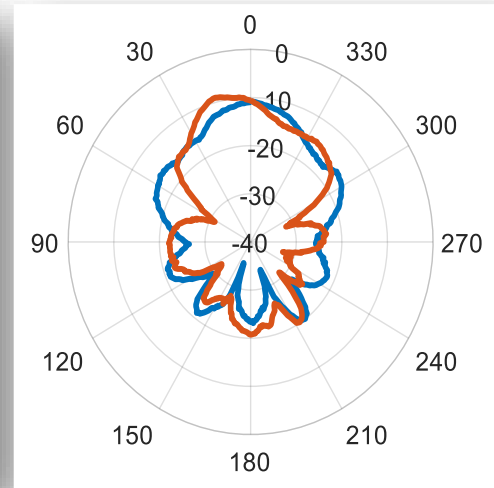
(a) Konum-1



(b) Konum-2

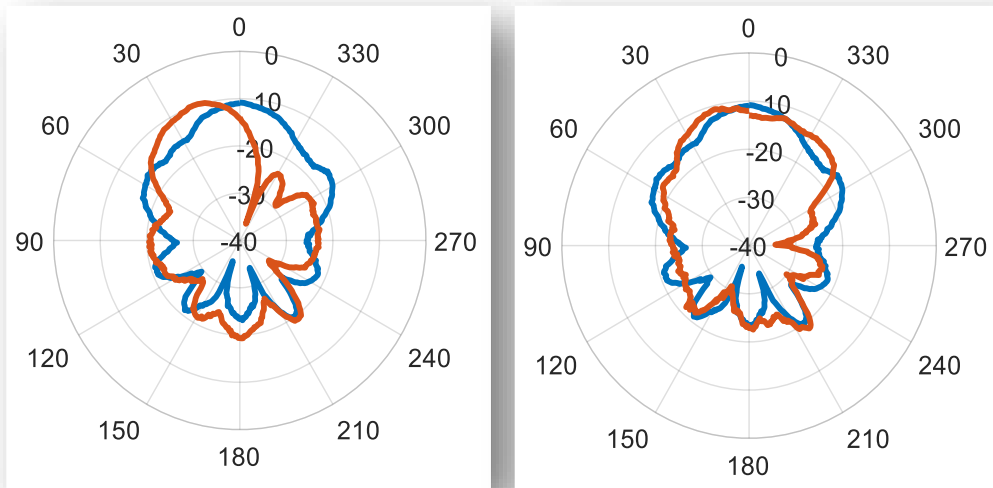


(c) Konum-3



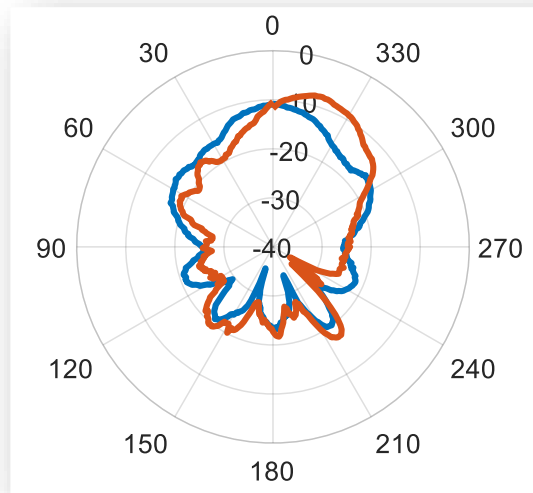
(d) Konum-4

Şekil 4.11. Konuma göre soğutucu-kuşak ölçüm sonuçları



(e) Konum-5

(f) Konum-6



(g) Konum-7

Şekil 4.11'in devamı

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında metamalzeme tabanlı soğurucu kuşağın anten davranışı gösteren elektronik soğutucu üzerine geçirildiğinde ışıma performansına olan etkisi analiz edilerek yeni tümleşik yapının ışıma davranışları incelenmiştir. Bu analizler ilk olarak CST benzetim programında yapılmış olup daha sonrasında laboratuvar ortamında yapılan uzak alan ölçümleri ile desteklenmiştir.

İlk olarak tasarlanan tek katlı soğurucu kuşak elektronik soğutucu etrafına geçirilmiştir. Bu durumda soğutucunun fiziksel boyutları göz önüne alınarak kuşağın bir kenarında beş adet birim hücre kullanılmıştır. Daha sonrasında soğutucu etrafına ikinci ve üçüncü kat kuşak geçirilmiştir. Elektronik kart üzerinde kullanılan soğutucunun ısı transferi yani hava akışının da engellenmemesi için aynı zamanda da ışıma performansında da daha iyi bir sonuç elde edildiği için tek katlı kuşak yapılan analizler için seçilmiştir.

İkinci durum olarak seçilen bu tek katlı soğurucu kuşak elektronik soğutucu üzerindeki kullanıcının amacına yönelik en uygun konuma yerleşimi sağlanmaya çalışılmıştır. Soğutucunun en üst seviyesinden başlanarak tabanına doğru kademeli olarak kaydırılıp taban seviyesine kadar getirilmiştir. Toplamda yedi farklı konumda benzetimi ve ölçümleri yapılmıştır.

Sonuç olarak yapılan bu konumlandırmanın neticesinde uzak alanın $\theta=90^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ de ışıma davranışları analiz edilerek incelenmiştir. Ölçüme dayalı olarak kuşak, soğutucunun üst seviyelerinde kazanca neden olurken tabana doğru kaydırıldığında ise bastırma gerçekleştirmiştir.

Uzak alan $\theta=90^\circ$ de en yüksek bastırmayı kuşak Konum-6'ya yerleştirildiğinde %75,6 oranında ortalama olarak 6,73 dB olarak gerçekleşirken, en düşük bastırmayı kuşak Konum-2'deyken %10,19 oranında ortalama 3,63 dB değerinde sağlamıştır. Kuşak Konum-2'ye kaydırıldığında en yüksek kazancı %89,81 oranında ortalama 4,92 dB olarak sağlarken, en düşük kazanç kuşak Konum-6'dayken %24,40 oranında ortalama 4,13 dB olarak gerçekleştirmiştir.

Uzak alan $\phi=90^\circ$ de ise en yüksek bastırmayı kuşak Konum-5'teyken %28,95 oranında ortalama 8,14 dB ile gerçekleşirken, en düşük bastırmayı Konum-2'de %22,52 oranında 2,88 dB olarak sağlamıştır. En yüksek kazanç kuşak Konum-2'deyken %77,48 oranında ortalama 8,53 dB değerinde sağlarken kuşak Konum-5'e getirildiğinde %71,05 oranında 6,59 dB olarak görülmüştür. Soğutucunun S11 cevabındaki rezonans frekansı 4,9 GHz olduğundan her bir konum içinde uzak alan ölçümleri 4,9 GHz de incelenmiştir.

Soğutucu etrafına soğurucu kuşak geçirilmesi neticesinde oluşan yeni tümleşik yapının S11 cevabında frekans kayması gerçekleşmiştir. Toplam 7 konumun 6'sında kayma miktarı bant genişliğinin içinde kalmış sadece bir tanesinde yaklaşık %10

seviyesinde bandın dışına kaymıştır. Fakat bu durum göz önüne alındığından 4-8 GHz C bandını tamamen soğuran metamateryal tabanlı kuşak tasarımı tamamlanmıştır.

Bu çalışmanın ışığında farklı ortamlarda kullanılan elektronik elemanların üzerlerine düşen elektromanyetik dalgaların neden olduğu harmoniklerin ya da anten davranışı göstererek oluşturdukları ışıma probleminin bastırılması ya da yönlendirilmesi hedeflenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmed, F., Ahmed, A. and Hassan, T. 2021. Comment on “Facile design of an ultra-thin broadband metamaterial absorber for C-band applications”. *Scientific Reports*, 9: 468.
- Ahn, C.H. and Oh, J.H. 2014. Resistive grounding technique of heat sink for reducing radiation noise. *J. Elect. Eng. Technol.*, vol. 9, pp. 1724–1728.
- Baimuratov, A.S., Pereziabova, T.P., Zhu, W., Leonov, M.Y., Baranov, A.V., Fedorov, A.V. and Rukhlenko, I.D. 2017. Optical anisotropy of topologically distorted semiconductor nanocrystals. *Nano Letters*, 17: 5514-5520.
- Başıyigit, İ.B., Genç, A., Doğan, H. and Helhel, S. 2020. The effect of fin types of the heat sinks on radiated emission on the printed circuit board at S - C band, *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(8): 1-8.
- Başıyigit, İ.B., Genç, A., Doğan, H., Senel, F.A. and Helhel, S. 2021. Deep learning for both broadband prediction of the radiated emission from heat sinks and heat sink optimization. *Engineering Science and Technology*, 24(3): 706-714.
- Bouchon, P., Koechlin, C., Pardo, F., Haidar, R. and Pelouard, J-L. 2012. Wideband omnidirectional infrared absorber with a patchwork of plasmonic nanoantennas. *Optics Letters*, 37: 1038-1040.
- Cao, W., Singh, R., Al-Naib, I.A., He, M., Taylor, A.J. and Zhang, W. 2012. Low-loss ultra-high-*Q* dark mode plasmonic fano metamaterials. *Optics Letters*, 37: 3366-3368.
- Chen, H-T. 2012. Interference theory of metamaterial perfect absorbers. *Optics Express*, 20: 7165-7172.
- Cheng, Y.Z, Wang, Y., Nie, Y., Gong, R.Z., Xiong, X. and Wang, X. 2012. Design, fabrication, and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements. *Journal of Applied Physics*, 111: 044-902.
- Chikando, E., Connor, S. and Archambeault, B. 2010. Reduction of heat sink emissions by application of lossy materials. *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 239–243.
- Chong, Y.D., Ge, L., Cao, H. and Stone, A.D. 2010. Coherent perfect absorbers: Time-reversed lasers. *Physical Review Letters*, 105: 053-901.
- Cui, Y., Fung, K.H., Xu, J., Ma, H., Jin, Y., He, S., and Fang, N.X. 2012. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab. *Nano Letters*, 12: 1443-1447.
- Culhaoglu, A.E., Osipov, A.V. and Russer, P. 2013. Mono- and bistatic scattering reduction by a metamaterial low reflection coating. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61: 462-466.
- Diem, M., Koschny, T. and Soukoulis, C.M. 2009. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime. *Physical Review B*, 79: 033-101.

- Doğan, H., Başığit, İ.B. and Genç, A. 2019. Variation of Radiated Emission from Heat sinks on PCB according to Fin Types. *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies* October 11-13. Ankara, Turkey.
- Doğan, H., Başığit, İ.B., Genç, A. and Helhel, S. 2020. Parametric Study of the Radiated Emission from the Plate-Fin CPU Heat sink at 2–8 GHz. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(6): 2401-2410.
- Engheta, N. and Ziolkowski, R.W. 2006. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Feng, S. and Halterman, K. 2012. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials. *Physical Review B*, 86: 165-103.
- Genç, A. and Helhel, S. 2019. The Comparison of EM Characteristics of the Heat sinks with Equal Base Area depending on the Various Geometries. *10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems*, ss. 979-985 Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Genç, A., Başığit, İ.B. ve Doğan, H. 2020. Elektronik Devrelerdeki Silindirik Soğutuculardan Kaynaklanan Elektromanyetik Girişimlerinin 0-10 GHz Bandında Araştırılması. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2): 502-510.
- Genç, A., Doğan, H., Başığit, İ.B. and Helhel, S. 2021. Heat sink Pre-Selection Chart to Minimize Radiated Emission in Broadband on the PCB. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 63(2): 419-426.
- Genç, A., Doğan, H., Başığit, İ.B. and Helhel, S. 2021. A Review of the EMI Effect on Natural Convection Heat sinks. *IETE Journal of Research*. 13(2): 502-510.
- Gu, S., Su, B. and Zhao, X. 2013. Planar isotropic broadband metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics*, 104: 163-702.
- Guddala, S., Kumar, R. and Ramakrishna, S.A. 2015. Thermally induced nonlinear optical absorption in metamaterial perfect absorbers. *Applied Physics Letters*, 106: 111-901.
- Gutman, N., Sukhorukov, A.A., Chong, Y.D. and Sterke, C.M. 2013. Coherent perfect absorption and reflection in slow-light waveguides. *Optics Letters*, 38: 4970-4973.
- Hand, T.H. and Cummer, S.A. 2008. Frequency tunable electromagnetic metamaterial using ferroelectric loaded split rings. *Journal of Applied Physics*, 103: 066-105.
- He, X. and Hubing, T.H. 2012 “A closed-form expression for estimating the maximum radiated emissions from a heat sink on a printed circuit board,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 1, pp. 205–211.
- Helhel, S., Karaman, A.B. and Kocakuşak, A. 2021. Heat sinks as quasi-antennas and frog forming frequency and feeding point effect, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(16): 2153-2162.
- Hong, W. et al. 2017. Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65: 6231-6249.

- Hoa, N. T., Tuan, T. S., Hieu, L. T. and Giang, B. 2019. Facile Design of an Ultra-Thin Broadband Metamaterial Absorber for C-band Applications. *Scientific Reports*, 41598-018-36453-6.
- Hoa, N. T., Tuan, T. S., Hieu, L. T. and Giang, B. 2021. Facile Design of an Ultra-Thin Broadband Metamaterial Absorber for C-band Applications. *Scientific Reports*, 41598-018-36453-6 (retracted article).
- Huang, Y., Wen, G., Li, J., Zhong, J., Wang, P., Sun, Y., Gordona, O. and Zhu, W. 2012. Metamaterial absorbers realized in X-band rectangular waveguide. *Chinese Physics B*, 21: 117-801.
- Huang, Y., Wen, G., Li, J., Zhu, W., Wang, P. and Sun, Y. 2013. Wide-angle and polarization-independent metamaterial absorber based on snowflake-shaped configuration. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 27: 552-559.
- Huang, Y., Wen, G., Zhu, W., Li, J., Si, L. and Premaratne, M. 2014. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators. *Optics Express*, 22: 16408-16417.
- Kang, M., Liu, F., Li, T-F., Guo, Q-H., Li, J., Chen, J. 2013. Polarization-independent coherent perfect absorption by a dipole-like metasurface. *Optics Letters*, 38: 3086-3088.
- Kang, M., Chong, Y.D., Wang, H-T., Zhu, W. and Premaratne, M. 2014. Critical route for coherent perfect absorption in a fano resonance plasmonic system. *Applied Physics Letters*, 105: 131-103.
- Kang, M., Wang, H.T. and Zhu W. 2017. Wavefront manipulation with a dipolar metasurface under coherent control. *Journal of Applied Physics*, 122: 013-105.
- Kang, M., Zhu, W. ve Rukhlenko, I.D. 2017. Experimental observation of the topological structure of exceptional points in an ultrathin hybridized metamaterial. *Physical Review A*, 96: 063-823.
- Karaman, A. B. 2019. Elektronik soğutucuların uzak alan elektromanyetik ışınma davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 70 s.
- Karaman, A. B., Kocakuşak, A., Genç, A. and Helhel, S. The Effect of Feeding Point on Electromagnetic Emission due to Heat Sink. *PIERS Photonics & Electromagnetics Research Symposium*, Roma, Italy, 17 - 20 June 2019, cilt.1, sa.1, ss.54.
- Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R. and Padilla, W.J. 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100: 207-402.
- Lin, F.H. and Chen, Z.N. 2017. Low-profile Wideband metasurface antennas using characteristic mode analysis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65: 1706-1713.
- Linder, J. and Halterman, K. 2016. Graphene-based extremely wide-angle tunable metamaterial absorber. *Scientific Reports*, 6: 31225.

- Mkhitaryan, V.K., Ghosh, D.S., Rude, M., Canet-Ferrer, J., Maniyara, R.A., Gopalan, K.K., and Pruneri, V. 2017. Tunable complete optical absorption in multilayer structures including Ge₂Sb₂Te₅ without lithographic patterns. *Advanced Optical Materials*, 5: 1600452.
- Mousavi, H., Darzi, A.A.R., Farhadi, M. and Omid, M. 2018. "A Novel Heat Sink Design with Interrupted, Staggered and Capped Fins", *International Journal of Thermal Sciences*, 127: 312-320.
- Pu, M., Wang, M., Hu, C., Huang, C., Zhao, Z., Wang, Y. and Luo, X. 2012. Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime. *Optics Express*, 20: 25513-25519.
- Pu, M., Feng, Q., Wang, M., Hu, C., Huang, C., Ma, X., Zhao, Z., Wang, C. and Luo, X. 2012. Ultrathin broadband nearly perfect absorber with symmetrical coherent illumination. *Optics Express*, 20: 2246-2254.
- Ra'di, Y., Simovski, C.R. and Tretyakov, S.A. 2015. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: theory, design, and realizations. *Physical Review Applied*, 3: 037-001.
- Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer, S.A., Pendry, J.B., Starr, A.F. and Smith, D.R. 2006. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314: 977-980.
- Shelby, R.A., Smith, D.R. and Schultz, S. 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292: 77-79.
- Shen, Y., Pang, Y., Wang, J., Ma, H. and Pei, Z. 2015. Ultra-broadband terahertz absorption by uniaxial anisotropic nanowire. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27: 2284-2287.
- Shrekenhamer, D., Chen, W-C., and Padilla, W.J. 2013. Liquid crystal tunable metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 110: 177-403.
- Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C. and Schultz, S. 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 84: 4184-4187.
- Tao, H., Landy, N.I., Bingham, C.M., Zhang, X., Averitt, R.D., and Padilla, W.J. 2008. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication, and characterization. *Optics Express*, (10): 7181-7188.
- Valentine, J., Zhang, S., Zentgraf, T., Ulin-Avila, E., Genov, D.A., Bartal, G. and Zhang, X. 2008. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature*, 455: 376-379.
- Wang, H., Sivan, P.V., Mitchell, A., Rosengarten, G., Phelan, P. and Wang, L. 2015. Highly efficient selective metamaterial absorber for high-temperature solar thermal energy harvesting. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 137: 235-242.
- Watts, C.M., Liu, X., and Padilla, W.J. 2012. Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*, 24: OP98-OP120.

- Wen, Q-Y., Zhang, H-W., Yang, Q-H., Chen, Z., Long, Y., Jing, Y-L., Lin, Y. and Zhang, P-X. 2012. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45: 235-106.
- Xie, J., Zhu, W., Rukhlenko, I.D., Xiao, F., He, C., Geng, J., Liang, X., Jin, R. and Premaratne, M. 2018. Water metamaterial for ultra-broadband and wide-angle absorption. *Optics Express*, 26: 5052-5059.
- Yao, G., Ling, F., Yue, J., Luo, C., Ji, J. and Yao, J. 2016. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range. *Optics Express*, 24: 1518-1527.
- Yin, S., Zhu, J., Xu, W., Jiang, W., Yuan, J., Yin, G., Xie, L., Ying, Y. and Ma, Y. 2015. High-performance terahertz wave absorbers made of silicon-based metamaterials. *Applied Physics Letters*, 107: 073-903.
- Zhang, X. and Liu, Z. 2008. Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nature Materials*, 7: 435-441.
- Zhang, Y., Feng, Y., Zhu, B., Zhao, J. and Jiang, T. 2014. Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency. *Optics Express*, 24: 22743-22734.
- Zhang, F., Feng, S., Qiu, K., Liu, Z., Fan, Y., Zhang, W., Zhao, Q. and Zhou, J. 2015. Mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber. *Applied Physics Letters*, 106: 091-907.
- Zhong, J., Huang, Y., Wen, G., Sun, H., Gordon, O. and Zhu, W. 2012. Dual-band negative permittivity metamaterial based on cross circular loop resonator with shorting stubs. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11: 803-806.
- Zhou, W., Wang, P., Wang, N., Jiang, W., Dong, X. and Hu, S. 2015. Microwave metamaterial absorber based on multiple square ring structures. *AIP Advances*, 5: 117-109.
- Zhu, W. and Zhao, X. 2009. Metamaterial absorber with dendritic cells at infrared frequencies. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 26: 2382-2385.
- Zhu, W. and Zhao, X. 2009. Numerical study of low-loss cross left-handed metamaterials at visible frequency. *Chinese Physics Letters*, 26: 074-212.
- Zhu, W., Zhao, X., Bao, S. and Zhang, Y. 2010. Highly symmetric planar metamaterial absorbers based on annular and circular patches. *Chinese Physics Letters*, 27: 014-204.
- Zhu, W. and Zhao, X. 2010. Metamaterial absorber with random dendritic cells. *European Physical Journal Applied Physics*, 50: 21101.
- Zhu, W., Huang, Y., Rukhlenko, I.D., Wen, G., Premaratne, M. 2012. Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum. *Optics Express*, 20: 6616-6621.
- Zhu, W., Rukhlenko, I.D. and Premaratne, M. 2012. Linear transformation optics for plasmonics. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 29: 2659-2664.

- Zhu, W., Rukhlenko, I.D., Huang, Y., Wen, G. and Premaratne, M. 2013. Wideband giant optical activity and negligible circular dichroism of near-infrared chiral metamaterial based on a complementary twisted configuration. *Journal of Optics*, 15: 125-101.
- Zhu, W., Rukhlenko, I.D., Si, L. and Premaratne, M. 2013. Graphene-enabled tunability of optical fishnet metamaterial. *Applied Physics Letters*, 102: 121-911.
- Zhu, W., Rukhlenko, I.D., Xiao, F. and Premaratne, M. 2014. Polarization conversion in U-shaped chiral metamaterial with four-fold symmetry breaking. *Journal of Applied Physics*, 115: 143-101.
- Zhu, W., Xiao, F., Kang, M. and Premaratne, M. 2016. Coherent perfect absorption in an all-dielectric metasurface. *Applied Physics Letters*, 108: 121-901.
- Zhu, W., Rukhenko, I.D., Xiao, F., He, C., Geng, J., Liang, X., Premaratne, M. and Jin, R. 2017. Multiband coherent perfect absorption in a water-based metasurface. *Optics Express*, 25: 15737-15745.
- Zhu, W., Xiao, F., Rukhlenko, I.D., Geng, J., Liang, X., Premaratne, M. and Jin, R. 2017. Wideband visible light absorption in an ultrathin silicon nanostructure. *Optics Express*, 25: 5781-5786.

ÖZGEÇMİŞ

ZEYNEP KOCAMAN

1zeynepkocaman@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2018-2021	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2013-2018	Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Kocaman Z., Kocakuşak A., Başığit B., Özen Ş., Helhel S., "Design of A Triple Band Absorber Metamaterial for C-Band Radars with Golden Ratio Approaches", International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES), KARABÜK, TÜRKİYE, 11-13 Mayıs 2018, vol.1, no.1, pp.8-11.

2- Kocaman Z., Kocakuşak A., Karaman A.B., Helhel S., "C bandı Hava Durumu Radarları İçin U şeklinde Metamateryal Tabanlı Radar Soğurucu Malzeme Tasarımı", IX. URSI-TÜRKİYE 2018 BİLİMSEL KONGRESİ ULUSAL GENEL KURUL TOPLANTISI, KONYA, TÜRKİYE, 6-8 Eylül 2018, cilt.1, no.1, ss.1-1.