



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TERAHERTZ (THZ) FREKANSTA ÇALIŞAN META MALZEME
SOĞURUCU TASARIMI

İlhan DAŞDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İlhan DAŞDEMİR tarafından hazırlanan “Terahertz (THz) Frekansta Çalışan Meta Malzeme Soğurucu Tasarımı” adlı tez çalışması 21/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Melih KUNCAN

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim ÖZTEKİN

.....

Üye

Doç. Dr. Emrullah ACAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu seminerdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this seminar document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İlhan DAŞDEMİR

21/08/ 2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERAHERTZ (THZ) FREKANSTA ÇALIŞAN META MALZEME SOĞURUCU TASARIMI

İlhan DAŞDEMİR

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim ÖZTEKİN

2023, 39 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Melih KUNCAN

Doç. Dr. Emrullah ACAR

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkerim ÖZTEKİN

Terahertz (THz) frekansındaki sinyaller yüksek nüfuz etme gücü, uygulama güvenliği, yüksek sinyal-gürültü oranı ve düşük iletim kaybı gibi pek çok özelliğe sahiptir. Ayrıca, daha geniş bant genişliği sayesinde, THz frekansında çalışan radarlar diğer radarlara kıyasla daha yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu özelliklere sahip olmasından dolayı THz frekans bandında çalışan bir radar, otomatik algılama ve gizli objeleri tespit etmede daha etkili olabilmektedir. Bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda, THz radar kullanımının artarak önceki radarların yerini alması kaçınılmazdır. Bununla beraber, özellikle askeri teknolojide, radara yakalanmadan hareket etme yeteneği günümüzde büyük bir önem kazanmıştır.

Normal şartlarda THz radarlara karşı görünmezlik sağlayabilecek soğurucu malzemeler bulmak oldukça güçtür, zira doğal malzemeler THz frekansındaki sinyallere karşı zayıf bir etkiye sahiptir. Meta malzemeler, dielektrik özellikleri laboratuvar ortamında yapay olarak değiştirilmiş malzemelerdir. Meta malzemeler genellikle askeri alanlarda uçak, gemi ve denizaltı gibi araçların kaplamalarında kullanılarak radar sistemlerine yakalanma olasılığını neredeyse sıfıra düşürüp bu sayede istenilen görünmezliği sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, meta malzeme kullanılarak Terahertz (THz) seviyesinde çalışabilecek bir elektromanyetik ekran tasarımı üzerine odaklanılmıştır. Çalışmanın amacı, hedeflenen soğurma değerini elde edebilecek bir ekran tasarımı geliştirmektir. Prototip tasarım üzerinde yapılan simülasyonlar, %99,98 gibi yüksek bir soğurma oranı elde edildiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Meta Malzeme, Radarda Görünmezlik, Soğurucu, Terahertz Radar.

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN OF A METAMATERIAL ABSORBER OPERATING AT TERAHERTZ (THz) FREQUENCY

İlhan DAŞDEMİR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN
ELECTRIC ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Abdulkirim ÖZTEKİN

2023, 39 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Melih KUNCAN

Assoc. Prof. Dr. Emrullah ACAR

Asst. Prof. Dr. Abdulkirim ÖZTEKİN

Signals in the Terahertz (THz) frequency range have many characteristics, such as high penetration power, application security, high SNR, and minimum transmission loss. Furthermore, thanks to its wider bandwidth, THz frequency radar systems enable higher resolution imaging compared to other radars. Due to these advantages, radar systems operating in the THz frequency band can be more effective in automatic detection and detecting hidden objects. Considering these advantages, it is inevitable that THz radar usage will increase and eventually replace previous radar systems. However, the ability to move without being detected by radar has become crucial, especially in military technology.

Under normal circumstances, finding absorptive materials that can provide invisibility against THz radar is quite challenging, as natural materials have a weak effect on THz signals. Metamaterials are artificially engineered materials with modified dielectric properties in laboratory settings. Metamaterials are commonly used in military applications for coating vehicles such as aircraft, ships, and submarines, reducing the probability of being detected by radar systems and achieving the desired invisibility.

In this thesis, the focus is on designing an electromagnetic screen that can operate at the Terahertz (THz) level using metamaterials. The purpose of the study is to advance a screen design that can achieve the targeted absorption value. Simulations conducted on the prototype design demonstrate a high absorption rate of 99.98%.

Key Words: Absorber, Metamaterial, Stealth, THz Signal.

ÖNSÖZ

Günümüzde, teknolojik gelişmeler ve yenilikler, birçok alanda devrim niteliğinde dönüşümlere yol açmaktadır. Özellikle iletişim, savunma, güvenlik ve görüntüleme alanlarında yapılan araştırmalar, farklı frekans seviyelerinde çalışabilen malzemelerin büyük önem taşıdığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, Terahertz (THz) seviyesinde soğurma yeteneğine sahip ve bu frekans aralığında etkili bir şekilde çalışabilen bir ekran tasarımı yapmanın önemi açıkça görülmektedir.

Bu tez çalışması, THz seviyesinde çalışabilen bir ekran tasarımının geliştirilmesine odaklanmaktadır. THz sinyallerinin özelliklerinden kaynaklanan avantajları, yüksek nüfuz etme gücü, mükemmel uygulama güvenliği, yüksek sinyal-gürültü oranı ve düşük iletim kaybı gibi faktörlerle birlikte değerlendirilmektedir. Ayrıca, daha geniş bir bant genişliği sayesinde THz radarlarının, geleneksel radarlara kıyasla daha yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etme potansiyeli vardır.

Askeri alanlarda kullanılan gizlilik ve güvenlik açısından büyük önem taşıyan bu tür tasarımlar, uçaklar, gemiler, denizaltılar gibi araçların kaplamalarında kullanılarak radar sistemlerine yakalanma olasılığını neredeyse sıfıra indirebilir. Bu sayede istenilen görünmezlik sağlanabilir. Çalışmanın sonuçları, elde edilen soğurma değerlerinin %99,98'e kadar çıktığını ve yüksek bir görünmezlik seviyesinin elde edilebileceğini göstermektedir. Bu tez çalışması, THz seviyesinde çalışabilen malzemelerin tasarımında önemli bir adımdır ve gelecekteki araştırmalar için güçlü bir temel oluşturmaktadır.

Ayrıca bu çalışmanın bir parçası olma fırsatını bana veren, bilgisini her konuda benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdülkerim ÖZTEKİN' e, yüksek lisans eğitimim süresince ve özellikle tez dönemindeki zorlu süreçte hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, her an beni motive eden, en zor anlarımda bile bana sürekli güvenen canım eşim Sıla DAŞDEMİR' e ve en zorlandığım anlarda bile gülümseyerek çalışma azmimi artıran sevgili kızım Beril Aya DAŞDEMİR' e teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

İlhan DAŞDEMİR
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	x
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. GENEL BİLGİLER	5
3.1 Radar	5
3.1.1 Radarların Sınıflandırması	5
3.1.2 Neden THz Radar Kullanılır?.....	9
3.2 Meta Malzeme	11
3.2.1 Meta Malzemelerin Özellikleri.....	12
3.2.2 Meta Malzeme Soğurucu Nedir?	14
3.2.3 Meta Malzeme Sınıflandırma	15
3.3 Ekranlama	17
3.3.1 Ekranlamada Dikkat Edilmesi Gerekenler	19
3.3.2 Elektromanyetik Ekranlama Özelliğine Sahip Malzemeler	20
3.3.3 Ekranlama Performansını Azaltan Etmenler	20
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
4.1. Computer Simulation Technology (CST).....	22
4.2. Ekran Tasarımı	22
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	26
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ.....	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- P_i : Bir dairenin çevresinin çapına oranı
 β : Dalga boyu
 ϵ_r : Dielektrik sabiti
 ϵ_{eff} : Efektif elektrik geçirgenlik
 μ_{eff} : Efektif manyetik geçirgenlik
 σ : İletkenlik
 P_T : İletilen güç
SiO₂ : Silikon dioksit
 S_{11} : Soğurma
 S_{21} : Yansıma

Kısaltmalar

- AHR : Ayrık Halka Rezonatörleri
CST : Computer Simulation Technology
dB : Desibel
DNG : Double Negative
DPS : Double Positive
EE : Ekranlama Etkinliği
EMC : Electromagnetic Compability
ENG : Epsilon Negative
GHz : Gigahertz
LHM : Left-handed Metamaterial
MHz : Megahertz
Mm : Mikrometre
MNG : Mu Negative
SE : Shielding Efficiency
TE : Transverse Electric
THz : Terahertz
TM : Transverse Magnetic

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1. Negatif kırılma indisi	12
Şekil 3. 2. E , H ve S nin aynı düzlemde gösterimi (Tao ve ark., 2008)	13
Şekil 3. 3. Geleneksel malzeme ve meta malzemenin iki ortamın ara yüzündeki yansıma ve kırılmaları	14
Şekil 3. 4. Kablolarda ve açık levha rezonatörlerde kullanılan negatif kırılmalı DNG malzemenin simülasyon örneği (Dekhoda ve ark., 2012)	16
Şekil 3. 5. DPS-DPS kırılması (Dekhoda ve ark., 2012)	17
Şekil 3. 6. DPS-DNG kırılması (Dekhoda ve ark., 2012)	17
Şekil 3. 7. Ekranlama etkinliğinin tanımı (Tekiner ve Erdemir, 2018)	18
Şekil 3. 8. Elektrik ve manyetik dipoller için ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi (Tekiner ve Erdemir, 2018).	19
Şekil 4. 1. THz seviyesinde çalışan meta malzeme soğurucu geometrisi	23
Şekil 4. 2. THz seviyesinde çalışan meta malzeme soğurucu tek katlı elektromanyetik ekran tasarımı	24
Şekil 4. 3. Çift katlı meta malzeme soğurucunun 3 boyutlu gösterimi	25
Şekil 5. 1. Tek katlı meta malzemeye ait S11 parametresinin büyüklüğü	27
Şekil 5. 2. Tek katlı meta malzemeye ait S21 parametresinin büyüklüğü	27
Şekil 5. 3. Çift katlı meta malzeme soğurucunun S11 parametresinin büyüklüğü	28
Şekil 5. 4. Çift katlı meta malzeme soğurucunun S21 parametresinin büyüklüğü	29
Şekil 5. 5. FR4 kalınlığı 1.75 µm olan çift katlı meta malzeme soğurucuya ait yansıma ve soğurma grafiklerinin MATLAB programında gösterimi	29
Şekil 5. 6. Çift katlı meta malzeme soğurucunun farklı FR4 kalınlıklarına ait soğurma grafikleri	30
Şekil 5. 7. TEM modunda 2 THz değeri için yüzey akım dağılım grafiği	31
Şekil 5. 8. TEM modunda 2 THz değeri için elektrik alan dağılım grafiği	32

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4. 1. Tasarıma ait parametre bilgileri	230
Tablo 4. 2. Paterne ait ölçüsel bilgiler.....	24
Tablo 5. 1. Substrat kalınlığına bağlı olarak elde edilen maksimum soğurma oranları ve frekans değerleri.....	30



1.GİRİŞ

Askeri araçların radar sistemlerinde daha net bir şekilde görünmesi THz seviyesi radarlarda mümkündür. Ancak günümüzde askeri teknolojide radara yakalanmadan hareket etme yeteneği büyük önem kazanmıştır. Radar görünmezliği, gelen sinyalin emilmesi veya saçılmasıyla mümkün olabilmektedir. Bu emilme veya saçılma işlemi, doğada bulunan doğal malzemelerle gerçekleştirilemez. Bu nedenle, laboratuvar ortamlarında tasarlanmış, dielektrik özellikleri değiştirilmiş, iletken veya yalıtkan özelliklere sahip malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelere "meta malzeme" denilmektedir (Liu ve Zhang, 2011). Normal şartlarda THz seviyesinde çalışabilen ürünlerin üretimi zordur, çünkü bu seviyelerde doğal malzemeler THz dalgalarına karşı çok zayıf kalmaktadır. Bu nedenle, meta malzemeler üretilmiş ve durumu tamamen değiştirmiştir (Pan ve ark., 2021).

Meta malzemeler, laboratuvar ortamlarında yapay olarak üretilen ve doğada bulunmayan elektronik ve elektromanyetik özelliklere sahip olan malzemelerdir. Bu malzemeler içindeki elektromanyetik dalgalar, alışılmışın dışında bükülmektedir. Bu alışılmışın dışında bükülme, meta malzeme içine yerleştirilen minik implantlar sayesinde gerçekleştirilmektedir (wikipedia). Bu implantlar, ışığı istediğimiz şekilde bükme ve yönlendirme imkanı sağlar. Bu da ışığı istediğimiz şekilde kullanabileceğimizi gösterir. Meta malzemelerin kırılma açısı eksi değer alır. Malzemeye çarpan elektromanyetik dalga, geliş açısıyla aynı yönde enerji akışını sürdürür, yani dalga vektörü ve enerji akışı zıt yönlüdür. Meta malzemeler, dielektrik veya metal elemanların dalga boyuyla oluşmuş yapay bir ortam olarak tanımlanır ve doğada bulunmayan elektromanyetik özellikler sergiler. Meta malzemeler, malzemelerin uygun tasarımıyla oluşur ve elektromanyetik dalgalarla etkileşime girerek olağan dışı özellikler gösterirler. Başka bir deyişle, dielektrik sabiti her yönde farklılık gösterir. Geometrisi, büyüklüğü ve düzeni, ışık ve sesle doğada görülmez bir şekilde etkileşime girebilir. Meta malzemelerin genel olarak kullanım yöntemleri, gelen sinyalin kırılması veya emilmesi şeklindedir (Cheng, 2012; Aniolezyk ve ark., 2004). İlk olarak mikrodalga frekanslarında tasarlanan meta malzeme emiciler, uygun geometri ve frekansta %70 - %90 arasında bir emilim elde etmek için tasarlanmıştır. Daha sonra, bu oranı daha da artırmak için MHz, GHz ve THz seviyelerinde çalışmalar yapılmış ve özellikle %90 - %99 civarında soğurma elde edilmiştir.

Son yıllarda, meta malzemelerin üretiminde hızlı gelişmeler kaydedilmiş ve yeni

platformlarda kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, elektromanyetik veya optik ürünler (He ve ark., 2016), modülatörler (Salvatore ve ark., 2014), filtreler (Ke ve ark., 2015), antenler (Pushkar ve Gupta, 2016) vb. kullanılmaktadır. Ancak meta malzemenin en başarılı emilim örnekleri ilk olarak Landy ve arkadaşları tarafından bilimsel dünyaya sunulmuştur (Landy, 2008).

Meta malzeme soğurucu genellikle üç ya da daha fazla tabakadan meydana gelir; topraklanmış metal zemin, dielektrik tabaka ve elektriksel rezonatör. Soğurma substratın iki tarafında bulunan paralel olmayan akımlar tarafından oluşturulan dıştan manyetik tepki ve elektrik rezonatörlerin elektrik alan tarafından uyarılmasıyla gerçekleşir. Böylelikle, belirli frekans periyotlarında eş zamanlı olarak kuvvetli bir elektrik ve manyetik reaksiyonla emilim başlar. Yani bakış açısına göre farklı dielektrik özelliği gösteren meta malzeme sinyalin geldiği yönde yalıtkan özellik gösterip gelen sinyali yalıtılmaktadır. Yalıtılan sinyal alt tabakadaki iletkenine çarpıp geri döner ama sinyalin geri dönüş yönü meta malzemenin farklı dielektrik sabitinden ötürü iletken olduğu için sinyal yüzeye çarpar ve geri döner. Böylece sinyal iki iletken yüzey arasına girip bir daha çıkamamaktadır yani soğurulmaktadır (Landy, 2008).

Yapılan bu tezde farklı bir patern tasarlanmış ve bu paterne ait maksimum soğurma değerlerinin hangi frekanslarda ve hangi şartlar altında alındığı üzerine çalışılmış, sonuçlar simülasyon programında elde edilmiş ve sunulmuştur. Öncelikle tek katman olarak bir tasarım elde edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Akabinde soğurma oranını daha artırmak için tasarım çift kat olarak denenmiş ve soğurma oranının maksimumuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Çift katlı tasarımda kullanılan malzemenin farklı kalınlık değerleri için farklı sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar tez çalışmasında sunulmuştur. En yüksek soğurmanın elde edildiği kalınlık değeri esas alındığında bu çalışmada % 99.9'dan daha fazla bir soğurma elde edildiği gözlemlenmiştir. Çalışma da birincil amaç maksimum soğurma elde etmek olduğu için bant genişliği nispeten göz ardı edilmiştir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde elektromanyetik soğurucular üzerine önceden yapılmış farklı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalardan bir kısmı maksimum soğurma değerini ele alırken bazıları ise bant genişliğini uzun tutmak üzere yapılmış çalışmalardır. Aşağıda bu çalışmalardan bazılarından bahsedilmektedir.

Avloni ve ark. (2006) yaptıkları çalışmalarında, elektro manyetik karışırmalarda meta malzemelerin iyi birer koruyucu olduğu ispatlanmıştır. Aslında konvansiyonel metalik ekranlarla aynı yansıma etkisini daha az yoğunlukla sağlar. Diğer bir avantajı ise istenilen frekans seçici durumlar da sergilenmek istenen durum için değiştirilebilir. Koruma yapılırken performansları hala değerlendirme aşamasındadır. Periyodik meta malzemelerin özel durumu hem rezonans hem de non-rezonans durumlarında efektif homejenize limitinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Lee ve Lee (2011), kare rezonatör yapısı kullanarak soğurucu elde ettikleri çalışmalarını Temmuz 2011 de yayınlamıştır. Lueng 'e göre kare rezonatör kullanılarak geniş bantlı THz meta malzeme soğurucu, çalışmada belirtilen özelliklerde uygulandığında müthiş soğurma elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, ince silikon dioksit film tarafından bölünmüş topraklanmış bakır zemin ve bakır periyodik kısım kullanılarak malzeme soğurucu tasarlanmıştır ve 14,5 μm kalınlıkta dar bantlı soğurma elde edilmiştir. Yansıma hemen hemen sifira yakındır, soğurma değeri ise 6,7 THz de %99,8 olarak elde tespit edilmiştir.

Cheng ve ark. (2018) yapmış olduğu çalışmalarında, THz bölgesinde çift ve geniş bantta çalışan kompakt kıvrımlı kablo rezonatör yapıya sahip meta malzeme soğurucu tasarımı sunmuşlardır. Çalışmaya göre 1,19 THz ve 1,64-2,47 THz seviyelerinde %90 civarında soğurma elde edilebilmişlerdir. Çalışma temel olarak tasarlanan yapıda elektrik ve manyetik rezonans cevabının karışımlarından meydana gelmektedir (Cheng ve ark., 2018). Yapılan çalışma da çift ve geniş bant soğurması kolaylıkla gözlemlenebilir durumdadır. 1,19 THz ve 1,65-2,49 THz seviyelerinde yansıtma oranı %10'dan düşük ve karşı soğurma oranı %90'dan daha yüksektir. İlaveten bu çalışmada yapılan denemeler sonucunda soğurma oranının 1,87 THz, 2,17 THz ve 2,35 THz seviyelerinde 99,9%'a kadar çıktığı gözlemlenmiştir.

Pan ve ark. (2021) çalışmalarında, ayırık ve sürekli spiral topolojik dağılımlı yuvarlak rezonatör paterne sahip geniş bant THz soğurucu üzerine çalışmışlardır. Spiral

yapının ayrık olması, soğurma bandını geniş tutabilmek için tercih edilmiştir. İki katman belirli bir oranda istiflenerek, 2,57–5,19 THz seviyelerinde enerji kaybı artırılmış fakat %90'ın üzerinde bir soğurma elde etmeyi başarmışlardır. Bu çalışma genel anlamda incelendiğinde en yüksek soğurma oranı olan % 90 üzeri değerin, sinyalin geliş açısının 20 derecenin altında ve frekans aralığının 2,5–5,6 THz arasındaki (4,95–5,1 THz değerleri hariç) değerler arasındaki durumlarda olduğu gözlemlenmektedir.

Li ve ark. (2022) yapmış oldukları çalışmalarında, çift fonksiyonlu dinamik olarak ayarlanabilir soğurma metodunu kullanmıştır. 1,545 THz ve 3,21 THz frekanslarına sahip iki rezonans zirvesini %93,8 ve %99,4 oranında soğurma elde ederek çalışmayı başarmışlardır. Lazer pompasında bulunan foto sensitif silikonun iletkenliğini ayarlayarak 1,525 THz ve 2,79 THz olmak üzere 2 tane zirve frekansı değiştirebilmişlerdir. Soğurma genliği değişimini ise cihazı döndürerek sinyalin geliş polarizasyon açısını ayarlayıp elde etmişlerdir. 2 farklı sinyal ve 2 farklı dönüş açısı elde ettikleri için aradaki değişimi aynı anda kolayca inceleyebilmişlerdir (Li ve ark., 2022). Ekibin çalışması incelendiğinde 1,545 THz seviyesinde %93,8'lik bir soğurma ve 3,21 THz seviyesinde ise %99,4'lük bir soğurma elde edildiği anlaşılmaktadır.

3. GENEL BİLGİLER

3.1 Radar

“Radar” terimi, "Radio Detection and Ranging" kavramının baş harflerinden türetilmiş bir kısaltmadır. Radar teknolojisi, elektromanyetik dalgaların yayılma hızını kullanarak nesnelere tespit eder ve bu nesnelere yansıyan sinyalleri analiz ederek uzaklık, yön ve hatta şekil gibi bilgiler elde eder. Radarın çeşitli askeri ve sivil kullanım alanları bulunur; örneğin hava trafik kontrolü, hava durumu tahmini, mesafe ölçümü ve nesne izleme gibi alanlarda geniş şekilde kullanılır.

İlk deneysel radar sistemleri, hedefin yerine varlığını tespit etmekte kullanılan bir prensibi takip eder. Bu sistemlerde, radarın vericisinden gönderilen sinyal, hedef nesneden yansıdığı anda Doppler frekans kayması gibi etkilerle sinyalde değişiklikler oluşur. Bu değişiklikler, hedefin varlığını tespit etmek için kullanılır. Asıl amaç, hedefin konumunu belirlemek değil, varlığını saptamaktır.

Radar teknolojisi, optik algılama ve kızılötesi cihazlarına kıyasla özellikle zorlu hava koşullarında, gece veya gündüz fark etmeksizin uzak mesafelerdeki hedefleri tespit etmek ve bu hedeflerin mesafelerini, konumlarını ve hatta hareketlerini hassas bir şekilde belirlemek için kullanılır. Radar, kendi vericisine sahip olduğundan, hedefleri aydınlatmak için gönderdiği elektromanyetik dalgaları kullanır. Genel olarak hertz cinsinden hesaplanan ve 400 MHz'den 40 GHz'e kadar olan elektromanyetik spektrumun mikrodalga alanında çalışmaktadırlar. Radarın çalışma prensibi çok basittir ve hem elektromanyetik güç iletir hem de hedefe geri dönen enerjiyi inceler. Geri dönen sinyaller, kaynağının konumunda tekrar alınır, iletim yolunda bir engel olduğu anlaşılır ve cismin tespiti yapılmış olur (ICAO, 2001).

3.1.1 Radarların Sınıflandırması

Şimdiye kadar frekans bantlarını nitelemekte kullanılan ve halen geçerli olan iki sistem bulunmaktadır. Biri sayılar diğeri ise harflendirme yöntemidir. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) kurumu tarihten gelen ve kısmen 2. Dünya Savaşından kalan seçimi benimsemiştir. Savaş zamanlarında bazı harfler frekans sınırlarını belli etmemek için özellikle boş bırakılmıştır. North Atlantic Treaty Organization (NATO), bant sınırları için farklı bant bölgelerini belirleyen bir frekans bant çizelgesi kullanır. Bu çizelge, farklı teknolojilere ve ölçüm imkanlarına uyum sağlayacak

şekilde düzenlenmiştir. Bant sınırları yaklaşık logaritmik bir şekilde bölünmüş olduğundan, bu yapı yukarı doğru genişletmeye açıktır. Bu durum, daha fazla frekans bandının kolayca eklenmesine ve bu frekans aralıklarının daha iyi tanımlanmasına imkan verir. Radar frekansları yaklaşık olarak 30 MHz ile 300 GHz arasındadır (Calderbank, 2009).

A ve B bandı (HF ve VHF radarı)

Verdiğiniz bilgiler doğru. 300 MHz'nin altındaki frekans bantları, radar teknolojisinin tarihsel geçmişine sahiptir ve özellikle 2. Dünya Savaşı öncesinde ve sırasında önemli bir rol oynamıştır. Bu dönemdeki ilk radarlar, bu frekans aralıklarını kullanarak geliştirilmiştir. Ardından bu frekans bantları uzun menzillere sahip Ufuk Ötesi Radarlar (Over the Horizon, OTH) adı verilen erken uyarı radarlarında kullanılmıştır. Ancak, dalga boyu uzunluğunun anten boyutuna oranına bağlı olarak açısal hesaplama hassasiyeti azaldığından, bu radarlar yüksek hassasiyet gereksinimlerini karşılamakta sınırlıdır. Bu frekans bantları haberleşmede kullanılan radyo servisleri tarafından sürekli bir şekilde kullanılmaları, radarların kullanabileceği bant genişliğini kısıtlar (Fishler ve ark., 2004).

C bandı (UHF radarı)

300 MHz - 1 GHz arasını kapsayan C frekans bandı, birçok özel uygulama için önemli bir role sahiptir. Örneğin, Orta Menzilli Hava Savunma Sistemleri gibi askeri sistemlerin erken uyarı radarları, bu frekans bandını kullanarak düşman hava taşıtlarını veya füzelerini tespit etmek ve savunma sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu frekans aralığı, yağış, bulut vb. meteorolojik oluşumlarla çok az etkileşime girer ve bu sayede daha uzak nesnelere ulaşma yeteneğine sahiptir. Ultra Geniş Bant Radarları adı verilen yeni teknoloji, A dan C ye kadar olan frekans bantlarında daha küçük darbe şiddeti ile sinyal yollar ve malzemelerin tetkik edilmesinde veya arkeolojik çalışmalarda Yer Radarı olarak kullanılırlar (Fishler ve ark., 2004).

D bandı (L bandı radarı)

D bant, 400 km alanı kapsayan uzun menzilli radarlar için üretilmiştir. Bu bantta sivil iletişim servislerinden kaynaklanan parazitlerin düşük olması, radara yüksek güçte geniş bantlı işaretler gönderme yeteneği sağlar. Bu geniş bantlı işaretler yer yüzeyinin kıvrımlarını kullanarak daha uzak menzillere ulaşmak için darbe içi modülasyon gibi

tekniklerle kullanılabilir. Ayrıca, radarın uzak hedefleri tespit etme yeteneği, radar ufkü ve yer yüzeyi kıvrımları gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle düşük uçuş yüksekliklerinde radarın ulaşabildiği menzül sınırlıdır. L denmesinin sebebi, uzun menzül anlamına gelen long ve büyük anten anlamına gelen large ifadelerinin ilk harfini çağrıştırmasından dolayıdır (Fishler ve ark., 2004).

E/F- bandı (S-bandı radarı)

2 - 4 GHz arasında çalışan E/F frekans bandında, atmosferik zayıflama tesiri D-bandından nispeten fazladır. Radarlar daha uzak mesafelere yayın yapabilmek için çok büyük bir gönderim gücü ihtiyacı duyarlar. Örnek olarak, askeri Orta Güç Radarı, 20 MW'a kadar darbe gücü gerektirebilir. Atmosferde yaşanan olayların önemli negatif etkileri bu frekans bandının bulunduğu aralıkta başlar. Aynı zamanda, yansıtma ve geçiş zayıflaması arasında bir denge kurmak gerektiği için, alt tropikal ve tropikal bölgelerde, özellikle ilk yağış radarlarında bu frekans bandı tercih edilir. S harfi, daha kısa menzilli anlamında kullanılan shorter ve daha küçük anlamına gelen smaller kelimelerinin ilk harfini çağrıştırmasından dolayı verilmiştir (Fishler ve ark., 2004).

G bandı (C bandı radarı)

Bu frekans bandı orta ve kısa meafeli mobil askeri savaş alanı radarlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu radarların anten bölümü, füzelerin yön güdümünü tespit edebilme esnasında hızlı tepki verebilmesi için küçük olarak tasarlanmıştır. Ayrıca atmosferik etkilerin fazla olmasından ötürü askeri amaçlar için kullanılan radarların antenleri tam dairesel geometride tasarlanmaktadır. Dairesel polarizasyon, radar sinyallerinin atmosferdeki yağış, bulut ve diğer hava koşullarından daha az etkilenmesini sağlar. Daha ılıman iklim özellikleri taşıyan bölgelerde kullanılan yağış radarlarının çoğu bu radarlardan oluşmaktadır. (Fishler ve ark., 2004).

I/J bandı (X ila Ku bandı arasındaki radar)

8 - 12 GHz aralığına sahip frekans bandında çalışan bu radarlarda, anten büyüklüğünün, dalga boyuna oranı diğer radarlara göre daha uygundur. Askeri uygulamalarda sıklıkla tercih edilen uçağa takılı radarlar gibi platformlar, daha minimal antenlerle daha yeterli açısız çözünürlük elde edilebilmektedir. I/J frekans bandı askeri ve sivil deniz üstü araçlarında bulunan yön güdüm radarlarında daha çok tercih edilmektedir. Sistem, daha net bir hassasiyetle yeterli uzaklıklarla ulaşmayı mümkün

kılan küçük, ucuz ve hızlı dönen antenlere sahiptir. İlaveten bu frekans bandı, yeryüzünün coğrafik olarak ölçülendirilmesinde, Yapay Açıklıklı Radarlarda ve askeri araştırmalarda kullanılmaktadır (Fishler ve ark., 2004).

K bandı (K ve Ka bandı radarı)

10,7 - 30 GHz arasındaki K bandında kullanılan radarlara örnek olarak Yüzey Havaalanı Yüzey Algılama Aygıtı veya Hareket Radarı ismiyle bilinen Havaalanı Yer Kontrol Radarı verilebilir. Çok kısa süreli (birkaç nano saniyeden daha kısa) darbe gönderimleri kullanarak, olağanüstü menzil çözünürlüklerine ulaşmak mümkündür, hatta önceki radarlar da imkansız olarak adlandırılan hava/yer araçlarının ve uçakların sınır çizgilerinin ayırt edilmesine dahi olanak sağlamaktadır (Fishler ve ark., 2004).

M bandı (W bandı)

M bant bölgesinde atmosferik zayıflama olarak değerlendirilebilecek iki hadise gözlemlenmektedir: 96 GHz civarında gerçekleşen minimum zayıflama ve 75 GHz'te gerçekleşen maksimum zayıflama meydana gelmektedir. Uygulamada bur frekanslarının ikisi de kullanılmaktadır. Laboratuvar teknik cihazlarında kullanılan 96 ila 98 GHz arasındaki frekanslar, çok daha yüksek frekanslarda çalışılmasına da öncülük etmiştir. 75 - 76 GHz arasında ki frekanslar, kara vasıtalarında otomatik kaza engelleme sensörü, kör nokta belirleme, aracı park etme ve frenlemede yardımcı olma gibi özelliklerde kullanılmaktadır (Fishler ve ark., 2004).

N bandı (THz Bölgesi)

Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal Radyo Bandı olarak adlandırılan ve 122 GHz bölgesinde çalışan bir başka bant aralığı bulunmaktadır. "THz Bölgesi" denilen ve en yüksek frekans teknolojisine sahip olan bu bölge, 100 GHz (0,1 THz) frekanstan başlamakta ve bu bölgedeki radar modülleri "Terahertz radar" olarak adlandırılmaktadırlar. THz bölgesindeki kullanım alanlarına, koruyucu kılıflar, gıdalarda bulunan yabancı maddelerin saptanması, vücut tarayıcıları, fabrikalarda bulunan üretim bandında bulunan paketlenmiş elemanların kalite kontrolü gibi uygulamalar örnek olarak verilebilir. THz bölgesi frekansları, vücut taramalarında derinin nem seviyesi nedeniyle vücuda birkaç milimetreden daha çok nüfuz edememesine rağmen, kuru ve iletken olmayan nesnelere kolayca nüfuz edebilmektedir. (Fishler ve ark., 2004).

3.1.2 Neden THz Radar Kullanılır?

Terahertz (THz) radarlar, Terahertz frekans bandında çalışan ve çeşitli uygulamalarda kullanılan radar sistemleridir. THz frekans bandı, milimetre dalgaları ve infrared arasında yer alır ve kısa dalga boyları nedeniyle yüksek çözünürlük sağlar. Bu özellik, THz radarların nesnelere daha detaylı bir şekilde görüntüleyebilmesini sağlar. Yüksek çözünürlüklü THz radarlar, özellikle güvenlik ve izleme uygulamalarında gizli nesnelere tespit etmek ve yüksek kaliteli görüntüler elde etmek için kullanılır (Deka ve ark., 2017).

THz frekans bandı, geniş bant genişliği sunar. Bu da daha fazla veri transferine ve daha yüksek hızlara olanak tanır. THz radarlar, yüksek hızlı haberleşme sistemlerinde kullanılarak büyük miktarlarda veriyi hızlı bir şekilde işleyebilme yeteneği sağlar (Wilcox ve ark., 1991). THz frekans bandı, elektromanyetik spektrumun bir bölümünde yer aldığından, çeşitli nesnelere içyapılarını tespit etmek için kullanılabilir. Özellikle organik maddeler, plastikler ve tekstiller gibi maddeler THz radyasyonu tarafından farklı şekillerde emilir veya yansıtılır. Bu özellik, güvenlik kontrollerinde ve havaalanlarında gizli nesnelere tespit edilmesinde THz radarların etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar. THz frekans bandı, yüksek bant genişliği sayesinde hızlı veri aktarımı için idealdir. Geleneksel radyo frekanslarına kıyasla çok daha yüksek veri hızlarına ulaşabilir. Bu özellik, kablosuz iletişim ve yüksek hızlı veri aktarımı gerektiren uygulamalar için THz radarlarının tercih edilmesini sağlar (Bhattacharyya ve ark., 2012). THz sinyali kullanılan yüksek çözünürlüklü görüntüleme radarları, hava savunma sistemleri, hava aracı çarpışma önleyici sistemleri, insan yapımı radara yakalanmayan silah sistemleri gibi sistemlerin teşhis edilmesinde büyük bir potansiyele sahiptirler (Cooper ve ark., 2011). Daha kısa dalga boyuna sahip THz sinyali daha geniş dalga boyuna sahip sinyale göre daha yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağladığı için daha kullanışlı durumdadır (Wu ve ark., 2012). Ayrıca optik radyasyonun toz, sis gibi heterojen malzemelerden yansımaya rağmen THz sinyaller bu tür malzemelerden yansımamaktadırlar (Akyıldız ve ark., 2012).

THz radyasyonu, farklı malzemelerin moleküler yapılarını analiz etmek için kullanılabilir. Özellikle ilaç endüstrisinde, gıda sektöründe ve malzeme biliminde THz radarlarının kullanımı önemlidir. Bu radarlar, ilaçların içyapılarını analiz etmek, gıdaların kalitesini kontrol etmek ve malzemelerin karakteristik özelliklerini belirlemek için kullanılabilir (Siegel ve ark., 2002).

Bunun yanında X-ışınlarına kıyasla daha az zarar vermesi; güvenlik sektöründe

görüntü elde edilmesinde daha yüksek başarı oranına sahip olması; yüksek frekanslardaki diğer sinyallere göre daha az elektromanyetik radyasyon yayması gibi sebeplerden ötürü THz sinyallere geçiş son zamanlarda hızlanmıştır. THz seviyesinde sinyal kullanılmasının amacı, THz sinyalinin yüksek nüfuz etme gücü; mükemmel uygulama güvenliği; yüksek SNR oranı ve düşük iletim kaybı gibi birçok kendine has özelliğinin olmasıdır. THz radarlar yüksek çözünürlük, geniş bant genişliği, gizli nesne tespiti, iletişim ve veri aktarımı, malzeme analizi gibi avantajlarıyla birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu teknoloji, güvenlik, haberleşme, izleme, tıp ve malzeme bilimi gibi birçok alanda çığır açmaktadır (Alaee, 2012). Hızla gelişen THz radar teknolojisi, gelecekte daha da ileriye giderek daha fazla yenilik ve uygulama fırsatları sunmaktadır.

Askeri alanda kullanılan araçların radarda görünürlüğü THz seviyesi radarlarda yukarıda bahsedilen sebeplerden ötürü daha nettir. Fakat gelen dünyada askeri teknolojide radarda görünmeden hareket etmek büyük önem kazanmıştır. Radarda görünmezlik gelen sinyalin soğurulması ya da kırılması ile mümkün olacaktır. Bu soğurma veya kırılma işlemi doğada bulunan doğal malzemelerle yapılamamaktadır. Bunun için laboratuvar ortamında tasarlanmış, dielektrik katsayısı değiştirilmiş, isteğe göre iletken veya yalıtkan özellik taşıyabilen malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelere meta malzeme denmektedir (Liu ve Zhang, 2011). Normal şartlarda THz seviyesinde çalışabilecek ürün üretmek zordur, zira bu seviyelerde THz dalgasına maruz kalan doğal olan malzemeler çok zayıf kalmaktadır. Bu sebeple meta malzemeler üretilmiş ve durumu tamamen değiştirmiştir (Zhang, 2017). THz seviyesinde güçlü bir soğurma elde edilebilecek malzemenin doğal olarak bulunamamasından dolayı son zamanlarda THz seviyesinde meta malzemeler ile ilgili çalışmaların sayısı çokça artmıştır.

Sonuç olarak yapılan bu tezde farklı bir patern tasarlanmış ve bu paterne ait maksimum soğurma değerlerinin hangi frekanslarda ve hangi şartlar altında alındığı üzerine çalışılmış, sonuçlar simülasyon programında elde edilmiş ve sunulmuştur. Öncelikle tek katman olarak bir tasarım elde edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Akabinde soğurma oranını daha artırmak için tasarım çift kat olarak denenmiş ve soğurma oranının maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Çift katlı tasarımda kullanılan malzemenin farklı kalınlık değerleri için farklı sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar tez çalışmasında sunulmuştur. En yüksek soğurmanın elde edildiği kalınlık değeri esas alındığında bu çalışmada %99,9'dan daha fazla bir soğurma elde edildiği gözlemlenmiştir. Çalışma da birincil amaç maksimum soğurma elde etmek olduğu için bant genişliği nispeten göz ardı edilmiştir.

3.2 Meta Malzeme

Meta malzeme, geleneksel malzemelerin doğal olarak sergileyemediği optik veya elektromanyetik özelliklere sahip olan yapay malzemelerdir. Meta malzemeler, nano ölçekte tekrarlanan yapılardan oluşurlar ve bu yapılar istenen optik veya elektromanyetik özellikleri sergilemek için özel olarak tasarlanır. Bu malzemeler, elektromanyetik dalgaları farklı şekillerde etkileyebilir ve yönlendirebilir (Smith ve ark., 2000). İlk olarak mikrodalga frekansında Landy ve arkadaşları tarafından kanıtlanmıştır. Meta malzemelerle koruyucu tasarlanmanın amacı gelen sinyal ya da dalganın arka tarafa geçmesinin engellenmesidir. Gelen dalga arka tarafa geçmediği sürece ne olduğu önemsizdir (Landy ve ark., 2008).

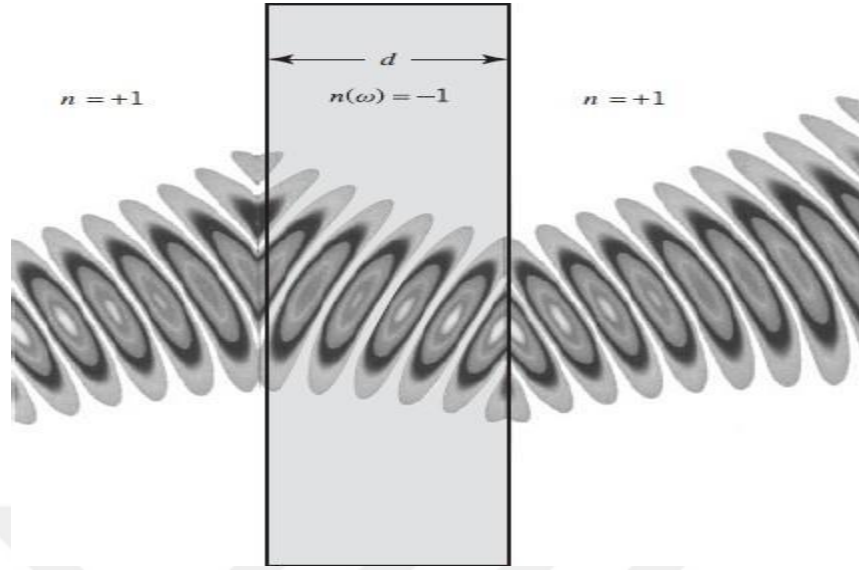
Meta malzemelerin tasarımında, elektromanyetik dalga boyutlarına kıyasla küçük yapılar kullanılır. Bu yapılar genellikle metal veya dielektrik malzemelerin düzenli olarak dizilmesiyle oluşturulur. Bu düzenli yapılar, elektromanyetik dalgaların istenen şekilde saçılmasını ve etkileşimini sağlar. Meta malzemeler, negatif kırılma indisi (Şekil 3.1), düşük dağılım kaybı veya farklı polarizasyonlara farklı tepkiler gibi tasarım gereği özel optik veya elektromanyetik özellikler sergileyebilir (Pendry ve ark., 2006).

Meta malzemelerin keşfi ve araştırılması 2000'li yılların başlarından itibaren hız kazanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar, çeşitli meta malzeme yapılarının oluşturulmasına ve farklı frekans aralıklarında çalışan malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır (Zhang ve ark., 2011).

Meta malzemelerin potansiyel uygulama alanları oldukça geniştir. Bunlar arasında mikrodalga ve optik frekanslarda kırınım kontrolü, gizlilik teknolojileri, süper mercekler, enerji toplama sistemleri, tıbbi görüntüleme sistemleri ve daha fazlası bulunmaktadır. Özellikle mikrodalga frekanslarında çalışan meta malzemeler, radyo frekansı algılayıcıları, antenler ve kablosuz iletişim teknolojileri için ilgi çekici bir seçenek olmuştur (Cui ve ark., 2014).

Schuring liderliğindeki bir ekip 10 Kasım 2006'da Duke Üniversitesinde mikrodalga frekans bandında çalışan ilk görünmezlik pelerinini yaptığını bildirmiştir. Mikrodalga görünmezlik, nesnelere radarlara karşı görünmez hale getirirken, insan gözüne karşı herhangi bir fayda sağlamamaktadır. Schuring'in ekibi küçük bir silindirik cisim meta malzeme örtü ile kaplayarak 8.5 Gigahertz (GHz)' lik mikrodalga frekansında görünmez hale getirmiştir. Ayrıca meta malzemedan üretilmiş olan bu görünmezlik örtüsünün dizaynı için kuramsal olan bir bilgisayar hesabını formüle etmiştir. Bilgisayar formüllerinin ve deney çıktılarının birbiriyle benzer olması, ileriki dönemlerde kusursuz

görünmezliğin elde edilebileceği umudunu oluşturmuştur. (Ziolkowski 2003).



Şekil 3.1. Negatif kırılma indisi (Ziolkowski, 2003)

Optik görünmezlik örtüsü üzerine, Igor Smolyaninov'un liderliğinde çalışan ekip Physical Review Letters adlı dergide 27 Mayıs 2009'da bir makale kaleme almıştır. Bu görünmezlik örtüsü nesnelere sadece radarlara karşı değil, aynı zamanda insan gözüne karşıda görünmezlik sağlamaktadır. Bu örtü, 0.05 mm çapındaki altın bir telin kesilip kullanılmasıyla yapılan ve milimetrik ölçülere sahip bir parçayı dahi görünmez hale getiren bir teknolojidir (Zayats, 2005).

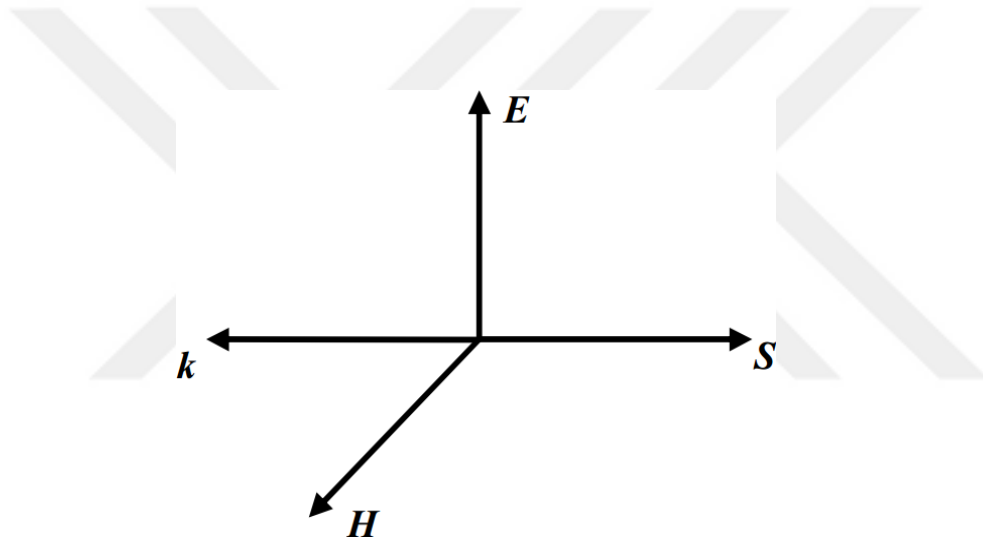
Meta malzeme soğurucu genel olarak üç veya daha fazla tabakadan meydana gelmektedir; toprakla temas eden metal tabaka, elektrik rezonatör ve dielektrik tabaka. Substratın iki tarafında bulunan ve birbirine paralel olmayan akımlar, dışsal manyetik tepkiyi oluştururken, elektrik alan da elektrik rezonatörleri harekete geçirir. Bu sayede, belirli frekans aralıklarında aynı anda güçlü bir şekilde elektrik ve manyetik tepki ile soğurma başlar (Huang ve ark., 2007).

3.2.1 Meta Malzemelerin Özellikleri

Meta malzemeler, elektromanyetik kabiliyetler dikkate alındığında doğal olarak bulunmayan ancak yapay olarak üretilebilen malzemelerdir. Meta malzeme nesnelere, μ -negatif (MNG) veya ϵ -negatif (ENG) özellikleri sayesinde mikrodalga alanında gerçekleştirilen uygulamalarda dikkatleri üzerine çekmektedir. MNG özelliklere sahip kesik halka rezonatör dizisi, ENG özelliklere sahip metal şerit dizisi, ve bu ikisinin

birleştirilmesiyle meydana gelen ENG/MNG özellikli malzemeler (left-handed metamaterial: LHM) bu yapılara verilebilecek en iyi örneklerdir. Meta malzemelerin tasarımında, esasen deneme-yanılma metodu tercih edilebilir. Bu metotta; tasarımın önem arz eden bütün değerlerine bağlı olarak belirli sayıda simülasyon gerçekleştirilir ve bu sonuçlara dayalı olarak optimum başarıyı verecek şekil belirlenmektedir. Ancak, kullanılan bu metottan farklı olarak, meta malzeme paternine bağımlı bir eşdeğer devre prototip kullanıldığında, tasarım daha hızlı ve daha sistemli hale gelmektedir (Tao ve ark., 2008).

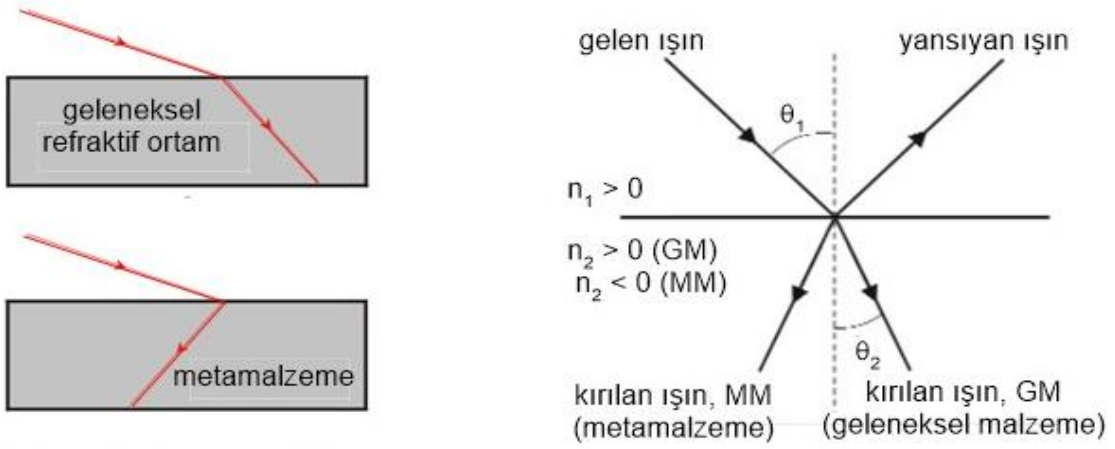
Şekil 3.2’de gösterilen negatif kırılma indeksli meta malzeme geometrisinde, E elektrik alanı, H manyetik alanı, k dalga vektörünü ve S ise Poynting güç vektörünü temsil etmektedir.



Şekil 3. 2. E , H ve S nin aynı düzlemde gösterimi (Huang ve ark., 2007)

Sağ-el kuralına sahip malzemelerde (right-handed materials) S ve k vektörleri aynı yönde hareket ederken, sol-elli kurallı malzemeler de (left-handed materials) bu vektörler zıt yönlü olarak görünmektedir. Bunun yanı sıra k vektörü ise faz hızı yönünde hareket etmektedir. Bu nedenle, sol-el kuralına göre çalışan yapılar negatif grup hızına haiz malzemeler olarak betimlenmektedir. Bu durum en net şekilde, frekansa bağlı değişimlerin olduğu yapılarda yada yöne bağımlı ortamlarda meydana gelmektedir.

Sol-el kuralına göre çalışan yapılarda enerji akış yönü ile faz hızı zıt yönlü olarak hareket eder. Doppler etkisi ve Vavilov-Cerenkov ışınımı bu tür yapılarda geleneksel basit yapılara göre zıttır. Ayrıca, bunların yanı sıra ayırt edici durumlardan biri de Şekil 3.3’te de gösterdiği gibi Snell yasasının Eşitlik 3.1 de gösterildiği gibi zıt olmasıdır.



Şekil 3. 3. Geleneksel malzeme ve meta malzemenin iki ortamın ara yüzündeki yansıma ve kırılmaları

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.1)$$

3.2.2 Meta Malzeme Soğurucu Nedir?

Meta malzemeler malzemelerin uygun dizaynıyla oluşur ve elektromanyetik etkileşimleri sonucunda alışılmadık özellikler göstermektedirler. İlk olarak mikrodalga frekanslarında Landy ve arkadaşları tarafından kanıtlanmıştır. Daha sonra görünür mikrodalga frekanslarında hassas olmayan soğurma polarizasyonu, geniş açılı soğurma, dual bant, geniş bant, çok bantlı soğurmayı başarmak için bu mükemmel meta malzeme soğurucu üzerinde çok sayıda deney yapılmıştır (Kong, 2012). Meta malzeme soğurucu, elektromanyetik dalgaları belirli bir frekans aralığında yüksek oranda soğurabilen yapay malzemelerdir. Bu malzemeler, istenen frekans aralığında elektromanyetik enerjiyi soğurarak etkin bir şekilde soğururlar.

Meta malzeme soğurucular, genellikle nano veya mikro ölçekte tekrarlanan yapılarla oluşturulurlar. Bu yapılar, elektromanyetik dalgaların soğurulmasını sağlayacak şekilde tasarlanır. Meta malzemelerin yapısı, elektromanyetik dalga boyutlarına göre optimize edilir ve istenen frekans aralığında yüksek soğurma verimliliği sağlanır (Shen ve ark., 2016).

Meta malzeme soğurucuların uygulama alanları oldukça geniştir. Elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve elektromanyetik girişim (EMI) kontrolünde kullanılabilirler. Kablosuz iletişim sistemlerinde, antenlerde, mikrodalga fırınlarda, güneş enerjisi panellerinde ve termal radyasyon kontrolünde kullanım potansiyelleri vardır (Pandey ve

ark., 2018).

Meta malzeme soğurucu genel olarak üç veya daha fazla tabakadan meydana gelmektedir; toprakla temas eden metal tabaka, elektrik rezonatör ve dielektrik tabaka. Substratın iki tarafında bulunan ve birbirine paralel olmayan akımlar, dışsal manyetik tepkiyi oluştururken, elektrik alan da elektrik rezonatörleri harekete geçirir. Bu sayede, belirli frekans aralıklarında aynı anda güçlü bir şekilde elektrik ve manyetik tepki ile soğurma başlar. Yani bakış açısına göre farklı dielektrik özelliği gösteren meta malzeme sinyalin geldiği yönde yalıtkan özellik gösterip gelen sinyali yalıtır. Yalıtılan sinyal alt tabakadaki iletken çarpıp geri döner ama sinyalin geri dönüş yönü meta malzemenin farklı dielektrik sabitinden ötürü iletken olduğu yüzeye çarpar. Böylece sinyal iki iletken yüzey arasına girip bir daha çıkamamaktadır yani soğurulmaktadır. Empedans uyuşması etkin alan kuramında serbest uzay için nedeysen kusursuzdur. Ayrıca dielektrik tabakaların ve metalin elektromanyetik belirginlikleri, dielektrik tabakanın kalınlığı ve malzemenin tasarımı meta malzeme soğurucunun soğurma özelliklerini ve frekans kalibrasyonunun mümkün olduğunu göstermektedir (Kong, 2012).

3.2.3 Meta Malzeme Sınıflandırma

Meta malzemeler sınıflandırılırken, ϵ (geçirgenlik), μ (permeability) parametreleri referans olarak sınıflandırılırlar. ENG, DPS, DNG ve MNG olmak üzere sınıflandırma 4 ana bölüme ayrılır. ENG (epsilon negative): Negatif elektrik geçirgenlik (ϵ) ve pozitif manyetik geçirgenlik (μ) birleştirildiğinde oluşur. DPS (double positive): Pozitif ϵ ve pozitif μ birleştirildiğinde oluşur. DNG (double negative): Negatif ϵ ve negatif μ birleşirse oluşur. MNG (mu negative): Pozitif ϵ ve negatif μ birleşirse oluşur (Landy ve ark., 2008).

ENG (epsilon negative):

Negatif ϵ ve pozitif μ birleştirildiğinde oluşur. Optik frekanslardaki metallerdir. Azalan dalga özelliği gösterirler ve tüm plazmalar bu özelliktedir.

DPS (double positive):

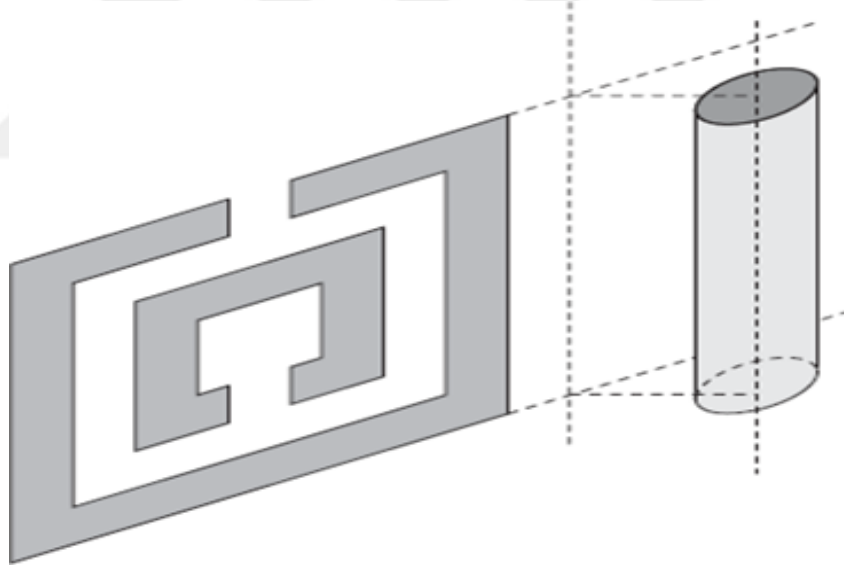
Pozitif ϵ ve pozitif μ birleştirildiğinde oluşur. İzotropik, dielektrik malzemelerin sağ el kuralı ile pozitif dalga yayılmasıdır. Faz geciktirme özelliği vardır. Su, cam şişe ve plastikler gibi dielektrikler başlıca örnekleridir (Landy ve ark., 2008).

DNG (double negative):

Negatif ϵ ve negatif μ birleştirildiğinde oluşur. Doğada bulunmazlar ve yansıyan dalga özelliği gösterirler. Aslında doğada bulunmayan ama yapay olarak elde edilebilirliği olan malzemelerdir. Elektromanyetik mühendislerinin dikkatini en çok çeken malzemelerdir. Aynı zamanda negatif kırılma indisli olarak da bilinirler (Landy ve ark., 2008).

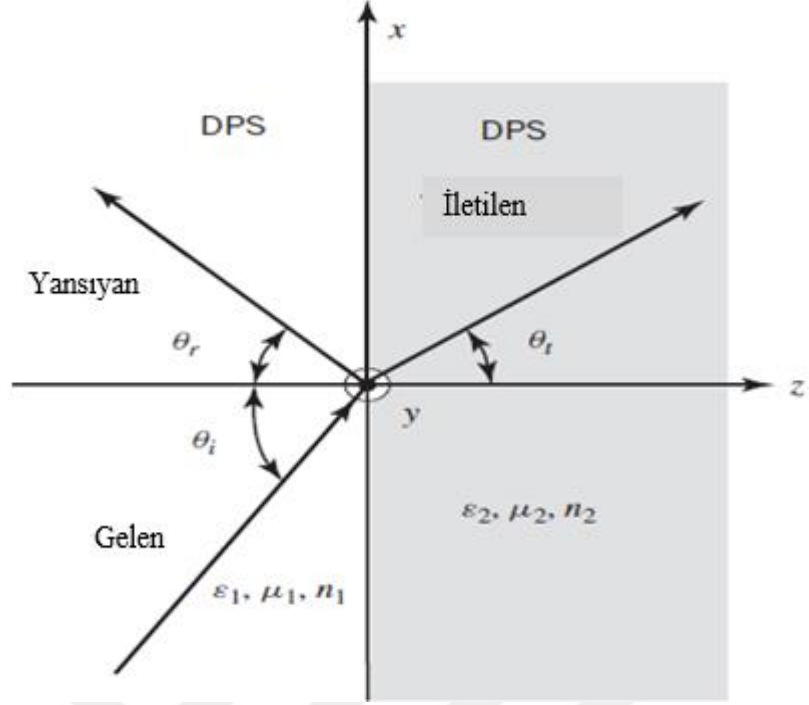
MNG (mu negative):

Pozitif ϵ ve negatif μ birleştirildiğinde oluşur. Manyetik özelliği ve azalan dalga özelliği gösterirler. Bu malzemelerin ele alma sebebi; Lenslerin, mikrodalga devrelerin, iletim hatlarının, güç bölücü devrelerin, ileriye ve geriye dönük sızıntı dalgalı antenlerin, elektrikli küçük zilli antenlerin, gizleme sistemlerinin, plazmonik nano tellerin ve ışık kristallerinin performanslarını yükseltmek için ele alınmıştır. Şekil 3.4'te DNG malzemenin simülasyon örneği gösterilmiştir (Dehkoda ve ark., 2012).

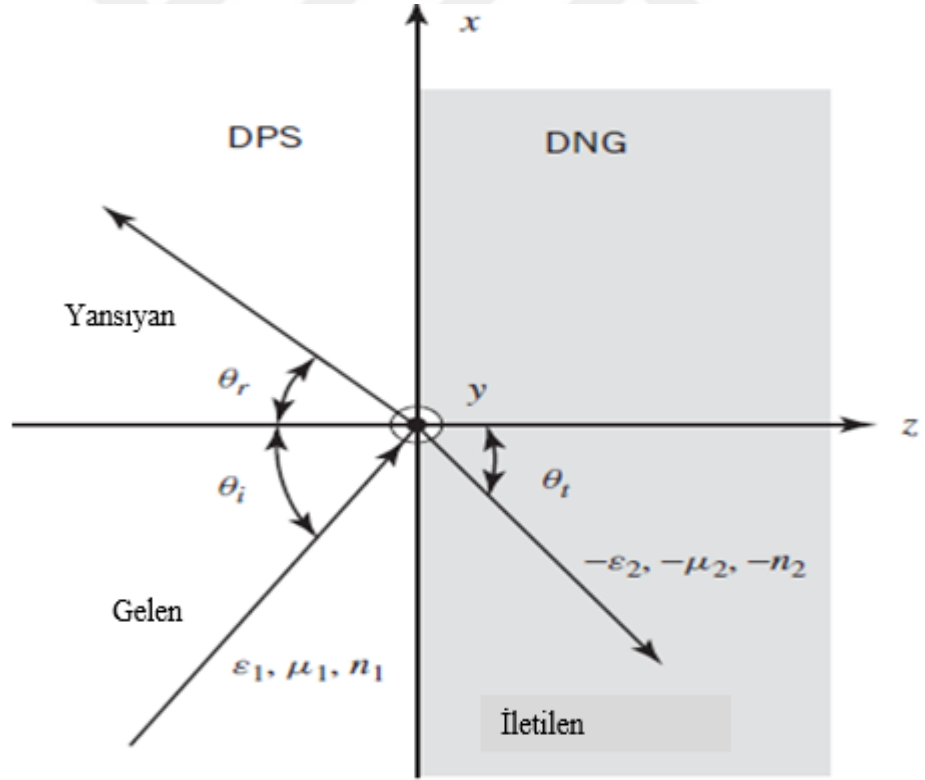


Şekil 3. 4. Kabloalarda ve açık levha rezonatörlerde kullanılan negatif kırılmalı DNG malzemenin simülasyon örneği (Dehkoda ve ark., 2012)

Şekil 3.5'te DPS-DPS kırılması ve Şekil 3.6'da DPS-DNG kırılması gösterilmiştir. Bu Şekillerdeki farklar farklı manyetik özellikler sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 3. 5. DPS-DPS kırılması (Dehkhoda ve ark., 2012)



Şekil 3. 6. DPS-DNG kırılması (Dehkhoda ve ark., 2012)

3.3 Ekranlama

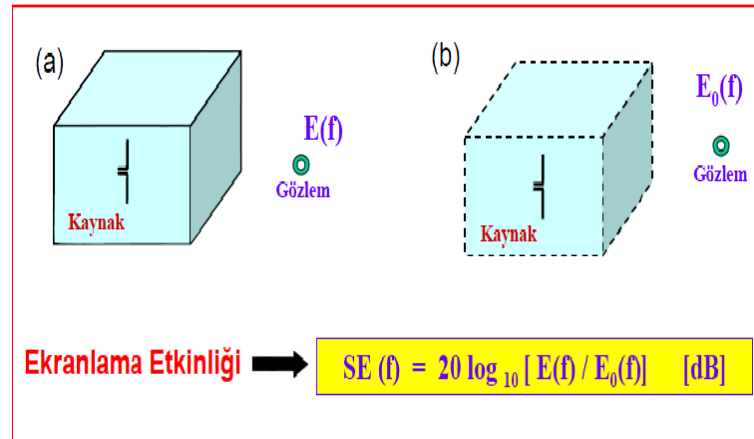
Elektronik kart, devre veya malzeme seviyesinde iki ortamı birbirinden

elektromanyetik olarak izole etmek ekranlama olarak adlandırılmaktadır. Ekranlamanın etkili olma derecesi, ekranlanacak kaynağın türüne bağlıdır. EMC (Elektromanyetik) problemlerinden bahsedilirken, iki tip girişim kaynağı önemlidir; elektrik dipolü özellikleri taşıyan kaynaklar ve manyetik dipol özellikleri taşıyan kaynaklar. İçerisinden akım geçen iletken teller elektrik dipol gibi, halka şekline sahip parçalar ise manyetik dipol özellik taşırlar. Elektrik dipolünün bulunduğu ortamlarda kuvvetli bir elektrik alan, manyetik dipolünün bulunduğu ortamlarda ise kuvvetli bir manyetik alan meydana gelir. Birbirinden uzak ortamlarda ise bu iki kaynağın etkileri bakımından herhangi bir farklılık bulunmamaktadır (Zheludev, 2010). Bu durumda;

- Elektrik (E) dipol özelliği taşıyan etkileşim kaynağı civarlarında elektriksel ekranlama

- Manyetik (H) dipol özelliği taşıyan etkileşim kaynağı civarlarında manyetik ekranlama oluşmaktadır.

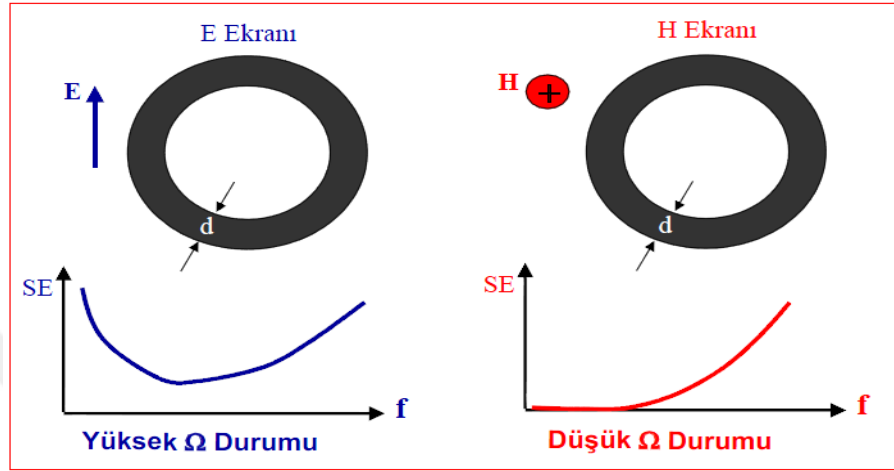
Ekranlamanın genel geçer bir parametresi olarak ekranlama etkinliği (SE, Shielding effectiveness) kullanılmaktadır. SE, Şekil 3.7’de belirtildiği gibi, kaynak ile diğer kaynak arasında herhangi bir ekran yok iken elde edilen elektrik alan ölçüsünün ekran varken meydana gelen elektrik alan ölçüsüne desibel (dB) cinden oranı olarak tanımlanmaktadır. SE değerinin büyük olması ekranlama etkinliğinin iyi olduğu anlamına gelmektedir (Uysal ve ark, 2018).



Şekil 3. 7. Ekranlama etkinliğinin tanımı (Akyıldız ve ark., 2012)

Ekranlama başarısı bakımından bu iki kaynağın mukayese edilmesi Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Şekilde aynı ve kalınlığı d olan iki metal küre bulunmaktadır. Kürelerden birinin bulunduğu bölgede kuvvetli elektrik alan oluşturan elektrik dipol mevcut iken diğerinin bulunduğu bölgede ise kuvvetli manyetik alan meydana getiren bir

manyetik dipol bulunmaktadır. Ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi her iki küre için de şekilde belirtilmiştir. Metal kürede meydana gelen ekranlama etkinliği elektrik dipol benzeri yapılar için alçak frekanslarda kuvvetli olurken, manyetik dipol benzeri yapılar için ekranlama etkinliği hemen hemen ortadan kalkmaktadır. Yüksek frekanslarda çalışıldığı durumlarda ise her iki yapı için de ekranlama etkinliği kuvvetlenmektedir.



Şekil 3. 8. Elektrik ve manyetik dipoller için ekranlama etkinliğinin frekansla değişimi (Akyıldız ve ark., 2012).

3.3.1 Ekranlamada Dikkat Edilmesi Gerekenler

Elektromanyetik ekranlama konusunda dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda belirtilmiştir:

Ekranlama Malzemesi Seçimi: Elektromanyetik ekranlama için kullanılan malzeme seçimi çok önemlidir. Genellikle metalik malzemeler, özellikle bakır ve alüminyum gibi yüksek iletkenlik özelliklerine sahip olanlar tercih edilir. Ekranlama malzemesi, elektromanyetik alanları absorbe edebilen ve yansıtabilen bir yapıda olmalıdır.

Ekranlama Tasarımı: Elektromanyetik ekranlama tasarımı, elektromanyetik alanların en iyi şekilde saptanması ve korunmasını sağlamalıdır. Ekranlama malzemesi, elektronik cihaz veya sistem üzerine tamamen kapalı bir şekilde uygulanmalıdır. Ekranlama tasarımında dikkat edilmesi gereken faktörler arasında ekranlama malzemesinin kalınlığı, şekli ve montaj yöntemi bulunur.

Ekranlama Bütünlüğü: Elektromanyetik ekranlama için kullanılan malzemenin bütünlüğü çok önemlidir. Ekranlama malzemesinin birleşim noktaları ve ek yerlerinde oluşabilecek açıklıklar elektromanyetik alanların içeri girmesine veya dışarı çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle, ekranlama malzemesi üzerindeki tüm birleşim noktalarının ve

ek yerlerinin dikkatlice kapatılması veya bağlantılandırılması gerekmektedir.

Kablolama ve Bağlantılar: Elektromanyetik ekranlama için kullanılan kablolama ve bağlantılar da önemlidir. Elektrik ve veri sinyallerinin iletilmesi sırasında ekranlama bütünlük sağlanmalıdır. Ekranlamalı kablolar, yeterli koruma sağlamak için kullanılmalı ve doğru şekilde bağlantılandırılmalıdır. Bağlantı noktaları ve konnektörlerdeki ekranlama bütünlüğü dikkate alınmalı ve düzgün bir şekilde topraklanmalıdır.

Frekans Uyumu: Elektromanyetik ekranlama tasarımı, korunması gereken elektromanyetik alan frekansına uygun olmalıdır. Farklı frekanslarda çalışan elektromanyetik alanlar farklı ekranlama gereksinimleri sunabilir. Bu nedenle, elektromanyetik ekranlama tasarımı, korunması gereken frekans aralığını dikkate almalı ve buna uygun şekilde optimize edilmelidir (Duff, 2001).

3.3.2 Elektromanyetik Ekranlama Özelliğine Sahip Malzemeler

Ekranlama için kullanılmak istenen yapılar yüksek manyetik geçirgenliğe ve iyi elektrik iletkenliğine haiz olmalıdır (manyetik enerjiyi ısıya çevirmek için). Yüksek frekans aralığında kuvvetli elektrik iletkenliğine haiz olan cisimler (>300 MHz) elektromanyetik ekran haline dönüşebilmektedirler. Esasen, elektrik bileşeni E ve manyetik bileşeni H'yi aynı oranda indirgeyebilen malzemeler iyi iletken olarak adlandırılırlar. Manyetik bileşen H'nin indirgenmesi 30 MHz'den düşük frekanslarda pek mümkün olmamakla birlikte, indirgeme ferro-manyetik malzemelerle yapılabilmektedir. Bundan dolayı elektriksel ekranlama sebebiyle kusursuz iletken sınırlayıcılar tasarlanırken, manyetik ekranlama da ferro- manyetik malzeme özelliğine sahip filtreler kullanılmaktadır. Bazı durumlarda sadece elektrik bileşeni E'nin indirgenmesi kafidir. (Zheludev, 2010).

3.3.3 Ekranlama Performansını Azaltan Etmenler

Elektromanyetik ekranlama, elektromanyetik alanları belli bir alandan uzak tutarak dışarıdan gelen girişimlerin veya dışarıya yayılan radyasyonun etkisini azaltmayı amaçlar. Ancak, elektromanyetik ekranlama özelliğini azaltan bazı etmenler bulunmaktadır. Elektromanyetik ekranlama özelliğini azaltan etmenlerden bazıları şunlardır:

Ekranlama Malzemesi Kalitesi: Ekranlama malzemesinin kalitesi, elektromanyetik ekranlama performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Düşük kaliteli veya yetersiz ekranlama malzemeleri, elektromanyetik alan geçirgenliği yüksek olabilir ve

dışarıdan gelen radyasyonu veya girişimleri içeriye geçirme eğiliminde olabilir (Hertleer ve ark., 2012).

Ekranlama Malzemesi Yapısı: Ekranlama malzemesinin yapısı, etkili bir elektromanyetik ekranlama sağlamak için önemlidir. Malzemenin yapısında bulunan boşluklar, çatlaklar, hava kabarcıkları gibi unsurlar, elektromanyetik alan geçişini kolaylaştırabilir ve ekranlama etkinliğini azaltabilir (Hertleer ve ark., 2012).

Elektriksel Bağlantılar: Elektromanyetik ekranlama sağlamak için ekranlama malzemesi, elektriksel olarak iyi bir şekilde bağlanmalıdır. Eksik veya zayıf bağlantılar, ekranlama malzemesinin bütünlüğünü bozabilir ve elektromanyetik alanların geçişini kolaylaştırabilir (Hertleer ve ark., 2012).

Ekranlama Kusurları: Ekranlama yapılarında meydana gelen kusurlar, ekranlama etkinliğini azaltabilir. Örneğin, ekranlama malzemesinin kesilmesi, çatlaklar, delikler veya kaynak hataları gibi faktörler, elektromanyetik alanların geçişine izin verebilir.

Frekans Bağımlılığı: Elektromanyetik ekranlama performansı, kullanılan frekans aralığına bağlı olarak değişebilir. Bazı ekranlama malzemeleri belirli frekans aralıklarında daha iyi performans gösterirken, diğer frekanslarda daha az etkili olabilir.

Yönlendirilmiş Radyasyon: Elektromanyetik radyasyonun belirli bir yönde yoğunlaşması veya odaklanması, ekranlama malzemesinin etkinliğini azaltabilir. Yoğunlaşmış veya odaklanmış radyasyon, ekranlama malzemesinin zayıf noktalarını geçebilir ve ekranlama etkinliğini azaltabilir (Vignesh ve ark., 2019).

Bu etmenler, elektromanyetik ekranlamanın performansını etkileyebilir ve istenmeyen elektromanyetik etkileşimlerin meydana gelmesine yol açabilir. Bu nedenle, etkili bir elektromanyetik ekranlama sağlamak için kaliteli malzemelerin kullanılması, uygun yapısal tasarımın yapılması ve elektriksel bağlantıların doğru şekilde kurulması önemlidir (Vignesh ve ark., 2019).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

İlk olarak benzer konularda yapılan çalışmaların literatür taraması yapılmıştır. Yaklaşık olarak yapılmak istenen çalışmanın frekansına karar verdikten sonra simülasyon işlemlerine geçilmiştir. Simülasyon işlemi tasarlanan meta malzeme yüzeyi gerçekleştirilmeden önce modelleme yaparak tasarımın soğurma performansını test etme imkânı doğurmuştur. Simülasyonlar için CST (Computer Simulation Technology) simülasyon programı kullanılarak istenilen frekansta soğurma işlemi yapabilecek elektromanyetik dalga soğurucu yüzey tasarımı yapılmıştır.

4.1. Computer Simulation Technology (CST)

Computer Simulation Technology (CST), elektromanyetik alanların simülasyonu ve analizi için kullanılan bir yazılım paketidir. CST, mikrodalga, RF, optik ve parçacık ışınımları gibi farklı frekans aralıklarında elektromanyetik davranışların modellenmesi için kullanılan bir araçtır (www.3ds.com).

CST yazılım paketi, kullanıcılarına elektromanyetik alanların yayılması, dağılması, yansımaları ve soğurulması gibi çeşitli fiziksel olayları simüle etme imkânı sunar. Bunun yanı sıra, anten tasarımı, RF devre analizi, elektromanyetik uyumluluk (EMC) değerlendirmeleri, elektriksel ve manyetik alan analizleri gibi uygulama alanlarında kullanılabilir. CST programının faydaları arasında;

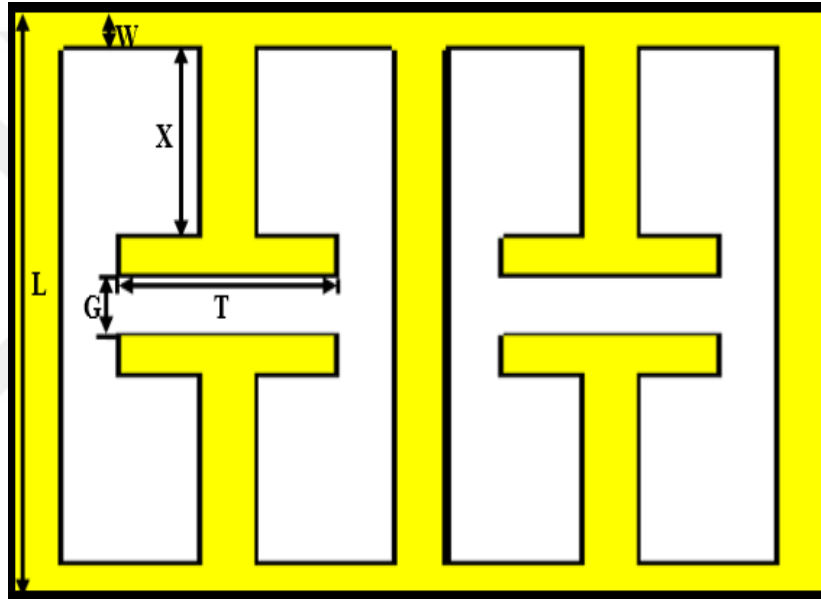
- Anten, ışık darbeleri ve PCB gibi makro bir uygulama alanlarını simüle etmek için değişik çözüm önerileri sunan sistemler içerisinde seçim yapılmasını mümkün kılması,
- Çağımızın zorlu elektromanyetik ihtiyaçları için anten çalışma başarısını değerlendirme ve en yüksek faydayı sağlama olanağı sunması,
- Mekanik ambalajlamada Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) etkilerini değerlendirme olanağı sunması, gibi özellikler sayılabilir (www.3ds.com/products).

4.2. Ekran Tasarımı

Çalışmanın başlangıcında, meta malzemenin özelliklerine yönelik bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu çalışmada, literatürde yer alan farklı tasarımlardan meta malzemenin farklı frekanslara nasıl tepki verdiği etüt edilmiştir. Çalışma kapsamında, meta malzemenin geometrik yapısı oluşturulmuş ve CST simülasyon programı

kullanılarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Meta malzeme kullanılarak elektromanyetik dalga soğurucu ekran oluşturulmuştur. Çalışmada, farklı katmanlarda ve farklı kalınlıklarda tasarlanan meta malzeme, çeşitli frekans değerlerine (1-3 THz) maruz bırakılarak, tasarlanan malzemenin nasıl sonuçlar vereceği simülasyonlarla incelenmiştir.

Bilindiği kadarıyla, daha önce literatürde hiç bir çalışmada kullanılmayan bir meta malzeme geometrisi tasarımı gerçekleştirilerek soğurma oranının maksimuma ulaşması sağlanmıştır. Elde edilen tasarım Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Öncelikle tek katmanlı ardından çift katlı olarak tasarlanan meta malzemeye ait S11 (soğurma) ve S21 (iletim) parametreleri şekillerle gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. THz seviyesinde çalışan meta malzeme soğurucu geometrisi

Tasarım 3 kısımdan oluşmaktadır. En üst tabakada Şekil +.1’de gösterilen patern kullanılmış olup bakırdan oluşmaktadır. L uzunluğu, W genişliği, G şeritler arası boşluğu, X orta şeridin dikey uzunluğunu, T orta şeridin yatay uzunluğunu, FR4 kullanılan substrat malzemeyi ve bakır ise en alt tabakayı ifade etmektedir ve parametreler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1. Tasarıma ait parametre bilgileri

Parametre	L	X	T	G	W	FR4	Bakır
Uzunluk	15 μm	6 μm	4,15 μm	3,7 μm ,	2,1 μm	30,1 μm	30,1 μm
Kalınlık	0,33 μm	0,33 μm	0,33 μm	0,33 μm	0,33 μm	1,6-1,9 μm	0,33 μm

En üst tabakada bulunan bakır paterne ait değer bilgiler ise Tablo 4.2’de sunulmuştur.

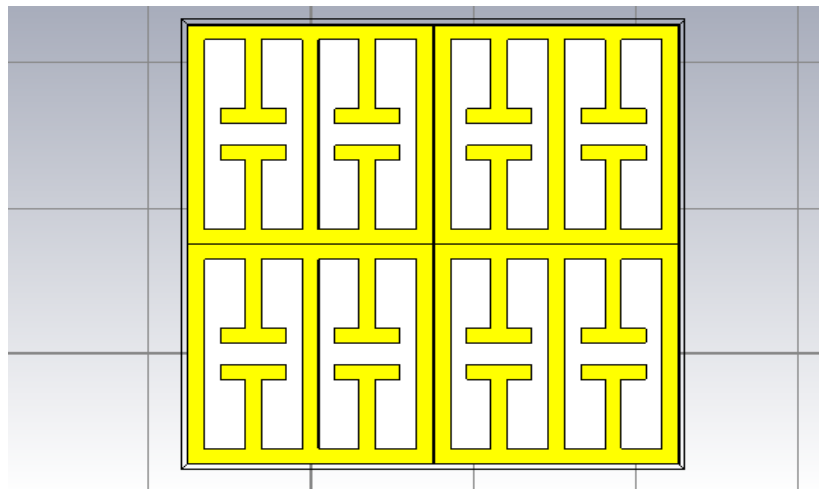
Tablo 4. 2. Paterne ait ölçüsel bilgiler

Madde Cinsi	Elektriksel İletkenlik	ρ Değeri	Termal İletkenlik	Kalınlık
Bakır	5,8e+07 S/m	8930 kg/m ³	401 W/K/m	0,33 μ m

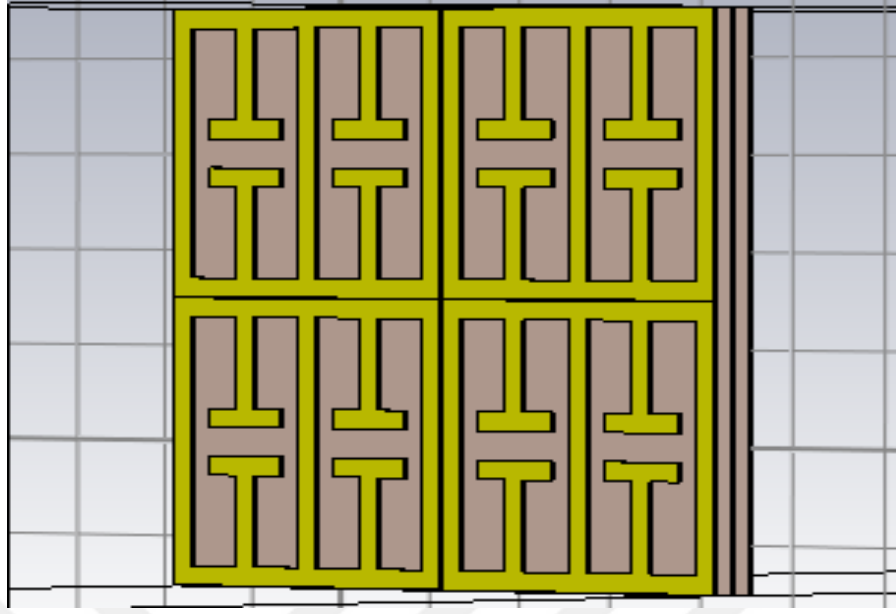
Çalışmada, orta katmanda dielektrik bir tabaka olarak FR4 kullanılmıştır. FR4, cam elyaf takviyeli epoksi laminat (Glass Epoxy) malzemeden yapılan bir levhadır. FR4, elektronik devrelerde yaygın olarak kullanılan bir yalıtkan malzemedir. Bu malzeme, yüksek mukavemet, termal direnç, düşük dielektrik kaybı ve elektriksel yalıtım özellikleri sunar. FR4 levhalar, cam elyaf kumaşlarının epoksi reçine ile emprenye edilmesi ve ısı ve basınç altında sıkıştırılmasıyla üretilir. Bu işlem, levhalara mekanik dayanıklılık ve düşük dielektrik kaybı sağlar. FR4, genellikle çok katmanlı devre kartlarının (PCB) yapımında kullanılır. FR4 malzemesi, elektronik endüstrisinde popülerdir çünkü iyi bir elektriksel yalıtım sağlar, yüksek frekanslı sinyallerin iletimine uygunluğu vardır ve termal direnci yüksektir. Ayrıca, FR4 levhalar kolayca şekillendirilebilir, delinip kesilebilir ve devre kartı yapımı için uygun bir yüzey sunar (Uysal ve ark., 2019).

Alt tabakada ise topraklama amacıyla bakır kullanılmıştır ve kalınlığı 0,33 μ m olarak belirlenmiştir. Bakır tabakanın kenar ölçüleri 30,1x30,1 μ m olarak tasarlanmıştır.

Elde edilen tasarım yana ve alta eklenerek tek katlı meta malzeme soğurucu tasarımının tek katlı nihai hali elde edilmiş ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca çift katlı tasarım ise Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. THz seviyesinde çalışan meta malzeme soğurucu tek katlı elektromanyetik ekran tasarımı



Şekil 4. 2. Çift katlı meta malzeme soğurucunun 3 boyutlu gösterimi

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan deneme simülasyonları sonucunda, FR4 kalınlığı 1,75 µm olan tek katmanlı bir meta malzeme soğurucunun en yüksek soğurma değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.2'de gösterilen tek katmanlı meta malzeme soğurucu tasarımı kullanılmıştır. Program çalıştırılarak, iletim ve yansıma parametreleri incelenmiş ve soğurma başarısının etkisi test edilmiştir. Şekil 5.1'de, yansıma parametresi olan S11'in büyüklüğü, Şekil 5.2'de ise iletim parametresi olan S21'in büyüklüğü görülmektedir. Soğurma Denklem (5.1)'de verilen formüle göre hesaplanmaktadır (Pan ve ark., 2021).

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = |S11|^2 - |S21|^2 \quad (5.1)$$

Burada;

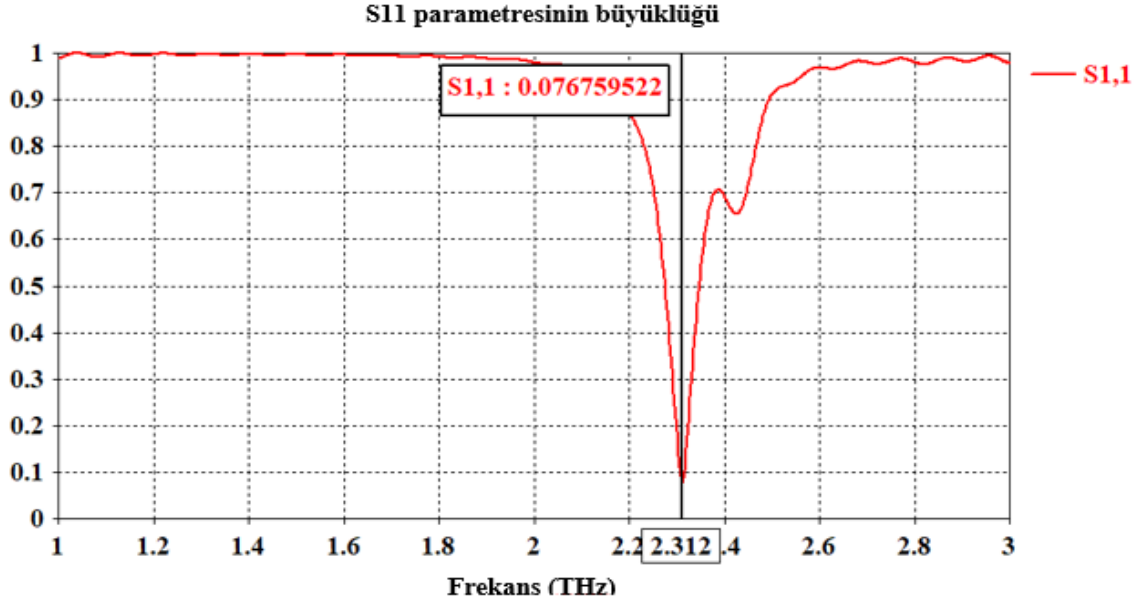
A(ω): soğurma

R(ω): yansıma

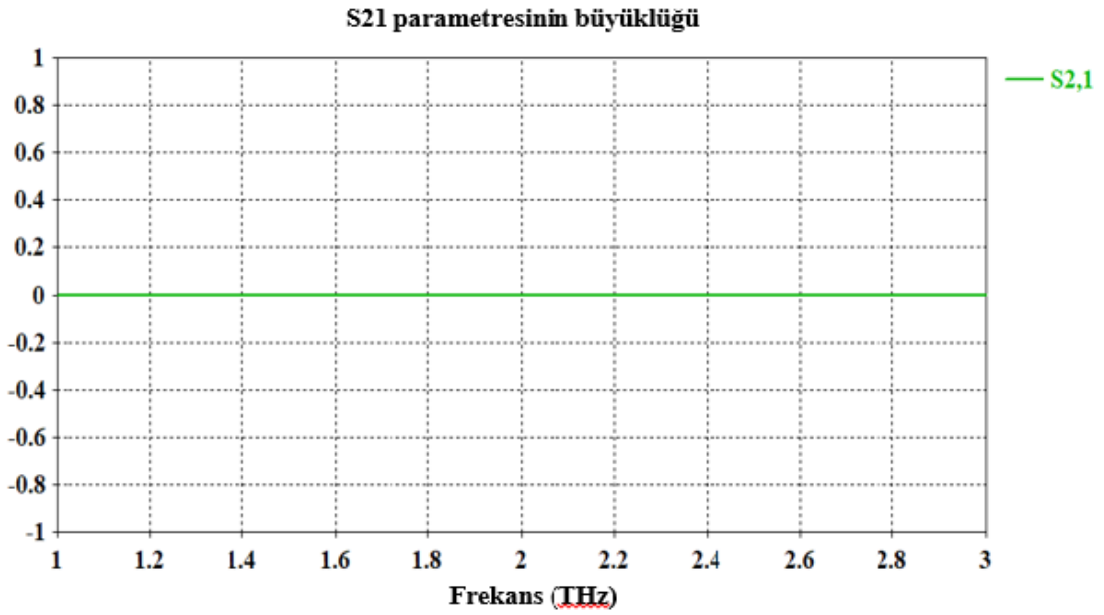
T(ω): iletim katsayılarıdır.

Meta malzemenin alt tabanının tamamen bakır ile kaplı olduğu ve gelen dalgaların normal açıyla geldiği varsayıldığında, iletilen bir dalga olmadığı için, soğurma formülü basitçe $1-|S11|^2$ şeklinde hesaplanabilir. Formül kullanılarak tek katmanlı meta malzeme için 2,31 THz frekansında yaklaşık 0,994, yani % 99,4 oranında bir soğurma elde edilmiştir.

Tasarım sonuçlarından elde edilen grafik (Şekil 5.1) incelendiğinde, 2,2 THz 'in altında ve 2,5 THz 'in üstündeki frekanslarda minimum seviyelerde (< %10) soğurma gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, 2,23 THz ile 2,46 THz bant aralığında soğurma oranının %40'ın üzerine çıktığı ve 2,28-2,35 THz aralığında ise %80 seviyelerinin üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Soğurma miktarı 2,31 THz 'de maksimum değerine ulaşarak %99,4 oranında en yüksek değerde soğurma oranı olarak gerçekleşmiştir. %80 seviyesinin üzerinde gerçekleşen soğurma oranı baz alındığında, yaklaşık 70 GHz bant genişliğine sahip etkili bir soğurma bandının elde edildiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5. 1. Tek katlı meta malzemeye ait S11 parametresinin büyüklüğü

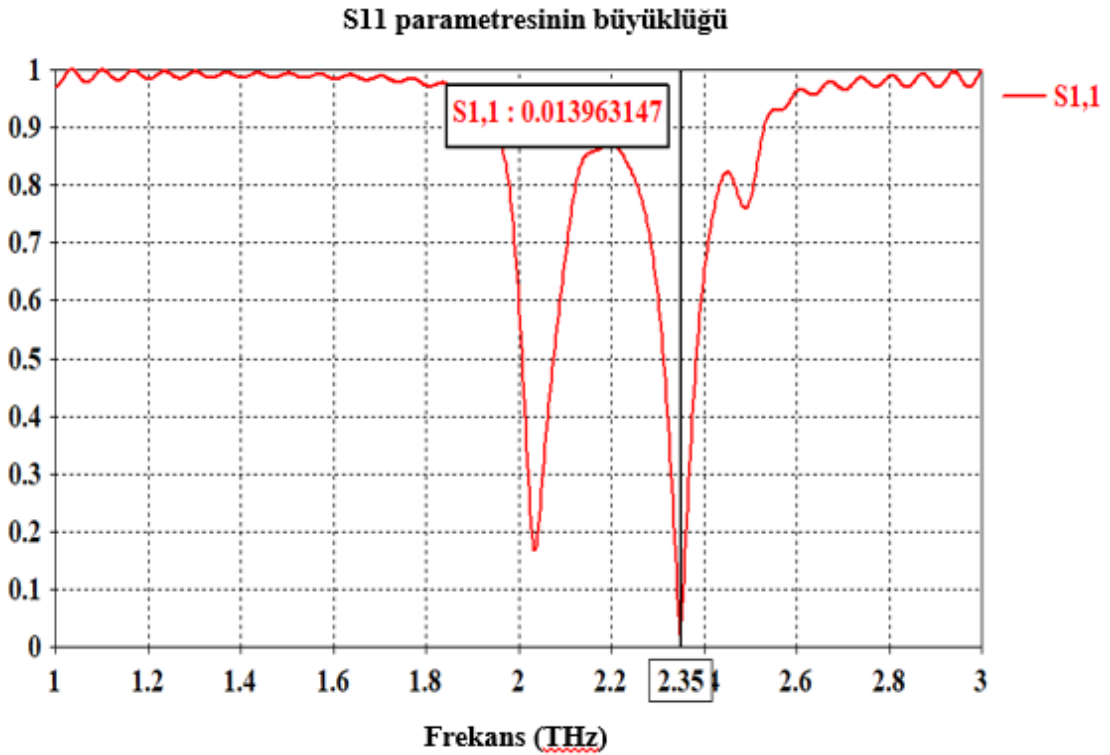


Şekil 5. 2. Tek katlı meta malzemeye ait S21 parametresinin büyüklüğü

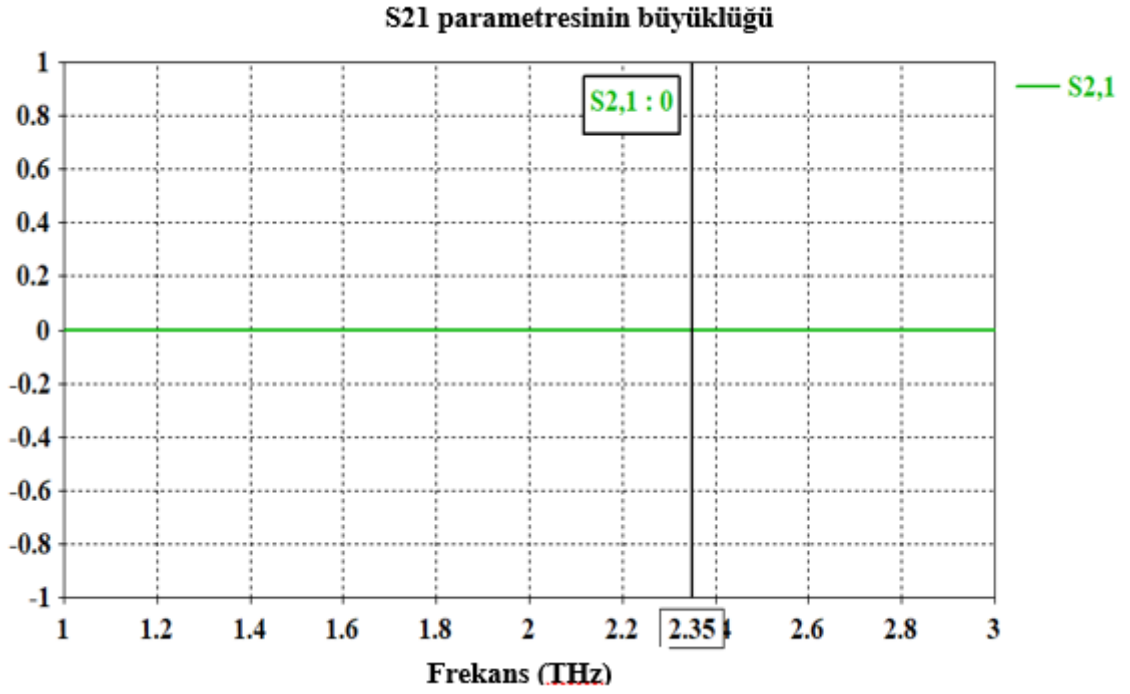
Tek katlı ekran tasarımı çift kat yapılarak çift katlı meta malzeme soğurucu elde edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre en yüksek soğurmanın çift katmanlı yapıda elde edildiği gözlemlenmiştir. Çift katmanlı soğurucunun nihai tasarımı Şekil 5.3'te verilmiştir. En yüksek soğurmanın elde edildiği 1,75 μm kalınlığa ait S11 parametresinin büyüklüğü Şekil 5.3'de, S21 parametresinin büyüklüğü ise Şekil 5.4 'de gösterilmektedir. Yansıma ve soğurma değerleri de Şekil 5.5 'de verilmektedir. Şekil 5.3 'ten de görüleceği üzere, çift katmanlı yapıda gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre soğurma oranı artarak 2,35 THz seviyelerinde maksimum olan 0,9998 değerine, yani

%99,98'e yükselmiştir.

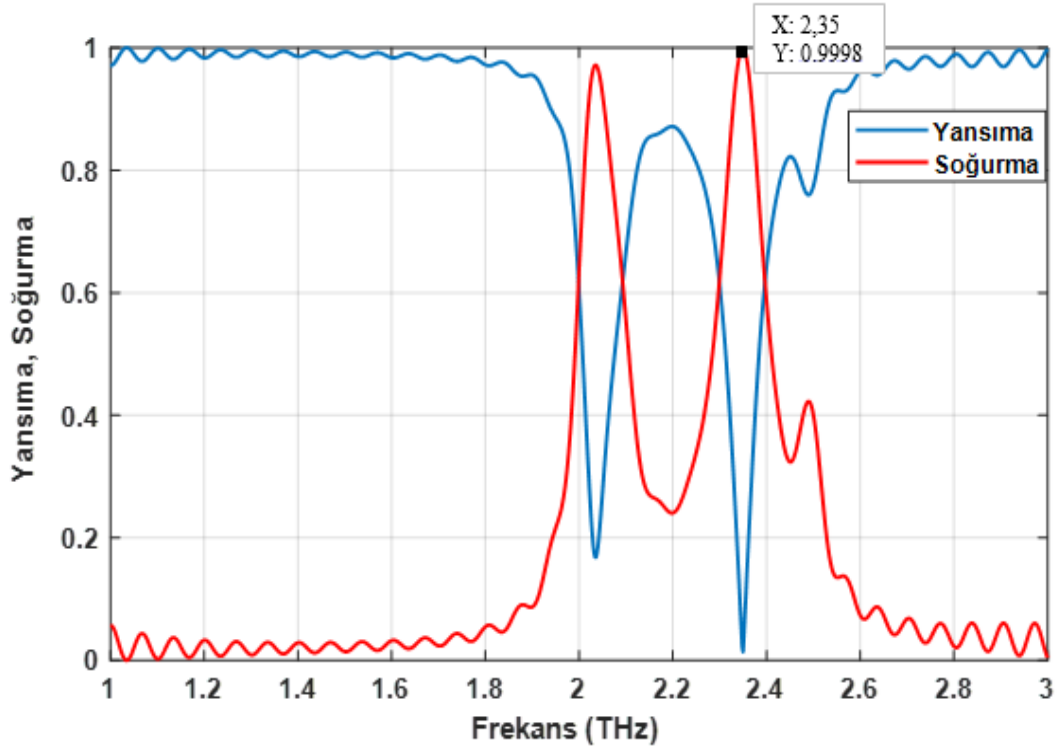
Şekil 5.3 ve Şekil 5.5'te çift katlı ve FR4 kalınlığı 1,75 µm olan meta malzeme soğurucu tasarımında 1,8 THz'e kadar herhangi bir soğurma gözlenmemiştir. Ancak, 1,8 THz'den sonra soğurma artmaya başlamış ve 2,6 THz'e kadar devam etmiştir. Grafikten, 1,9-2,5 THz arasında yayın yapan bir THz radara karşı yaklaşık %30 oranında bir soğurma elde edileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, 2,01-2,08 THz ve 2,31-2,38 THz frekans aralıklarında %80'nin üzerinde bir soğurma gerçekleşeceği görülmektedir. Özellikle 2,03 THz'de %97,2 ve 2,35 THz'de %99,98 olmak üzere iki maksimum soğurma noktası belirlenmiştir. Şekil 5.5'te MATLAB programında tasarıma ait yansıma ve soğurma grafikleri gösterilmiştir. Soğurma değerinin %80 ve üzerinde olduğu başarılı sayılabilecek bir frekans bandı dikkate alındığında, soğurma bant genişliği yaklaşık 70 GHz olarak hesaplanmaktadır. Bu noktada, soğurucunun çift katlı olarak tasarlanmasının iki yerel maksimuma sahip soğurmaya sebebiyet verdiği çıkarımı yapılabilir. Daha çok katmanlı tasarım bu çalışmamızda henüz test edilmemiş olmakla birlikte, çok katlı ekran tasarımının, çift katlı tasarımda olduğu üzere, yerel maksimum soğurmalar oluşturarak etkili soğurma bant genişliğini arttırabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5. 3. Çift katlı meta malzeme soğurucunun S11 parametresinin büyüklüğü



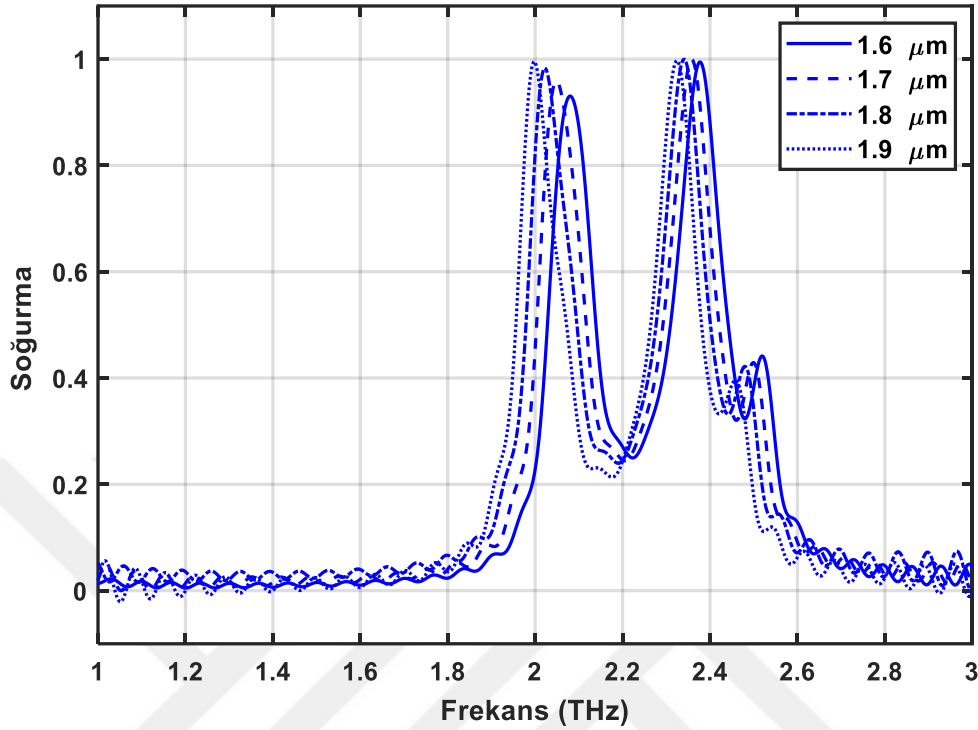
Şekil 5. 4. Çift katlı meta malzeme soğurucunun S21 parametresinin büyüklüğü



Şekil 5. 5. FR4 kalınlığı 1.75 μm olan çift katlı meta malzeme soğurucuya ait yansıma ve soğurma grafiklerinin MATLAB programında gösterimi

Orta tabakada bulunan FR4 substratın kalınlığı değiştirilerek farklı kalınlıklarda elde edilebilecek soğurma miktarları test edilmiştir. Farklı kalınlık değerleri için

gerçekleştirilen simülasyonlarda, soğurma grafiği Şekil 5.6'da ve elde edilen maksimum soğurma oranları ve frekansları ise Tablo 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 6. Çift katlı meta malzeme soğurucunun farklı FR4 kalınlıklarına ait soğurma grafikleri

Tablo 5. 1. Substrat kalınlığına bağlı olarak elde edilen maksimum soğurma oranları ve frekans değerleri

Kalınlık	1,6 µm	1,7 µm	1,75 µm	1,8 µm	1,9 µm
Çift kat Soğurma Oranı	%99,46	%99,91	%99,98	99,96	%99,70
Frekans Değeri	2,28 THz	2,31 THz	2,35 THz	2,34 THz	2,32 THz

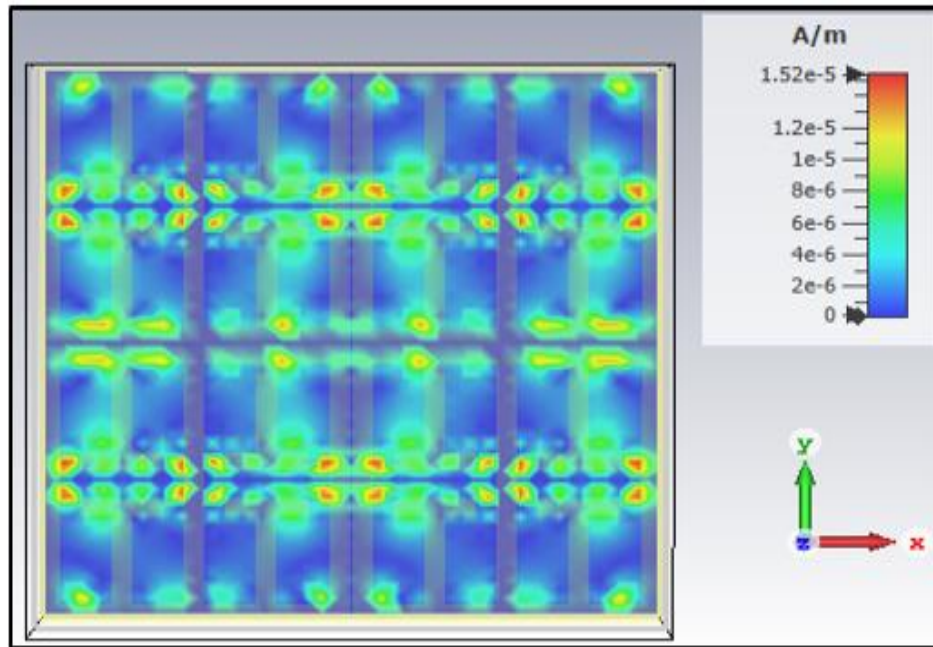
Şekil 5.6 ve Tablo 5.1'den de anlaşılacağı üzere bu tasarım özelinde, substratın kalınlığı belli bir seviyeye kadar arttıkça soğurma oranında artış olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum soğurma oranı, FR4 substratın 1,75 µm kalınlığına sahip olduğu durumda elde edilmektedir. Ancak, kalınlık daha da artırıldığında soğurma oranı tekrar azalmaktadır. Bu çalışmada sunulan değerler maksimum soğurma oranının elde edildiği 1,75 µm kalınlığındaki duruma göre sunulmuştur.

Bunun yanı sıra, tasarımda soğurmanın daha yüksek oranda gerçekleştiği değer aralığı yaklaşık 2 THz frekanslarında gerçekleştiğinden, 2 THz değerinde Transverse electromagnetic (TEM) modunda yüzey akım dağılım grafiği Şekil 5.7'de, elektrik alan dağılım grafiği ise Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Transverse Electromagnetic (TEM): Elektromanyetik dalgaların bir iletim hattında

yayıldığı bir moddur. TEM modu, elektromanyetik dalganın hem elektriksel bileşeni (E vektörü) hem de manyetik bileşeni (H vektörü) yayılma yönüne dik olduğu bir durumu ifade eder. TEM modu genellikle koaksiyel kablolar, mikroşerit hatları ve paralel plakalar gibi simetrik yapılarla ilişkilidir. Bu mod, dalga yayılmasında herhangi bir yönelim kısıtlaması olmaksızın genel olarak iletim hatlarındaki en yaygın kullanılan moddur. TEM modunda, elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine dışsal bir bağımlılık olmaksızın ortogondur. TEM modu, elektromanyetik dalgaların sadece iletim hattının içinde ilerlediği ve yayılma yönünde herhangi bir değişikliğe uğramadan ilerlediği bir moddur. Bu mod, elektromanyetik dalga iletiminin istikrarlı ve dengeli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. TEM modu, iletim hattı tasarımı, sinyal iletimi, parazitlerin azaltılması ve elektromanyetik uyumluluk gibi uygulamalarda önemlidir (Pozar, 2011).

Yüzey akımı dağılımı: Bir iletkenin yüzeyinde akımın nasıl dağıldığını ifade eder. Elektrik akımı, iletken malzemelerde yüzey boyunca hareket eder ve yüzey akımı olarak adlandırılır. Yüzey akımı, akımın yüzeyin belirli bölgelerinde yoğunlaştığı veya dağıldığı bir şekilde olabilir. Özellikle yüksek frekanslı elektrik akımları veya alternatif akımlar durumunda, yüzey etkisi ve yüzey akımı dağılımı önemli hale gelmektedir (Jiang ve ark., 2021).



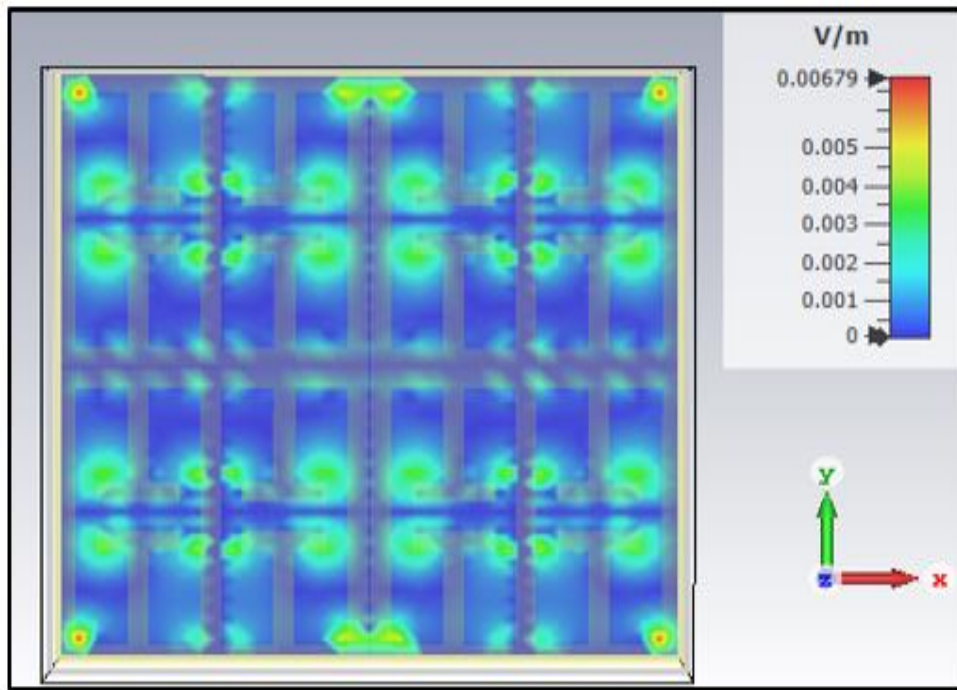
Şekil 5. 7. TEM modunda 2 THz değeri için yüzey akım dağılım grafiği

Tasarımın yüzey akım dağılımını incelendiğinde (Şekil 4.7), genellikle oluşturulan desenin orta kısmında yoğunlaşan bir akım gözlemlenir. Bu akım, enerjinin büyük bir

kısmını tüketir ve soğurma sürecinin gerçekleştiği bölgede önemli bir rol oynar. Bu durum, elektrik rezonansının ortaya çıkmasına ve yüksek oranda soğurma elde edilmesine yol açar.

Çift katlı yapının her iki katmanının da soğurma katsayısını artırdığı gözlemlenmiştir. İki katman arasındaki etkileşim ve yapılan tasarım değişiklikleri, enerjinin daha etkili bir şekilde soğurulmasını sağlar. Bu sayede daha yüksek bir soğurma oranı elde edilir.

Elektrik alan dağılımının incelenmesi (Şekil 4.8), soğurma durumunu netleştirmek için önemli bir adımdır. Elektrik alan dağılımı; bir elektriksel sistem veya cihazın çevresinde elektrik alanının nasıl dağıldığını ifade eder. Elektrik alan, elektrik yüklerinin varlığından kaynaklanan bir fiziksel alan türüdür. Elektrik yükleri, pozitif veya negatif yükler olarak düşünülebilir ve bu yükler elektrik alan oluştururlar. (Fan ve ark., 2020). Elektrik alan dağılımı, elektrik güvenliği, elektromanyetik uyumluluk ve elektriksel sistemlerin performansı açısından önemlidir. Özellikle elektriksel sistemlerde yüksek elektrik alanlar, insanların veya elektronik cihazların zarar görmesine veya hatalı çalışmasına neden olabilir. Bu nedenle, elektrik alan dağılımı analiz edilerek, olası riskler belirlenir ve gerekli önlemler alınır (Fan ve ark., 2020).



Şekil 5. 8. TEM modunda 2 THz değeri için elektrik alan dağılım grafiği

Şekil 5.8 incelendiğinde, elektrik alanın genellikle orta kısımda yoğunlaştığı ve dağıldığı görülmüştür. Bu durum, orta kısmın gelen elektromanyetik dalgaları sürekli olarak yansıttığını ve enerjisi tükettiğini göstermektedir. Bu yansıtma ve dağılma süreci, soğurma mekanizmasının ortaya çıkmasına katkıda bulunur. Elektrik alanın yoğunlaştığı orta kısım, genellikle bir elektrik rezonans bölgesi olarak kabul edilir. Bu rezonans bölgesi, gelen dalgaları yakalar ve enerjisi soğurur. Bu sayede soğurma meydana gelir ve enerji kaybedilir. Elektrik alanın dağılımı, tasarımın etkinliği ve soğurma özelliklerinin anlaşılması açısından önemlidir. Bu gözlem ve analizler, çift katmanlı tasarımlarda soğurmanın artmasına katkıda bulunur ve malzeme performansının iyileştirilmesine yardımcı olur.

Gelişen teknoloji ve askeri ihtiyaçlar doğrultusunda genel bir değerlendirme yapıldığında, askeri erken ihbar radarlarının GHz seviyelerinden THz seviyelerine geçiş yapması düşünülmektedir. Bu geçişin amacı, daha net görüntü elde etmek ve daha etkili bir şekilde hedefleri tespit etmektir. Ancak, bu gelişmeyle birlikte radarlara karşı önlem almak da önem kazanmaktadır.

Bu çalışma, daha etkin soğurucu malzemelerin üretilmesiyle radarlara karşı görünmezliği sağlamayı amaçlamaktadır. Askeri alanda düşmanı erken tespit etmek hayati önem taşırken, aynı şekilde düşman tarafından tespit edilmeden operasyon icra etme yeteneği de bu denli kritik ve önemlidir. Bu nedenle, daha fazla soğurma sağlayan malzemelerin tasarımı ve üretimi büyük bir önem arz etmektedir.

Bu tasarımın radarlara karşı görünmezlik sağlamada veya radarda algılanmayı minimize edecek potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir. Tasarlanan bu soğurucu malzeme sayesinde, çift katmanlı ekran tasarımında 2,35 THz 'de maksimum %99,98 oranında soğurma sağlanmıştır. Bu da radarın hedeflediği nesnelere (örneğin savaş uçakları, denizaltılar, gemiler) bu soğurucu malzeme ile kaplanması durumunda, radarın gönderdiği sinyalin %99,98 'inin absorbe edileceği ve neredeyse radarda görünmez olacağı anlamına gelmektedir. Radarların çalışma prensibi gereği, gönderilen sinyalin bir nesneye çarpıp geri dönmesiyle nesnenin tespit edilmesi mümkün olur. Ancak bu tasarımla, gelen radar sinyali %99,98 oranında absorbe edildiğinden, radar tarafından yansıyan kayda değer bir sinyal oluşmaz. Sonuç olarak, radar sistemi, varlığına rağmen herhangi bir nesne tespiti yapamaz. Bu tasarımın, askeri alanda gizlilik ve güvenlik açısından önemli bir adım olabileceği ve gelecekteki radar teknolojilerinde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma maksimum soğurma elde etmeyi önceliğinden, etkin bant genişliği

ikinci planda tutulmuştur. Ancak, çalışmayı ileri aşamaya taşımak isteyenler için tasarımın bant genişliğini artırmak amacıyla paternde şekilsel değişikliklerin denenmesi mümkündür. Bu şekilsel değişiklikler, malzemenin geometrisinde veya yapısal özelliklerinde yapılabilir. Bant genişliğini artırmak, tasarımın daha geniş bir frekans aralığında etkili olmasını sağlar. Bu durumda, maksimum soğurma seviyesi belki daha düşük olabilir, ancak tasarımın daha geniş bir frekans aralığında etkili olması önemli bir avantaj sağlayabilir. Özellikle bazı durumlarda, daha düşük seviyelerde soğurma sağlansa da daha geniş bir bantta çalışma aralığı elde edilmesi tercih edilebilir. Bu nedenle, ileriye yönelik çalışmalarda, tasarımın bant genişliğini artırmak için şekilsel değişiklikler yapılabilir. Bu değişiklikler malzeme yapıları, katman sayısı, geometri parametreleri veya başka özellikler üzerinde odaklanılarak yapılabilir. Bu şekilde, tasarımın bant genişliği artırılarak daha geniş bir frekans aralığında etkili olması hedeflenebilir. Ancak, bant genişliğini artırmanın maksimum soğurma seviyesini etkileyebileceği de unutulmamalıdır. Bu nedenle, tasarım hedeflerine ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, maksimum soğurma veya bant genişliği tercih edilebilirlik açısından değerlendirilmelidir.

Ayrıca çalışmada maliyet etkinliği dikkate alınarak bakır kullanılmıştır. Bakır, genellikle elektrik iletkenliği yüksek olan ve yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu nedenle bakırın tercih edilmesi maliyet açısından avantajlı bir durumdur. Ancak, bazı çalışmalarda altın gibi daha yüksek iletkenlik özelliklerine sahip malzemelerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Altın, bakıra göre daha yüksek bir elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu nedenle, altın kullanılması durumunda aynı tasarımla daha iyi sonuçlar elde etmek mümkün olabilecektir. Altın gibi yüksek iletkenlik özelliklerine sahip malzemelerin kullanılması, genellikle daha düşük kayıplar ve daha etkili bir elektriksel performans sağlayabilir. Ancak, altının maliyeti bakıra göre daha yüksek olduğu için maliyet etkinliği açısından tercih edilebilirliği tartışılabilir.

Gerçekleştirilen bu tasarımın, literatürde yer alan diğer tasarımlarla kıyaslandığında, daha basit bir geometriye sahip olduğu ve dolayısıyla fiziksel olarak gerçekleştirilmesi bakımından daha kolay ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu da tasarımın diğer bir avantajı olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., & Han, C. (2014). Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Physical communication*, 12, 16-32.
- Alaee, R., Menzel, C., Rockstuhl, C., & Lederer, F. (2012). Perfect absorbers on curved surfaces and their potential applications. *Optics express*, 20(16), 18370-18376.
- Aniołczyk, H., Koprowska, J., Mamrot, P., & Lichawska, J. (2004). Application of electrically conductive textiles as electromagnetic shields in physiotherapy. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, (4 (48)), 47-50.
- Avloni, Dr. Henn, Lau., Development and applications of nanotechnology. *Eeonyx.Corp; Pinole.CA94564 USA*, 2006.
- Bhattacharyya, K., & Sarma, K. K. (2012). Automatic target recognition (atr) system using recurrent neural network (rnn) for pulse radar. *International Journal of Computer Applications*, 50(23).
- Calderbank, R., Howard, S. D., & Moran, B. (2009). Waveform diversity in radar signal processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(1), 32-41.
- Cheng, Y., Zou, H., Yang, J., Mao, X., & Gong, R. (2018). Dual and broadband terahertz metamaterial absorber based on a compact resonator structure. *Optical Materials Express*, 8(10), 3104-3114.
- Cheng, Y., Nie, Y., & Gong, R. (2013). A polarization-insensitive and omnidirectional broadband terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-squares films. *Optics & Laser Technology*, 48, 415-421.
- Cooper, K. B., Dengler, R. J., Llombart, N., Thomas, B., Chattopadhyay, G., & Siegel, P. H. (2011). THz imaging radar for standoff personnel screening. *IEEE Transactions on terahertz science and technology*, 1(1), 169-182.
- Cui, Smith, D. R., Liu, R., & T. J. (Eds.). (2010). *Metamaterials: theory, design, and applications*. Springer US.
- Deka, R, Bhattacharyya, K., & Baruah, S. (2017). Automatic RADAR target recognition system at THz frequency band. A review. *ADBU Journal of Engineering Technology*, 6(3).
- Dehkhoda, P., Tavakoli, A., & Azadifar, M. (2012). Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(4), 792-805.
- Duff, "Electromagnetic shielding and corrosion protection for aerospace vehicles" *CRC Press*, 2001.
- Fishler, E., Haimovich, A., Blum, R., Chizhik, D., Cimini, L., & Valenzuela, R. (2004,

- April). MIMO radar: An idea whose time has come. *In Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference (IEEE Cat. No. 04CH37509)* (pp. 71-78). IEEE.
- Fan, Li, Liu, Song, (2020). Perfect dual-band metamaterial absorber based on coaxial resonator. *Journal of physics. Conference Series*, 1565(1), 012027.
- Hertleer I, Rogier W, Ginste, D. (2012) Electromagnetic shielding efficiency of periodic metallic structures. *Journal of Applied Physics*, 111(2), 024903.
- Huang, Y., Feng, Y., & Jiang, T. (2007). Electromagnetic cloaking by layered structure of homogeneous isotropic materials. *Optics express*, 15(18), 11133-11141.
- Hyodo, K. (2021). Comparison of magnetic response between dielectric metamaterials and ferromagnetic materials, toward application to microwave absorbers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 60(4), 040901.
- ICAO (2001) Doc 4444 ATM/501, *Procedures for Air Navigation Services Air Traffic Management Fourteenth Edition*.
- Jiang X, Pan H, Zhao Y, Zhang W, (2021.) Design and simulation of metamaterial absorber for terahertz frequencies. in *terahertz and mid infrared radiation: generation, detection and applications*. Woodhead Publishing. pp. 73-98.
- K Bi,., Zhu, W., Lei, M., & Zhou, J. (2015). Magnetically tunable wideband microwave filter using ferrite-based metamaterials. *Applied Physics Letters*, 106(17).
- Kong, H., Li, G., Jin, Z., Ma, G., Zhang, Z., & Zhang, C. (2012). Polarization-independent metamaterial absorber for terahertz frequency. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 33, 649-656.
- Landy, N. I., Bingham, C. M., Tyler, T., Jokerst, N., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2009). Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging. *Physical review B*, 79(12), 125104.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), 207402.
- Lee, H.E. and Lee H.M. (2011, July). Metamaterial absorbers at THz signals. *Kyonggi University*, San 94-6, Korea.
- Li, Y., Wang, X., & Zhang, Y. (2022). Dual-function Dynamically Tunable Metamaterial Absorber and Its Sensing Application in the Terahertz Region. *Current Optics and Photonics*, 6(3), 252-259.
- Liu, Y., & Zhang, X. (2011). Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chemical Society Reviews*, 40(5), 2494-2507.
- Pandey P., Gupta W, Jain K., (2018). Metamaterial absorbers for electromagnetic wave absorption: *Fundamentals and applications*, *Journal of Applied Physics*, 124(10), 103102.

- Pan, H., Zhang, H., Tian, X., & Zhang, D. (2021). Broadband terahertz absorber with gradient ring resonators based on a discrete spiral topological distribution. *JOSA B*, 38(3), 850-857.
- Paul, C. R., Scully, R. C., & Steffka, M. A. (2022). Introduction to electromagnetic compatibility. *John Wiley & Sons*.
- Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(5781), 1780-1782.
- Pozar, D. M. (2011). Microwave engineering. *John wiley & sons*.
- Pushkar, P., & Gupta, V. R. (2016). A metamaterial based tri-band antenna for W i MAX/WLAN application. *Microwave and optical technology letters*, 58(3), 558-561.
- Savo, S., Shrekenhamer, D., & Padilla, W. J. (2014). Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications. *Advanced optical materials*, 2(3), 275-279.
- Shen S., Cui W., Zhao X. (2016). Metamaterial electromagnetic absorbers, *Advanced Materials*, 28(48), 10764-10782.
- Siegel, P. H. (2002). Terahertz technology. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 50(3), 910-928.
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters*, 84(18), 4184.
- Uysal G., Dede A., Erol F. (2019). FR4 and PTFE material based microwave circuits, *International Journal of Electrical and Computer Engineering Research*, 11(3), 257-267.
- Veselago V. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10, 509-514.
- Vignesh A., Manikandan F., Ramakrishnan R. (2019). Analysis of electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanotube/polymer nanocomposites, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(1), 416-420.
- Wikipedia, Metamalzeme, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Metamalzeme> [Ziyaret tarihi: 10 Temmuz 2023]
- Wilcox, C. H. (1991). The synthesis problem for radar ambiguity functions. *Institute for Mathematics and Its Applications*, 32, 229.
- Wu, Y., Xu, Z., & Li, J. (2012). Terahertz Radar Signal for Heart and Breath Rate detection based on time-frequency analysis. In Communications, Signal Processing, and Systems: *The 2012 Proceedings of the International Conference*

on Communications, Signal Processing, and Systems (pp. 523-530). Springer New York.

Zayats, A. V., Smolyaninov, I. I., & Maradudin, A. A. (2005). Nano-optics of surface plasmon polaritons. *Physics reports*, 408(3-4), 131-314.

Zhang Z., Liu X. (2011). Recent advances in transformation optics. *metamaterials*, 5(1), 128-139.

Zhang Z, J. F., Ding, Z., Hu, Z., Wang, S., Cheng, Y., Liu, M., & Wang, S. (2017). Metamaterial-based high-efficiency wireless power transfer system at 13.56 MHz for low power applications. *Progress In Electromagnetics Research B*, 72, 17-30.

Zheludev, N. I. (2010). The road ahead for metamaterials. *Science*, 328(5978), 582-583.

Ziolkowski, R. W., & Kipple, A. D. (2003). Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(10), 2626-2640.