



**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAOTİK FRAKTAL YAPILAR KULLANILARAK
TASARLANAN METAMALZEMELERİN SİNYAL EMİCİ
VE SENSÖR UYGULAMALARINDAKİ BAŞARIMI**

SAİT ÜNAL

DOKTORA TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Sertol KÖKSAL

AĞUSTOS – 2024

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAOTİK FRAKTAL YAPILAR KULLANILARAK
TASARLANAN METAMALZEMELERİN SİNYAL EMİCİ
VE SENSÖR UYGULAMALARINDAKİ BAŞARIMI

SAİT ÜNAL

DOKTORA TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Sertol KÖKSAL

AĞUSTOS – 2024

YOZGAT

	YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU
---	---

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı 70111817001 numaralı öğrencisi Sait ÜNAL'nın hazırladığı “**Kaotik Fraktal Yapılar Kullanılarak Tasarlanan Metamalzemelerin Sinyal Emici ve Sensör Uygulamalarındaki Başarımı**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 20/08/2024 Salı günü saat 14:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan :

Jüri Üyesi :

(Danışman)

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Prof. Dr. Ümit BUDAK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğini beyan ederim.

Sait Ünal

20/08/2024

ÖN SÖZ

Doktora çalışmam boyunca devamlı olarak bana yol gösterip kıymetli desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, çok değerli danışman hocam, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Sertol KÖKSAL’a ve çalışmalarımda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Mehmet BAKIR hocama, ayrıca Tez izleme komitesi üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Kenan GENÇOL ve Prof. Dr. Orhan ER hocalarıma teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca, doktora çalışmam boyunca benim için her türlü fedakârlığa katlanan aileme şükranlarımı sunarım.

Sait Ünal

20/08/2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KAOTİK FRAKTAL YAPILAR KULLANILARAK TASARLANAN METAMALZEMELERİN SİNYAL EMİCİ VE SENSÖR UYGULAMALARINDAKİ BAŞARIMI

SAİT ÜNAL

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ AHMET SERTOL KÖKSAL

Metamalzemeler, doğada bulunmayan ve olağandışı elektromanyetik özelliklere sahip yapay malzemelerdir. Medikal, görüntü işleme, sinyal emilimi, görünmezlik pelerini, enerji hasadı, sensör ve anten gibi birçok alanda uygulamaları vardır. Kaos teorisi ise, başlangıç koşullarına son derece duyarlı olan ve gürültü gibi geniş bir güç spektrumuna sahip olan düzensizliğin düzeni olarak tanımlanabilir. Kaos teorisinin bu özelliğinden yararlanılarak metamalzeme tasarımında rezonatör katmanı kaos desenlerinden oluşturulmuştur. Kaotik desenler hem rastgele şekillere hem de boyutlara sahip birimlerden oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında metamalzeme tabanlı sensör ve soğurucu konuları ele alınmış ve simülasyonlar yapılmıştır. Tasarlanan metamalzeme, kaotik desenli rezonatör katman, dielektrik katman ve iletken katman olmak üzere üç katmandan oluşur. Spektrumun C bandında çalışan sensör uygulamasında, rezonatör katmanında Rossler kaotik çekicisinden elde edilen desen kullanılmıştır. Spektrumun kızılöztesi bölgesinde çalışan soğurucu uygulamasında ise Lorenz kaotik çekicisinden elde edilen desen kullanılmıştır. Simülasyonlar, sonlu integrasyon tekniği tabanlı CST Microwave Studio programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen rezonatör yapısı, literatürdeki çalışmalar ile benzer sonuçlar göstermiştir. Sinyal emici tasarımda alttaş olarak Rogers RT5870 malzemesi, sensör tasarımında ise FR-4 malzemesi kullanılmıştır. Bu tez kapsamında tasarlanan metamalzemelerin birçok alanda kullanılabileceği öngörülmektedir.

2024, xiii + 116 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Metamalzeme, Kaos, Sinyal emici, Sensör, Görüntü oluşturma

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

PERFORMANCE OF METAMATERIALS DESIGNED USING CHAOTIC FRACTAL STRUCTURES IN SIGNAL ABSORBER AND SENSOR APPLICATIONS

SAİT ÜNAL

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
MECHATRONIC ENGINEERING**

SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. AHMET SERTOL KÖKSAL

Metamaterials are artificial materials that are not found in nature and have unusual electromagnetic properties. They have applications in many fields such as medical, image processing, signal absorption, invisibility cloaks, energy harvesting, sensors and antennas. Chaos theory can be defined as the order of disorder, which is highly sensitive to initial conditions and has a wide power spectrum like noise. By utilising this feature of chaos theory, the resonator layer in metamaterial design is formed from chaos patterns. Chaotic patterns consist of units with both random shapes and dimensions. In this thesis, metamaterial based sensors and absorbers are discussed and simulation studies are carried out. The designed metamaterial consists of three layers: resonator layer, dielectric layer and conductive layer with chaotic patterns. In the sensor application operating in the C band of the spectrum, the pattern obtained from the Rossler chaotic attractor was used in the resonator layer. In the absorber application operating in the infrared region of the spectrum, the pattern obtained from the Lorenz chaotic attractor is used. Simulation studies were carried out using the FIT-based CST Microwave Studio programme. The resonator structure used in the proposed structure has shown similar results with the studies in the literature. Rogers RT5870 material was used as substrate in the signal absorber design and FR-4 material was used in the sensor design. It is predicted that the metamaterials designed within the scope of this thesis can be used in many fields.

2024, xiii + 116 Pages

Keywords: Metamaterial, Chaos, Signal absorber, Sensor, Image Generation

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAY SAYFASI.....	iii
TEZ BEYANI.....	iv
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	20
2.1. Kaos Teorisi.....	20
2.2. Kaosun Matematiksel Denklemleri	20
2.2.1. Dinamik Sistemler ve Kaos.....	20
2.2.2. Kaos Analiz Yöntemleri.....	22
2.2.3. Kaotik Çekiciler	26
2.3. Fraktallar ve Kaos.....	31
2.3.1. Fraktal Geometri	31
2.3.2. Kaos ve Fraktallerin İlişkisi	33
2.3.3. Julia Seti.....	33
2.4. Kaos Teorisinin Uygulama Alanları	34
2.5. Metamalzemeler.....	36
2.5.1. Metamalzeme Teorisi.....	37
2.5.2. Metamalzemelerin İletim Özellikleri	39
2.5.3. Negatif Kırılma İndisi ve Ters Snell Yasası	42

2.5.4. Saçılma Parametreleri	44
2.5.5. Soğurma Teorisi.....	46
2.5.6. Sonlu Entegrasyon Tekniği.....	47
2.5.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	52
2.5.8. Sınır Koşulları	53
2.5.8. Nümerik Analiz Teknikleri	53
3. GEREÇ VE YÖNTEM	58
3.1. Kaotik Desenlerin Oluşturulması.....	58
3.2. Metamalzeme Tasarımı.....	61
3.3. Sayısal Analiz	62
4. BULGULAR	64
4.1. Kan Glukoz Oranının Tespiti Uygulaması	64
4.2. Çok Bantlı Soğurucu Uygulaması	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	84
6. KAYNAKLAR.....	88
EKLER	110

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Kırılma indisi işaret kuralları.....	43
Tablo 2.2. Malzeme parametrelerinin S parametreleri kullanılarak elde edilmesinde kullanılan yöntemler	54
Tablo 4.1. Farklı glukoz değerleri için kan örneklerinin dielektrik özellikleri.....	67
Tablo 4.2. Farklı başlangıç koşulları altında sensör parametreleri	70
Tablo 4.3. Tasarlanan sensör yapısının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması	72
Tablo 4.4. Başlangıç koşullarındaki değişim tablosu	74
Tablo 4.5. Tasarlanan yapının literatür çalışmalarıyla karşılaştırması	82

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Işığın kırılması	2
Şekil 2.1. Üç boyutlu faz uzayında bir yörünge örneği.....	22
Şekil 2.2. Örnek faz portresi çıktıları	23
Şekil 2.3. Poincare haritasının oluşturulması	25
Şekil 2.4. Çatallanma diyagramı	26
Şekil 2.5. Lorenz çekicisinin üç boyutlu görüntüsü	27
Şekil 2.6. Rossler sisteminin x,y ve z durum değişkenlerinin zamana göre değişimi ($x_0 = 0,1, y_0 = 0,1, z_0 = 0,1$)	29
Şekil 2.7. Rossler çekicisine ait faz portreleri	29
Şekil 2.8. Duffing osilatörü	30
Şekil 2.9. Chua çekicisinin bir görüntüsü.....	31
Şekil 2.10. Mandelbrot Kümesi ve Mandelbrot Kümesinin kuyruk kısmı	32
Şekil 2.11. Yapısal parametrelere göre malzemelerin sınıflandırılması	36
Şekil 2.12. Poynting vektörü gösterimi; (a) doğal malzeme ortamı ve (b) metamalzeme ortamı.....	41
Şekil 2.13. İki farklı ortam arasındaki elektromanyetik dalga geçişi.....	43
Şekil 2.14. Kara kutu.....	44
Şekil 2.15. 2 portlu devre şematığı.....	45
Şekil 2.16. Çoklu yansıma teorisi.....	46
Şekil 2.17. FIT uygulaması.	49
Şekil 2.18. FIT- Faraday yasası uygulaması.	50
Şekil 2.19. Zaman integral şeması.....	51
Şekil 2.20. Dalga kılavuzu içerisinde parametrelerinin ölçüm konfigürasyonu	54
Şekil 3.1. Kaotik desenlerin oluşturulması ve simülasyon ortamına aktarılması süreci	58
Şekil 3.2. (a) Rossler kaotik sistemin xy düzlemindeki yörüngesi, (b) bu yörüngelerden oluşturulan görüntü (c) rafine edilmiş görüntü.....	60
Şekil 3.3. Tasarımların genel yapısı	61
Şekil 3.4. Sensör tasarımının üstten görünümü	62
Şekil 3.5. Soğurucu tasarımının üstten görünümü	62
Şekil 4.1. Metamalzeme sensör tasarımının (a) üstten, (b) yandan görünümü	65
Şekil 4.2. Metamalzeme sensör tasarımının sınır koşulları ve portları	66
Şekil 4.3. Rossler kaotik sisteminin çözümünden elde edilen fraktal yapılı desen.....	66

Şekil 4.4. Metamalzeme sensörün farklı kan örnekleri için S_{21} değerleri.....	67
Şekil 4.5. Farklı y_0 başlangıç koşulları için Rossler çekicisinden elde edilen desenler	69
Şekil 4.6. y_0 başlangıç koşulundaki değişimlerin S_{21} sonuçlarına etkisi	71
Şekil 4.7. y_0 başlangıç koşulunun sensörün rezonans frekansı üzerindeki etkisi	72
Şekil 4.8. Lorenz sisteminin farklı başlangıç koşullarından elde edilen desenler.....	74
Şekil 4.9. Parametrik çalışmaların bazılarının soğurma oranlarının karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.10. Tasarlanan yapının 10-40 THz aralığındaki soğurma spektrumu	76
Şekil 4.11. Tasarlanan çok bantlı soğurucunun parametrik bilgileri.....	77
Şekil 4.12. Farklı dielektrik alttaş malzemelerinin sinyal soğurma oranları.....	78
Şekil 4.13. Elektromanyetik dalganın farklı geliş (a) ve polarizasyon (b) açılarına göre soğurulma grafikleri	79
Şekil 4.14. Rogers RT5870 alttaş malzemesinin kalınlığının tasarlanan MTM'nin soğurma katsayısı üzerindeki etkisi.....	80
Şekil 4.15. Birim hücre boyutunun soğurma katsayısı üzerindeki etkisi	81
Şekil 4.16. Tasarlanan soğurucunun 19.72 THz'de yüzey akım dağılımı (a) üst katman, (b) alt katman	81

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
μ	: Manyetik geçirgenlik
μm	: Mikrometre
$A(\omega)$	: Emilim değeri
B	: Manyetik akı yoğunluğu
c	: Işık hızı
db	: Desibel
E	: Elektrik alan
H	: Manyetik alan
hz	: Hertz
n	: Kırılma indisi
$R(\omega)$	: Yansıma değeri
T	: İletim katsayısı
$T(\omega)$	: İletim değeri
THz	: Terahertz
ϵ	: Dielektrik katsayısı
θ	: Polarizasyon dönme açısı
ω	: Açısal frekans
Γ	: Yansıma katsayısı
$\vec{k}$	: Dalga vektörü
$\vec{k}$	: Dalga vektörü

Kısaltmalar	Açıklamalar
BHR	: Bölünmüş halka rezonatör
CFL	: Courant-Friedrichs-Lewy
ÇNO	: Çift negatif ortam
ÇPO	: Çift pozitif ortam
EBG	: Elektromanyetik bant boşluklu
EM	: Elektromanyetik
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik girişim
ENO	: Epsilon negatif ortam
FDTD	: Zamanda sonlu farklar yöntemi
FIT	: Sonlu entegrasyon tekniği
FSS	: Frekans seçici yüzey
MNO	: Mu-negatif ortam
MTM	: Metamalzeme
NIST	: Noniterative Stable Transmission Reflection Technique
NRW	: Nicolson Ross Weir
PEC	: Mükemmel elektrik iletken
PMC	: Mükemmel manyetik alan
PML	: Mükemmel uyumlu katman
RIU	: Kırılma indisi birimi
SCL	: Kısa devre hattı
SRR	: Ayırık halka rezonatörü
TM	: Enine manyetik alan
TNO	: Tek negatif ortam
VNA	: Vektör ağ analizörü

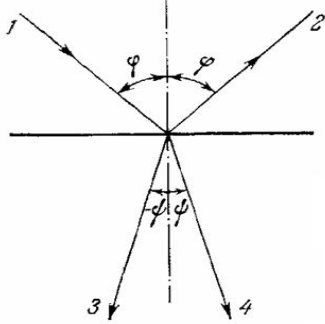
1. GİRİŞ

Elektromanyetik (EM) dalgalar, elektrik ve manyetik alanların dalga şeklinde yayılmasıyla oluşan enerji türleridir ve radyo dalgalarından gama ışınlarına kadar geniş bir spektrumu kapsar. Bu dalgalar, günlük yaşamımızda iletişim, tıp, endüstri, savunma, astronomi ve tüketici elektroniği gibi birçok alanda kritik öneme sahiptir. Örneğin, radyo ve TV yayınları, cep telefonları, tıbbi görüntüleme (X-ışınları, MRI), radar sistemleri, uzay gözlemleri ve Wi-Fi teknolojileri, elektromanyetik dalgalar sayesinde mümkün hale gelmiştir. Elektromanyetik dalgalar, modern teknolojilerin temelini oluşturur.

EM dalgaların malzeme ile etkileşimini anlamak ve kontrol etmek, bilimsel araştırmaların pratik uygulamalara dönüşmesinde anahtar bir role sahiptir. EM dalgalar ile malzemelerin etkileşimi, bu malzemelerin atomik ve moleküler yapılarına bağlıdır (Caloz & Itoh, 2005; Orfanidis, 2002). Bu malzemeler dört ana kategoriye ayrılabilir: iletkenler (metaller gibi), yalıtkanlar (cam, plastik gibi dielektrik malzemeler), yarı iletkenler (silisyum, germanyum gibi) ve metamalzemeler (MTM). İletkenler, serbest elektronları sayesinde EM dalgalarını yansıtır ve iletir. Yalıtkanlar, düşük iletkenlikleri nedeniyle EM dalgalarını kırar ve soğurur. Yarı iletkenler, iletkenliklerini koşullara göre değiştirerek elektronik ve optoelektronik uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulurlar (Jackson, 1999). Metamalzemeler ise, doğal malzemelerde görülmeyen özellikler sağlamak için özel olarak tasarlanmış yapay yapılardır ve EM dalgalarını istenen şekilde yönlendirme, odaklama veya manipüle etme yetenekleri ile dikkat çekerler (Veselago, 1968). Metamalzemeler sol elli malzemeler olarak da anılmaktadırlar. Metamalzemeler, yapılarındaki özel düzenlemeler sayesinde görünmezlik pelerinleri, süper lensler, gelişmiş antenler ve daha pek çok ileri teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır.

EM dalga analizinde, maddelerin elektriksel, manyetik, optik, kimyasal, ısı ve mekanik özellikleri önemlidir. MTM'ler açısından, özellikle negatif kırılma indisi (n), negatif manyetik geçirgenlik (μ) ve negatif dielektrik sabiti (ϵ) önemlidir (Veselago, 1968). Veselago, bir malzemenin elektromanyetik özelliklerini belirleyen dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik parametrelerinin belirli bir frekans aralığında negatif değerlere sahip olması durumunda, bu malzemenin negatif kırılma indisine sahip olabileceği teorisini geliştirmiştir. Kırılma indisi, bir malzemede ışığın yayılma hızını belirleyen bir parametredir ve $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ formülüyle hesaplanır. Eğer ϵ ve μ her ikisi de negatifse, kırılma indisi (n)

negatif olabilir. Kırılma indisinin negatif olması, ışığın normale ters bir şekilde kırılmasıdır. Bu durum Şekil 1.1’de 3 numaralı dalga yönüyle gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Işığın kırılması (Kaynaak: Veselago, 1968)

Veselago’nun çalışmasından yaklaşık 30 yıl sonra 1996 ile 1999 arasında Pendry ve ark., ince şerit yapılar ve ayırık halka rezonatörlerinin, teorik olarak negatif dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip olabileceğini göstermişlerdir (Pendry vd., 1996; Pendry vd., 1999). Smith ve ark., tek boyutlu bir metamalzemenin kırılma indisinin bazı frekans bölgelerinde negatif değerde olduğunu göstermişlerdir (Smith & Kroll, 2000).

Metamalzemelerin yukarıda bahsedilen özellikleri, dış alanlar tarafından etkilenen atomik veya moleküler osilatörlerin frekansa bağlı olarak ölçümlerinin ortalamasıdır (Enoch vd., 2002). Metamalzemeler, dalga boyundan daha küçük ölçekli periyodik yapılar barındırır. Bu nedenle, gelen bir dalga için homojen görünürler ve efektif ya da ortalama parametrelerle tanımlanabilirler. Bu parametreler, metamalzemenin birim hücresinin geometrisi ve bileşen malzemeleri tarafından kontrol edilir (Plum, 2010).

Bu malzemeler, elektromanyetik dalgaların polarizasyonunu değiştirerek optik etkinlik ve yönlendirme sağlar. Bu sayede, elektromanyetik dalgalar istenilen şekilde yönlendirilebilir ve kontrol edilebilir (Hasar vd., 2012; Wei vd., 2011). Ayrıca, bu malzemeler insan yapımı olduğu için istenilen frekans bandında çalışacak şekilde tasarlanabilirler (Dolling vd., 2007; Zhang vd., 2005). Metamalzemeler, sahip oldukları bu benzersiz özellikler nedeniyle elektromanyetik görünmezlik, lens, anten, frekans seçici yüzey, soğurucu, sensör gibi birçok uygulama potansiyeline sahiptir.

Sol elli malzemelerin sahip olduğu uygulama potansiyeli farklı materyallere entegrasyonu, savunma, tıp ve tüketici elektroniği gibi çeşitli alanlarda metamalzeme üzerine önemli çalışmalar yapılmaktadır (Alici & Ozbay, 2007; Fang vd., 2005; Melik vd.,

2009). Ayrıca metamalzemelerin bu ve benzeri uygulamalar için pratik olarak çok sayıda avantaj sunduğu literatürdeki çalışmalarda kanıtlanmıştır.

Metamalzemelerin benzersiz özellikleri sayesinde, çok çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Görünmezlik de bu uygulamalardan biridir ve herhangi bir nesnenin elektromanyetik dalgaları etrafında yokmuş gibi yönlendirmesini sağlayarak radar, mikrodalga veya diğer elektromanyetik dalgalarla algılanmasını engelleme yöntemidir. Görünmezlik yöntemleri genellikle iki ana kategoriye ayrılır: Birincisi, optik dönüşüm olup, bu yöntem saçılmanın yok edilmesi prensibine dayanır (Alù & Engheta, 2005; Pendry vd., 2006). Resmi olarak, Pendry'nin önerdiği gibi, görünmez hale getirilecek malzemeler, metamalzemelerle kaplanarak görünmezlik sağlanabilir (Pendry vd., 2006). Metamalzemenin yansıma katsayıları çok dikkatli bir şekilde seçilerek, gelen dalganın görünmez hale getirilecek malzemeye ulaşmadan önce kırılması sağlanır. Gelen dalga, metamalzemeye girdikten sonra, fazı tekrar eski haline döndürülerek, sanki metamalzeme içerisinde hiçbir malzeme yokmuş gibi davranması sağlanır. Bu sayede, metamalzeme içerisine yerleştirilen malzeme dışarıdan görülemez hale gelir.

Görünmezlik konusunda ikinci yöntem, Alu ve Engheta tarafından sunulmuştur. Bu yöntem, önceki metottan farklı olarak, gelen dalganın kırılmadığı, ancak metamalzeme tarafından kaplanan nesneye çarptığı ve oluşacak saçılmanın metamalzemeler tarafından engellendiği bir yaklaşımdır. Bu sayede, hiçbir saçılma veya yansıma meydana gelmez. Bu çalışmayı takiben, Alu ve Engheta, bu uygulamayı bir sensör üzerinde geliştirmiş ve dış etkilere kapalı ancak kendi içinde elektromanyetik alan ölçümü yapabilen bir uygulama geliştirmişlerdir (Alù & Engheta, 2005; Silveirinha & Engheta, 2006).

2008 yılında Lai ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, EM dalganın saçılmasının kontrolü sağlanarak bir nesnenin olduğundan daha farklı görünebileceği raporlanmıştır (Lai vd., 2008).

2011 yılında Zhou ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, terahertz frekans aralığında çalışan nesneleri gizlemek için tasarlanmış, kalınlığı azaltılmış ayna tabanlı bir gizleme çözümü önerilmiştir. Bu araştırmanın temel amacı, görünmezlik üzerine geliştirilen cihazların etkinliğini korurken inceltme sorununu çözmektir (Zhou vd., 2011).

2015 yılında Wang ve ark., X bandında çalışan silindirik şekilde dielektrik rezonatör tabanlı bir metamalzeme pelerini önermişlerdir. Pelerinlerinin toplam saçılma genişliğini X-

bandında birin altına düşürdüğünü göstermişlerdir (Wang vd., 2013). Islam ve ark., C-bandında etkin bir şekilde kullanılabilecek kare şeklinde metamalzeme tabanlı bir pelerin geliştirmişlerdir (Islam vd., 2015).

Islam ve ark. önermiş oldukları bir diğer çalışmada yeni bir metamalzeme tabanlı geniş bant elektromanyetik dikdörtgen pelerin tanıtmışlardır. Metamalzeme birim hücre, C ve X bantlarında keskin geçirgenlik özelliği sergilemiştir. Bu metamalzeme birim hücre, daha sonra dikdörtgen şekilli bir elektromanyetik pelerin tasarımında kullanılmıştır. Gizleme işlemi için saçılma azaltma tekniği uygulanmıştır. Pelerin, 4 GHz'den daha geniş bir bant genişliği kapsayan C ve X bantlarının belirli bir bölümünde çalışmaktadır (Islam vd., 2018).

Metamalzemelerin başka bir yaygın uygulaması, mükemmel lens, süper lens veya hiper lens olarak da bilinen metamalzeme lenslerdir. 2000 yılında Pendry tarafından önerilen çalışmada geleneksel lensler, görüntü keskinliğini ışığın dalga boyu ile sınırlarken, negatif kırılma indeksine sahip malzemelerden yapılmış "süper lensler" görünür ışık frekansında çalışan ve birkaç nanometre büyüklüğündeki nesneleri çözümleyebilen ince bir gümüş levha şeklinde bir süper lensin yapılabileceğini göstermiştir (Pendry, 2000).

Metamalzeme lensler, geleneksel lenslerden farklı olarak, ışığı kontrol etmek ve yönlendirmek için metamalzemelerin sıra dışı elektromanyetik özelliklerinden faydalanır. Mükemmel lensler, ışığın elektrik ve manyetik bileşenini aynı şekilde bükerek, optik görüntülerin süper çözünürlükle elde edilmesini sağlar (Brumfiel, 2009; Fang vd., 2005; Liu vd., 2007; Melville & Blaikie, 2005; Pendry, 2000; Schwaiger vd., 2009). Bu uygulamalar, çoğunlukla Pendry'nin çalışmalarına dayanmaktadır ve mevcut lenslerin çözünürlük sorunlarını ortadan kaldırmak veya azaltmak amacıyla geliştirilmişlerdir.

2019 yılında önerilen bir çalışmada Ku bandında (12-18 GHz) çalışan mikroşerit yama anten yönlendirici kazanç iyileştirmesi için bölünmüş halka rezonatör (BHR) metamalzeme lens önerilmiştir. Ku bandında odaklama elde edebilmek için aynı bantta negatif kırılma indisli bir BHR metamalzeme lens tasarlanıp referans antenin ışıma doğrultusunda yarım dalga boyu uzaklığına yerleştirilerek benzetim ve ölçüm sonuçları ayrı ayrı elde edilmiştir. Bu şekilde referans antenin yönlendirici kazancında ölçüm sonuçlarına göre 1,52 dB'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın önemli bir avantajı, daha az sayıda metamalzeme birim hücreden oluşan lens katmanı kullanılmasıdır (Tütüncü & Urul, 2019).

2021 yılında Yıldız ve ark., dikdörtgen ayırık halkalı rezonatör dizilerinden oluşan ve 1 GHz ile 5 GHz frekans aralığında çalışan bir matemalzeme lens önermişlerdir. Dielektrik alttaş olarak FR-4 malzemesi kullanılmıştır. Sayısal analiz (simülasyon analizi) sırasında, birim hücre yapısının optimal boyutunu belirlemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. S_{11} (yansıma katsayısı), S_{21} (iletim katsayısı) ve n (kırılma indisi) ilgilenilen frekans aralığında incelenmiştir. Parametrik çalışma sonucunda n değeri yaklaşık olarak sıfır olarak elde edilmiştir. Bölünmüş halka genişliğini artırarak, daha yüksek frekanslarda sıfıra yakın kırılma indisi gözlenmiştir. Bu nedenle, metamalzeme yapının ilgili frekansta bir süper mercek anteni gibi davrandığı sonucuna varılmıştır. Simülasyon sonuçları, ağ analizörü ile elde edilen deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır (Yıldız vd., 2021).

Metamalzemelerin anten uygulama alanı da oldukça yaygın bir konudur (Buell vd., 2006; Iizuka & Hall, 2007; Unal vd., 2010). Bu uygulamaların önemli bir avantajı ise antenlerin fiziksel boyutunun azaltılabilmesidir (Jin & Ziolkowski, 2009; Ziolkowski & Erentok, 2006). Ayrıca, metamalzeme, antenin arkasına yerleştirildiğinde, yapay manyetik iletken gibi davranarak dalgaların odaklanmasını sağlayabilir (Erentok vd., 2005). Bu durumda yapay manyetik iletken üzerindeki saçılma fazı, gelen dalga fazı ile aynı olur ve böylece odaklanma sağlanır. Bu yaklaşım, özellikle anten uygulamalarında geleneksel olarak kullanılan iletken malzemelerin yerine doğada bulunmayan yapay manyetik iletkenlerin kullanılmasıyla daha küçük boyutlara imkân sağlamaktadır.

2016 yılında önerilen bir çalışmada WLAN ve WiMAX uygulamaları için metamalzemedan ilham alan ayırık halka yapılarına dayanan iki kompakt monopol antenin tasarımı karşılaştırılmıştır. Önerilen antenin, tüm çalışma bölgesi üzerinde tutarlı bir radyasyon modeline sahip olduğu gözlenmiştir (Rosaline & Raghavan, 2016). 2018 yılında Ali ve ark., 2,4 GHz WiFi uygulamaları için yama antenindeki üçgen tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlerinin etkisini göstermişlerdir (Ali vd., 2018).

2018 yılında üçgen tamamlayıcı ayırık halka rezonatörü kullanılarak çok bantlı anten performansı elde edilmiştir. Alan açısından, üçgen şekilli ayırık halka rezonatör yapıların, dikdörtgen ve kare gibi diğer çeşitli şekillere kıyasla çok daha az yer kapladığı belirtilmiştir. Önerilen anten kompakt bir boyuta sahiptir ve aynı anda 2,4–2,48/5,15–5,35 GHz (WLAN), 2,5 GHz (WiMAX), 7,4 GHz (X-bant aşağı bağlantı) ve 8,05–8,50 GHz (ITU bandı) gerekli frekans bantlarını kapsamaktadır (Rajkumar & Kommuri, 2018).

2018 yılında Bhatia ve ark. tarafından önerilen çalışmada, geniş bant uygulamaları için fraktal antenin optimal tasarımı amaçlanmaktadır. Önerilen anten 0'dan başlayarak 3'e kadar çok sayıda iterasyon yapılarak tasarlanmıştır. Geniş bant karakteristiğini elde etmek için 3. iterasyonda kısmi toprak düzlemi eklenmiş ve bant genişliğini arttırmak için toprak düzleminin uzunluğu değiştirilmiştir. Bant genişliği, kısmi toprak düzleminde yatay ve dikey uzantılar kullanılarak 3-6 GHz frekans aralığında 2,48 GHz'e çıkarılmıştır. Önerilen anten WiMAX (3,4-3,69 GHz) ve WLAN (5,15-5,35 ve 5,72-5,82 GHz) gibi kablosuz uygulamalar için kullanışlıdır. Benzetim ve deneysel sonuçlar da birbirini desteklemiştir (Bhatia vd., 2018).

2020 yılında önerilen bir çalışmada ise 2,4 GHz uygulamalarında çalışan bir metamalzeme anten sunulmuştur. Önerilen anten, dikdörtgen yamadaki tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlerinden oluşmaktadır. CST Microwave Studio yazılımıyla simülasyonları yapılmıştır. Önerilen metamalzeme anten, doğrulanarak test edilmiştir (Geetharamani & Aathmanesan, 2020).

Günümüzde, modern insan yaşamının ve teknolojik gelişmelerin en büyük kaygılarından biri enerji gereksinimidir. Fosil enerji kaynakları azalmakta ve yenilenebilir enerji kaynakları her geçen gün daha değerli bir kavram haline gelmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları sürekli olarak araştırma konusu olmuştur. Bu araştırma konularından birisi de metamalzeme tabanlı enerji hasadı uygulamalarıdır.

Enerji hasadı sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, çoğunlukla belirli bir miktarda güçle çevreye elektromanyetik dalgalar yayan çeşitli kaynaklar nedeniyle radyo frekansı (RF) spektrumuna yönelmiştir. RF spektrumunda, elektromanyetik dalga enerjisini doğru akıma (DC güç) dönüştürmek için metamalzeme veya antenler gibi bir empedans uyum yüzeyi ve dirençli yük veya varaktör diyotlar gibi bir enerji hasat birimi gereklidir. Bu yaklaşım, doğrultucu devreler, rektenna, geniş bant/çok bant/ayarlanabilir metamalzeme tasarımları ve giyilebilir tasarımlar gibi çeşitli uygulama modellerinde tartışılmıştır (Lu vd., 2014).

2013 yılında Hawkes ve ark., 900MHz civarında elektromanyetik sinyal enerji hasadını gerçekleştirmek için 5×1 ayrık halka rezonatörü (Split-Ring Resonator, SRR) dizisi önermişlerdir (Hawkes vd., 2013).

2016 yılında Duhan ve ark., 2,45 GHz'de elektromanyetik enerjiyi yakalamak için, periyodik aynalı ayırık halkalardan, metal bir topraklama ve entegre doğrultuculardan oluşan bir metamalzeme doğrultma yüzeyi tasarlamışlardır (Duan vd., 2016).

2018 yılında Bakır ve ark., ayırık halka rezonatörün parametrelerini ayarlayarak %36,8 maksimum verimlilik elde etmişlerdir. Dielektrik alt tabakanın ön ve arka tarafında iç içe geçmiş dört U-şekilli elemandan oluşan, GSM 900 ve GSM 1800 frekans bantları etrafında etkili bir şekilde enerji hasadı için metamalzeme tabanlı bir enerji hasat cihazı tasarlamışlardır (Bakır vd., 2018).

2019 yılında önerilen bir tasarım, gelecekteki güneş enerjisi emicileri ve güneş hücrelerinin tasarımı için düşünülmüştür. Dielektrik katman tarafından emilen enerji, farklı metal yapıları için neredeyse tüm frekans aralıklarında %70'in üzerinde bulunmuştur. Dolayısıyla, dielektrik katmanda depolanan enerji, ön ve arka metal katman arasında gidip geldiği için elektrik enerjisine dönüştürülmeye hazırdır. Bu dönüşüm, uygun yarı iletkenlerin sandviç katmana gömülmesiyle gerçekleştirilebilir. Burada Ni-SiO₂ için bildirilen geniş bantlı emicinin, ışık enerjisinin hasat edilmesinde, biyomedikal görüntülemeye ve algılamada kullanılabileceği belirtilmektedir (Bagmanci vd., 2019).

2022 yılında Zhao ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, ortam titreşimlerinden (100 Hz) esinlenerek geniş bantlı ve yüksek kapasiteli piezoelektrik enerji hasadı için gradyan metamalzeme tabanlı bir enerji hasadı uygulaması önerilmiştir. Geniş bantlı enerji hasadı hedefi, verimli bir gradyan profili ile gradyan metamalzeme tasarımının uzaysal-frekans ayrımı sayesinde doğal olarak karşılanmıştır. Gradyan metamalzemenin iki avantajını piezoelektrik enerji hasadı için iki ana hedefle birleştirerek, gradyan hasatçısının güç performansı ve enerji hasat verimliliği teorik, sayısal ve deneysel analizlerle kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Gradyan metamalzeme, IoT cihazlarında yaygın olarak benimsenen geleneksel çözümlere göre hasat edilen gücün beş kat artmasını sağlamıştır (Zhao vd., 2022).

Metamalzemelerin frekans seçici yüzey (FSS) uygulamaları da vardır. FSS'ler genellikle iki boyutlu periyodik elemanlardan oluşan bir yapıdır ve geleneksel radyo frekansı (RF) devrelerindeki frekans filtrelerine benzer frekans filtreleme özellikleri sergilerler. Bu filtreleme özelliği nedeniyle FSS'nin iki ana uygulaması vardır. Birincisi, FSS reflektörlerin farklı bantlardaki beslemeleri ayırmak için kullanıldığı reflektör anten sistemleridir. Diğer uygulama ise, iletilen ve yansıtılan elektromanyetik dalgaların daha iyi kontrolü için FSS'nin

anten radomları olarak kullanılmasıdır. Anten radomları, antenleri çevresel koşullardan koruyan, elektromanyetik dalgaların geçişine izin veren ve antenin performansını bozmadan çalışmasını sağlayan kapaklardır (Mittra vd., 1988; Munk, 2005; Wu, 1995).

Filtreleme, iletişim sistemlerinin en önemli özelliklerinden biridir çünkü istenmeyen frekansların etkisini ortadan kaldırarak sadece gerekli frekansların geçmesini sağlar. FSS'ler, metalik kısmının yama veya açıklık olmasına bağlı olarak bant durdurucu veya bant geçiren filtre olarak çalışır (Munk, 2005; Nauman vd., 2016).

2010 yılında yapılan bir çalışmada elektromanyetik bant boşluklu (EBG) bir anten sunulmuştur (Moustafa & Jecko, 2010). Antenin empedans bant genişliğini ve kazancını artırmak için, FSS katmanını üst tabaka olarak uygulanmıştır.

Literatürde çeşitli bant geçiren ve bant durdurucu yapılar önerilmiştir; örneğin, çok katmanlı metalik yamalar polarizasyon bağımsız bant durdurucu filtre olarak kullanılırken, spiral elemanların kombinasyonları minyatürleştirilmiş bant geçiren filtre olarak FSS kullanılarak uygulanmıştır (Yang vd., 2010). Swastika şeklindeki modifiye edilmiş bir birim hücre, WLAN sinyallerinin zayıflatılmasını önlemek için bant durdurucu filtre olarak uygulanmıştır (Natarajan vd., 2013).

2016 yılında Ünaldı ve ark. tarafından önerilen çalışmada metalik merkezli kare, X bandı uygulaması için ultra ince çift bant FSS elde etmek amacıyla 45° ayrılmış L şeklinde kollarla birleştirilmiştir. Çift bant özelliği, L şeklindeki kollardan elde edilmiştir. Dikey kollar ile daha düşük rezonans frekansı (8,47 GHz) ve yatay kollar ile de daha yüksek rezonans frekansı (10,45 GHz) kontrol edilmiştir (Ünaldı vd., 2016). 2017 yılında önerilen benzer bir çalışmada, basit bir FSS yapısı kullanılarak üçlü bant durdurucu elde edilmiştir. Çalışılan frekans aralığı WiMAX, WLAN ve X-bandı frekans bantlarını kapsamaktadır. Ancak, arka tarafta aynı kare döngü, iki katlanmış kol ile birlikte basılmıştır. Bu yapı, WiMAX, WLAN ve X bandı olmak üzere üç farklı frekans bandında bir bant durdurucu sunmaktadır (Bashiri vd., 2017).

FSS'ler yalnızca filtreleme yapmakla kalmaz, aynı zamanda daha iyi iletişim için anten kazancını ve bant genişliğini de artırır (Foroozesh & Shafai, 2009; Gangwar vd., 2017). Yahya ve ark., UWB (ultra geniş bant) bandında tek yönlü radyasyon özelliklerine sahip çift polarizeli bir anten sunmuşlardır (Yahya vd., 2017). Burada, FSS bir yansıtıcı olarak kullanılmıştır. Antenin iki farklı polarizasyonda 9,5 dB ortalama kazanç sergilediği

gözlemlenmiştir. 20 dB yalıtım seviyesinde, tüm UWB bandını kapsayan bir empedans bandı elde edilmiştir.

FSS'ler, mikrodalga uygulamalarının yanı sıra milimetre dalga uygulamalarında da kullanılabilir. Kesavan ve ark., U ve V bantlarında geniş bantlı bir FSS yapısı önermişlerdir. Geniş bant elde etmek için RO4003 alüminyum üzerine Kudüs haçı şekli, altına ise fan şekli basılmıştır. Önerilen yapı, iki farklı şeklin tek bir birim hücre FSS oluşturacak şekilde birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Tasarım simüle edildiğinde, Kudüs haçı 48 GHz'de, fan ise 60 GHz'de rezonansa girer. Bu iki yapı bir araya getirildiğinde, karşılıklı bağlanmadan dolayı rezonans frekansı kayar. Bant genişliği, fan şeklinin halka yarıçapı ile ve Kudüs haçının kol uzunluğu değiştirilerek hesaplanmıştır. Halka yarıçapı değeri 0,4 mm'den 0,25 mm'ye değiştirildiğinde, bant genişliğinin azaldığı ve kol uzunluğu arttıkça rezonans frekansının daha düşük değerlere kaydığı gözlemlenmiştir (Kesavan vd., 2016).

2019 yılında Farooq ve ark. tarafından FSS'ler kablosuz cihazları zararlı radyasyondan korumak için elektromanyetik kalkanlama olarak önerilmiştir (Farooq vd., 2019). Syed ve ark. önerdikleri çalışmada FR4 alüminyumun bir tarafında çapraz dipol ve diğer tarafında halka kullanımı ile 6,5 GHz'den 14 GHz'ye kadar uzanan 7,5 GHz'lik bir durdurma bandı oluşumu gözlemlenmiştir. X-band ve Ka-band gibi iki iletişim bandında 20 ila 35 dB arasında minimum zayıflama ile kalkanlama etkinliği sağlamıştır (Syed vd., 2014).

2017 yılında Sivasamy ve ark. tarafından elektromanyetik ekranlama uygulamaları için yeniden yapılandırılabilir bir frekans seçici yüzey (RFSS) sunulmuştur. Önerilen RFSS'nin birim hücresi, düzgün bir mesafe ile ayrılmış bir çift kısa kare döngü içerir. RFSS, WiMAX, WLAN ve ISM/WiMAX bantlarını korumaktadır ve sırasıyla 3,5, 5 ve 5,8 GHz frekanslarını kapsamaktadır. Önerilen RFSS'nin simülasyon sonuçları ölçümlerle doğrulanmıştır. Önerilen FSS, elektromanyetik kalkan uygulamaları için geniş bant frekans ayarı sunmaktadır (Sivasamy vd., 2017).

Yukarıda bahsedilen metamalzeme uygulamaları, literatürdeki bazı örnekleri özetlemektedir. Aşağıda, bu tez konusunun da araştırma alanlarından olan metamalzeme sensör ve soğurucu uygulamalarına ilişkin literatür incelenmekte ve özetlenmektedir.

Metamalzemeler, sensör teknolojilerinde de kullanılmaktadır. Sensör araştırmaları, metamalzeme gelişiminin en ilgi çekici alanlarından birisidir. Metamalzeme sensörleri, çevrelerindeki değişiklikleri tespit etmek için metamalzemelerin benzersiz özelliklerini

kullanan sensörlerdir. Bu sensörler, elektromanyetik dalgaların metamalzeme ile etkileşimindeki değişiklikleri tespit ederek çalışır. Örneğin, bir metamalzeme sensörü, ışığın frekansındaki veya polarizasyonundaki değişiklikleri ya da etrafındaki manyetik veya elektrik alanlardaki değişiklikleri tespit edecek şekilde tasarlanabilir. Potansiyel bir algılama mekanizması olarak metamalzeme sensörleri, geleneksel sensörlerin çözünürlük sınırını aşabilir ve hızlı tepki, yüksek hassasiyet ve basit ölçüm avantajı sağlayabilir (Chen vd., 2012).

Metamalzeme tabanlı sensörler, mikroakışkan, terahertz, soğurucu tabanlı, 3D metamalzeme ve makine öğrenimi tabanlı sensörler dahil olmak üzere çeşitli algılama uygulamalarında kullanılabilir.

Mikroakışkan sensörler, mikro kanallardan akan sıvıların kırılma indisindeki veya konsantrasyonundaki değişiklikleri tespit etmek için kullanılabilir. Bu sensörler, hasta teşhisi, çevresel izleme ve kimyasal analiz dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Terahertz radyasyonu, görüntüleme, spektroskopi ve iletişimde potansiyel uygulamaları olan bir elektromanyetik radyasyon türüdür. Metamalzemeler, geleneksel sensörlerden daha hassas ve seçici olan terahertz sensörleri oluşturmak için kullanılabilir. Örneğin, metamalzemeler, benzersiz terahertz absorpsiyon spektrumlarına dayalı olarak belirli molekülleri veya malzemeleri tespit etmek için tasarlanabilir.

Çevredeki değişiklikleri sıcaklık, nem, basınç veya diğer fiziksel parametrelerdeki değişiklikleri algılamak için soğurucu tabanlı sensörler kullanılabilir.

3D metamalzeme sensörleri, her üç boyutta da benzersiz elektromanyetik özelliklere sahip yapılardır. Sıcaklık veya basınçtaki değişiklikler gibi çevredeki değişiklikleri algılamak için kullanılabilir. Bu sensörler son derece hassas ve seçici olacak şekilde tasarlanabilir ve biyomedikal algılama ve çevresel izleme dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Makine öğrenimi tabanlı sensörler, makine öğrenimi algoritmaları ile entegre edilerek akıllı algılama sistemleri oluşturulabilir. Bu sistemler, geçmiş verilerden öğrenip gerçek zamanlı sensör verilerine dayanarak gelecekteki olaylar hakkında tahminlerde bulunabilirler. Makine

öğrenimi tabanlı sensörler, robotik, akıllı şehirler ve çevre izleme gibi geniş bir yelpazede potansiyel uygulamalara sahiptir.

Metamalzeme soğurucu tabanlı sensörler, yüksek hassasiyet ve kalite faktörü, maliyet ve üretim kolaylığı açısından oldukça umut vericidir. Bu soğurucu tabanlı sensörler, sıcaklık, basınç, yoğunluk gibi fiziksel parametreleri algılamak için kullanılabileceği gibi, malzemelerin elektromanyetik özelliklerini ve karakterizasyonunu belirlemek için de kullanılabilirler. Metamalzeme tabanlı sensörler, biyomedikal, kimya endüstrisi, gıda kalitesi testi, tarım gibi alanlarda çeşitli uygulamaları nedeniyle çok popülerdir. Test edilen malzemenin rezonatör ile elektromanyetik dalganın etkileşimine dayanan algılama prensibiyle çalışmaktadırlar. Maliyet, kompaktlık, yeniden kullanılabilirlik, üretim kolaylığı ve sağlamlık gibi birçok kısıtlamayı içeren tasarım zorluklarının metamalzeme sensörleri kullanılarak üstesinden gelinmesi de ele alınmıştır (Prakash & Gupta, 2022). Metamalzeme sensörleri, ultra ince alt tabaka veya düşük kırılma indisli alt tabaka malzemelerinin kullanılması ve geniş bir frekans aralığında malzeme özelliklerini tahmin etmek için mikro akışkanların entegre edilmesiyle daha da geliştirilmiştir (Ranjan & Sahoo, 2024).

Metamalzemeler, çeşitli frekans bölgelerinde malzeme özelliklerini anlamak ve tahmin etmek için kullanılabilirler (Lu vd., 2018; Pan vd., 2019). Ayrıca, algılama metamalzemeleri hem katı hem de sıvı olmak üzere çeşitli madde türlerinde kullanılabilir (Bakir, 2016; Baxter vd., 2021; Pan vd., 2019; Yang vd., 2021). Nem, kalınlık ve geçirgenlik değerlerini belirlemek için kiral bir metamalzeme sensörü kullanılabilir (Altıntaş vd., 2019). Yakıtların ve yağların taşış tespiti için mikroakışkan algılama uygulamaları geliştirilmiştir (Song vd., 2019). Mikrodalga sensörlerle ilgili doğruluk, maliyet, boyut ve gerçek zamanlı ölçümler gibi birçok sorun hala ele alınması gereken konular arasında yer almaktadır.

Tipik olarak 100 GHz ila 10 THz arasında değişen ve 0,03-3 mm dalga boylarına karşılık gelen THz dalgaları, elektromanyetik spektrumda mikrodalgalar ile kızılötesi dalgalar arasında bir konuma sahiptir. Son yıllarda, THz dalgaları biyolojik algılama, tıbbi görüntüleme ve güvenlik denetimleri de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın uygulamalara sahiptir. THz dalgalarının önemli bir avantajı, biyomoleküler yapılara zarar verme riskini en aza indiren son derece düşük foton enerjilerine sahip olmalarıdır. Dahası, THz dalgaları yüksek penetrasyon kabiliyeti sergiler ve yüksek uzamsal çözünürlük sunar. Geleneksel tıp ve kimyasal algılama yöntemleriyle karşılaştırıldığında, THz dalgası tabanlı

teknikler ölçülen nesneler üzerinde ihmal edilebilir bir hasara neden olur. Ayrıca proteinler, nükleik asitler ve karbonhidratlar gibi birçok biyolojik ve kimyasal molekül THz aralığında rezonans ve rotasyonel frekanslar sergiler. Bu moleküller belirgin rezonans emilimi gösterir ve THz bandında zengin karakteristik parmak izi spektrumları ortaya çıkarır. Gelen THz dalgalarının biyomoleküllerle etkileşimini analiz ederek, moleküler yapılandırma, konformasyon ve çevresel etkiler hakkında bilgiler elde etmek ve özel algılama yetenekleri sağlamak mümkün hale gelir (Liu, Liu, vd., 2020; Liu, Zhang, vd., 2020; Ryu vd., 2017; Y. Wang vd., 2019; Yan vd., 2019).

2011 yılında önerilen bir çalışmada kanser tespitine yönelik bir metamateryal sensör geliştirilmiştir. Kanser algılamanın temel prensibi, biyolojik dokuların su içeriğinde küçük bir değişikliğin dokuların geçirgenlik ve iletkenlik değerlerinde değişikliklere yol açmasıdır. Kanserli hücreler, normal dokulara göre önemli ölçüde daha yüksek su içeriğine sahiptir. Bu nedenle, tümörün geçirgenliği ve iletkenliği, mikrodalga frekanslarında normal bir dokunun değerlerinden daha yüksektir. Önerilen biyosensör, tamamlayıcı metalik metamateryal rezonatörlerinden oluşan bir dizi içermektedir. Ayrılmış halka rezonatörlerin seçilmesinin nedeni, elektromanyetik bir alana güçlü tepki vermeleridir (La Spada vd., 2011).

2020 yılında Omer ve ark., diyabet kontrolünün ve önlenmesinin hızlı, doğru ve invaziv olmayan bir şekilde izlenmesi için taşınabilir düzlemsel bir mikrodalga sensörünü tasarlamışlardır. Önerilen sensör tasarımı, FR-4 dielektrik alttaşı üzerine üretilmiş ve bal peteği konfigürasyonunda düzenlenmiş dört hücreli altıgen şekilli rezonatörlerden oluşmaktadır. Entegre sensör, kan glukoz seviyelerinde etkileyici bir algılama yeteneği ve dikkate değer bir hassasiyet göstermektedir. Üretilen sensörün istenilen performansı, deneysel olarak da doğrulanmıştır (Omer vd., 2020a).

Metamateryallerle gerçekleştirilen biyosensör uygulamaları da bulunmaktadır. Tıp alanında yapılan bir çalışmada, diyabet hastalarının kan glukoz seviyesini izlemek için kompakt bir mikrodalga sensörü önerilmiştir. Sunulan sensör, Rogers RO3210 alttaşı üzerine üretilmiş ve 50 Ohm mikroşerit hattı ile beslenen, bal peteği konfigürasyonunda sıralanmış sekiz hücreli altıgen şekilli halka rezonatörler kullanılmaktadır. Glukoz algılamak için, işaret ve orta parmaklar algılama alanına yerleştirilir. Biyosensör, sinyal yolu boyunca kandaki glukozun dielektrik özelliklerindeki küçük değişiklikleri algılayabilir. Bu tasarımın ana konsepti, algılama alanında yoğunlaşan elektromanyetik alanlarla güçlü etkileşimdir. Teorik

tahminlerin yanı sıra, sensör, iletim katsayısı S_{21} ve fazı ölçen bir vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak deneysel olarak doğrulanmıştır. Sensör, kan glukoz konsantrasyonunun yaklaşık 3 MHz/(mg/dL) oranında bir rezonans frekansı kayması göstermiştir, bu da önceki çalışmalara göre önemli ölçüde daha iyi bir hassasiyettir. Bu sensör konsepti, giyilebilir non-invaziv kan glukoz izleme cihazları için umut verici bir adaydır (Mansour vd., 2023).

2016 yılında Aristov ve ark., yüksek spektral hassasiyete (> 2600 nm kırılma indisi birimi RIU değişimi başına) ve belirgin faz duyarlılığına ($> 3 \times 10^4$ derece faz değişimi RIU başına) sahip odun yığını yapısından oluşan 3D metamalzeme tabanlı bir biyosensör önermişlerdir (Aristov vd., 2016). Sreekanth ve arkadaşları, bir 3D metamalzeme tabanlı sensörün açısall hassasiyetini artıran 3D alt dalga boyu yapısına sahip bir ızgara ile kuplajlı hiperbolik metamalzeme içeren bir biyosensör tasarladılar (Sreekanth vd., 2016). Önerilen 3D metamalzeme ile cowpea mozaik virüsünün tespitini başarılı bir şekilde gösterdiler ve maksimum 7000 derece RIU başına hassasiyet elde ettiler.

Makine öğrenimi tabanlı sensörlere ilişkin ilk çalışmalardan biri, 2020 yılında Moon ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, makine öğrenimi algoritmalarına dayalı metamalzemeleri içeren plazmonik biyosensör tasarımlarının performansını araştırmışlardır. Eğitim ve test için transfer matrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Önerilen sensörün optik tepkilerini tespit etmek için optik özellikler kullanılmıştır. Yazarlar, makine öğrenme algoritmaları kullanarak önerilen çalışmanın hassasiyetini artırmanın mümkün olduğunu göstermiştir (Moon vd., 2020).

Metamalzeme tabanlı mikrodalga sensörler yüksek hassasiyet, geniş bant, küçük ve kompakt tasarım ve çok fonksiyonluluk gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Metamalzemeler, elektromanyetik dalgalarla etkileşimlerini optimize ederek sensörlerin hassasiyetini artırır. Bu özellik, küçük değişiklikleri bile tespit etmelerini sağlar. Ayrıca aynı yapı üzerinde birden fazla sensör fonksiyonu gerçekleştirilebilir, bu da maliyet ve yer tasarrufu sağlar (Ranjan & Sahoo, 2024).

Metamalzeme tabanlı soğurucular, belirli çalışma frekanslarında gelen elektromanyetik dalgaların verimli soğurulmasını sağlamakta önemli bir rol oynar. Soğurucular, soğurulan enerjiyi dielektrik alttaşı içinde ısıya dönüştürmek üzere tasarlanır. Ancak, mikrodalga enerji hasadı olarak bilinen bazı uygulamalarda, soğurulan enerji DC elektrik gücüne dönüştürülebilir.

Soğurucular, belirli bir frekans aralığı için iletimi ve elektromanyetik dalga yansımalarını sınırlandırmak amacıyla radar kesit alanı azaltma (Beeharry vd., 2018; Choi vd., 2020; Pan vd., 2013; Zhang & Zhang, 2016), elektromanyetik girişim (EMI) ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) (Hossain vd., 2023; Sen & Das, 2018) ve sensör teknolojileri (Abdulkarim vd., 2020; Bakır vd., 2019; Islam vd., 2022; Shahzad vd., 2022; Zebiri vd., 2020) gibi birçok kablosuz teknoloji uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metamalzeme tabanlı soğurucu kavramı, ilk kez 2006 yılında Bilotti ve ekibi tarafından deneysel olarak incelenmiştir. O zamandan bu yana, çeşitli soğurucu çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Bilotti vd., 2006; Dincer vd., 2013; Sabah vd., 2014; Wang vd., 2009). Son zamanlarda, mükemmel emilim kavramının ortaya çıkmasıyla birlikte, soğurucuların önemi artmış ve bu da soğurucu çalışmalarının değerini artırmıştır.

2008 yılında Landy ve ark., metamalzemelerin soğurucu olarak kullanılabileceğini gösterdiler. Yaptıkları çalışmada metamalzemenin soğurucu olarak kullanılabileceğini nümerik ve deneysel olarak kanıtlamışlardır. Tasarlanan metamalzeme iki rezonatör yapıdan oluşmuştur ve literatürde temel alınan çalışma olarak geçmektedir (Landy vd., 2008).

2008 yılında Tao ve ark., Terahertz frekanslarında güçlü rezonans soğurucu olarak çalışan bir metamalzeme önermişlerdir. Tasarımları, iki katmanlı bir birim hücreden oluşmaktadır. Elektriksel geçirgenliğin ve manyetik geçirgenliğin bağımsız olarak ayarlanmasıyla soğurmanın en üst düzeye çıkarılmasını sağlamışlardır. Çalışmalarında 1,3 THz’de %70’lik bir deneysel soğurma elde etmişlerdir (Tao vd., 2008).

2009 yılında Wang ve ark. kiral bir metamalzemeye dayalı bir rezonans mikrodalga emici önermişlerdir. Hem sayısal simülasyonlar hem de deneysel ölçümlerle, soğurucunun farklı polarizasyonlar ve geliş açıları için iyi çalıştığını göstermişlerdir (Wang vd., 2009).

Bir soğurucu, gelen bir parçacığın enerjisinin bir kısmını soğurmak için kullanılan bir malzeme bloğudur. Yüksek verimli güneş pilleri, sensörler ve gizlilik teknolojisindeki potansiyel uygulamaları nedeniyle, soğurucular üzerine araştırmalar hızla artmaktadır. Birçok değerli uygulama arasında en yaygın olanı askeri amaçlar veya gizlilik teknolojisi. Gizlilik teknolojisinin amacı, örneğin bir jeti radar sinyallerini soğuran malzemelerle kaplayarak radardan gizlemektir. Bu teknolojiye kullanılan soğurucu, bir uçağın yüzeyinden yansıyan radar sinyallerini azaltabilir veya engelleyebilir. Metamalzeme tabanlı

soğurucular, yüksek emilimleri, ince katmanları ve düşük yoğunlukları nedeniyle büyük ilgi görmektedir (Abdulkarim, Mohanty, vd., 2022).

Metamalzeme üretim teknikleri geliştikçe farklı geometrilere rezonatör tasarımları ortaya çıkmaktadır. Ayırık halka rezonatörleri metamalzeme tasarımlarında en yaygın kullanılan yapılardan biridir (Lee, 2009). Bu rezonatörler, genellikle FR-4 malzemesinden imal edilerek metamalzeme tasarımı ve üretimi için kullanılır. İlk rezonatörler, iç içe geçmiş kare "C" şekillerinden oluşmaktadır (Shelby vd., 2001). Sonraki çalışmalarda, farklı şekillerde tasarlanabilen ve üretilebilen rezonatörler kullanılmıştır. Bu rezonatörler arasında π şekli, U şekli, çapraz şekilli, Ω şekilli, S şekilli, hilal biçimli, V şekilli, sekizgen şekilli, gamalı haç eşleniği, fraktal desenler ve kaotik desenler gibi birçok farklı tasarım yer almıştır ve bu tür çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. (Bute vd., 2017; Chen vd., 2005; Cui vd., 2014; Dong vd., 2007; Li vd., 2013; Nandakumar vd., 2023; Naskar vd., 2017; Sabah vd., 2010; Tütüncü & Torpi, 2017; Yuan vd., 2018; Zhao vd., 2010; Zhao vd., 2011).

Metamalzeme soğurucunun bant genişliğini artırmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Özellikle, araştırmacılar çok bantlı, geniş bantlı ve frekansı ayarlanabilir metamalzeme soğurucular tasarlamışlardır. (Dai vd., 2020; Garg & Jain, 2020; Xin vd., 2017). Park ve ark., mikrodalga frekanslarında tasarladıkları halka yapılı çok bantlı soğurucunun performansını simülasyon ve deney yoluyla doğrulamıştır (Park vd., 2013).

Wang ve ark., sırasıyla 28,21-39,59-52,78 ve 58,63 GHz'de %99,47, %99,94, %99,05 ve %99,55 zirvelere sahip dört absorpsiyon bandı elde eden dört bantlı bir metamalzeme soğurucu geliştirmişlerdir. Halka rezonatörleri arasındaki bağlantı, soğurma özellikleri için atfedilmiştir (Wang vd., 2015).

Bir metamalzeme soğurucunun boyutlarını ve metalik yamanın şeklini değiştirerek, çok sayıda soğurma bandı elde edilebilir. Çok bantlı soğurucuların tasarımına ek olarak, araştırmacılar geniş bantlı soğurucular üzerinde de çalışmalar yapmaktadır. Geniş bantlı bir yanıt, bir cihazın soğurucu yüzeyine gelen tüm elektromanyetik frekansları soğurabilmesi anlamına gelir. Bant genişliğini genişletmek için literatürde çok katmanlı istiflenmiş yapılar ve çoklu metalik metamalzeme yapılar önerilmiştir (Park vd., 2013). 2012 yılında, Lee ve ark., hem dar bant hem de geniş bant emilimi sağlayan mikrodalga frekanslarında geniş bantlı metamalzeme tabanlı, mükemmele yakın I-şekilli bir emici tasarladı (Lee vd., 2012).

Kaos ve fraktallar, doğadaki düzensiz ve karmaşık sistemlerin anlaşılmasına yardımcı olan matematiksel kavramlar olarak anılırlar. Kaos teorisi, başlangıç koşullarına aşırı duyarlılık gösteren sistemlerin davranışlarını inceler ve bu sistemlerin uzun vadeli tahmin edilemezliğini vurgular. Fraktallar ise, kendine benzer yapılar sergileyen, karmaşık geometrik şekillerdir. Kaos ve fraktallar, çeşitli bilimsel ve teknolojik alanlarda büyük bir etki yaratmıştır (Addison, 1997; Peitgen vd., 2004).

Metamalzeme tabanlı soğurucu tasarımlarında kaotik çekicilerden elde edilen fraktal yapıları desenlerle gerçekleştirilmiş rezonatörlü çalışmalar da mevcuttur. Yapılan çalışmalarda, kaotik sistemler ve fraktal geometriler kullanılarak, elektromanyetik dalgaların soğurulmasını sağlayan yenilikçi yapılar geliştirilmiştir.

Son yıllarda kaos ve fraktallar, metamalzeme çalışmalarında da ilgi uyandırmaktadır. Kaotik yüzeylerin geniş bant elektromanyetik dalga soğurma performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde inceleyen bir çalışmada, kaotik desenlerin korelasyon fonksiyonlarının elektromanyetik dalga soğurucular üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve geniş bantlı soğurma performansının optimizasyonu için evrensel bir seçim yöntemi önerilmiştir. Deneysel sonuçlar, simülasyon ve teorik analizleri doğrulamış ve kaotik desenlerin düşük yansıtma özelliklerini geniş bir bantta sürdürebildiğini göstermiştir (Zhang vd., 2022).

Nandakumar ve ark. (Nandakumar vd., 2023), görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde çalışan MXene tabanlı fraktal desenli bir metamalzeme soğurucu geliştirmişlerdir. MXene, atomik olarak ince katmanlar oluşturan geçiş metal karbürleri veya nitrürler sınıfına ait iki boyutlu inorganik bileşenlerdir. Bu yapılar yüksek elektriksel iletkenlik, mekanik dayanım ve zengin yüzey kimyası gibi birçok önemli özelliğe sahiptir. Önerdikleri soğurucu, silikon dioksit bir alt tabaka, gümüş bir yansıtıcı yüzey ve fraktal desenli bir MXene tabakasından oluşmaktadır. 400-1500 nm aralığında, bu çift bantlı soğurucu, %80'in üzerinde bir soğurma oranına ulaşmaktadır. Görünür bölgede %100 soğurma oranına sahip dar bant soğurma zirvesi, sensör uygulamaları için değerlidir. Geniş spektrumda etkili soğurma, meta yüzeyin elektrik rezonansından kaynaklanmaktadır. Fraktal yapının simetrik olması polarizasyona karşı duyarsızlık sağlamaktadır.

Bilal ve ark. görünür bölgede (380-750 nm) eliptik metalik halka şekilli fraktal metamalzeme soğurucu kullanarak geniş bant bir soğurucu tasarlamışlardır (Bilal vd., 2020). Naveed ve ark. önerdikleri çalışmada metal-yalıtkan-metal konfigürasyonuna sahip yeni

altıgen halka şeklindeki fraktal desenli metamalzeme soğurucu, 820 ila 2520 nm arasında %97'nin üzerinde ve 200 ila 4000 nm arasında %80'in üzerinde soğurma elde etmişlerdir (Naveed vd., 2021). Başka bir soğurucu çalışmasında fraktal desenlerdeki kendine benzer yapıların, kompakt tasarım ve gelişmiş çok bantlı performans sağladığı ifade edilmiştir (Heshmatzadeh vd., 2023).

Yuan ve ark. Rossler kaos reaksiyon-difüzyon sistemi desenleri ile oluşturulmuş dirençli bir meta yüzey kullanarak geniş bantlı bir elektromanyetik soğurucu tasarlamışlardır. Elde edilen kaotik desenler görüntü işleme yöntemleriyle sayısallaştırılmıştır. Bu kaotik desenlerden oluşturulan yüzeyler, rastgele şekil ve boyutlara sahip birimlerden oluşmaktadır. Simülasyon sonuçları, soğurma oranlarını ortaya koyarken, korelasyon fonksiyonu analizi, kaotik desenlerin kenarlarının korelasyonu kaotik birimlerin geometrik boyutlarıyla eşleştğinde yeni bir dalga soğurma modunun oluşabileceğini göstermektedir. Deneysel sonuçlar, -10, -15 ve -19 dB'nin altında yansıtıcılığa sahip sıra dışı bant genişliği oranlarının sırasıyla %96,84, %80,1 ve %56,1'e ulaştığını göstermektedir. Yüksek soğurma özelliği, bu yapıyı modern yankısız odalar ve diğer elektromanyetik dalga soğurucular için potansiyel bir uygulama haline getirmektedir (Yuan vd., 2018).

Metamalzeme soğurucu ve sensör tasarımında geleneksel yöntemlerle (geometrik şekil) oluşturulan rezonatörlerin yerine kaotik desenlerle oluşturulmuş rezonatörler de kullanılmıştır. Kaotik çekicilerden elde edilen desenin çeşitli avantajları vardır. Desenler hızlı bir şekilde ve kolaylıkla oluşturulabilir; başlangıç koşullarına duyarlılığı nedeniyle güçlü rastgelelik sağlayabilir, böylece soğurma yeteneğini geliştirmek için yeni fırsatlar sunabilir. Kaos desenindeki meta-atomlar şekil, boyut ve kenar bakımından farklıdır. Meta yüzey bir kaos deseninden tasarlanabilirse, kaos yamaları arasındaki korelasyon geliştirilebilir ve emilim ve bant genişliği artırılabilir (Du vd., 2021; Yuan vd., 2018; Zhang vd., 2022).

Teknolojideki hızlı gelişmeler savunma sanayinden tıpa ve daha birçok alanda yeni ihtiyaçların ortaya çıkmasına ve yeni elektromanyetik malzemelerin üretimi üzerindeki çalışmaların artmasına yol açmıştır. Metamalzemeler bu alanda popülerliğini her geçen gün artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında metamalzeme tabanlı, biri sensör ve diğeri soğurucu olmak üzere iki uygulama gerçekleştirilmiştir. İlk uygulama, 4-8 GHz frekans aralığında Rossler kaotik

çekicisinden elde edilen desenlerin rezonatör katmanında kullanıldığı metamalzeme sensörüdür. İkinci uygulama ise spektrumun kızılötesi bölgesinde, Lorenz kaotik çekicisinden elde edilen desenlerin rezonatör katmanında kullanıldığı çok bantlı bir elektromanyetik dalga soğurucusudur.

Sensör uygulaması olarak kandaki glukoz seviyesinin belirlenmesi için kaotik desenli bir metamalzeme sensörü tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan kaotik desenlerin, bu sensörlerin duyarlılığına, doğruluğuna veya genel performansına nasıl katkıda bulunduğu araştırılmıştır. Araştırmanın ana amacı, sensör karakteristikleri ile kaotik sistem parametreleri arasındaki ilişkiyi anlamaktır.

Soğurucu uygulamasında ise metamalzeme soğurucu tasarımında kullanılan kaotik desenlerin, soğurma performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Tasarlanan soğurucu, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, çok bantlı soğurucu tasarımları için umut verici sonuçlar sunmaktadır. Ayrıca, farklı kaotik desenlerin soğurucu tasarımındaki etkileri de araştırılmış ve bu desenlerin rezonatör olarak kullanılmasının mümkün olduğu ortaya konmuştur.

Metamalzeme tasarımlarında kaos desenli yapıların kullanımı oldukça nadirdir ve bu durum, bu alanda daha kapsamlı araştırmalar yapılmasını gerekli kılmaktadır. Kaotik desenlerin, metamalzemelerin elektromanyetik özellikleri üzerindeki potansiyel etkileri büyük ilgi çekmektedir. Bu çerçevede hem Rossler hem de Lorenz kaotik çekicilerinin metamalzeme sensörler ve soğurucular üzerindeki etkileri bu tez çalışmasında ayrıntılı olarak incelenmektedir. Rossler ve Lorenz çekicileri, dinamik sistemlerdeki kaotik davranışları temsil eden önemli modellerdendir. Bu çekicilerin metamalzemelerde kullanılması, elektromanyetik dalgaların kontrolü ve yönlendirilmesi açısından yeni perspektifler sunabilir. Kaotik desenlerin metamalzeme soğurucularda elektromanyetik dalgaları soğurma potansiyeli ve sensörlerde hassasiyeti artırma yeteneği, bu çalışmadaki önemli odak noktalarıdır. Bu araştırmalar, metamalzeme teknolojilerinde yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine ve uygulama alanlarının genişletilmesine katkıda bulunabilir.

Bu tez metninin ikinci bölümünde, kaos teorisi ve metamalzemeler tanıtılmaktadır. Üçüncü bölümde kaotik desenlerin elde edilmesi ve metamalzeme tasarımında kullanılan gereç ve yöntemler açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, sensör ve soğurucu uygulamalarına ait bulgular gösterilmekte ve elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir.

Son bölümde ise genel bir değerlendirme yapılmakta, yapılan tasarımların geliştirilebilir yönleri tartışılmakta ve hangi alanlarda kullanılabileceğine dair önerilerde bulunmaktadır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kaos Teorisi

Kaos kelimesi Yunanca boşluk anlamına gelen Khaos kelimesinden gelmektedir. Kaos teorisi, sistemin başlangıç koşullarında yapılan küçük bir değişikliğin daha sonra çok büyük bir değişikliğe yol açabileceği kavramıdır (Devaney & Alligood, 1989). Kaotik sistemlerin davranışı sadece kısa bir süre için tahmin edilebilir. Sonraki iterasyonlarda kaotik sistemlerin davranışı öngörülemez hale gelir. Bu özelliklerinden dolayı fizik, mühendislik, ekonomi, biyoloji ve felsefe dahil olmak üzere çeşitli disiplinlerde uygulamaları olan bir çalışma alanıdır.

Kaos, genel olarak, başlangıç koşullarına hassas bağımlılık gösteren deterministik bir sistemdeki periyodik olmayan uzun vadeli davranış olarak tanımlanabilir (Kellert, 1993; Strogatz, 2018). Kaos, genellikle düzensizlik içindeki düzen olarak tanımlanan doğrusal olmayan olguları açıklamaya yardımcı olan bilimsel bir alandır. Kaos, karmaşık davranışların yanı sıra kendine özgü iç yapısı nedeniyle rastgele bir olay değildir. Görünüşte rastgele durumlar içindeki hassas farklılıklardan kaynaklanan olaylar arasındaki ilişkilere odaklanır. Kaos bilimi alanı, bulutların hareketi, sigara dumanı, çalkantılı nehir akışları, bir musluktan su akışı gibi gerçek hayatta rastgele davranış sergilediği düşünülen olayları anlamaya çalışır (Addison, 1997; Hilborn, 2000).

2.2. Kaosun Matematiksel Denklemleri

2.2.1. Dinamik Sistemler ve Kaos

Kaos teorisi, dinamik sistemler olarak adlandırılan ve zamanla evrilen sistemleri inceler. Dinamik sistemler, genellikle diferansiyel denklemler veya fark denklemleri ile modellenir. Dinamik sistemler zamanın nasıl ele alındığına bağlı olarak ayrık zamanlı ve sürekli zamanlı dinamik sistemler olarak incelenir (Alligood vd., 1998).

Ayrık Zamanlı Kaotik Sistemler: Ayrık zaman sistemi, değişkenlerin yalnızca belirli, ayrık zaman noktalarında değiştiği bir sistemi ifade eder. Ayrık zaman kaotik sistemi, sürekli değil ayrı zaman adımlarında gelişen dinamik bir sistemi ifade eder. Başlangıç koşullarına hassas bağımlılık ile karakterizedir, yani başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklerin uzun vadede önemli ölçüde farklı sonuçlara yol açabileceği anlamına gelir. Bu sistemler, zengin dinamikleri ve kriptografi, veri şifreleme ve rastgele sayı üretimi gibi alanlardaki

uygulamaları nedeniyle fizik, matematik ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak incelenmektedir (Alligood vd., 1998; Broer & Takens, 2011; Moon, 2008).

$$x(t+1) = kx(t), x(0) = x_0$$

Denklem 2.1. Ayırık zamanlı bir kaotik sistemin denklemi

Denklem 2.1, bir ayırık zamanlı dinamik sistem örneğidir. Burada $x(t)$, t zaman adımındaki sistemin durumunu, k ise sabit bir çarpanı (genellikle büyüme veya azalma faktörü olarak adlandırılır) temsil eder. x_0 başlangıç durumunu belirtir.

Sürekli Zamanlı Kaotik Sistemler: Sürekli zaman kaotik sistemler, dinamik sistemlerin sürekli zamanda davranışını tanımlayan matematiksel modellerdir. Durum değişkenlerinin zamanın bir fonksiyonu olarak sürekli değiştiği diferansiyel denklemler veya gecikmeli diferansiyel denklemler ile tanımlanır (Alligood vd., 1998; Broer & Takens, 2011).

Deterministik sürekli zamanlı bir dinamik sistem başlangıç şartları ile birlikte aşağıdaki diferansiyel denklem ile tanımlanabilir.

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \vec{F}[\vec{x}(t), t], \quad \vec{x}(t_0) = \vec{x}_0$$

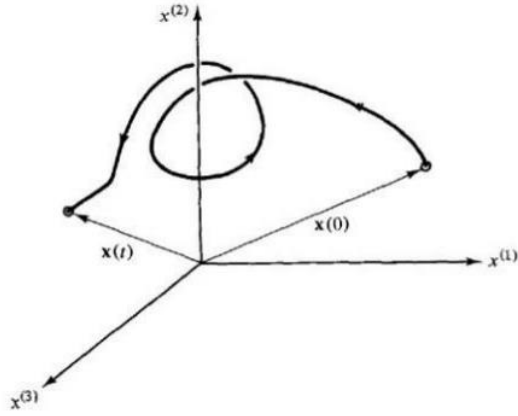
Denklem 2.2. Sürekli zamanlı bir dinamik sistemin denklemi

$x(t)$ durum, $\frac{d\vec{x}(t)}{dt}$ zamana göre türev, $x(t_0) = x_0$ başlangıç koşuludur ve $\vec{F}: R^m \rightarrow R^m$ ise vektör alanıdır. Eğer sürekli zamanlı deterministik bir dinamik sistemin vektör alanı sadece duruma bağlı ve zamandan etkilenmiyorsa, bu sistem otonom olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \vec{F}[\vec{x}(t)], \quad \vec{x}(t_0) = \vec{x}_0$$

Denklem 2.3. Otonom bir dinamik sistemin denklemi

Otonom bir sistemin değişimi genellikle kendi faz uzayında temsil edilir. Dinamik bir sistemin tüm olası durumlarının birleşimi, o dinamik sistemin faz uzayını oluşturur. Dinamik bir sistemin başlangıç koşulları altında çözülmesiyle elde edilen durum değişkenlerinin faz uzayına izdüşümü, dinamik sistemin yörüngesidir (Strogatz, 2018). Üç boyutlu faz uzayındaki yörüngenin şekli Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Üç boyutlu faz uzayında bir yörünge örneği (Kaynak: Kalaycı, 2022)

Denklem 2.3’te verilen otonom bir dinamik sistemin faz uzayında her noktadaki $x(t)$ değeri tektir. Bu da sistemin herhangi bir yörüngesinin aynı noktadan geçmeyeceğini ifade eder. Buradan da kaotik sistemlerin kendini tekrarlamayan dinamik sistemler olduğu ortaya çıkmaktadır.

Sürekli zamanlı kaotik sistemlere, Lorenz, Rossler, Chua, Duffing, Van Der Pol gibi kaotik sistemler örnek verilebilir. Bu sistemler kaotik çekiciler başlığı altında incelenmiştir.

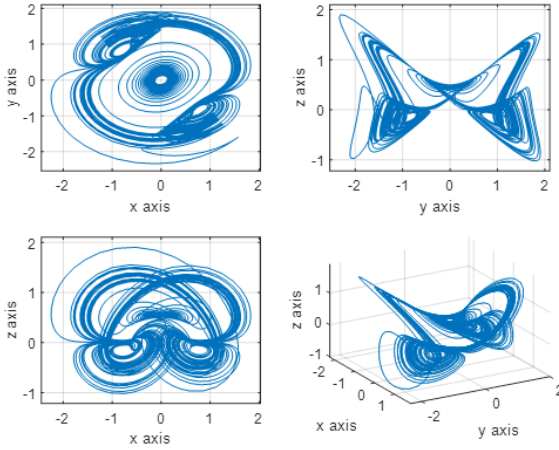
2.2.2. Kaos Analiz Yöntemleri

Bir sistemin kaotik olup olmadığını tespit edebilmek için kullanılan çeşitli analiz teknikleri vardır. Bunlar arasında zaman serileri verilerinin, denge noktalarının, başlangıç koşullarına duyarlılığın, kaos boyutunun, Lyapunov üstellerinin, Lyapunov spektrumunun, çatallanma diyagramlarının, güç spektrumlarının hesaplanması gibi yöntemler vardır. Bu analiz ve hesaplamalar kaotik davranışı tahmin edebilmek için bakış açısı sunarlar. Fakat kaos boyutunu hesaplamak, Lyapunov üstelleri, Lyapunov spektrumu ve çatallanma diyagramları oluşturmak gibi daha nicel teknikler kaos hakkında kesin yargılar yapmak ve sistemin farklı parametre değerlerinde davranışını anlamak için gereklidir.

Zaman serileri analiz yöntemi kaosu varlığını tespit edebilmek için kullanılan görsel bir yöntemdir ve Euler, Heun, Runge Kutta vs. gibi çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak bulunabilir. Bu analiz yönteminde dinamik bir sistemin durum değişkenlerinin zaman içinde nasıl değiştiği gözlemlenir. Bulunan sonuçlar düzensiz ve tahmin edilemez bir davranış sergiliyorsa sistem kaotiktir. Bu sistem basit gibi görünse de tek başına bir sistemin kaotik olup olmadığını belirlemede yeterli değildir. Çünkü burada yapılan analiz seçilen aralık için

geçerli bir sonuç olacaktır. Dolayısıyla sistemin bütünü temsil edemeyecektir (Lorenz, 1963; Mandelbrot & Mandelbrot, 1982).

Faz portresi analiz yöntemi, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin davranışını gösteren grafiksel temsillerdir. Özellikle kaotik ve karmaşık dinamikleri anlamak için kullanılırlar. Bilgisayar yazılımları ile sisteme ait faz portreleri elde edilebilir (Poincaré, 1881). Şekil 2.2’de örnek bir kaotik sisteme ait faz portresi verilmiştir.



Şekil 2.2. Örnek faz portresi çıktıları (Kaynak: Çimen vd., 2019)

Kaotik bir sistemin faz portresini oluşturan yörüngeler, zaman ilerledikçe faz uzayını kaplamaya başlar ve asla birbirini kesmeden tekrar ederler. Faz portreleri kaosu varlığını ispat etmede tek başına yetersizdir (Poincaré, 1881).

Denge noktası analizi, sistem dinamiklerinin zaman içinde sabit kaldığı durumlardır. Bu noktalar, kaotik sistemlerin davranışını ve istikrarını anlamada çok önemli bir rol oynamaktadır. Denge noktası analizi genellikle sistemin denge noktaları etrafındaki doğrusallaştırılmış dinamikleri hakkında bilgi sağlayan Jacobian matrisi hesaplanarak gerçekleştirilir. Jacobian matrisinin özdeğerlerini inceleyerek, denge noktalarının kararlılığını belirleyebilir ve sistemin davranışı hakkında fikir edinilebilir (Poincaré, 1881).

Başlangıç koşullarına hassas bağımlılık, kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına çok büyük bir hassasiyetle bağlı olması durumunu ifade eder. Bu, kaotik bir sistemin başlangıç durumundaki küçük varyasyonların bile zaman içinde tamamen farklı yörüngelere neden olabileceği anlamına gelir. Bu kavram aynı zamanda bir kelebeğin kanat çırpmasının potansiyel olarak dünyanın diğer tarafında bir kasırgaya neden olabileceği “kelebek etkisi”

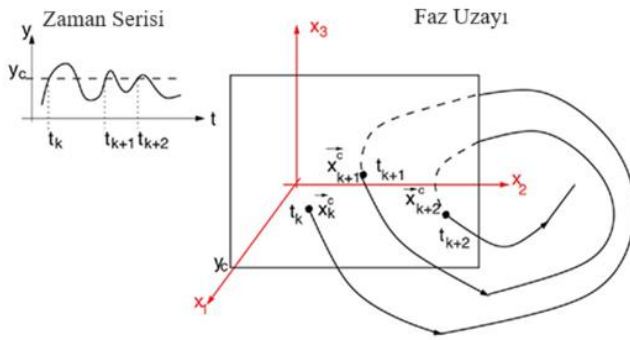
olarak da bilinir. Kaotik sistemler deterministiktir, yani gelecekteki davranışları tamamen başlangıç koşulları ve dinamiklerini yöneten denklemler tarafından belirlenir. Bununla birlikte, başlangıç koşullarına karşı aşırı duyarlılıkları nedeniyle, uzun vadeli davranışlarını kesin bir şekilde tahmin etmek neredeyse imkansızdır. Yani, aynı denklemlerle tanımlanan ancak birbirinden çok az farklı başlangıç koşullarına sahip iki kaotik sistem, birbirinden farklı kaotik yörüngelere sahip olacaktır. Bu durum, kaotik sistemlerin hassas bir şekilde başlangıç koşullarına bağımlı olduğunu gösterir (Lorenz, 1963).

Lyapunov üstelleri analizi faz uzayında birbirine yakın iki başlangıç noktasındaki hareket, zaman içinde belirli bir üstel faktörle birbirinden uzaklaşır veya birbirine yaklaşır. Bu, kaotik sistemlerde görülen bir gerçekliktir ve bu üstel faktör, Lyapunov üsteli olarak adlandırılır. Lyapunov üstelleri, dinamik bir sistemin başlangıç koşullarına duyarlılığının bir ölçüsüdür. Bir sistemin kaotik olup olmadığı, Lyapunov üstellerine bakılarak belirlenebilir. k boyutlu bir dinamik sistem, k adet Lyapunov üstel değerine sahiptir. Eğer bir Lyapunov üstel pozitifse, başlangıç şartları arasındaki fark, yörünge boyunca belirli bir yönde büyüme eğilimindedir. Kararlı bir sürekli hal davranışı için yaklaşma, uzaklaşmadan daha fazla olmalıdır. Bu nedenle, k boyutlu bir dinamik sistemdeki tüm Lyapunov üstel değerlerinin toplamı sıfırdan küçük olmalıdır. Ancak, bir sistemin kaotik olması için en az bir Lyapunov üstel değerinin pozitif olması gereklidir (Dingwell, 2006; Hilborn, 2000; Lyapunov, 1992; Wolf vd., 1985).

Lyapunov spektrumu, sistemin davranışını faz uzayındaki yakın yörüngelerin ayrışması veya yakınsaması açısından karakterize eden dinamik bir sistem için Lyapunov üstelleri kümesi olarak tanımlanır. Lyapunov spektrumu hem sürekli hem de ayrık dinamik sistemler için hesaplanabilir. Lyapunov spektrumu en az bir Lyapunov üstelinin pozitif olması ve sistemin deterministik olması durumunda kaotik davranışın varlığını gösterir. Lyapunov spektrumu, karmaşık dinamikleri analiz etmek ve anlamak için mühendislik, fizik ve ekoloji gibi birçok alanda uygulanmıştır (Dingwell, 2006; Lyapunov, 1992; Wolf vd., 1985).

Poincare haritalaması, bir sistemin yörüngesinin belirli bir düzlemle (Poincare kesiti) kesiştiği noktaların çizilmesini içerir. Poincare kesiti, yörüngelerden belirli zaman aralıklarında örnek almak için seçilen herhangi bir düzlem olabilir. Bu haritalama, sistemin dinamiklerini görselleştirmeye ve kaotik davranışları tanımlamaya yardımcı olur. Poincare haritalaması, güvenli iletişim sistemleri geliştirme, kaotik güvenli diziler oluşturma ve

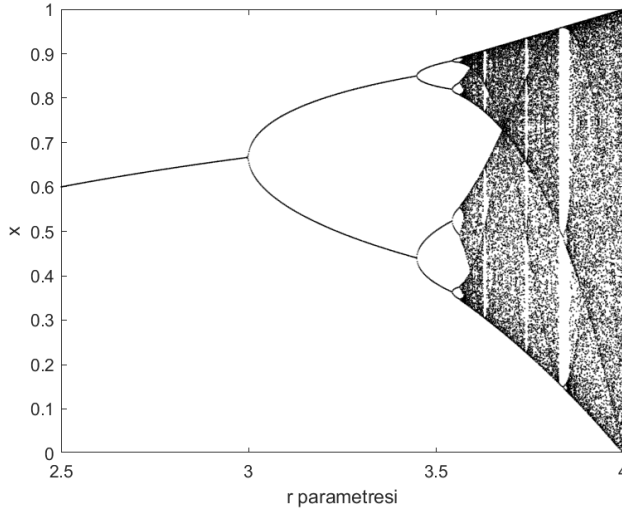
kaotik haritaların dinamiklerini analiz etme gibi çeşitli amaçlarla uygulanmıştır. Genel olarak, Poincare haritalaması, kaotik sistemlerin davranışları hakkında bilgiler sağlar ve çeşitli araştırma alanlarında uygulamaları vardır (Baker & Gollub, 1996; Özer & Zorlu, 2012; Poincaré, 1881). Zaman serisi verilen bir sisteme ait faz diyagramından Poincare haritasının oluşturulması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Poincare haritasının oluşturulması (Kaynak: Tagliazucchi vd., 2012)

Poincaré haritası, sistemin davranışı hakkında önemli bilgiler sağlayabilir. Örneğin, periyodik bir sistemin Poincare haritası, sabit bir nokta olarak görünecektir. Yarı periyodik bir sistemin Poincare haritası, kapalı bir eğri olarak görünecektir. Kaotik bir sistemin Poincare haritası ise kapalı olmayan ve belirli alanlarda yoğunlaşmış fraktal bir şekil olarak görünecektir (Baker & Gollub, 1996; Poincaré, 1881).

Çatallanma diyagramı, kaotik sistemlerin dinamiklerini analiz etmek için yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Sistemin faz uzayı özelliklerini temsil eder ve zaman içinde dinamiklerdeki değişiklikleri görselleştirmeye yardımcı olur. Çatallanma, bir sistemin parametresindeki küçük bir değişikliğin, sistemin davranışında büyük değişikliklere yol açması durumudur. Bu değişiklikler sistemin sabit noktalarının, periyodik yörüngelerinin veya kaotik davranışlarının ortaya çıkmasına veya kaybolmasına neden olabilir. Çatallanmanın meydana geldiği parametre değerine kritik parametre değeri denir (Feigenbaum, 1978). Şekil 2.4'te örnek bir çatallanma diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Çatallanma diyagramı (Kaynak: Alligood vd., 1998)

Bu diyagram, araştırmacıların kaotik ve periyodik sistemleri ayırt etmelerini sağlar. Çatallanma diyagramının verimsiz olduğu durumlarda, çatallanma spektrumu adı verilen yeni bir yaklaşım da kullanılabilir (Karimov vd., 2021).

2.2.3. Kaotik Çekiciler

Kaotik çekiciler, bir dinamik sistemin uzun vadeli davranışını belirleyen yapılardır. Ayrıca faz uzayında karmaşık ve fraktal yapılar oluştururlar. Bu çekiciler, deterministik bir sistemde başlangıç koşullarına duyarlılıktan dolayı karmaşık ve öngörülemez davranışlara yol açar. Kaotik çekiciler, düzensiz ve fraktal yapılara sahiptir. Belçikalı fizikçi David Ruelle, 1971 yılında "tuhaf çekici" terimini ortaya atmıştır (Ruelle & Takens, 1971). Tuhaf çekiciler, kaos ve fraktalların birleştiği noktada yer alır; geometrik desenler olarak fraktal, dinamik nesneler olarak kaotiktirler. Kaotik çekiciler, sabit nokta, limit-döngü, limit-torus ve tuhaf çekici gibi çeşitli türlerde bulunur ve bu alandaki çalışmalar, çekicilerin sınıflandırılması, nicel özelliklerinin ölçülmesi ve fiziksel verilerden yeniden inşası gibi konuları kapsar (Neimark & Landa, 2012). Tuhaf çekici olarak lorenz, duffing, chua, van der pol, rossler, henon gibi kaotik çekiciler bulunmaktadır ve aşağıda açıklanmıştır.

Lorenz Çekicisi: Kaos teorisinin önemli bir paradigması olarak bilinir. İlk olarak 1963'te Edward Lorenz tarafından tanıtılmıştır ve meteorolojik olayları öngörmek amacıyla oluşturulmuştur. İlerleyen zamanda matematik ve fizik alanlarında da büyük ilgi görmüştür. Lorenz çekicisi, başlangıç koşullarına yüksek hassasiyet gösteren dinamik sistemleri açıklamaktadır. Yani başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklerin bile büyük ve

öngörülemez sonuçlara yol açabileceği anlamına gelmektedir. Bu durum "kelebek etkisi" olarak bilinir (Lorenz, 1963). Lorenz'in çalışmaları, dönemin diğer dinamik modellerini geride bırakarak, matematiksel kaos teorisinin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Çalışmanın önemli bir özelliği, çekicinin dinamiklerinin topolojik ve istatistiksel açıdan iyi tanımlanmış olması ve bazı hiperbolik özellikler göstermesidir. Bu, Lorenz modelinin herhangi bir pertürbasyona karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Lorenz kaotik sistemi, üç boyutlu akışkan konveksiyonu için bir model olarak sunulmuştur. Bu çalışmalarda üç değişkenden ikisi sıcaklık, diğeri hız alanı katsayısıdır. Lorenz denklemleri;

$$\dot{x} = s(-x + y)$$

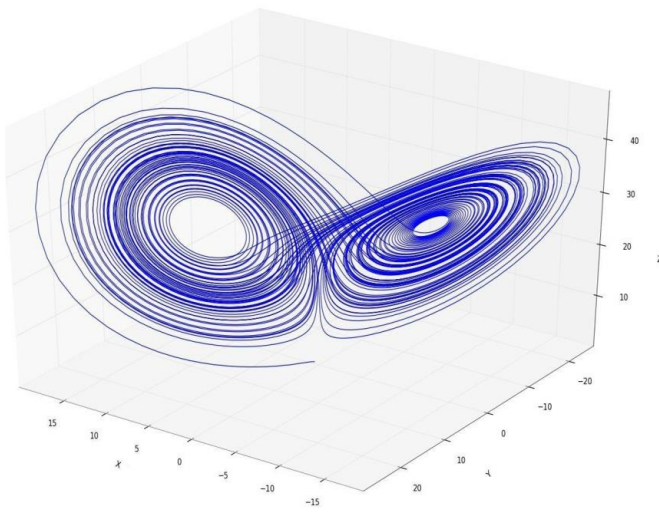
$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = -bz + xy$$

$$s, r, b > 0$$

Denklem 2.4. Lorenz çekirine ait denklem

Burada; x, y, z sistemin durum değişkenleri, s ısı transfer oranını, r sıcaklık farkının kuvvetini ve b ise sistemin fiziksel boyutlarını temsil eder. Sistemin belirgin niteliği, geniş bir frekans aralığına yayılan periyodik olmayan osilasyonlar oluşturmalarıdır. Sistem örneğin, $s=10$, $r=28$ ve $b=2,66$ parametre değerlerinde kaotik bir davranış sergiler. Şekil 2.5'te, verilen bu parametre değerleri için Lorenz çekicisinin bir görseli sunulmuştur.



Şekil 2.5. Lorenz çekicisinin üç boyutlu görüntüsü

Kaos teorisini anlamak için Lorenz sistemi, en temel sistemlerden biri olarak incelenebilir. Bu sistem, kaos teorisinin teorik ve deneysel çalışmalarına öncülük etmiştir. Baykuşun gözlerini veya kelebek kanatlarını hatırlatan bu büyülu şekil, kaosun ilk araştırmacıları tarafından bir sembol olarak kabul edilmiştir. Düzensiz bir veri akışının içinde, bu şekil sayesinde saklı olan sağlam ve güzel bir yapı ortaya çıkar. Sistem, hiçbir zaman aynı şekilde tekrar etmediği için, sistem yörüngesi kendisiyle asla kesişmez. Aksine, sonsuza dek kendi etrafında dönmeye devam eder. Çekici üzerindeki bu hareket, soyut olmasına rağmen, gerçek bir sistemin hareketi hakkında bir fikir verir (Lorenz, 1963).

Rosler Çekicisi: Rosler çekicisi, Alman biyokimyacı Otto Rosler tarafından 1976'da tanıtılmıştır. Kaos teorisi ve dinamik sistemler alanında önemli bir model olup, sistemlerin kaotik davranışlarını incelemek amacıyla kullanılır ve Lorenz çekicisine benzer bir şekilde kaotik davranış sergiler (Rössler, 1976). Rosler çekicisi, üç adet birinci dereceden diferansiyel denklemden oluşur ve Denklem 2.5'te ifade edilmiştir.

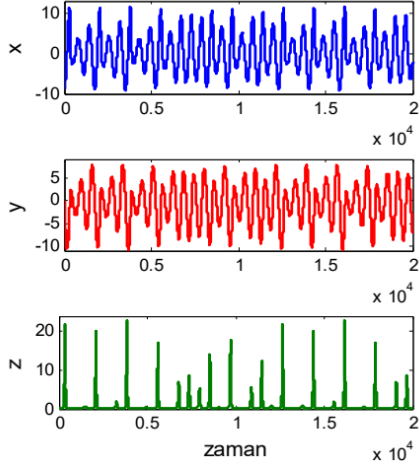
$$\dot{x} = -y - z$$

$$\dot{y} = x + ay$$

$$\dot{z} = b + z(x - c)$$

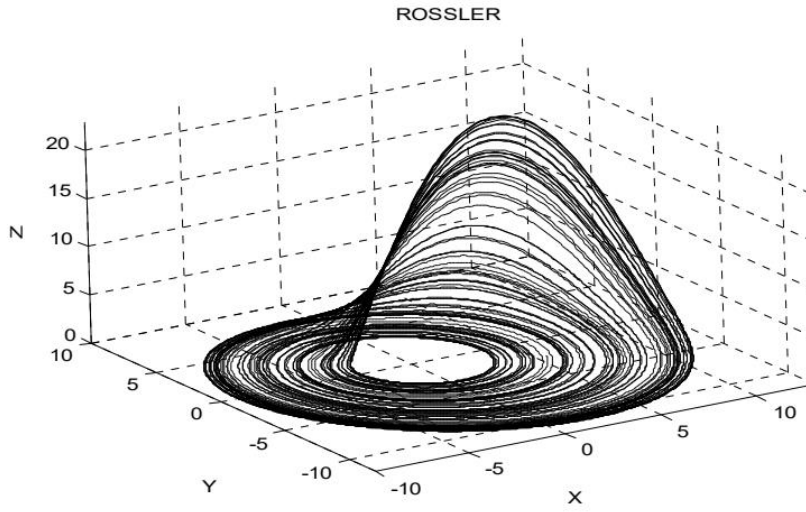
Denklem 2.5. Rosler çekicine ait denklem

Burada a, b, c sistem parametreleridir. Örnek olarak, $a = 0,2$, $b = 0,2$ ve $c = 5,7$ parametreleri kullanılarak ve belirli başlangıç koşulları altında kaotik çözümler bulunmuştur ve Şekil 2.6'da ise Rosler sisteminin x, y ve z durum değişkenlerinin zamana göre değişimi sunulmuştur.



Şekil 2.6. Rossler sisteminin x,y ve z durum değişkenlerinin zamana göre değişimi ($x_0 = 0, 1, y_0 = 0.1, z_0 = 0.1$)

Rossler çekicisine ait faz portreleri Şekil 2.7’de üç boyutlu olarak sunulmuştur.



Şekil 2.7. Rossler çekicisine ait faz portreleri

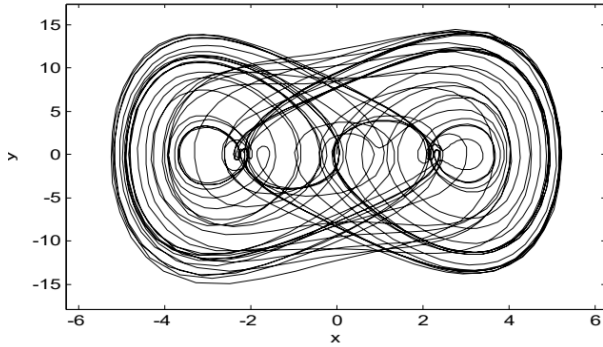
Duffing Çekicisi: Duffing çekicisi, Duffing osilatörü olarak bilinir. Doğrusal olmayan bir sistemin faz uzayındaki kaotik davranışını temsil eder. Bu çekici yay, doğrusal olmayan elektronik devreler, süper iletken Josephson parametrik kuvvetlendirici, plazmalardaki iyonize dalgalar gibi fiziksel sistemler için model olarak kullanılmaktadır (Guckenheimer & Holmes, 2013). Duffing osilatörü Denklem 2.6 ile tanımlanmaktadır.

$$\ddot{x} + r\dot{x} + w_0^2 x + \beta x^3 = f \cos(\omega t)$$

Denklem 2.6. Duffing osilatörü

Burada, r sönüm katsayısı, w_0^2, β sistem parametreleri (doğrusal ve doğrusal olmayan kuvvet katsayıları), f zorlayıcı kuvvetin genliği ve ω zorlayıcı kuvvetin açısal frekansdır.

Duffing osilatörü sistemin dinamiklerini değiştiren βx^3 doğrusal olmayan terimi tarafından diğer temel harmonik osilatörlerden ayrılmaktadır. Burada örnek bir kaotik cevap için $r = 0,2$, $w_0^2 = -1$, $\beta = 1$, $f = 27$ ve $\omega = 1,33$ alınarak Şekil 2.8'deki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 2.8. Duffing osilatörü (Kaynak: Pehlivan, 2007)

Chua Çekicisi: Chua devresinin kaotik davranışını temsil eden faz uzayı geometrisidir. Chua devresi, kaos teorisi ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin incelenmesinde sıkça kullanılan bir elektronik devredir. Leon O. Chua tarafından tanımlanmıştır ve aşağıdaki denklemlerle modellenir (Chua vd., 1986).

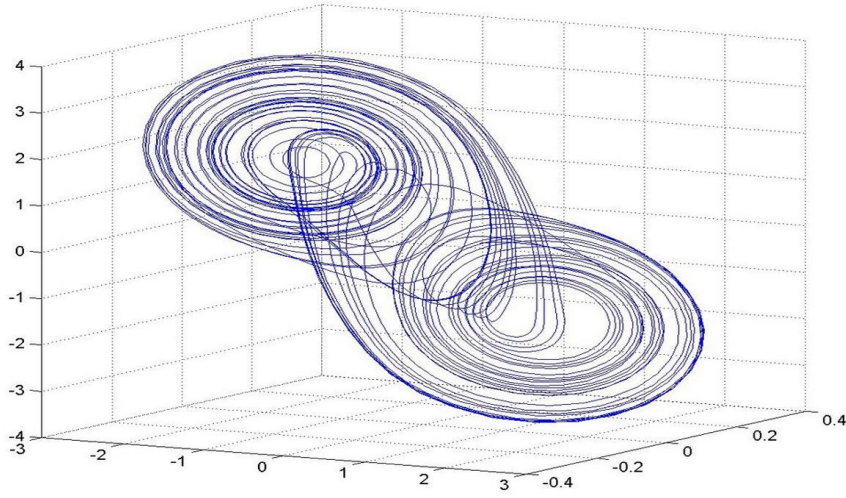
$$\dot{x} = \alpha(y - x - f(x))$$

$$\dot{y} = x - y + z$$

$$\dot{z} = -\beta y$$

Denklem 2.7. Chua devresinin diferansiyel denklemi

Burada x, y, z durum değişkenleri, α ve β sistem parametreleri ve $f(x)$ Chua diyotunun doğrusal olmayan karakteristik fonksiyonudur.



Şekil 2.9. Chua çekicisinin bir görüntüsü

Van Der Pol Osilatörleri: kaotik işaret üreten başka bir kaotik çekici de Van der pol çekicileridir. Sisteme ait dinamik denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\dot{x} = y + \mu(x - x^3) ; (\mu > 0)$$

$$\dot{y} = -x$$

Denklem 2.8. Van der pol çekicisinin dinamik denklemi

Henon Çekicisi: İki boyutlu kesikli zamanlı dinamik sistemlerden biridir ve Fransız astronom Henon tarafından ortaya konmuştur (Hénon, 2004). Sisteme dinamik denklemler aşağıdaki eşitliklerde sunulmuştur.

$$x_{t+1} = 1 + y_t - ax_t^2$$

$$y_{t+1} = bx_t$$

Denklem 2.9. Henon çekicisi dinamik sistemleri

2.3. Fraktallar ve Kaos

2.3.1. Fraktal Geometri

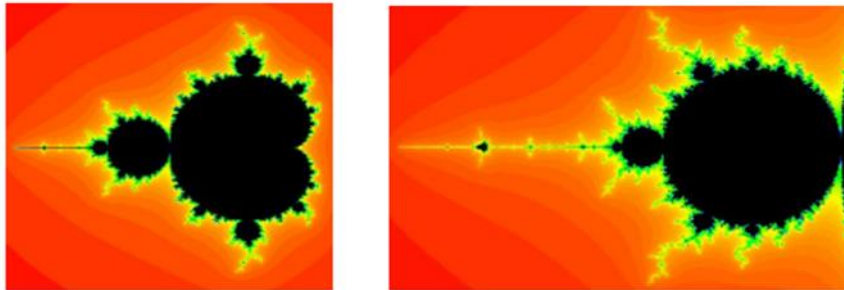
Fraktallar, doğada ve matematikte oldukça sık karşılaşılan geometrik şekillerdir. Kendine benzerlik gösteren ve her ölçekte aynı desenleri tekrarlayan bir küme genellikle fraktal olarak adlandırılır. Fraktalların en önemli özelliklerinden biri, kendilerine benzerlik ölçeğinin sonsuzluğudur. Yani, bir fraktalın herhangi bir parçası, bütünün kendisiyle aynı

özellikleri taşır. Fraktallar, doğada farklı şekillerde görülebilir. Örneğin, kar taneleri, yıldızlar, ağaç dalları, dağlar, nehirler, vb (Mandelbrot & Mandelbrot, 1982).

1883 yılında Georg Cantor tarafından oluşturulan Cantor kümesi, fraktal teorisi ve uygulamaları için basit ve mükemmel bir örnek olduğundan, en önemli ve etkili fraktallardan biri olarak kabul edilir. Helge von Koch'un çalışmalarında kendine benzerlik fikri daha fazla ilgi görmüştür. 1904'te, kendisiyle hiçbir zaman kesişmeyen, sürekli fakat türevlenemeyen bir eğri tasarladı. Bu eğri, en basit düzenli fraktallardan biri olarak kabul edilir. Wacław Sierpiński, fraktallar alanına önemli katkılarda bulunan matematikçilerdendir. 1916'da Sierpiński üçgeni olarak bilinen ünlü üçgen fraktalını tanıttı. Bu fraktal, başlangıç üçgeninden simetrik parçaların çıkarılmasıyla oluşan yinelemeli bir işlemle üretilir. Sierpiński ayrıca, Sierpiński halısı olarak bilinen kare bir fraktal da geliştirmiştir.

Julia kümeleri, yinelemeli fonksiyonların dinamikleri kullanılarak oluşturulmuştur ve Gaston Julia ile Pierre Fatou tarafından 1917-19 yıllarında keşfedilmiştir (Mandelbrot & Mandelbrot, 1982). Aynı dönemde matematikçi Felix Hausdorff, fraktalların geometrik karmaşıklığını incelemek ve karakterize etmek için çok önemli bir araç haline gelen kesirli boyut kavramını formüle etti. Paul Lévy, kendine benzer eğriler ve yüzeyler üzerinde çalıştı ve 1938'de yeni bir fraktal eğri olan Lévy C eğrisini tanımladı.

Bugün fraktal geometri olarak bilinen alan, yirminci yüzyılın son çeyreğinde Benoit Mandelbrot tarafından geliştirildi. Mandelbrot, fraktal şekilleri incelemek ve oluşturmak için bilgisayarı kullanan ilk kişilerden biriydi. 1979'da Mandelbrot, kendi adıyla anılan Mandelbrot setini ve Julia setlerini görselleştirdi (Mandelbrot & Mandelbrot, 1982). Şekil 2.10'da Mandelbrot kümesinin bütünü ve farklı ölçekteki bir görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Mandelbrot Kümesi ve Mandelbrot Kümesinin kuyruk kısmı (Kaynak: Çilingir, 2023)

Fraktaller, her ölçek seviyesinde benzer görünen yapılardır. Klasik geometrik boyutlardan farklı olarak, fraktallerin fraktal boyutları kesirli olabilir.

2.3.2. Kaos ve Fraktallerin İlişkisi

Kaotik sistemlerde çekiciler genellikle fraktal yapıya sahiptir. Kaotik çekiciler, sistemin uzun vadeli davranışını tanımlar ve fraktal geometriye sahiptirler.

Birçok araştırma, kaos ve fraktal geometri arasında yakın bir ilişkinin gözlemlenebileceğine dikkat çekmiştir. Bu ilişki, örneğin Julia ve Mandelbrot kümelerini oluşturmak için kullanılan Fatou-Julia iterasyonunun dinamiklerinde görülebilir. Sınıra yakın iki komşu nokta, tamamen farklı davranışlara sahip olabilir. Bu durum, fraktal yapılardaki hassasiyeti ortaya koymaktadır. Kaos, dinamiklerin doğasına bağlı olarak yörüngelerin düzensizlik ve ırsaklık durumunu anlatırken, fraktal kavramı karmaşık geometrik yapıları incelemek için kullanılabilir. Bu nedenle, kaos ve fraktallar arasındaki bağlantı, bir yörüngenin faz uzayını ne ölçüde doldurduğunu ölçmek için fraktal boyut kullanıldığında daha net hale gelir. Başka bir deyişle, faz uzayındaki yörüngenin fraktal boyutu, tuhaf bir çekicinin varlığına işaret eder (Moon, 2008). Fraktalların kaotik doğası üzerine yapılan temel çalışmalar, yalnızca tamamen bağlantısız fraktallar altında kategorize edilen belirli türler için yapılmıştır (Barnsley, 2014; M. Chen vd., 2004; Devaney, 2018).

2.3.3. Julia Seti

Julia seti, karmaşık dinamik sistemlerde belirli iterasyonlar sonucunda ortaya çıkan fraktal yapılardır. Bu setler, her bir iterasyon sonucunda belirli bir noktalar kümesi oluşturarak karmaşık ve kendine benzer desenler üretir. Fraktal geometri ve kaotik sistemlerle ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanılırlar. Julia setleri, ilk olarak Fransız matematikçi Gaston Julia tarafından 1918'de tanımlanan ve daha sonra 20. Yüzyılın sonlarında Benoît Mandelbrot tarafından popüler hale getirilen kompleks dinamik sistemlerin önemli bir sınıfıdır. Fraktal geometri çalışmalarında önemli rol oynamıştır. Julia setleri, belirli bir kompleks fonksiyonun iterasyonlarıyla oluşturulan noktaların oluşturduğu kümelerdir. Julia kümesi bir fonksiyonun dinamiğini araştırmak için kullanılır. Karmaşık sayılar kümesi üzerinde tanımlı dönüşümlerin tekrarlanmasıyla oluşturulan karmaşık dinamik sistemlerdir (Douady, 1982; Fatou, 1920; Julia, 1918).

Julia setleri genellikle Denklem 2.10'da tanımlanan kompleks fonksiyonun iterasyonlarıyla incelenir. İterasyon, matematiksel bir sürecin tekrarlı uygulanmasıdır. Örneğin Denklem 2.10'da verilen Julia seti denkleminde z_0 başlangıç değeri alınır ve bu değer fonksiyona tekrar tekrar uygulanarak z_1, z_2, z_3 vb. değerler elde edilir. Her bir adımda fonksiyon, bir

önceki değeri alarak yeni bir değer üretir. Bu süreç, belirli bir duruma ulaşılan veya belirli bir koşul sağlanana kadar devam eder.

$$z_{n+1} = z_n^2 + c$$

Denklem 2.10. Julia seti

Burada, z kompleks düzlemde bir nokta, c ise sabit bir kompleks sayıdır. Bir noktanın Julia setine ait olup olmadığını belirlemek için, bu noktanın iterasyonlar sonucunda sınırlı kalıp kalmadığına bakılır. Yani, Julia seti fonksiyonunun iterasyonları sonucunda elde edilen değerler sonsuza gitmezse, bu nokta Julia setine aittir.

Julia setleri karmaşık ve fraktal yapıdadır. Benzer desenlerin tekrarından oluşur. Julia setleri, kaotik sistemlerin görselleştirilmesinde önemli bir araçtır ve fraktal özelliklere sahiptir.

2.4. Kaos Teorisinin Uygulama Alanları

Kaos teorisi hava durumu modellerinin gözlemlenmesinden doğmuştur, ancak çeşitli diğer durumlara da uygulanabilir hale gelmiştir. Günümüzde kaos teorisinden yararlanan bazı alanlar mimarlık, peyzaj, ekonomi, finans, tıp, psikoloji ve meteoroloji gibi alanlardır. Mühendislik alanlarında, kaotik dinamikler şu alanlarda kullanılmıştır.

Gerçek sistemlerin modellenmesi, mevcut sistemlerin performansının artırılması, özellikle güvenli iletişim, anten ve radar sistemleri, biyomedikal mühendisliği, inşaat, makine, robotik, güç sistemleri vb. alanlarda kullanılmaktadır.

Kaos, güvenli olmayan iletişim ağları üzerinden bilgi güvenliğinde yaygın uygulamalar bulmuştur (Pecora & Carroll, 1990). Başlangıç koşullarına hassas bağımlılıkları ve zamanın herhangi bir noktasında faz uzayı ve zaman serilerindeki dinamiklerinin geniş bant spektrumları, mesaj taşıyan sinyalleri (görüntü, veri, video) saldırganın müdahalesinden (bilgisayar korsanlığı, gizli dinleme, veri hırsızlığı vb. yoluyla) maskeleyerek için etkili bir şekilde kullanılabilir. Literatürdeki birçok çalışma kaos tabanlı kriptografinin geleneksel kriptografiye göre etkinliğini ve daha iyi performansını ortaya koymuştur (Seyedzadeh & Mirzakuchaki, 2012; Shao & Gao, 2008; Tong & Cui, 2007; Wang & Gu, 2014).

Son yıllarda robotik bilimi, robotların imalat endüstrilerindeki bilinen sabit robotlardan, konuşabilen, koşabilen, insanlarla ve çevreyle etkileşime girebilen ve ayrıca tipik insan tepkilerini taklit etmek için duyarlarla donatılmış evrimsel robotlara dönüşmesiyle yaygın bir ilgi ve uygulama alanı kazanmıştır. Günümüzde, kaotik dinamikleri kinematiklerine dahil

ederek tasarlanmış kaotik robotlar bulunmaktadır (Buscarino vd., 2010). Bu yenilikler, bu robotların kaotik otonom davranışlar sergilemesini sağlamaktadır. Bu tür robotlar, mayın temizleme ve çim biçme görevleri gibi arama ve kurtarma operasyonlarında uygulama alanı bulmuştur (Ashraf, 2012).

Kaos, güç sistemlerinin karmaşık dinamiklerinin performanslarını artırmıştır. Güç sistemleriyle ilişkili karmaşık dinamikler kaos yardımıyla modellenmiş ve kontrol edilmiştir. Güç sistemleri esasen doğrusal olmayan dinamik sistemlerdir. Güç arızalarının, sistemin bozulmalara verdiği dinamik tepkinin bir sonucu olduğu ve sonuçta sistem aşırı yüklendiğinde istikrarsızlığa ve voltaj çökmesine yol açtığı bildirilmektedir (Wildberger, 1994). Bu süreç kaos ile modellenmiş ve deneysel olarak bastırılmıştır.

Güç elektroniği cihazlarının çalışması, çeşitli doğrusal olmayan dinamikler üreten akım topolojilerinin döngüsel anahtarlama ile karakterize edilir. Kaos, DC-DC dönüştürücüler ve buck dönüştürücüler gibi cihazlarda bu dinamikleri denetlemek için araştırılmış ve kullanılmıştır (Hamill vd., 1992; Hamill & Jeffries, 1988).

Kaotik olayların incelenmesine ilişkin literatür, kaosun elektrikli sürücülerde gözlemlenmesinden bu yana çoğalmıştır (Chau & Wang, 2011). Kaos ve çatalanmalar endüksiyon motoru üzerine yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir (Kuroe & Hayashi, 1989). Daha sonra, kaosun uygulamalarına yönelik kapsamlı araştırmalar sırasında çeşitli dönüm noktalarına ulaşılmış ve örneğin çamaşır makinelerinde olduğu gibi elektrik motorlarının performans iyileştirmesinde kaotik dinamiklerin yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır (Ye vd., 2006).

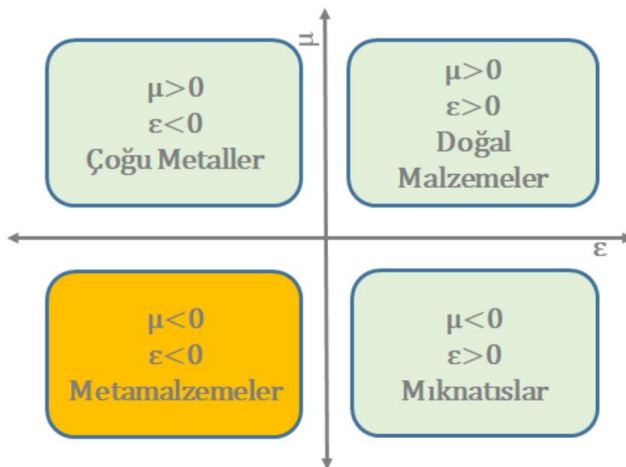
İnternet üzerinden veri trafiğinin kaotik olabileceği gösterilmiştir (Arrowsmith vd., 2003). Bu nedenle, uygun kontrol tekniklerinin (bulanık, sinir ağı ve bazı evrimsel algoritmalar) uygulanması, tıkanıklık giderme ve kontrol sürecini geliştirebilir. Kaos çalışmalarındaki son gelişmeler, kesirli mertebeden kaos çalışmalarıyla sonuçlanmıştır. Kesirli mertebeden kaos, kesirli kalkülüs (integral ve türevler) ile modellenir (Oldham & Spanier, 1974). Kesirli hesap, keyfi mertebeden integral ve türev alma ile ilgilenir. Kesirli mertebeli sistemler ortaya çıkana kadar, dikkatler yalnızca tamsayı mertebeli kaotik sistemlere odaklanmıştı. Tamsayı mertebeli sistemler, mertebeleri tam sayı boyutlarında olan sistemlerdir, örneğin 1.2.3 ... vb. Tamsayı mertebeli kaotik dinamiklerin kullanımı sınırlıdır ve siber suçluların kaba saldırıları nedeniyle güvenlik ihlallerine karşı hassastırlar. Bununla birlikte, kesirli düzen sistemleri,

bu saldırı dinamikleriyle ilişkili strese dayanabilecek sistemler tasarlamak için daha iyi güvenlik şablonları sunar. Bunlar yeni kriptografik sistemler üzerinde gösterilmiştir (Muthukumar & Balasubramaniam, 2013; Xu vd., 2014; Yang vd., 2013).

Kaos kontrol tekniklerindeki gelişmeler, özellikle zaman ve enerji açısından kritik uygulamalarda, geleceğin birçok yeni mühendislik buluşu üzerinde etkili olmayı vaat etmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, kullanıcı spesifikasyonlarını ve değişen toplumsal dinamikleri karşılamak için mühendislik sistemlerine ek özellikler eklendikçe tasarım karmaşıklığı artmaya devam etmektedir. Bu nedenle, doğrusal olmayan bir olgu olarak kaosun mühendislik sistem tasarımı ve analizinde giderek daha ilgili ve yararlı olmaya devam edeceği yadsınamaz. Modern dünya, otomasyonun insanı belirli görevler için gereksiz kılmaya devam edebileceği yeni bir mühendislik tasarımları çağına doğru yönelmeye devam ederken, Kaos, fizyoloji, kardiyoloji, psikoloji, biyotıp, biyomekanik, ekonomi, finans ve hisse senedi pazarlaması gibi alanlarda karmaşık yaşam zorluklarıyla başa çıkma bilgisinin sınırlarını genişletmeye ve genişletmeye devam edecektir.

2.5. Metamalzemeler

Metamalzemeler doğada bulunmayan, olağanüstü elektromanyetik özellikler sergilemek üzere yapay olarak inşa edilen periyodik yapılardır. Kayıpsız bir ortamda, elektromanyetik özellikler, malzemelerin makroskopik parametreleri olan dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) tarafından belirlenir (Ramakrishna, 2005). Bu nedenle bir ortam, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, yapısal parametrelerine bağlı olarak dört grupta sınıflandırılabilir (Engheta & Ziolkowski, 2006).



Şekil 2.11. Yapısal parametrelere göre malzemelerin sınıflandırılması (Kaynak: Dulkadir, 2021)

Pozitif dielektrik sabitine ve manyetik geçirgenliğe sahip ortamlar çift pozitif ortam (ÇPO) olarak adlandırılır ve doğadaki malzemelerin çoğu bu gruptadır. Bu tür malzemelerde elektromanyetik dalgaların yayılması mümkündür. En az bir negatif yapısal parametreye sahip ortamlar tek negatif ortam (TNO) olarak adlandırılır ve epsilon-negatif (ENO) ve mu-negatif (MNO) ortamlar olarak iki alt kategoride sınıflandırılır. ENO ortamlarda yalnızca negatif dielektrik sabiti vardır, MNO ortamlarda ise yalnızca negatif manyetik geçirgenlik bulunur. Bu tür ortamlarda belirli koşullar altında elektromanyetik dalgaların yayılması mümkündür, ancak genellikle zorluklar ve sınırlamalar vardır. Belirli frekans bölgelerinde, birçok plazma ve değerli metaller (altın ve gümüş gibi) negatif dielektrik davranışı sergilerken, ferromanyetik malzemeler negatif manyetik geçirgenlik davranışı sergiler. Bazı yapay malzemeler de ÇPO, ENO ve MNO özellikleri gösterecek şekilde inşa edilebilir (Hao & Mittra, 2008). Elektromanyetik dalgaların yayılması, aynı anda negatif dielektrik sabitine ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip olan ve çift negatif ortam (ÇNO) olarak adlandırılan malzemelerde de mümkündür. Böyle bir malzeme henüz doğada keşfedilmemiştir; ancak yapay olarak inşa edilebilmiştir (Pekmezci, 2018).

2.5.1. Metamalzeme Teorisi

MTM'ler, sol elli malzemeler olarak da bilinirler. "Meta" terimi, doğada bulunmayan özellikler gösteren anlamına gelir ve "malzeme" terimi ile birleşerek bu özel malzemeleri tanımlar. Metamalzemelerin geçmişi, J.C. Bose'un 1898'de milimetre-dalga frekansında bükülmüş jüt çifti polarizörü üzerine yaptığı öncü çalışmalara ve K.F. Lindman'ın 1914'te mikrodalga frekansında elektromanyetik kiralite üzerine yaptığı çalışmalara kadar uzanabilir. 1940-1960 yılları arasında yapay dielektrikler üzerinde de kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte, metamalzeme üzerine araştırmaların başlangıcı, aslında 1968'de V.G. Veselago'nun ufuk açıcı çalışmasıyla başlar (Veselago, 1968). Veselago, Maxwell denklemlerinin çözümlerini negatif izotropik dielektrik ve manyetik geçirgenliğe sahip varsayımsal ortamlarda incelemiş ve bu tür malzemelerin bazı mantık dışı olaylar sergileyeceğini gözlemlemiştir. Doğada bulunmayan bu tür maddelere "sol elli malzemeler" adını vermiştir. "Metamalzeme" terimi ise 1999 yılında kompozit malzemeler üzerine yapılan bir DARPA çalıştayında R. Walser tarafından icat edilmiştir (Kar, 2021).

Metamalzemeler, genellikle ışığın dalga boyundan çok daha küçük birim hücre boyutuna sahip periyodik yapılar olarak tanımlanmaktadır. MTM yapıların çalışma frekanslarına

uygun elektromanyetik dalgalar, bu yapıları sürekli (veya etkin) bir ortam olarak algılar. Bazı araştırmacılara göre, MTM'ler aynı zamanda elektromanyetik dalga boyuyla eş veya karşılaştırılabilir boyutlara sahip fotonik kristaller (PC'ler) ve elektromanyetik bant aralıklı (EBG) yapıları da kapsamaktadır (Martin, 2015).

MTM'ler dışsal olarak homojen değildirler, fakat gelen bir elektromanyetik dalga için etkili bir şekilde homojen davranırlar. MTM'lerin karakteristikleri ve işlevleri, oluşturuldukları malzemenin kimyasal yapısından ziyade yapısal özellikleri tarafından belirlenir. Böyle bir yapay malzeme, boyutları küçük ölçekli olan ve periyodik yapıdaki birim hücrelerle gerçekleştirilir ($h \ll \lambda$, burada h bir birim hücrenin karakteristik boyutu ve λ çalışılan dalga boyudur). Dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik, herhangi bir malzemenin temel parametreleridir. Normal/doğal malzemelerde (sağ eli malzemelerde), hem dielektrik sabiti hem de manyetik geçirgenlik pozitifdir. Buna karşın, sol eli metamalzemelerde, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik aynı anda negatifdir. Ancak, metamalzemeler arasında sadece ENO veya sadece MNO özellikler sergileyenler de bulunmaktadır.

MTM'ler, mükemmel lensler, sensörler, absorpsiyon, görünmezlik pelerinleri ve antenler gibi alanlarda umut verici özellikleri nedeniyle son yıllarda dikkat çekmiştir. Pendry tarafından yapılan bir çalışmada, ışığın dalga boyu ile sınırlı geleneksel mercekler yerine negatif kırılma indisine sahip MTM'ler kullanılarak, iki boyutlu bir görüntünün tüm Fourier bileşenlerine odaklanmanın mümkün olduğu ve bu malzemelerle mükemmel lenslerin elde edilebileceği gösterilmiştir (Pendry, 2000). Ziolkowski ve Heyman, çift negatif meta malzemelerde elektromanyetik dalga yayılımını analitik ve sayısal olarak analiz ederek saçılma ve yayılma özelliklerini elde ettiler ve bunları mükemmel merceklerle uyguladılar (Ziolkowski & Heyman, 2001). Karaaslan ve Bakir, X-bandında çalışan kiral SRR MTM'leri kullanan sensörler tasarladı. Sensör tasarımlarının hassasiyetini hem analitik hem de sayısal olarak kanıtladılar (Karaaslan & Bakir, 2014). Landy ve arkadaşları, simülasyon yoluyla meta materyalleri kullanarak belirli bir frekans bandında yaklaşık %96'lık bir absorpsiyon oranı elde ettiler. Tasarım da deneysel olarak üretildi, ancak imalat hataları nedeniyle absorpsiyon oranı %88 olarak ölçüldü (Landy vd., 2008). Schuring ve arkadaşları deneysel olarak ilk kez MTM yapımı bir perdenin arkasına bakır bir silindiri gizlediler (Schurig vd., 2006).

Metamalzemeler ayrıca antenlerin yönlülüğünü, kazancını, verimliliğini ve bant genişliğini artırmak için kullanılır. Akçelik'in çalışması, ürettiği metamalzemenin, bir yama antene kıyasla 17 kat daha fazla bant genişliğine ulaştığını ve daha küçük boyutlu olduğunu göstermiştir (Akçelik vd., 2015).

2.5.2. Metamalzemelerin İletim Özellikleri

Metamalzemeler, iletken katman, yalıtkan katman ve periyodik iletken şekillerin bir araya gelmesiyle oluşan bir yapıya sahiptir. Bu yapı, elektromanyetik dalgalarla etkileşimlerini değiştirebilecek şekilde periyodik olarak düzenlenmiş boyutlara ve dizilimlere sahiptir. Bu metamalzemelerde, elektrik alan vektörü ($\vec{E}$), manyetik alan vektörü ($\vec{H}$) ve dalga vektörü ($\vec{k}$) sağ-el üçlü vektör formuna uymaktadır. Ayrıca Poynting vektörü $\vec{S}$ ile dalga vektörü zıt yönlerde doğru işaret etmektedir (Bose, 1898).

Malzemenin iletkenlik özellikleri ve elektromanyetik dalga yayılmasını belirleyen temel parametreler, malzemenin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik parametreleridir. Bu parametrelerle ilişkili olan dalga vektörü ve kırılma indisinin (n) genel tanımı Denklem 2.11'de tanımlanmıştır.

$$k = \sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}\omega c_0^{-1} = n\omega c_0^{-1}$$

$$c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Denklem 2.11. Dalga vektörü

Burada ω açısal frekansı c_0 ise ışık hızını ifade etmektedir. Sağ-el üçlü vektör formuna sahip malzemeler (normal malzemeler) için dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri pozitifdir. Metamalzemelerde ise bu değerler negatiftir. Veselago tarafından yapılan çalışmada, negatif dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerine sahip metamalzeme ile negatif kırılma indisinin (n) teorik olarak elde edilebileceği, Denklem 2.12'de gösterilmiştir.

$$n = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$$

$$\epsilon_r < 0, \mu_r < 0$$

Denklem 2.12. Kırılma indisinin dielektrik ve manyetik geçirgenlik ile ilişkisi

Metamalzemelerin karakteristik özelliklerini açıklamak için Maxwell denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \text{ (Faraday Yasası)}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{J} \text{ (Maxwell-Ampere Yasası)}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \text{ (Gauss yasası)}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Manyetik monopol yok)}$$

Denklem 2.13. Maxwell denklemleri

Denklem 2.13'te $\vec{E}$ elektrik alan vektörü, $\vec{H}$ manyetik alan vektörü, $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğu, $\vec{D}$ elektrik akı yoğunluğu, $\vec{J}$ akım yoğunluğu ve ρ elektrik yük yoğunluğu olarak verilmiştir.

Faraday'ın indüksiyon yasası, zamana bağlı değişen bir manyetik alanın bir elektrik alanı oluşturduğunu ifade eder ve EM indüksiyonun temelini oluşturur.

Amper yasasında yer alan $\frac{d\vec{D}}{dt}$ yer değiştirme akımı, elektromanyetik dalgaların yayılmasının varlığını tahmin etmek ve yük korumasını sağlamak için gereklidir. $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ eşitliğin sonucu sıfırdır çünkü manyetik monopol yükleri yoktur.

Gauss'un elektrik alanı yasası, elektrik yüklerinin elektrik alanlar oluşturduğunu ve elektrik alanının bir kapalı yüzeydeki elektrik yüküne orantılı olduğunu belirtir.

Denklem 2.14'te ise manyetik akı yoğunluğu, elektrik akı yoğunluğu eşitlikleri verilmiştir.

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

Denklem 2.14. Manyetik ve elektrik akı yoğunluğu

Bu denklemler, Maxwell denklemleri ile birlikte, EM dalgaların malzemelerde nasıl yayıldığını ve malzemelerin bu dalgalara nasıl tepki verdiğini anlamamıza yardımcı olur.

Düzgün düzlem dalga için dalga vektörü ($\vec{k}$) yönünde ilerleyen bir durumda, elektrik alanı ve manyetik alanı ifade etmek için sağ-el kuralı kullanılır. Sağ elin dört parmağı, elektrik

alanının yönünden manyetik alanın yönüne doğru döndürüldüğünde, başparmak dalga vektörü yönünü gösterir ve aşağıdaki dalga eşitlikleri elde edilir (Caloz & Itoh, 2005).

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H}$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E}$$

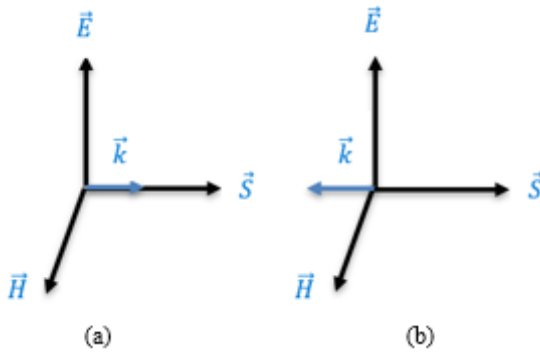
Denklem 2.15. Dalga vektörünün elektrik ve manyetik alan ile ilişkisi

Elde edilen eşitlikler, doğal malzemelerin sağ-el üç vektör formuna ve metalmalzemelerin sol-el üç vektör formuna sahip özelliklerini gösteren eşitliklerdir. Bu eşitliklerle birlikte Poynting vektörü ($\vec{S}$) de Denklem 2.16'da tanımlanmıştır (Caloz & Itoh, 2005). Poynting vektörü elektrik ve manyetik alan ile ilişkilendirilerek elektromanyetik dalganın enerji akışını gösterir.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Denklem 2.16. Poynting vektörü

Poynting vektörü hem dielektrik sabiti hem de manyetik geçirgenlik negatif olduğunda yön değiştirmez. Dalga vektörü, sağ-el üç vektör formuna sahip malzemeler için Poynting vektörü ile aynı yöndedir. Ancak sol-el üç vektör formuna sahip metalmalzemeler için Poynting vektörünün zıt yönündedir (Caloz & Itoh, 2005). Bu durum Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Poynting vektörü gösterimi; (a) doğal malzeme ortamı ve (b) metalmalzeme ortamı

Poynting vektörü, dalga kaynağından başlayarak yayılma yönünde ilerler. Dalga vektörü sağ-el üç vektör formuna sahip malzemeler için Poynting vektörü ile aynı yöndedir. Ancak sol-el üç vektör formuna sahip metalmalzemeler için Poynting vektörünün zıt yönündedir.

Bu, sağ-el ve sol-el üç vektör formuna sahip malzemeler arasındaki temel farklardan biridir (Caloz & Itoh, 2005).

2.5.3. Negatif Kırılma İndisi ve Ters Snell Yasası

Bir ortamın kırılma indisi, o ortamda yayılan ışığın veya elektromanyetik dalgaların vakumdaki hızının ortam içindeki hızına oranıdır (Balanis, 2016; Caloz & Itoh, 2005). Ortamın frekansa bağlı kırılma indisi Denklem 2.17'de verilmiştir.

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)}$$

Denklem 2.17. Frekansa bağlı kırılma indisi

Metamalzemelerde, frekansla değişen dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri, belirli bir frekans aralığında negatif olabilir. Bu durumda, $\varepsilon_r(\omega)$ ve $\mu_r(\omega)$ için kutupsal gösterim şu şekildedir:

$$\varepsilon_r(\omega) = |\varepsilon_r(\omega)| \cdot e^{j\pi}$$

$$\mu_r(\omega) = |\mu_r(\omega)| \cdot e^{j\pi}$$

Denklem 2.18. Frekansla değişen dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri

Bu denklemler Denklem 2.17'de yerine konulursa Denklem 2.19'daki eşitlikler elde edilir.

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)e^{j2\pi}} = \sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)}e^{j\pi} = -\sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)}$$

Denklem 2.19. Frekansa bağlı kırılma indisinin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleriyle ilişkisi

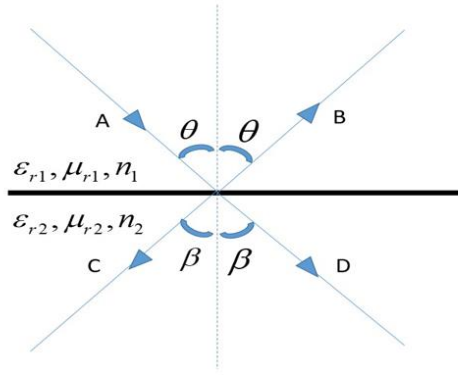
Kırılma indisi, elektromanyetik dalgaların yayılım yönünü belirleyen kritik bir faktördür. Doğada bulunan malzemelerde, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri genellikle pozitifdir ve bu durumda kırılma indisi de pozitif olur. Bu, elektromanyetik dalgaların kaynaktan dışarı doğru yayıldığı anlamına gelir. Ancak, metamalzemelerde, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri aynı anda negatif olabilir. Bu durumda, kırılma indisi negatif bir değere sahip olur ve elektromanyetik dalgalar kaynağa doğru yayılır. Eğer bir ortamın dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinden biri pozitif ve diğeri negatifse, kırılma indisi sanal bir değer alır ve elektromanyetik dalga yayılımı gerçekleşmez; bunun yerine sönümlenme meydana gelir (Balanis, 2016; Delihasanlar, 2020).

Tablo 2.1 kırılma indisi işaretlerinin ne anlama geldiğini göstermektedir.

Tablo 2.1. Kırılma indisi işaret kuralları

	$\varepsilon_r(\omega) > 0$	$\varepsilon_r(\omega) < 0$
$\mu_r(\omega) > 0$	+	j
$\mu_r(\omega) < 0$	j	-

Şekil 2.13, kırılma indisi etkisi altında iki farklı ortam arasında elektromanyetik dalganın nasıl geçtiğini göstermektedir. Şekle göre, 1. ortamdan A yönünde gelen elektromanyetik dalga, 2. ortama geçerken bir kısmı D yönünde iletilirken, diğer kısmı B yönünde yansıtılıyor. Ancak, 2. ortam bir metamalzeme olduğunda, ters Snell yasası devreye girer ve A yöünden gelen elektromanyetik dalga C yönünde iletilir.



Şekil 2.13. İki farklı ortam arasındaki elektromanyetik dalga geçişi (Kaynak: Delihasanlar, 2020)

İlk ve ikinci ortamların dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri sırasıyla $\varepsilon_{r1}, \mu_{r1}$ ve $\varepsilon_{r2}, \mu_{r2}$ olarak gösterilmiştir.

Snell yasası, ışığın bir ortamdan başka bir ortama geçerken kırılma açısını hesaplamak için kullanılan temel bir optik yasadır. Hollandalı matematikçi Willebrord Snellius tarafından 1621 yılında keşfedilmiştir. Yasa, ışığın kırılması sırasında, gelen ışın, kırılan ışın ve normal (iki ortamın sınırına dik çizgi) arasındaki ilişkiyi tanımlar. Snell yasası aşağıdaki gibi verilmiştir (Balanis, 2016).

$$\frac{\sin \theta}{\sin \beta} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}{\varepsilon_{r1}\mu_{r1}}}$$

Denklem 2.20. Snell yasası

θ ve β sırasıyla elektromanyetik dalgaın geliş ve kırılma açısını ifade etmektedir.

2.5.4. Saçılma Parametreleri

Dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik parametreleri, malzemelerin elektromanyetik dalgalarla nasıl etkileşime gireceği konusunda bize önemli bilgiler sunar. Bu parametrelerin belirlenmesinde saçılma parametrelerinin kullanılması etkili bir yöntemdir. Araştırmacılar, saçılma parametrelerini kullanarak, simülasyon ortamında tasarladıkları yapılar ile gerçekte üretilen yapıların nümerik ve deneysel sonuçlarını karşılaştırabilirler (Delihasanlar, 2020).

Saçılma parametreleri, literatürde ilk kez 1945 yılında Vitold'un çalışmasıyla tanıtılmıştır. 1947 yılında, savaş döneminde, Henry'nin radarlar üzerine yaptığı çalışmalar sırasında, önceki çalışmalardan bağımsız olarak ortaya çıkmıştır (Belevitch, 1962; Van Valkenburg, 1974).

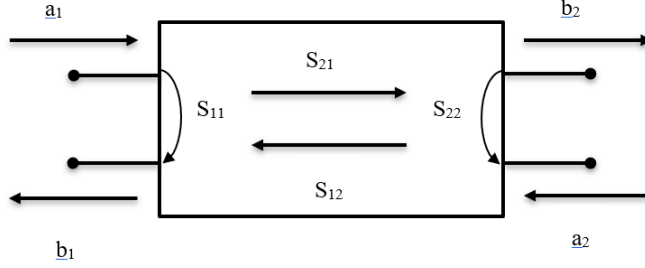
S-parametreleri veya saçılma parametreleri, bir devre, sistem veya malzemenin özelliklerini tanımlamak ve iç yapısı hakkında bilgi edinmek için kullanılan bir tekniktir. Bu parametreler, sistemin bir 'kara kutu' olarak modellenmesine olanak tanır ve elektronik, malzeme bilimi, iletişim sistemleri, mikrodalga ve radar gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Pozar, 2011). Şekil 2.14'te kara kutu modellemesi gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Kara kutu

Yüksek frekanslarda elektrik devrelerindeki gerilim ve akımı tanımlamak ve ölçmek daha karmaşık hale gelir. Bu nedenle, devrenin giriş ve çıkış noktalarındaki elektriksel davranışları anlamak için S-parametreleri kullanılır. S-parametreleri hem genlik hem de faz açısını içeren kompleks sayılardır ve frekansa bağlı olarak değişirler. Eğer bir sistem çok sayıda port içeriyorsa, her biri için bir S-parametresi tanımlanmalıdır; örneğin, N portlu bir sistem için toplam N^2 adet S-parametresi gereklidir. Genellikle, bu parametrelerin hesaplanması iki portlu devreler üzerinden yapılır. Devredeki kapı parametresi, sinyallerin devreye giriş veya çıkış yaptığı noktaları ifade eder (Note, 2006).

İki portlu bir devrenin S-parametrelerini gösteren şematik bir diyagram, Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. 2 portlu devre şematiği

2 portlu bir devre için S-parametreleri şunlardır;

S_{11} , birinci porta uygulanan sinyalin yine birinci porttan yansıyan kısmını temsil eder.

S_{12} , ikinci porta uygulanan sinyalin birinci porttan iletilen kısmını temsil eder.

S_{21} , birinci porta uygulanan sinyalin ikinci porttan iletilen kısmını temsil eder.

S_{22} , ikinci porta uygulanan sinyalin yine ikinci porttan yansıyan kısmını temsil eder.

Denklem 2.19'daki eşitliklerde 2 portlu devrenin S-parametreleri verilmiştir.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

Denklem 2.21. 2 portlu devreye ait S-parametreleri

Burada; a_1 ve a_2 sırasıyla 1 ve 2 numaralı portlara uygulanan giriş dalgalarıdır.

b_1 ve b_2 , sırasıyla 1 ve 2 numaralı portlardan çıkan (yansıyan) dalgalarıdır.

Denklem 2.21'deki eşitlikler Denklem 2.22'deki gibi ifade edilebilir.

$$b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2$$

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2$$

Denklem 2.22. Gelen ve yansıyan dalgaların S-parametreleri cinsinden ifadesi

Denklem 2.22'deki eşitlikler matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

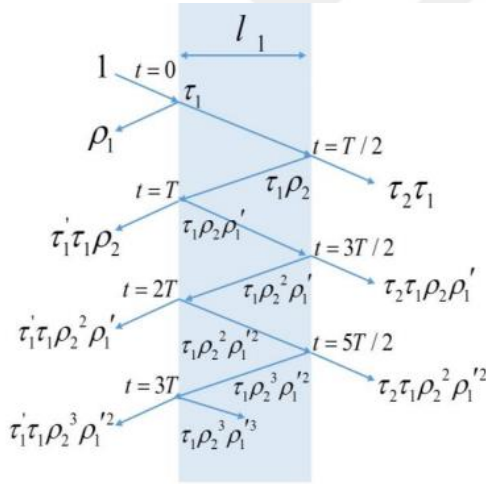
$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Denklem 2.23. S-parametrelerinin matris formu

Denklem 2.23 iki portlu devrelerin matrisi en çok kullanılan ve aynı zamanda daha büyük devrelerin yüksek dereceli matrislerinin oluşturulmasında temel blok olan yapıdır.

2.5.5. Soğurma Teorisi

Bir malzemenin soğurma yeteneği, malzemeye gelen elektromanyetik dalganın ne kadarının yansıtıldığını ve ne kadarının malzemeden geçtiğini belirleyen yansıma ve iletim katsayıları ile ölçülür. Bu katsayılar, çoklu yansıma teorisi ile hesaplanır. Elektromanyetik dalga ilk olarak malzemeye ulaştığında, bir kısmı yansırken geri kalanı malzemeye girer. Malzeme içindeki dalga, son arayüzden bir kısmını yansıtırken, geri kalanı malzemeyi terk eder. Bu süreç, dalga malzeme içinde tamamen kaybolana kadar devam eder (Orfanidis, 2002). Bu durum, Şekil 2.16’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Çoklu yansıma teorisi (Kaynak: Delihasanlar & Yuzer, 2020)

Toplam yansıma katsayısı $R(\omega)$ frekansın bir fonksiyonu olarak yazılır ve Denklem 2.24’de verildiği gibi S-parametreleriyle bulunabilir (Orfanidis, 2002).

$$\Gamma_1(\omega) = \rho_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \tau_1 \tau_1 (\rho_1)^{n-1} \rho_2^n e^{-j\omega n t}$$

$$R(\omega) = \Gamma_1(\omega) = |S_{11}|^2$$

Denklem 2.24. Toplam yansıma katsayısı

Toplam iletim katsayıları ($T(\omega)$), frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilir ve S-parametrelerini kullanarak Denklem 2.25'te belirtildiği şekilde hesaplanabilir.

$$\Gamma_1(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \tau_1 \tau_2 (\rho_1)^n \rho_2^n e^{-j\omega n t} e^{-j\omega t/2}$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2$$

Denklem 2.25. Toplam iletim katsayısı

Malzemelerin frekansa bağlı soğurma gücü (A), Denklem 2.26'da kullanılarak belirlenebilir.

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) = 1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2$$

Denklem 2.26. Malzemelerin frekansa bağlı soğurma gücü

Metamalzeme tabanlı soğurucu yapılar, boş uzay ve hava ortamının empedans değerini metamalzemenin empedans değeri ile eşleştirir. Bu eşleştirme sonucunda, metamalzemeye gelen elektromanyetik dalga yansımaz. Metamalzemenin periyodik rezonatör şekilleri, gelen elektromanyetik dalgaların dalga boyuyla uyumludur. EM dalga, metamalzeme yapısına ulaştığında, periyodik rezonatörler bir yüzey akımı oluşturur ve bu akım elektriksel rezonansa yol açar. Periyodik rezonatör katmanı ve iletken katman, yüzey akımına karşı bir akım üretir ve bu da manyetik rezonansa sebep olur. Elektriksel ve manyetik rezonansın aynı bant genişliğinde gerçekleşmesi durumunda, mükemmel bir soğurucu elde edilir. Soğurulan enerji, omik ısıya dönüştürülür (Ghebrebrhan vd., 2017; Lai vd., 2017; Landy vd., 2008)

2.5.6. Sonlu Entegrasyon Tekniği

Tez çalışmasında CST Microwave Studio yazılımı benzetim programı olarak kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından elektromanyetik parametrelerin belirlenmesi ve model simülasyonlarının yapılması için etkin bir şekilde kullanılır. Bu yazılım, sonlu entegrasyon yöntemi (FIT) temelli bir yazılımdır. Sonlu entegrasyon metodu, uzay koordinatlarına bağlı olarak ayrıklaştırılmış bir yöntem olup, zaman ve frekans domeninde elektromanyetik alan problemlerini nümerik olarak çözer. Bu yöntem, enerji ve yük korunumu gibi sürekli denklemlerin temel topolojik özelliklerini içerir. Sonlu entegrasyon metodu, 1977 yılında Thomas Weiland tarafından bulunmuş ve yıllar boyunca araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Bartsch vd., 1992; Weiland, 1977, 1996). Bu yöntem, tam dalga EM çözümü

yapar ve belirli bir frekans bölgesinde çalışır. Bu yaklaşımın temel metodu, integral formda bir sistem kurarak Maxwell denklemlerini uygulamaktır. Sonlu entegrasyon metodu, her tür malzeme dağılımı ve anizotropi, lineer olmayan ve dağılım gibi malzeme özelliklerinin birleştirilmesi için yapılan geometrik modelleme ve sınır koşullarında yüksek esneklik sunar (Greengard & Rokhlin, 1987; Mohammadian vd., 1991; Thoma & Weiland, 1995; Weiland, 1977). Sonlu entegrasyon metodu, integral formdaki Maxwell denklemlerinin tutarlı bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar.

Bu yöntem Maxwell denklemlerinin, göz önüne alınan bölgede çözümü için bölgenin sonlu, küçük alt bölgelere ayrılmasını önerir. Önce üzerinde çalışılan malzeme ile ilgili bir hesaplama bölgesi seçilir. Hesaplama bölgesi küçük parçalara ayrılır. Yani hesaplama ortamı küçük parçalardan oluşmuş bir örgü halini alır. Dolayısıyla ortam sürekli ortamdandır, ayrılmış ortam haline getirilir. Dikdörtgen ya da küp gibi düzgün bölgelerde bu parçalar birer kare veya küptür. Bunların her birine ızgara denir (Clemens vd., 2000; Jussaume, 2011).

Bu ızgaranın her bir hücresi, küçük bir hacmi temsil eder. Bu hücrelerin kenarları ve yüzeylerinde alan ve akı değişkenleri tanımlanır. Izgara hücre kenarları boyunca voltajları ve ızgara yüzeyleri içinden akıları kullanarak Maxwell denklemlerini frekans veya zaman uzayında doğrudan herhangi bir tür ızgara üzerinde tanımlar. FIT uygulama adımları, Weiland (1977) tarafından belirtildiği şekilde tanımlanabilir. Aşağıda görüldüğü gibi, Denklem 2.27 Gauss Yasasını, Denklem 2.28 Faraday Yasasını, Denklem 2.29 ise Amper Yasasının integral formunu ifade eder.

$$\oiint_{\partial V} D \cdot dA = \iiint_V \rho \cdot dV, \quad \oiint_{\partial V} B \cdot dA = 0$$

Denklem 2.27. Gauss yasası eşitlikleri

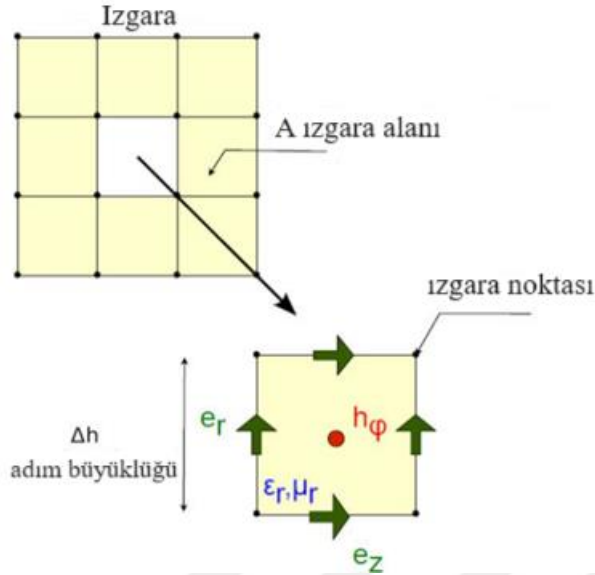
$$\oint_{\partial A} E \cdot dl = \frac{\partial}{\partial t} \iint_A B \cdot dA$$

Denklem 2.28. Faraday yasası eşitliği

$$\oint_{\partial A} H \cdot dl = \iint_A \left(\frac{\partial}{\partial t} D + J \right) \cdot dA$$

Denklem 2.29. Amper yasası eşitliği

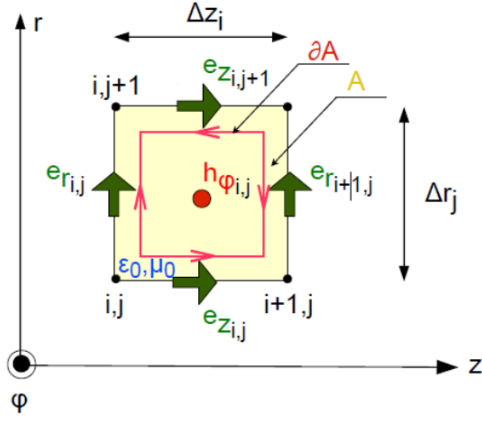
FIT uygulama sürecinin ilk adımı, ızgaranın belirlenmesidir. İkinci adımda, malzeme özellikleri tanımlanır. Üçüncü adımda, alan birimlerinin dağıtılması gerçekleştirilir. Dördüncü ve son adımda ise, uzay ve zaman ayrıştırılır. Şekil 2.17, FIT uygulama adımlarını göstermektedir.



Şekil 2.17. FIT uygulaması (Kaynak: Bakir, 2016).

Şekil 2.17’de hücrenin kenarları ve yüzeyleri üzerinde tanımlanan elektrik alan (e_r) ve manyetik alan (h_ϕ) vektörleri gösterilmiştir. Δh adım büyüklüğü hücrenin boyutunu ifade eder.

Silindirik koordinat sisteminde (r, ϕ, z) Faraday yasası enine manyetik alan (TM) modunda ayrıştırılır. Bu, Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Denklem 2.26’da belirtilen integral formdaki Faraday yasası, bu ayrıştırma sonucunda Denklem 2.28’de görülen ayrıştırılmış forma dönüşür.



Şekil 2.18. FIT- Faraday yasası uygulaması (Kaynak: Bakir, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t} h_{\phi_{ij}} = -\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{e_{zij}}{\Delta r_j} + \frac{e_{ri+1j}}{\Delta z_i} - \frac{e_{ri+1j}}{\Delta r_j} - \frac{e_{rij}}{\Delta z_i} \right)$$

Denklem 2.30. Faraday yasasının ayrıştırılmış formu

“Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)” kullanılarak zamana bağlı fonksiyonun ayrıştırılması durumu ele alındığında Denklem 2.31 elde edilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} e^n \approx \frac{e^{(n+1/2)} - e^{(n-1/2)}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} h^{(n+1/2)} \approx \frac{h^{(n+1)} - h^n}{\Delta t}$$

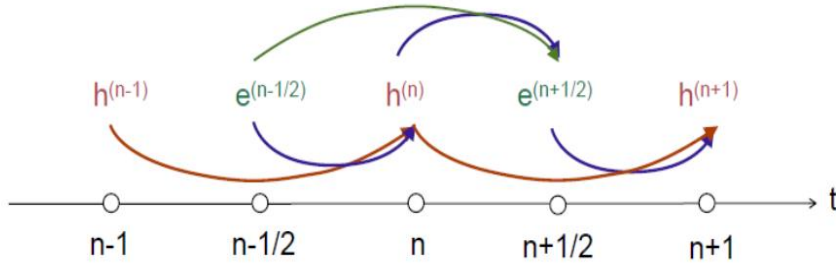
Denklem 2.31. Faraday yasasının CFL kullanılarak ayrıştırılması

Courant-Friedrichs-Lewy’ye göre zaman aralığı Denklem 2.32’de verilmiştir.

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{\sqrt{\frac{1}{\Delta z_i^2} + \frac{1}{\Delta z_j^2}}} \right\}$$

Denklem 2.32. CFL’ye göre zaman aralığı

Burada Δz z, yönünde adım genişliği, Δr , ise r yönünde adım genişliğidir. Zaman integral şeması Şekil 2.19’da görülmektedir. Burada Δt zaman aralığı, e ve h ayrık elektrik ve manyetik voltajı, ϵ_0 ve μ_0 havanın dielektrik sabiti katsayısı ve manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.



Şekil 2.19. Zaman integral şeması (Kaynak: Bakir, 2016)

$$h_{\phi ij}^{(n+1)} = h_{\phi ij}^{(n)} - \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{e_{zij}^{(n+1/2)}}{\Delta r_j} + \frac{e_{ri+1j}^{(n+1/2)}}{\Delta z_i} - \frac{e_{zij+1}^{(n+1/2)}}{\Delta r_j} - \frac{e_{rij}^{(n+1/2)}}{\Delta z_i} \right)$$

Denklem 2.33. Manyetik alan bileşeninin güncellenmesi

Bu denklemle, manyetik alanın bir bileşenini ($h\phi$) güncellerken, elektrik alan bileşenlerinin (e_z ve e_r) zaman içindeki değişimlerini ve uzaydaki farklı noktalarını dikkate alır.

$$e_{rij}^{(n+1/2)} = e_{ri+1j}^{(n-1/2)} - \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{2}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}} (h_{\phi ij}^{(n)} - h_{\phi i+1j}^{(n)})$$

Denklem 2.34. Elektrik alanın radyal bileşeninin güncellenmesi

$$e_{zij}^{(n+1/2)} = e_{zij}^{(n-1/2)} - \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{4}{\Delta r_j} (h_{\phi ij}^{(n)})$$

Denklem 2.35. Elektrik alanın z bileşeninin güncellenmesi

Bu durumda uzay ve zamandan ayrıştırılan Maxwell denklemleri aşağıdaki formlara dönüşür.

$$h_{\phi}^{(n+1)} = (T_{11}T_{12}T_{13}) \cdot \begin{pmatrix} h_{\phi}^n \\ e_r^{(n+1/2)} \\ e_z^{(n+1/2)} \end{pmatrix}$$

Denklem 2.36. Manyetik alan bileşeninin matris formatındaki denklemi

$$\begin{pmatrix} e_r^{(n+1/2)} \\ e_z^{(n+1/2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{21} & T_{22} & 0 \\ T_{31} & 0 & T_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_{\phi}^n \\ e_r^{(n-1/2)} \\ e_z^{(n-1/2)} \end{pmatrix}$$

Denklem 2.37. Elektrik alan bileşeninin matris formatındaki denklemi

$$\begin{pmatrix} h_{\phi}^n \\ e_r^{(n+\frac{1}{2})} \\ e_z^{(n+\frac{1}{2})} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I + T_{12}T_{21} + T_{13}T_{31} & T_{12}T_{13} \\ T_{12} & 1 & 0 \\ T_{31} & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_{\phi}^n \\ e_r^{(n+\frac{1}{2})} \\ e_z^{(n-\frac{1}{2})} \end{pmatrix}$$

Denklem 2.38. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin güncellenmesinin matris formu

Bu durumda, T_{11} , T_{22} ve T_{33} birim matrislerdir. Ayrıştırılan alanların sonucunda ortaya çıkan matris denklemleri, bilgisayar sistemlerinde etkin bir şekilde nümerik simülasyon işlemleri için kullanılabilir. Bu basit cebirsel özelliklerin yanı sıra, elektromanyetik alan teorisinde, yük ve enerjinin korunumu analitik ve cebirsel olarak kanıtlanabilir. Tüm büyük ölçekli elektromanyetik durumlar, Maxwell denklemleri ile matematiksel olarak ifade edilebilir. FIT metodu, karmaşık yapıların elektromanyetik çözümünü diğer yöntemlere göre daha hızlı bir şekilde gerçekleştirebilir. Ancak, basit yapıların zaman domen çözümünü için en uygun yöntem olmayabilir (Bakir, 2016).

2.5.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) karmaşık geometrilere sahip problemleri çözmek için kullanılan güçlü bir sayısal analiz yöntemidir. Karmaşık şekiller, genellikle yapısal olmayan ızgaralarla tanımlanır. Yapısal olmayan ızgaralarda Maxwell denklemlerini ayırklaştırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

Sonlu elemanlar metodu, sınır-değer problemlerinin yaklaşık çözümünü bulmak için kullanılan bir sayısal tekniktir. İlk olarak 1940'larda (Courant, 1994) ortaya çıkmış ve o zamandan beri geliştirilmeye devam etmektedir. Bu yöntem, mekanik yapı sorunları başta olmak üzere birçok farklı alanda uygulanmaktadır.

FEM'in prensibi, bilinmeyen bir fonksiyonun temel ara değer fonksiyonları ile temsil edildiği durumlarda, sürekli bir alanın bir dizi alt alanla değiştirilmesine dayanır. Bu yaklaşım, cebirsel denklemler sistemini değişimsel bir formülasyon uygulayarak elde etmeyi sağlar. Ardından, sınır-değer problemleri, doğrudan ya da iteratif bir çözücü kullanılarak lineer denklem sisteminin çözümü ile çözülür. Sonlu elemanlar, temel geometrik alt alanlar üzerinde parçalı polinom fonksiyonları kullanılarak oluşturulur. Bu alt alanlar, iki boyutlu

durumlarda dikdörtgenler ve üçgenler, üç boyutlu durumlarda ise dört yüzlü, alt yüzlü ve prizma şeklinde olabilir (Rahimi, 2011).

FEM'in elektromanyetik problemlerde, özellikle karmaşık geometrilere sahip olan ve klasik çözüm yöntemleriyle çözilemeyen alanlarda uygulanmaktadır. Maxwell denklemleri, FEM kullanılarak elektromanyetik dalga yayılımı, anten tasarımı, rezonans analizleri gibi birçok alanda çözülmektedir.

2.5.8. Sınır Koşulları

Hesaplama bölgesinin doğru bir şekilde sınırlandırılması, FIT'ten kesin çözümler elde etmek için gereklidir. CST Studio Suite, çeşitli sınır koşullarında çalışabilir. Bunlar arasında, konuya bağlı olarak en yaygın kullanılanlar mükemmel elektrik iletken (PEC), mükemmel manyetik iletken (PMC), açık ve periyodik ya da birim hücre olarak bilinenlerdir.

PEC ve PMC sınır koşulları nispeten daha anlaşılır. PEC, bir malzemenin mükemmel bir iletken olduğunu belirtir. Bu nedenle, böyle bir malzeme içinde E'nin sıfır olması gerekir. PEC malzemeleri için genellikle metaller gibi iyi iletkenler kullanılır. PMC malzemeleri ise PEC'nin manyetik karşılığıdır. Bu durumda, PMC malzemenin içinde H'nin sıfır olması gerekir. PEC ve PMC sınır koşullarının oluşturulması matematiksel olarak kolaydır. Ancak, açık sınır koşulunun matematiksel olarak uygulanması daha zordur. Bir açık sınır, belirtilen yönde sonsuz uzayı simüle eder. Açık sınır üzerine gelen enerji, hesaplama bölgesine geri yansımaz. CST Studio Suite, açık bir sınırı, bir mükemmel uyumlu katman (PML) ile çevrili bir şekilde gerçekleştirir. PML çerçeve, sağlam ve hesaplama açısından etkili bir mekanizmadır. Bu, oldukça az sayıda nümerik yansıma olduğu ve standart FIT veya FDTD (Finite difference time domain) formülasyonlarına uygulanabildiği anlamına gelir (Berenger, 1996).

Periyodik ve birim hücre ya da Floquet sınır koşulları, bir veya iki eksen boyunca ayna yansımaları sağlar. Periyodik bir sınır koşulu için sonuç, bir boyutta sonsuz uzunlukta bir yapıdır. Birim hücre sınır koşulu için ise, sonuç iki boyutlu bir sonsuz yapıdır (Jussaume, 2011).

2.5.8. Nümerik Analiz Teknikleri

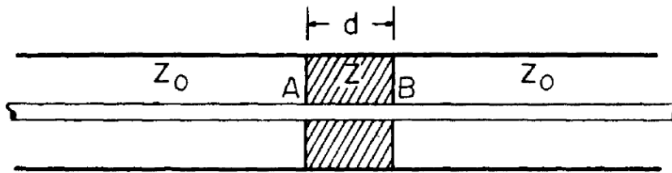
Dielektrik sabiti katsayısı ve manyetik geçirgenlik gibi malzeme parametrelerinin belirlenmesi için S parametrelerini kullanan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler

arasında Nicolson Ross Weir (NRW), Tekrarlı NIST (Noniterative Stable Transmission Reflection Technique), Tekrarsız yöntem ve Kısa devre hattı (short circuit line SCL) bulunmaktadır. Bu yöntemlerin karşılaştırmalı bir tablosu, Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Malzeme parametrelerinin S parametreleri kullanılarak elde edilmesinde kullanılan yöntemler

Yöntem Adı	S Parametreleri	Dielektrik Özellikleri
NRW	$S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ veya S_{11}, S_{21}	ϵ_r, μ_r
Tekrarlı NIST	$S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ veya S_{11}, S_{21}	$\epsilon_r, \mu_r = 1$
Tekrarsız Yöntem	$S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ veya S_{11}, S_{21}	$\epsilon_r, \mu_r = 1$
SCL	S_{11}	ϵ_r

Nicolson Ross Weir: NRW metodu, S parametrelerini kullanarak dielektrik özelliklerini doğrudan hesaplamak için kullanılır ve bu tür dönüşümler için en yaygın kullanılan metotlardan biridir (L.-F. Chen vd., 2004). Malzeme parametrelerinin belirlenmesi için, Tablo 2.2’de belirtilen S parametrelerinin ölçülmesi gereklidir. Bu metot, düşük kayıp değerine sahip malzemelerin dalga boyunun yarısına karşılık gelen frekansları, faz uyumsuzluğu nedeniyle ayırır. Bu nedenle, optimum alttaş kalınlığı, dalga boyunun dörtte birine eşit olan küçük boyutlu yapılar için uygundur. NRW metodunun başlıca avantajları, hızlı olması ve dalga kılavuzlarına ve iletim hatlarına uyarlanabilir olmasıdır. Dalga boyunun yarısına karşılık gelen alttaş kalınlıkları için dağılma görülmesi, küçük boyutlu yapılar için uygulanabilir olması ve düşük dielektrik katsayılı malzemeler için uygun olmaması, bu metodun dezavantajları arasında sayılabilir. Nicolson ve Ross, Şekil 2.20’de gösterildiği gibi bir yapı oluşturmuşlar ve bu yapı üzerinde ölçümler gerçekleştirmişlerdir (Luukkonen vd., 2011; Nicolson & Ross, 1970).



Şekil 2.20. Dalga kılavuzu içerisinde parametrelerinin ölçüm konfigürasyonu (Kaynak: Nicolson & Ross, 1970)

Şekil 2.20, bir dalga kılavuzu veya koaksiyel hat içindeki malzemenin konumlandırılmasını ve malzemenin EM özelliklerinin ölçülmesini göstermektedir. Z_0 , hattın karakteristik

empedansını, A ve B noktaları arasında dikdörtgen bölge test edilecek malzeme örneğini ve d de malzemenin kalınlığını temsil eder.

Bu durumda, $\mu = \mu_0\mu_r$ manyetik geçirgenliği, $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ dielektrik sabitini, d kalınlığı ve $Z = \sqrt{\mu_x/\varepsilon_r} Z_0$ empedansı temsil eder. Eğer d kalınlığı sonsuz olarak kabul edilirse, daha sonra taranan bölüm için gelen dalganın yansıma katsayısı Denklem 2.39’da belirtildiği gibi ifade edilebilir (Nicolson & Ross, 1970). Bu durumda, Γ yansıma katsayısını temsil eder. Aşağıdaki denklemlerde yer alan ω açısal frekansı, Z malzemenin karakteristik empedansını temsil eder.

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} + 1}$$

Denklem 2.39. Yansıma katsayısı denklemi

Sonsuz d kalınlığı için tabakanın A ve B yüzleri arasındaki S_{11} ve S_{21} katsayıları için (Luukkonen vd., 2011; Nicolson & Ross, 1970);

$$z = \exp -j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}d = \exp \left[-j\left(\frac{\omega}{c}\right)\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}d\right]$$

Denklem 2.40. EM dalganın yayılım yönündeki mesafesi

z değeri hesaplanır. Ardından iletim ve yansıma katsayılarından empedans değeri hesaplanır.

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1 + \Gamma)(1 - \Gamma)z}{1 - \Gamma^2 z^2} = \frac{(1 - \Gamma^2)z}{1 - \Gamma^2 z^2}, \quad S_{11}(\omega) = \frac{(1 - z^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 z^2}$$

Denklem 2.41. İletim ve yansıma katsayıları

$$Z = \frac{+ \sqrt{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}}{- \sqrt{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}$$

Denklem 2.42. Malzemenin karakteristik empedansı

Daha sonra iletim ve yansıma katsayılarının toplamaları ve çıkarımları denklem 2.43 ve 2.44’te ele alınırsa X ve Y değerleri sırasıyla denklem 2.45 ve 2.46’daki gibi elde edilir.

$$V_1 = S_{21} + S_{11}$$

Denklem 2.43.

$$V_2 = S_{21} - S_{11}$$

Denklem 2.44.

$$X = \frac{1 + V_1 V_2}{V_1 + V_2} = \frac{1 + Z^2}{2Z}$$

Denklem 2.45.

$$Y = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} = \frac{1 + \Gamma^2}{2\Gamma}$$

Denklem 2.46.

Buradan iletim ve yansıma parametreleri için; empedans değeri Denklem 2.47'deki gibi hesaplanabilir.

$$Z = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - \Gamma V_1}$$

Denklem 2.47.

$$\Gamma = \frac{Z - V_2}{1 - Z V_2}$$

Denklem 2.48.

Metamalzemenin elektriksel kalınlığının çok büyük olmadığı varsayılırsa $k_{real}d \leq 1$ ve bilinen kompleks dalga numarası $k = \frac{\omega\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}{c} = k_0\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$, burada dalga empedans değeri, dielektrik sabitini ve manyetik geçirgenliğini elde etmek için yaklaşık olarak $Z \sim 1 - jkd$ yazılırsa;

$$k \sim \frac{1}{jd} \frac{(1 - V_1)(1 + \Gamma)}{1 - \Gamma V_1}$$

Denklem 2.49.

$$\mu_r \sim \left(\frac{2}{jk_0 d}\right) \left(\frac{1 - V_2}{1 + V_2}\right)$$

Denklem 2.50.

$$\varepsilon_r \sim \left(\frac{2}{jk_0 d}\right) \left(\frac{1 - V_1}{1 + V_1}\right)$$

Denklem 2.51.

dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik parametre değerleri hesaplanabilir. NRW metodu Matlab programında yazılmış ve başka yapılarda rahatlıkla esnek olarak kullanılabilmesi için tasarlanmıştır. Böylece yapılan tasarım ile nümerik çalışması gerçekleştirilen metamatizme yapılarının etkin ortam için parametre değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir.

Tekrarlı NIST: Bu metod hesaplamaları Newton-Raphson kök bulma metodu kullanarak yapar ve sadece dielektrik sabiti hesabı için uygundur. Yansıma ve iletim katsayılarını hesaplamak için test altındaki numunenin s-parametrelerinin bütün dördünü (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) veya bir çiftini (S_{11} , S_{21}) kullanır.

Tekrarsız Yöntem: New non-iterative metodu bir farklı formül dışında NRW metoduna oldukça benzer ve geçirgenliğin yani $\mu_r = 1$ durumu için dielektrik sabiti hesaplanması için uygundur. Yansıma ve iletim katsayılarını hesaplamak için test altındaki numunenin s parametrelerinin bütün dördünü (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) veya ikisini (S_{11} , S_{21}) kullanır.

SCL Yöntemi: Short circuit line (SCL) çevrim yöntemi, koaksiyel hatlar veya dalga kılavuzlarının üzerinde bir bağlantı noktası ölçüsüdür. Bu yöntem tekrarlamalı NIST ile aynı Newton-Raphson kullanıcısının sayısal yaklaşımı kullanarak hesaplama yapar ve sadece hesaplama dielektrik sabiti için uygundur. Bu yansıma katsayısı hesaplamak için numunenin yalnızca S_{11} parametresi kullanır.

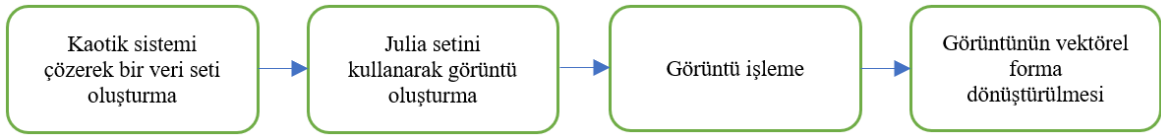
Her bir dönüşüm metodu, belirli avantajları, dezavantajları ve sınırlamaları ile birlikte gelir. Bu metodların seçimi, ölçülen S-parametrelerinin boyutlarına, aranan dielektrik sabitine, dönüşümün hızına ve doğruluğuna bağlıdır (Bakir, 2016).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu kısımda metamalzeme tasarım yönteminden detaylı olarak bahsedilmektedir. İlk olarak metamalzeme tasarımında rezonatör olarak kullanılacak kaotik desenlerin elde edilmesi tanıtılmaktadır. İkinci olarak da tez kapsamında tasarlanan metamalzeme yapılarının tasarım özellikleri açıklanmaktadır.

3.1. Kaotik Desenlerin Oluşturulması

Metamalzeme tasarımlarında kullanılan desenler, kaotik sistemlerden elde edilen fraktal yapılarıdır. Bu desenlerin oluşturulması ve tasarımda kullanılmak üzere simülasyon ortamına aktarılması dört aşamada yürütülen bir süreçtir. Bu süreç, Şekil 3.1'deki blok diyagramla temsil edilmektedir.



Şekil 3.1. Kaotik desenlerin oluşturulması ve simülasyon ortamına aktarılması süreci

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen iki farklı uygulamanın ilkinde Rossler, ikincisinde ise Lorenz kaotik çekicisi kullanılmıştır. Sürekli zamanlı dinamik sistemler olan Rossler ve Lorenz çekicilerine ait diferansiyel denklemler sırasıyla Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de verilmektedir.

$$\dot{x} = -y - z$$

$$\dot{y} = x + ay$$

$$\dot{z} = b + z(x - c)$$

Denklem 3.1. Rossler çekicisine ait diferansiyel denklem takımı

$$\dot{x} = s(-x + y)$$

$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = -bz + xy$$

Denklem 3.2. Lorenz çekicisine ait diferansiyel denklem takımı

Her iki denklem için x, y, z durum değişkenleri; (a, b, c) ve (s, r, b) ise sırasıyla Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'deki sistemin parametreleri olan sabitlerdir.

İlk aşamada, kaotik sistemler, Euler yöntemi kullanılarak çözülür. Euler yöntemine ilişkin matematiksel model Denklem 3.3'te verilmektedir.

$$q_{n+1} = q_n + h \cdot f(t_n, q_n)$$

Denklem 3.3. Euler yönteminin matematiksel modeli

Burada, $q_n = [x_n, y_n, z_n]$ 'dir ve kaotik sistemin mevcut adımdaki bilinen değerleridir. Kaotik sistemin bir sonraki adımda tahmin edilen değerleri $q_{n+1} = [x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1}]$ 'dir. Bu yeni durum, mevcut durumun üzerine belirli bir değişiklik eklenerek hesaplanır. h , zaman adımı veya adım büyüklüğü olarak adlandırılır ve her bir adımda t zamanında ne kadar ilerleme kaydedildiğini gösterir. $f(t_n, q_n)$, kaotik sisteme ait diferansiyel denklemdir ve sistemin mevcut durumdaki eğimini (türevini) gösterir.

Sürekli zamanlı kaotik sistem, Euler yöntemi ile çözüldükten sonra doğal olarak, ayrık zamanlı bir çözüm kümesi elde edilir. Ardından bu çözüm kümesi, 3-boyutlu vektörler olarak kaydedilir. Kaydedilen bu vektör, görüntü oluşturmak amacıyla kullanılacaktır. Bu nedenle oluşturulacak görüntünün boyutuna göre yeterli sayıda olmalıdır. Bu tez çalışmasında oluşturulan görüntüler 480x480 piksel büyüklüğündedir. Dolayısıyla her pikseli temsil edecek görüntü özelliğini üretmek için 480x480=230400 adet veriye ihtiyaç vardır. Kaotik sistemin başlangıcındaki geçici durumları elemek ve kararlı durumdaki değerleri kullanmak için fazladan 5000 veri daha üretilmektedir. İlk 5000 veri, geçiş durumlarını elemek için yeterlidir. Sonraki 230400 adet veri ise görüntüyü oluşturmak amacıyla kaydedilmektedir. Bütün bu işlemler, bir MATLAB betiği yazılarak gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada, kaydedilen 3-boyutlu vektör Julia setine girdi olarak sunulur. Julia seti $\gamma_{n+1} = \gamma_n^2 + c$ eşitliği kullanılarak iteratif olarak sonuç üreten bir fonksiyondur. Buradaki n , iterasyon sayısına bağlıdır. Yapılan çalışmalarda iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Julia seti fonksiyonundaki γ , karmaşık bir sayıdır ve biri reel diğeri sanal olmak üzere iki bileşene sahiptir. Kaotik sistemin çözümünden elde edilen değerlerin Julia setine girdi olarak sunulması şu şekildedir: γ 'nın reel bileşeni için x ; sanal bileşeni için ise y durum değişkeni kullanılmaktadır. Sonuç olarak $\gamma = x + iy$ karmaşık sayısı elde edilmekte ve bu değer fonksiyona girdi olarak verilmektedir. Fonksiyon, 230400 adet verinin her biri için yeni bir değer hesaplar. Bu değerlerin her biri, tek bir pikselin görüntü

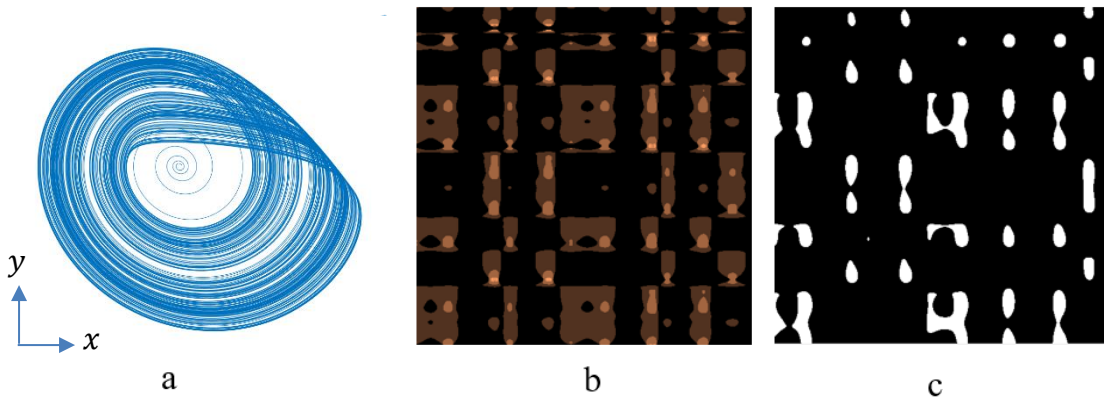
özelliğini oluşturacak şekilde kaydedilir. Böylelikle görüntü tuvalinin her bir pikseli için bir renk özelliği belirlenmiş olur. Sonuçta 480x480 piksel boyutlu bir görüntü elde edilir.

Julia setinin davranışında ϵ parametresi oldukça etkilidir. Farklı ϵ değerleri, karmaşık düzlemde farklı fraktal desenler oluşturur. Dolayısıyla, belirli bir ϵ değeri seçmek, elde edilen fraktal desenlerin yapısını doğrudan etkilemektedir. Bu tez çalışmasında ϵ parametresi $-0,175+0,655i$ olarak belirlenmiştir.

Üçüncü aşamada, oluşturulan görüntüdeki gürültüyü azaltmak ve kenarları yumuşatmak amacıyla Gauss filtresi uygulanmaktadır. Gauss filtreleme, bir görüntüyü bulanıklaştırmak için iki boyutlu bir Gauss dağılımı kullanır. Bu, her bir pikselin değerini, çevresindeki piksellerin ağırlıklı ortalamasını alarak hesaplar. Gauss dağılımı, merkezden uzaklaştıkça ağırlıkların azaldığı simetrik bir dağılımdır. Ağırlıklar, Gaussian fonksiyonu kullanılarak belirlenir. Gauss filtresinin çıktısı komşu piksellerin ağırlıklı ortalamaları alınarak elde edilmektedir.

Gauss filtrelemede, bir görüntü üzerinde hareket eden bir çekirdek (kernel) kullanılır. Bu çekirdek, Gauss dağılımına göre oluşturulmuş bir dizi sayıdan oluşur. Çekirdek üzerindeki her sayı, merkezden uzaklaştıkça küçülür. Filtreleme işlemi sırasında, çekirdek görüntü üzerindeki her piksel üzerinde kaydırılır ve pikselin değeri, çekirdekteki sayılarla komşu piksellerin değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak yeniden hesaplanır.

Gauss filtresi uygulandıktan sonra, görüntü ikili (binary) forma dönüştürülür. Bu durum Şekil 3.2’de örnek bir desen üzerinde gösterilmiştir.



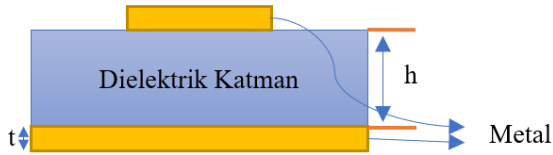
Şekil 3.2. (a) Rossler kaotik sistemin xy düzlemindeki yörüngesi, (b) bu yörüngelerden oluşturulan görüntü (c) rafine edilmiş görüntü

Şekil 3.2, Rossler çekicisinden örnek bir kaotik desenin elde edilme aşamalarını açıklamaktadır. Şekil 3.2 (a)'da Rossler çekicisinin xy düzlemindeki değişimi; Şekil 3.2 (b), x ve y değerlerinin Julia setine uygulanması ile elde edilen fraktal görüntüyü resmetmektedir. Bu desen, karmaşık ve düzensiz yapısı ile dikkat çekmektedir. Şekil 3.2 (c)'de ise, görüntü işleme aşamalarından sonra görüntünün rafine edilmiş hali görülmektedir.

Kaotik desenlerin oluşturulmasındaki dördüncü ve son aşama, rafine edilmiş görüntünün vektör formuna dönüştürülmesidir. Vektörel formatlar, görüntülerin yüksek çözünürlükte ve herhangi bir detay kaybı olmaksızın yeniden kullanılmasına olanak tanıdığı için, tasarım süreçlerinde esneklik sağlamaktadır.

3.2. Metamalzeme Tasarımı

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sensör ve soğurucu tasarımları Şekil 3.3'te gösterildiği gibi üç katmandan oluşmaktadır. Bunlar, tasarımın en üstünde kaotik desenlerin bulunduğu rezonatör katmanı, ortada dielektrik katman (alttaş) ve en altta topraklama plakası katmanıdır. Rezonatör ve topraklama plakası iletken malzemeden, alttaş ise dielektrik malzemeden oluşmaktadır.

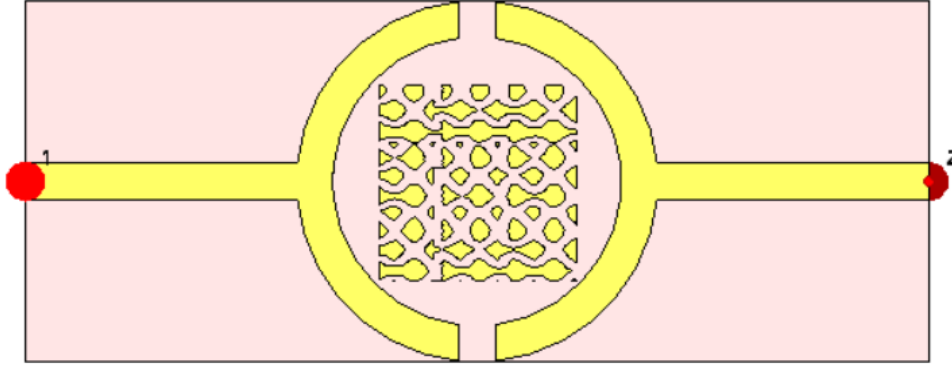


Şekil 3.3. Tasarımların genel yapısı

Vektör formuna dönüştürülen görüntüler simülasyon ortamına aktarıldıktan sonra rezonatör katmanındaki şekli oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu görüntü vektörel formda olduğu için veri kaybı olmadan tasarım boyutlarına uygun olarak ayarlanabilir.

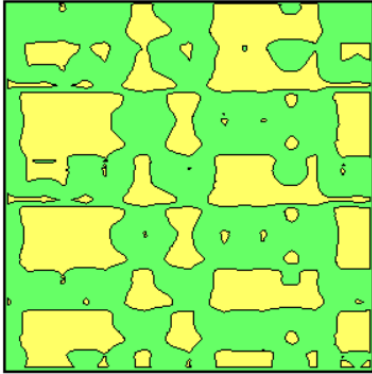
Tasarımlarda kullanılan metal malzemeler sensör ve soğurucu uygulamasında sırasıyla bakır ve altın, dielektrik katmanda ise FR-4 ve Rogers RT5870 malzemeleri kullanılmaktadır.

Şekil 3.4'te sensör uygulaması için geliştirilen tasarım gösterilmektedir. Tasarımda dielektrik alttaş olarak kullanılan FR-4 malzemesi, epoksi reçine ile güçlendirilmiş cam elyafından oluşmaktadır.



Şekil 3.4. Sensör tasarımının üstten görünümü

Gerçekleştirilen soğurucu tasarımı ise Şekil 3.5’te gösterilmektedir. Soğurucu tasarımında dielektrik alttaş olarak kullanılan Rogers RT5870 Rogers Corporation tarafından üretilen bir yüksek frekanslı laminattır. Genellikle mikrodalga devreleri ve yüksek frekanslı uygulamalar için kullanılan bu malzeme, düşük dielektrik kaybı ve yüksek dielektrik sabiti ile bilinir.



Şekil 3.5. Soğurucu tasarımının üstten görünümü

3.3. Sayısal Analiz

Sensör ve soğurucunun sayısal analizleri CST Microwave Studio Suite yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Yukarıda, tasarımları verilen sensör ve soğurucunun frekans bölgeleri ve sınır koşulları aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Sensör tasarımı, 4-8 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir ve bu aralık, sensörün hedef uygulama alanında yüksek hassasiyet ve doğruluk sağlamak amacıyla seçilmiştir. Simülasyonlarda açık sınır koşulları kullanılarak, elektromanyetik dalgaların simülasyon sınırlarından yansması engellenmiş ve böylece sensörün gerçek performansı doğru bir şekilde değerlendirilmiştir. Sensörün elektromanyetik yanıtını modellemek için sonlu

elemanlar yöntemi (FEM) tercih edilmiştir; bu yöntem, sensörün karmaşık geometrik ve malzeme özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Simülasyon sonuçları, sensörün rezonans frekanslarını belirlemek ve duyarlılık analizlerini yapmak için kullanılmıştır, böylece sensörün frekans yanıtı hedeflenen frekans aralığında optimize edilmiştir.

Soğurucu tasarımı, 10-40 THz geniş frekans aralığında gerçekleştirilmiştir; bu geniş aralık, çok bantlı soğurucunun geniş spektrumlu uygulamalarda kullanılabilmesi için seçilmiştir. Tasarımda birim hücre sınır koşulları kullanılarak, birim hücrenin sonsuz bir düzlemde tekrarlanarak gerçek bir metamalzeme yüzeyini temsil etmesi sağlanmıştır. Elektromanyetik soğurma özelliklerini simüle etmek için sonlu entegrasyon tekniği (FIT) kullanılmıştır; bu yöntem, geniş frekans aralıklarında hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Simülasyonlar sonucunda, soğurucunun farklı frekans bantlarındaki soğurma etkinliği incelenmiş ve tasarımın performansını değerlendirmek ve optimize etmek için kullanılmıştır.

4. BULGULAR

Bu bölümünde, sensör ve soğurucu tasarımlarının analizleri ayrı başlıklar altında verilmiştir. Tasarımlarda kaotik desenlerin sağladığı yenilikçi avantajlar ve çeşitli parametre değişikliklerinin tasarım üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

4.1. Kan Glukoz Oranının Tespiti Uygulaması

Diyabet, insan vücudunda insülin seviyesindeki dengesizlikten kaynaklanan bir hastalıktır. Bu dengesizlik, pankreasın yeterli miktarda insülin üretememesi ya da vücudun pankreas tarafından üretilen insülini etkin bir şekilde kullanamaması durumunda ortaya çıkar. İnsülin, kan şekerini düzenlemekle görevli bir hormondur. Diyabet, Tip 1 ve Tip 2 olmak üzere iki ana türde incelenir. Tip 1 diyabet, pankreasın yetersiz insülin üretimiyle karakterize edilirken, Tip 2 diyabet, vücudun mevcut insülini etkili bir şekilde kullanamaması sonucu gelişir (Vahidi vd., 2016).

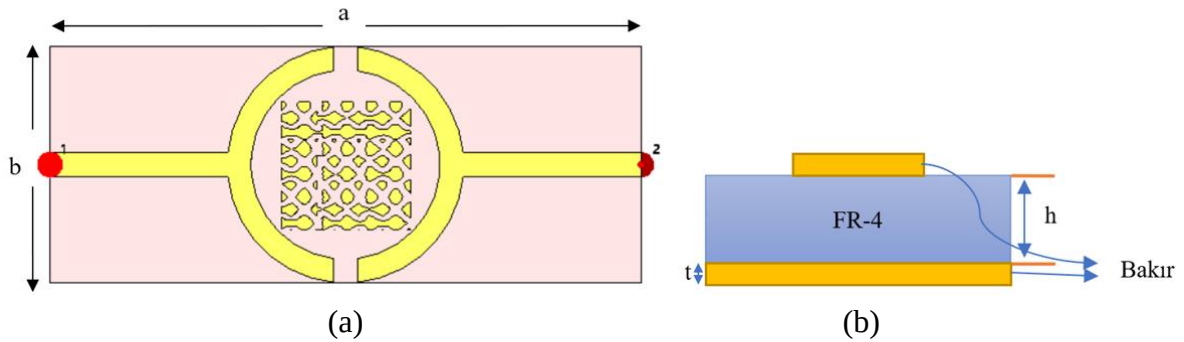
Diyabet, kan şekerinin (glukoz) uygun aralıkta düzenlenememesi ve hiperglisemi ya da hipoglisemi ile sonuçlanabilen metabolik bir hastalık olarak tanımlanabilir. Hiperglisemi durumunda kandaki glukoz seviyesi 200 mg/dl'nin üzerine çıkarken, hipoglisemi durumunda ise bu seviye 70 mg/dl'nin altına düşer. Günümüzde diyabetin kesin bir tedavisi bulunmamakla birlikte, uygun beslenme ve fiziksel aktivite yoluyla hastalığı kontrol altında tutmak mümkündür. Bu nedenle, vücuttaki glukoz seviyesinin düzenli ve doğru bir şekilde izlenmesi büyük önem taşır (Siddiqui vd., 2018).

Kan şekeri takibi, invaziv ve non-invaziv olmak üzere iki yöntemle gerçekleştirilebilir. İnvaziv yöntemler, genellikle kan örneği almayı gerektiren en yaygın yaklaşımlardır. Diyabet hastaları, kandaki glukoz seviyesini belirlemek için düzenli olarak kan örneği almak zorundadır. Bu yöntemler yüksek hassasiyet sunsa da ağırlı, pahalı ve enfeksiyon riskine karşı oldukça hassastır. Buna alternatif olarak, ağrısız, güvenli ve kullanımı kolay non-invaziv yöntemler de mevcuttur (Villena Gonzales vd., 2019). Non-invaziv yöntemler, kan örneği alınmadan kandaki glukoz seviyesini izlemeyi mümkün kılan çeşitli teknolojilere dayanır. Genellikle deri üzerinden veya diğer yüzeysel ölçümlerle kandaki glukoz seviyesini tespit etmeyi amaçlayan bu teknolojiler arasında MTM tabanlı sensörler de yer almaktadır.

Kandaki glukoz seviyesini tespit etmek amacıyla, bu tez çalışması kapsamında bir metamatizeme sensörü tasarlanmıştır. Bu sensör, kanın dielektrik özelliklerindeki

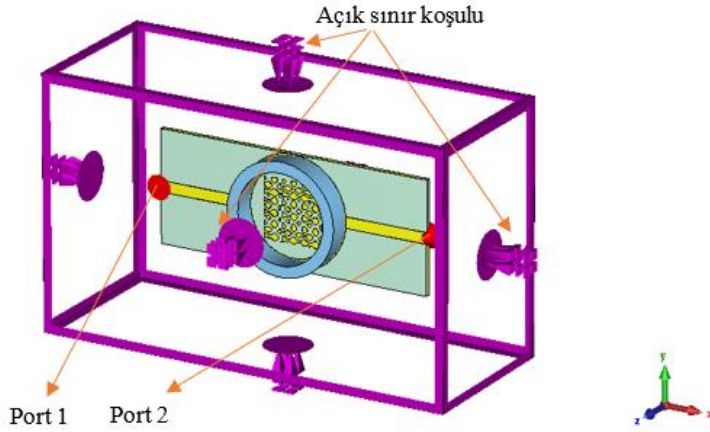
değişikliklere yanıt olarak rezonans frekansındaki kaymaları algılamaya dayanmaktadır. Rezonans frekansı, sensör yanıtının (elektromanyetik dalgaların yansması veya iletilmesi) maksimum seviyeye ulaştığı frekans olarak tanımlanır. Kandaki glukoz seviyesi değiştiğinde, kanın dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, rezonans frekansında bir kaymaya neden olur. Bu çalışma, sensördeki bu frekans kaymalarını tespit ederek kandaki glukoz seviyesinin hassas bir şekilde ölçülebileceğini ortaya koymaktadır.

MTM sensör, üç katmandan oluşacak şekilde tasarlanmıştır ve bu katmanlar Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Üst katmanda, rezonatör olarak Rossler kaotik çekicisinden türetilmiş özel bir desen yer almaktadır. Orta katmanda, sensörün alttaşı olarak FR-4 dielektrik malzeme kullanılmıştır. Dielektrik sabiti 4,3, kayıp tanjantı 0,025’tir. Alt katman ise topraklama plakası olarak görev yapmaktadır. Hem rezonatör hem de topraklama plakası bakır metalinden yapılmıştır.



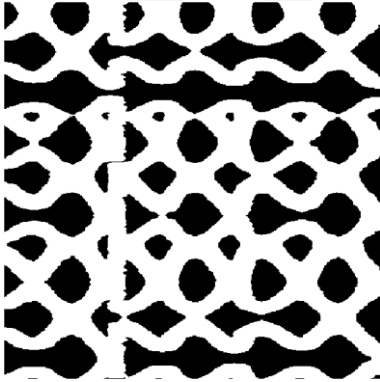
Şekil 4.1. Metamalzeme sensör tasarımının (a) üstten, (b) yandan görünümü

Tasarlanan yapının elektromanyetik özellikleri ve algılama performansı, sonlu entegrasyon tekniğini kullanan CST Studio Suite elektromanyetik simülatörü ile analiz edilmiştir. Simülasyonda, sınır koşullarının gerçek ortamı en iyi şekilde yansıtabilmesi için x , y ve z yönlerinde açık sınır koşulları uygulanmıştır. Bu ayarlara ait detaylar, Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Metamalzeme sensör tasarımının sınır koşulları ve portları

Rezonatör katmanını oluşturan fraktal yapı desenin üretilmesi için, kaotik Rossler çekicisi $a = 0,2$, $b = 0,1$, $c = 5,2$ parametreleri ve $x_0 = 0,2$, $y_0 = 0,05$, $z_0 = 0,3$ başlangıç koşulları altında çözülmüştür. Desen üretimindeki diğer aşamalar üçüncü bölümde detaylı olarak açıklanmaktadır. Şekil 4.3'te gösterilen desen elde edildikten sonra iki yarım ay arasına yerleştirilmiştir (bkzn. Şekil 4.1 (a)).



Şekil 4.3. Rossler kaotik sisteminin çözümünden elde edilen fraktal yapı desen

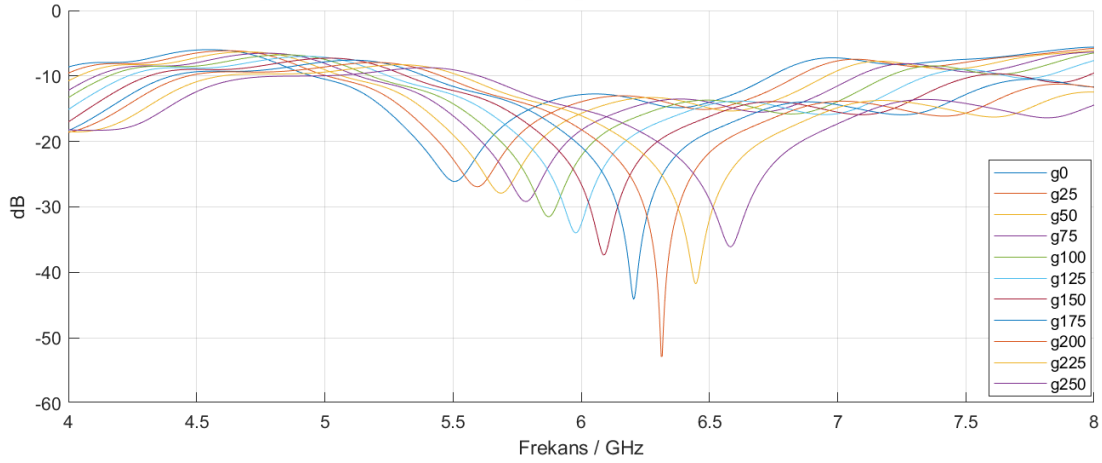
Metamalzeme sensör tasarımı tamamlandıktan sonraki aşamada, kan glukoz seviyesinin ölçülmesi için gerekli analizler yapılmaktadır. Bunun için, farklı glukoz seviyelerine sahip kan örneklerinin dielektrik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu veriler Vrba ve Vrba yayınladıkları çalışmadan (Vrba & Vrba, 2015) alınarak kullanılmıştır. Bu çalışmada Tablo 4.1'de gösterildiği gibi 0-250 mg/dl arasındaki belli aralıklarla ölçülen kan glukozu oranları gösterilmektedir. Analizler için numuneler rezonatör katmanındaki fraktal desen üzerine yerleştirilir. Daha sonra CST Studio Suite ortamında analizler 4-8 GHz frekans aralığında

gerçekleştirilir. Bu analizde, iletilen EM dalgayı açıklayan S_{21} değerleri toplanmış ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.1. Farklı glukoz değerleri için kan örneklerinin dielektrik özellikleri

Glikoz Oranı(mg/dl)	Bağıl Geçirgenlik (ϵ_r)	Eşdeğer İletkenlik σ_e [S/m]
0	69,4325	1,4895
25	67,2436	1,4895
50	65,0547	1,4895
75	62,8658	1,4895
100	60,6768	1,4895
125	58,4879	1,4895
150	56,2990	1,4895
175	54,1101	1,4895
200	51,9211	1,4895
225	49,7322	1,4895
250	47,5433	1,4895

(Kaynak: Vrba & Vrba, 2015)



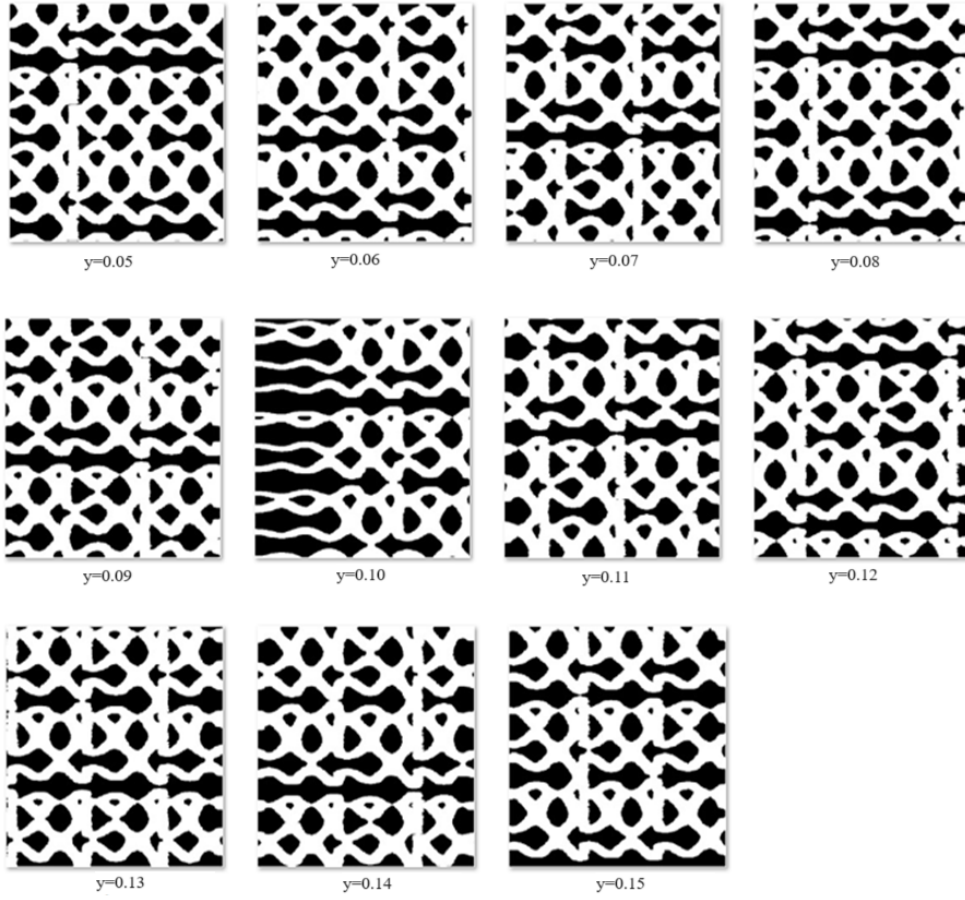
Şekil 4.4. Metamalzeme sensörün farklı kan örnekleri için S_{21} değerleri

Şekil 4.4'teki grafikteki gXX terimleri kandaki glukoz seviyesini temsil etmektedir. Örneğin g50 kanda 50 mg/dl, g125 ise 125 mg/dl glukoz olduğunu belirtmektedir. Grafikten farklı glukoz seviyeleri için farklı rezonans frekansları olduğu anlaşılmaktadır. Rezonans frekansları, g0 için 5,50 GHz, g25 için 5,59 GHz, g50 için 5,68 GHz, g75 için 5,78 GHz, g100 için 5,87 GHz, g125 için 5,98 GHz, g150 için 6,08 GHz, g175 için 6,20 GHz, g200 için 6,30 GHz, g225 için 6,40 GHz ve g250 için 6,50 GHz'dir.

için 6,31 GHz, g225 için 6,44 GHz, g250 için 6,58 GHz olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar farklı kan örneklerinin 90 MHz ile 140 MHz arasında frekans kaymasına neden olduğunu göstermektedir. Bu frekans kaymaları, sensörün algılama hassasiyeti açısından oldukça belirgin bir değerdedir ve kolaylıkla algılanabilir. Bu da sensörün pratik, kolay ve etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Kandaki glukoz oranı arttıkça sensörün rezonans frekansının doğrusal bir şekilde arttığı ve buna ilişkin bant genişliklerinin neredeyse değişmediği ve düzenli bir yapıda kaldığı gözlemlenmektedir.

Ayrıca, sensörün algılama hassasiyeti sinyal gücü ile de rahatlıkla hesaplanabilir. Şekil 4.4'teki grafikten anlaşılabileceği üzere her bir glukoz seviyesi için sinyal gücündeki düşüşler diğer seviyelerle bir çakışma olmaksızın kolaylıkla ölçülebilir. Bu, sensörün her bir glukoz seviyesini doğru ve güvenilir bir şekilde algılayabileceği manasına gelir.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında kaotik Rossler çekicisinin y_0 başlangıç koşuluna ilişkin parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. y_0 'daki değişimlerin sensör davranışı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bunu göstermek üzere $y_0 = 0,05$ ile $y_0 = 0,15$ arasındaki 11 farklı başlangıç koşulu için 11 farklı desen üretilmiştir. Bu desenler Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Farklı y_0 başlangıç koşulları için Rossler çekicisinden elde edilen desenler

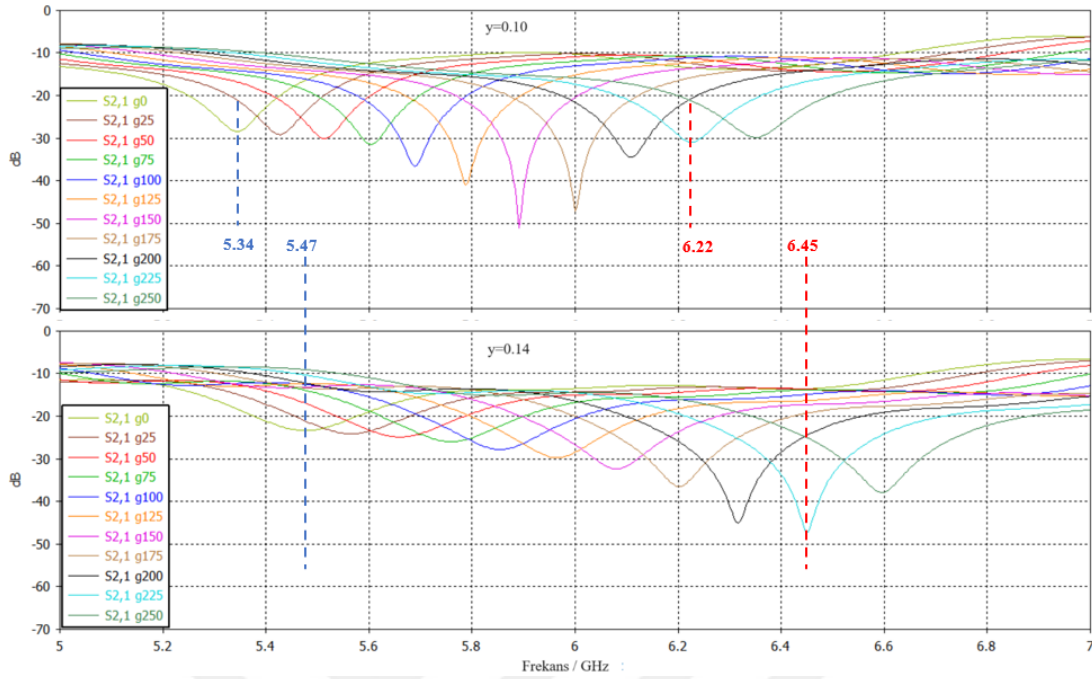
Elde edilen 11 farklı desen kullanılarak 11 farklı MTM sensör tasarımı yapılmıştır. Tasarımlarda değişen sadece rezonatör katmanında kullanılan fraktal yapılı kaotik desenlerdir. Diğer parametreler değişmemektedir. Her bir tasarıma ait analizler yukarıda açıklandığı gibi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.2'de verilmektedir. Tablo 4.2'deki veriler her bir tasarımdaki maksimum sinyal gücü düşümüne sahip kan örneklerinden elde edilmiştir. Örneğin $y_0 = 0,05$ iken maksimum sinyal gücü düşümü g200 seviyesinde ölçülmüş ve 6,31 GHz olarak bulunmuştur. $y_0 = 0,06$ iken maksimum sinyal gücü düşümü g0 seviyesinde ölçülmüş ve 5,51 GHz olarak bulunmuştur. Tablonun diğer satırları da benzer şekilde oluşturulmuştur.

Tablo 4.2. Farklı başlangıç koşulları altında sensör parametreleri

Parametre	f_c (GHz)	Sinyal Gücü(dB)	Kan Glukoz Seviyesi	BG(GHz)	$Q = f_c/BG$
y=0,05	6,31	-52,85	g200	0,017	371,30
y=0,06	5,51	-38,85	g0	0,047	117,27
y=0,07	6,35	-52,43	g225	0,02	317,6
y=0,08	6,12	-54,05	g125	0,011	556,36
y=0,09	6,37	-39,04	g250	0,103	61,83
y=0,10	5,89	-50,99	g150	0,01	589,2
y=0,11	6,44	-41,00	g250	0,067	96,12
y=0,12	5,82	-64,20	g50	0,003	1941,33
y=0,13	6,52	-36,35	g250	0,152	42,89
y=0,14	6,45	-47,25	g225	0,036	179,22
y=0,15	6,59	-41,95	g250	0,056	117,64

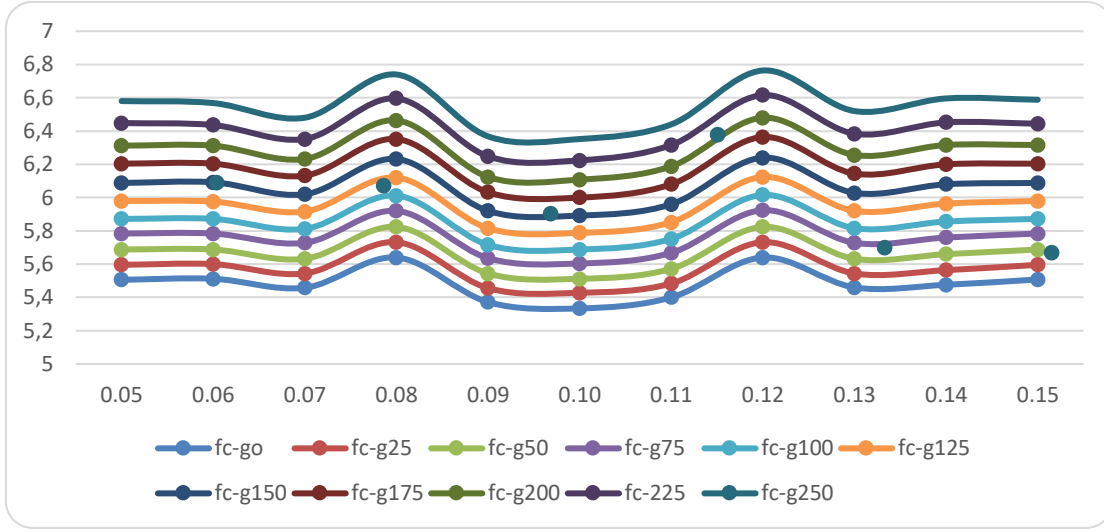
Tablo 4.2’de ayrıca bant genişliği (BG) ve kalite faktörü (Q) verilmiştir. Kalite faktörü, rezonans frekansının bant genişliğine oranıdır ve rezonansın ne kadar keskin olduğunu gösterir. Yüksek kalite faktörü değerleri, dar bant genişlikleri ve keskin rezonansları ifade eder. Tablodaki Q değerleri, 42,89 ile 1941,33 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, sensörün yeterli duyarlılık ve seçiciliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Başlangıç koşullarındaki değişimlerin sensör davranışına etkisini gözlemleyebilmek için Şekil 4.6’daki grafik oluşturulmuştur. Bu grafikte, $y_0 = 0,10$ ve $y_0 = 0,14$ için S_{21} grafikleri alt alta çizdirilmiştir. Sensörün, farklı başlangıç koşullarında farklı rezonans frekanslarına sahip olduğu grafikten izlenebilir. Grafik üzerinde g0 ve g225 için rezonans frekansları işaretlenmiş ve karşılaştırma yapılabilmesi açısından grafik üzerinde gösterilmiştir. Örneğin $y_0 = 0,10$ için g0 seviyesindeki rezonans frekansı 5,34 GHz iken $y_0 = 0,14$ için bu değer 5,47 GHz’dir. Grafiğin okunabilirliğini artırmak ve karmaşayı azaltmak için diğer glukoz seviyeleri için görselleştirme yapılmamıştır. Ancak diğer seviyeler de benzer şekilde grafikten rahatlıkla gözlemlenebilir. 11 farklı tasarıma ait S_{21} grafiklerinin tamamı Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 4.6. y_0 başlangıç koşulundaki değişimlerin S_{21} sonuçlarına etkisi

11 farklı tasarımın analiz sonuçları, kaotik sistemin başlangıç koşullarındaki küçük değişimlerin sensör davranışını belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. Bu sonuç, sensör tasarımının kaotik bir sistemle kontrol edilebileceğine dair güçlü bir kanıt sunmaktadır. Şekil 4.7'deki grafik, farklı başlangıç koşullarındaki rezonans frekanslarını her bir glukoz seviyesi için görselleştirmektedir. Bu grafik ayrıca kaotik sistem ile sensör davranışı arasındaki ilişkiyi açıklamak için de değerlendirilebilir. Grafikten, 11 farklı tasarımın hepsinin sensör olarak kullanılabileceği, her tasarımın belli bir düzen içinde etkiye sahip olduğu gözlemlenebilir. Örneğin, tüm tasarımlarda glukoz seviyesi ile rezonans frekansı doğru orantılı olarak artmaktadır. Başlangıç koşulu y_0 'daki değişim bu düzeni bozmamakta ancak rezonans frekansında belirgin şekilde kaymalara yol açmaktadır. Bu frekans kaymaları $y_0 = 0,08$ ve $y_0 = 0,12$ 'de daha yüksek değerdedir. Bu iki değer arasında, rezonans frekanslarının daha küçüldüğü; $0,08 > y_0 > 0,12$ uç bölgelerinde değişimin daha küçük olduğu gözlemlenmektedir. Bu bulgular, farklı özellikteki sensörlerin tasarımı için önemli olabilir.



Şekil 4.7. y_0 başlangıç koşulunun sensörün rezonans frekansı üzerindeki etkisi

Sensörün hassasiyeti, kandaki farklı glikoz seviyelerine olan algılama hassasiyetidir ve rezonans frekansındaki kaymalar ve sinyal gücündeki değişikliklerle temsil edilmektedir. Özellikle 5-7 GHz aralığında, glukoz seviyelerindeki küçük değişikliklerin bile belirgin bir şekilde tespit edilebildiği gözlemlenmektedir. Bu çalışmada tasarlanan metamalzeme sensörlerinin hassasiyeti, literatürdeki benzer tasarımlarla Tablo 4.3'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.3. Tasarlanan sensör yapısının literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması

Referans	Sensör Yapısı	Glikoz Seviyesi Aralığı (mg/dl)	Çalışma Frekansı (GHz)	Kullanılan Çözelti	Algılama Hassasiyeti (dB/(mg/dl))
(Jang vd., 2020)	Bölünmüş halka rezonatörlü	0-400	2-3	Su- glikoz	0,00075
(Choi vd., 2015)	İki ayrı bölünmüş halka rezonatörlü	504-3531	1,4-1,8	Su- glikoz	0,00018
(Kumari vd., 2018)	Epsilon negatif (ENG) birim hücre rezonatörlü	2000-10000	1-3	Su- glikoz	0,001
(Byford vd., 2015)	Açık bölünmüş halka rezonatörlü	0-40000	4-8	Su- glikoz	0,0019
(Govind & Akhtar, 2019)	Bölünmüş halka rezonatörlü	0-5000	3-5	Su- glikoz	0,026
(Vrba & Vrba, 2015)	Yapay iletim hattı rezonatörlü	0-250	1,8-2,2	Kan sıvısı	0,0071
(Omer vd., 2020b)	Üç Kutuplu CSRR	70-120	1-6	Kan sıvısı	0,0167
(Qureshi vd., 2022)	Beş bölünmüş halka rezonatörlü	50-120	20-30	Kan sıvısı	0,027
Bu çalışma	Kaotik desen rezonatörlü	0-250	4-8	Kan sıvısı	0,051

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, iletim katsayısının zirve değeri 50 mg/dl glikoz seviyesi için $-27,895$ dB, 75 mg/dl glikoz seviyesi için ise $-29,178$ dB olarak ölçülmüştür. Bu veriler

kullanılarak sensör hassasiyeti 0,051 dB/(mg/dl) olarak hesaplanmıştır. g50 ve g75 seviyelerinin seçilmesinin nedeni tıbbi açıdan daha anlamlı olması ve sinyal gücünün bu iki seviyede maksimum olmasıdır. Dolayısıyla bu değer sensörün minimum algılama hassasiyeti olarak kabul edilebilir. Maksimum algılama hassasiyeti ise g175 ve g200 arasında olup 0,35'tir. Tıbbi açıdan anlamlı olan diğer iki seviye g100 ve g125'tir. Çünkü bu iki sınır, normal seviye ile hiperglisemi seviyesinin ayırt edilebilmesi açısından önemlidir. g100 ve g125 seviyeleri arasındaki algılama hassasiyeti 0,099'dur. Bu değerler, literatürle kıyaslandığında önemli ölçüde iyileştirme yapıldığını kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak bu tür bir analiz, kaotik desenli sensör tasarımının etkinliğini ortaya koyarak, gelecekteki sensör tasarımlarına ışık tutabilir. Rossler kaotik çekicisinden elde edilen farklı desenlerin metalmalzeme sensör tasarımına yönelik yapılan detaylı analizler, bu sensörün hassas, güvenilir ve etkili olduğunu göstermektedir.

Sensör, kandaki 11 farklı glikoz seviyesi için rezonans frekansında yaklaşık 90 MHz'lik bir kayma göstermiştir. Bu da farklı glikoz çözeltilerini ayırt edebilmek için önemli bir sonuçtur. Bu sensör konsepti, kandaki glukoz oranını izleyen giyilebilir non-invaziv cihazlar için umut verici bir çalışma olabilir.

4.2. Çok Bantlı Soğurucu Uygulaması

Metalmalzeme tabanlı soğurucular, elektromanyetik dalgaların belirli frekanslarda tamamen emilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmış yapılardır. Genellikle dalgaların enerjisini ısıya dönüştürürler ve radar, sensör, enerji hasadı gibi çeşitli alanlarda kullanılırlar. Soğurucu tasarımı, frekansa, malzemeye ve geometrik parametrelere göre optimize edilir.

Bu soğurucu uygulamasında Lorenz çekicisinin başlangıç koşullarındaki değişimden elde edilen desenler rezonatör katmanında kullanılmıştır. Üçüncü bölümde kaotik desen elde etme süreci detaylı olarak açıklanmıştır.

Matlab yazılımında Lorenz çekicisinin başlangıç koşulları için Tablo 4.4'te gösterilen değerler kullanılarak Lorenz sistemi çözülmüş ve 12 farklı desen elde edilmiştir. Bu desenler Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Burada Lorenz çekicisinin başlangıç koşullarındaki (x_0, y_0, z_0) değişimlerinin soğurucu tasarımındaki etkisi incelenmiştir.

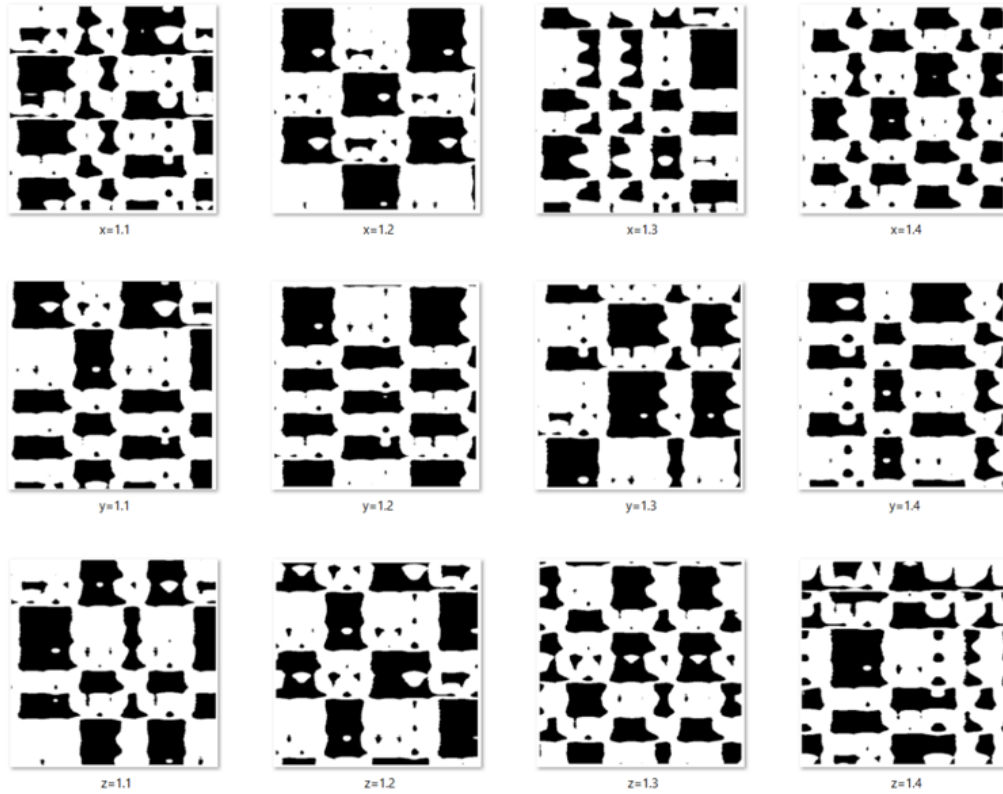
Tablo 4.4'teki her satırdan farklı bir desen elde edilmektedir. Örneğin ilk dört satırda x_0 başlangıç koşulu 0,1 adımlarla değiştirilmiştir. Diğer parametreler ise (y_0, z_0) sabit

tutulmuştur. Aynı şekilde sonraki dört satırda y_0 başlangıç koşulu parametresi 0,1 adımlarla değiştirilmiş diğer parametreler (x_0, z_0) sabit kalmıştır. Son dört satırda ise z_0 başlangıç koşulu parametresi 0,1 adımlarla değiştirilmiş diğer parametreler (x_0, y_0) sabit tutulmuştur.

Tablo 4.4. Başlangıç koşullarındaki değişim tablosu

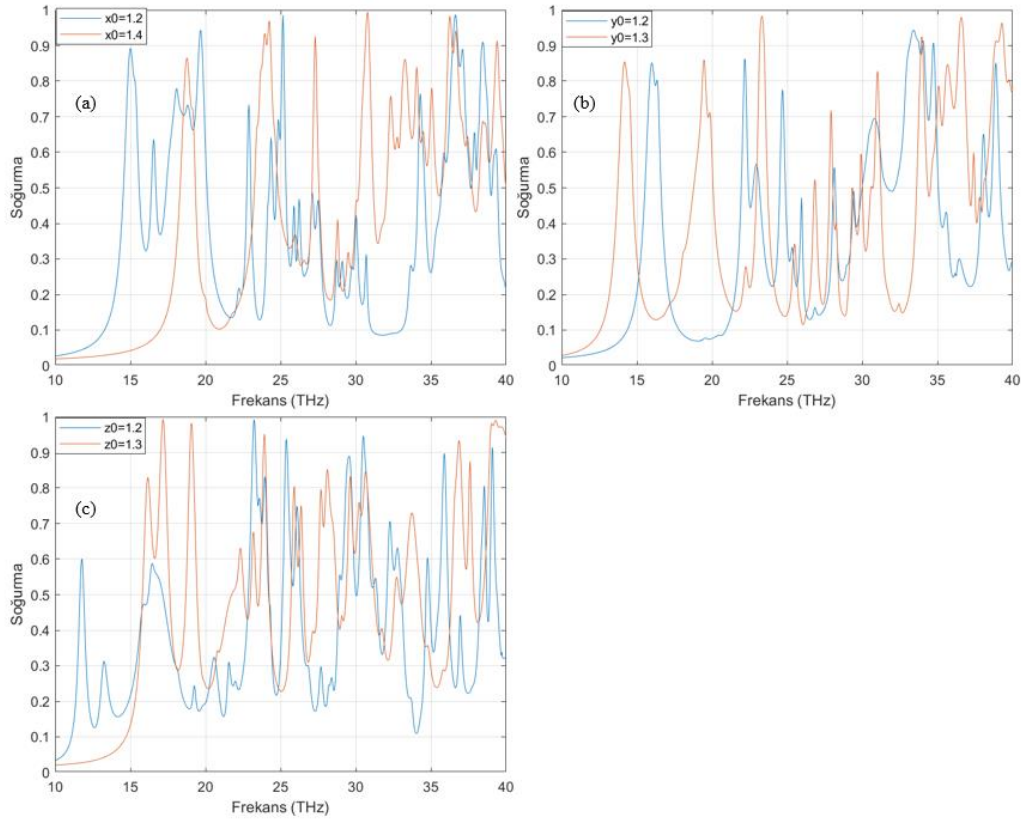
x_0	y_0	z_0
1,1	1,0	1,0
1,2	1,0	1,0
1,3	1,0	1,0
1,4	1,0	1,0
1,1	1,1	1,0
1,1	1,2	1,0
1,1	1,3	1,0
1,1	1,4	1,0
1,1	1,0	1,1
1,1	1,0	1,2
1,1	1,0	1,3
1,1	1,0	1,4

Şekil 4.8’de gösterilen desenler incelendiğinde Lorenz çekicisinin başlangıç koşullarındaki 0,1 adımlık değişimin desen üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.



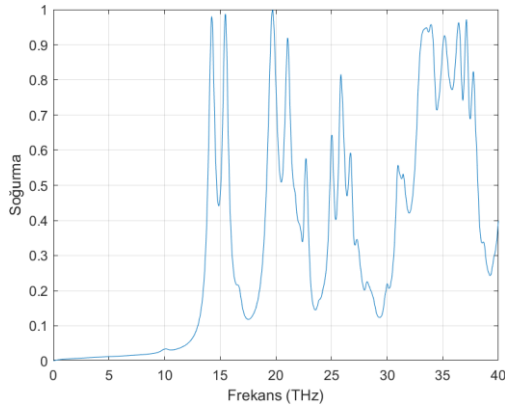
Şekil 4.8. Lorenz sisteminin farklı başlangıç koşullarından elde edilen desenler

Şekil 4.8’de elde edilen desenlerin bir kısmıyla simülasyon çalışmaları yapılmış ve bunlara ait sinyal emilim oranları Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Burada metamalzeme tasarımında alttaş olarak Rogers RT5870 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Şekil 4.9 (a)’da x_0 parametresinin 1,2 ve 1,4 olduğu değerlerden elde edilen desenlerin sinyal emilim oranları kıyaslanmıştır. Sinyal emilim oranlarının çok bariz bir şekilde değiştiği gözlenmektedir. Benzer şekilde (b) ve (c)’de de sırasıyla y_0 ve z_0 parametre değerlerinin sinyal emilim oranları kıyaslanmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi, parametre değişiminin sinyal emilimi üzerindeki etkilerinde bir doğrusal ilişki gözlenmemektedir.



Şekil 4.9. Parametrik çalışmaların bazılarının soğurma oranlarının karşılaştırılması

Toplamda 12 adet desen çalışmasında sinyal emilim oranı en yüksek olanlardan biri Tablo 4.4’teki birinci satırdaki parametrelerden elde edilmiştir ve soğurma oranı Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Bunun nedeni performans kriterleri olan, soğurma oranının %90’dan büyük olduğu rezonans noktaları ve bant genişliğidir.

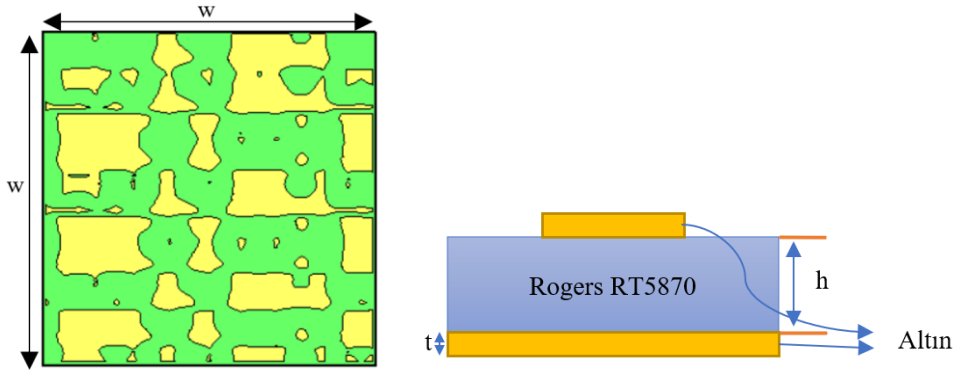


Şekil 4.10. Tasarlanan yapının 10-40 THz aralığındaki soğurma spektrumu

Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi mükemmel metamalzeme sinyal emilimleri, sırasıyla %97,98, %98,73, %99,85, %92,03, %95,62, %92,56, %96,21, %97,09 sinyal emilim değerlerine karşılık gelen 14,24 - 15,44 - 19,72 - 21,04 - 33,92 - 35,16 - 36,44 ve 38,79 THz'deki sekiz pikte gözlemlenmiştir.

Bu sinyal soğurma piklerinin tümü elektrik dipol rezonansı nedeniyle meydana gelir. Elektrik dipol rezonansları nötron ve protonların kütle merkezlerinin birbirlerine karşı titreşimleri sonucu meydana gelir (Goldhaber & Teller, 1948; Gric vd., 2015). Elde edilen bu piklerden soğurma oranı %90'dan az olanlar soğurucu olarak değerlendirilmezler. Bu tür pikler, gelen elektromanyetik radyasyonu soğuramadıkları için pratikte kullanılmazlar. Sadece %90'dan daha yüksek emilim oranına sahip emilim bantları dikkate alınır.

Soğurucu tasarımının ve parametre bilgileri Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Tasarım kare şeklinde tasarlanmış ve kenar uzunluğu w olarak ifade edilmiştir. Tasarlanan soğurucu üç katmandan oluşmaktadır. Tasarımın alt katmanı tamamen altın metaliyle kaplı yüzeyden oluşmuştur. Orta katmanda ise h yüksekliğinde dielektrik alttaş bulunmaktadır. Üst katmanda ise Lorenz çekicisinden elde edilen desen rezonatör olarak bulunmaktadır. Rezonatör katmanı da altın metalinden oluşmaktadır.



Şekil 4.11. Tasarlanan çok bantlı soğurucunun parametrik bilgileri

Şekil 4.11'de gösterilen birim hücrenin boyutu $w = 18 \text{ um}$ ve dielektrik alt tabakanın kalınlığı $h = 900 \text{ nm}$ 'dir. Alt katman ve rezonatör katmanının kalınlığı $t = 30 \text{ nm}$ 'dir.

Laboratuvar koşullarında, elektromanyetik malzemeler çeşitli sınır koşulları altında test edilirler. Tasarımların sayısal analizinde PEC/PMC, PEC, serbest uzay, periyodik ve birim hücre gibi çeşitli sınır koşulları kullanılmıştır. Tasarımın etkin boyutlarını belirlemek ve simülasyon süreçlerini basitleştirmek için x ve y yönlerinde birim hücre, z yönünde ise açık sınır koşulu seçilmiştir. Bu sayede dalga yansıması azaltılmış ve gelen dalganın soğurulması arttırılmıştır. Tasarlanan yapının elektromanyetik özellikleri ve sinyal soğurma performansı, CST Studio Suite elektromanyetik simülatörüyle analiz edilmiştir.

Tasarımda dielektrik alttaş olarak farklı malzemelerin (ZnSe, Arlon AD410, FR4 ve Rogers RT5870) soğurma performansı incelenmiş ve Rogers RT5870 malzemesinin soğurma oranı daha iyi olduğundan alttaş olarak seçilmiştir. Dielektrik sabiti 2,33 ve kayıp tanjantı 0,0012'dir. Rezonatörleri tasarlamak ve topraklama plakaları için $4,56 \times 10^7 \text{ S/m}^{-1}$ iletkenliğe sahip altın metali kullanılmıştır.

Sinyal soğurma oranı Denklem 4.1 ile ifade edilebilir.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$$

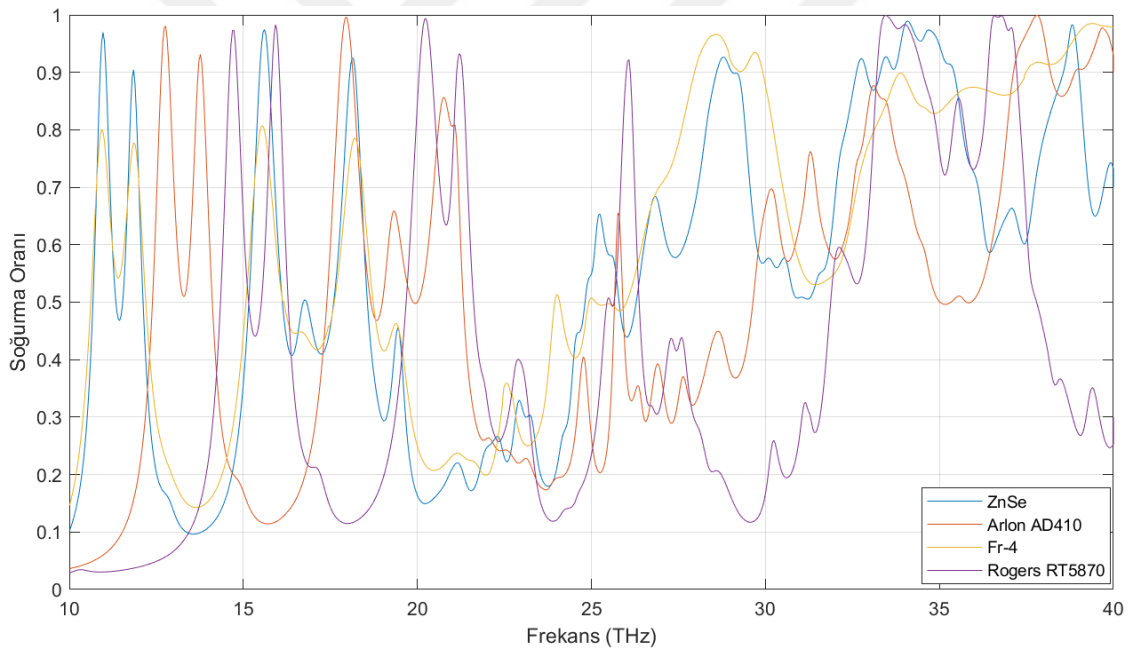
Denklem 4.1. Sinyal soğurma oranı

$A(\omega)$, $R(\omega)$ ve $T(\omega)$ sırasıyla soğurma, yansıma ve iletimi temsil etmektedir. Sinyal emiliminin kaynağı Denklem 4.1'den anlaşılabilir. Tasarım, iletim ve yansıma katsayıları sıfır olduğunda gelen elektromanyetik radyasyonu emer. Sıfır geçiş, dalga iletimini engelleyen topraklama plakası ile sağlanır. Bu nedenle soğurma değerini $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$

olarak ifade edebiliriz. Üst düzlemdeki rezonatörlerin uygun tasarımı ile yansıma katsayısı minimize edilebilir.

Simülasyon Sonuçları: Simülasyon sonuçları farklı parametrelerle kıyaslanarak alt başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

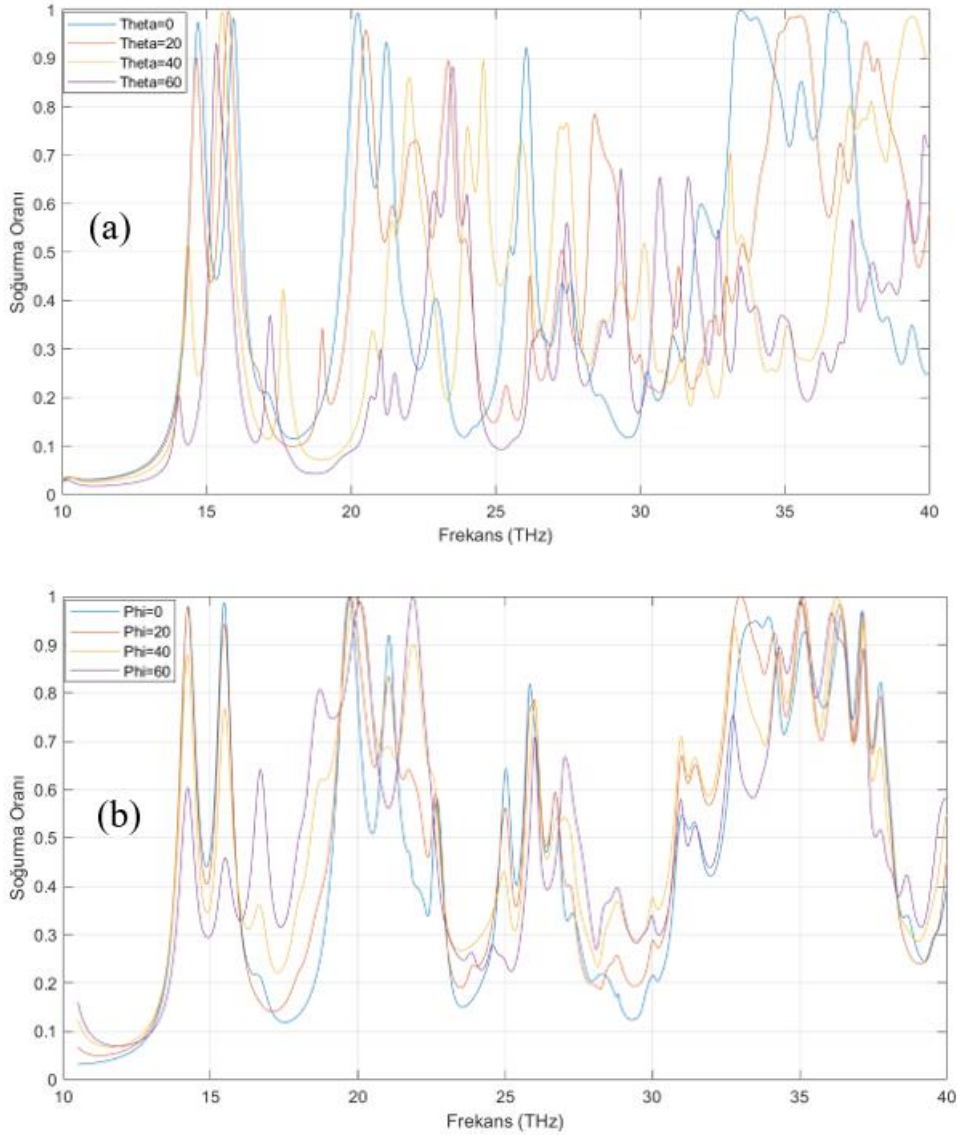
Dielektrik Alttaşı Tipinin Etkisi: İlk parametre olarak, farklı dielektrik alttaşı malzemelerinin soğurma performansları incelenmiştir. Şekil 4.12, simülasyon çalışmasında kullanılan dielektrik alttaşı malzemelerin (ZnSe, Arlon AD410, FR4 ve Rogers RT5870) soğurma değerlerini göstermektedir. Bu sonuçlardaki soğurma farklılıkları, malzemelerin dielektrik sabitleri ve kayıp tanjantlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Kullanılan bu alttaşı malzemelerinin dielektrik sabitleri sırasıyla 5,73 – 4,10 – 4,3 ve 2,33 iken, bunlara karşılık gelen kayıp tanjant değerleri sırasıyla 1 - 0,003 - 0,025 ve 0,0012'dir.



Şekil 4.12. Farklı dielektrik alttaşı malzemelerinin sinyal soğurma oranları

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, ZnSe ve Rogers RT5870 dielektrik alttaşları sekiz tepe noktasında rezonans sergilemiştir, ancak ZnSe alttaşı kullanılan tasarımın soğurma oranları daha düşüktür. Fr-4 dielektrik malzemesinin üç tepe noktası üretebildiği, Arlon AD410 dielektrik alttaşı kullanılan tasarımın ise beş tepe noktası üretebildiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre, MTM tasarımında alttaşı malzeme olarak Rogers RT5870 seçilmiştir. Bundan sonraki diğer sayısal analiz çalışmalarında alttaşı olarak bu malzeme kullanılmıştır.

Soğurma Tepkisi ve Polarizasyon Açısı Toleransı: Bir metamalzeme yüzeyi, kendisine çarpan elektromanyetik dalganın bir kısmını yansıtacak ve soğurma özelliği azalacaktır. İdeal soğurucular, geliş açısı ve polarizasyondan bağımsız olarak elektromanyetik dalgayı soğurabilmelidir. Tasarlanan yapı, Şekil 4.13'te gösterildiği gibi farklı geliş açıları ve farklı polarizasyon açıları için benzer soğurma özellikleri göstermektedir.

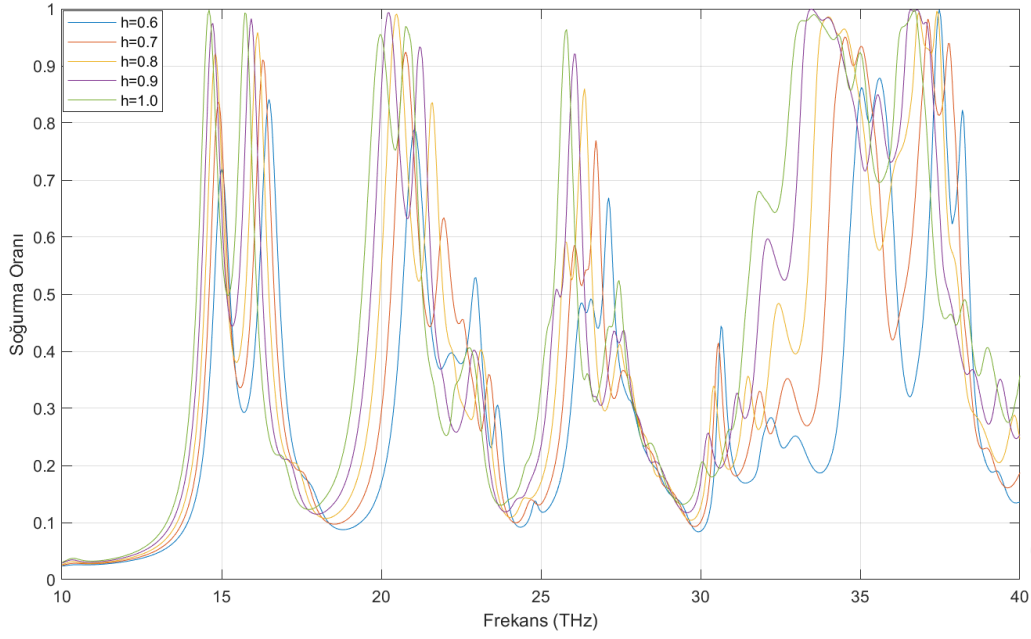


Şekil 4.13. Elektromanyetik dalganın farklı geliş (a) ve polarizasyon (b) açılarına göre soğurulma grafikleri

Dört farklı eğik geliş açısı 0° ile 60° arasında test edilmiş ve soğurma sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Tasarımda kullanılan kaotik desenden elde edilen rezonatörün farklı geliş ve polarizasyon açılarından kısmen bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Spektrumun bazı

noktalarında farklı geliş ve polarizasyon açılarında soğurma oranlarının düştüğü de gözlemlenmektedir.

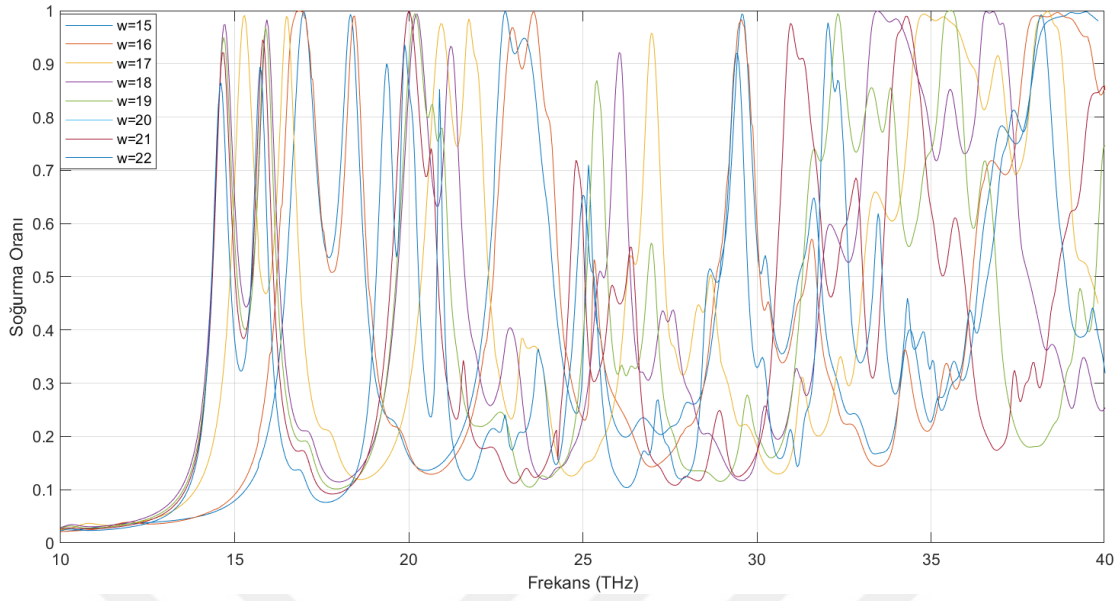
Dielektrik Alttaşı Kalınlığının Etkisi: Rezonatör tasarımının ikinci önemli parametresi dielektrik alttaşı kalınlığıdır. Bu parametre rezonans frekansına karşı kapasitif etkiyi kontrol eder. Şekil 4.14, birinci rezonans frekansının kalınlıkla birlikte kaydığını ve ikinci rezonansı bozduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Rogers RT5870 alttaşı malzemesinin kalınlığının tasarlanan MTM'nin soğurma katsayısı üzerindeki etkisi.

Şekil 4.14'ten de görülebileceği gibi, farklı parametre sonuçlarına göre Rogers RT5870 alt tabaka malzemesinin optimum kalınlığı $h = 0,9 \mu\text{m}$ 'de gerçekleşmiştir ki bu da başarılı soğurma sonuçlarından biridir. Bu nedenle Rogers RT5870 alttaşı kalınlığı $0,9 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir.

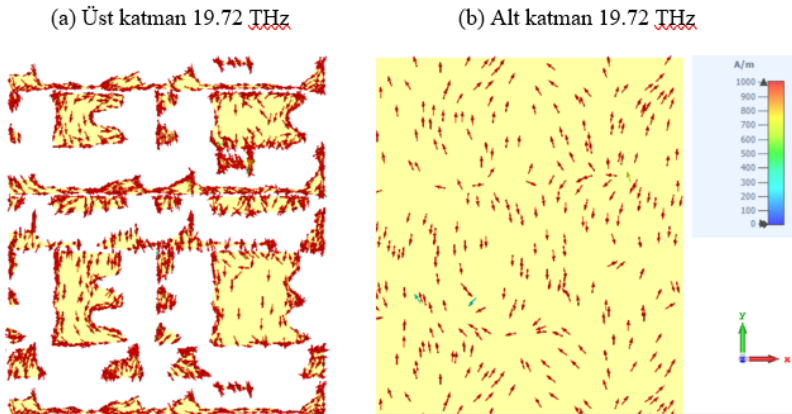
Birim Hücre Boyutunun Etkisi: Soğurucu tasarımında incelenen bir diğer parametre de birim hücre boyutu w parametresidir. Şekil 4.15'teki sonuçlar sırasıyla $15 \times 15 (\mu\text{m})^2$, $16 \times 16 (\mu\text{m})^2$, $17 \times 17 (\mu\text{m})^2$, $18 \times 18 (\mu\text{m})^2$, $19 \times 19 (\mu\text{m})^2$, $20 \times 20 (\mu\text{m})^2$, $21 \times 21 (\mu\text{m})^2$ ve $22 \times 22 (\mu\text{m})^2$ boyutlarında sekiz farklı birim hücre simüle edilerek elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Birim hücre boyutunun soğurma katsayısı üzerindeki etkisi

Farklı boyutlar için soğurma spektrumunun değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, her bir rezonatörün belirli bir frekansta çalıştığı dalga boyunun etkisi olabilir. Birim hücre boyutu değiştirildiğinde, ilgili dalga boyu da değişir. Bu parametrik çalışmadan, tasarlanan MTM rezonatörünün maksimum soğurma elde etmesi için birim hücre boyutu için optimum koşul $w = 18$ olarak belirlenmiştir.

Yüzey Akımları Analizi: Tasarlanan metamalzeme soğurucunun fiziksel soğurma mekanizmasını daha iyi anlamak için, tasarımın üst ve alt katmanlarının yüzey akım dağılımları incelenmiştir ve Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Tasarlanan soğurucunun 19.72 THz’de yüzey akım dağılımı (a) üst katman, (b) alt katman

Şekil 4.16 (a)’da üst katmandaki paralel ve antiparalel yüzey akımı dağılımları manyetik dipol rezonans modunu göstermektedir. Metalik katmanlardaki yüzey akımları zıt yönlerde

akabilir. Bu, gelen manyetik alan ile eşleşen bir manyetik akı kuplajı üretir. Alt katmandaki akım dağılımı Şekil 4.16 (b)'de gösterilmektedir. Bu, akım dağılımının paralel olduğunu ve elektrik rezonansını tetiklediğini göstermektedir.

Tablo 4.5, tasarlanan çok bantlı soğurucu MTM yapısının genel performansının literatürde bildirilen diğer çalışmalarla karşılaştırılmasını göstermektedir. Tablo 4.5'te MTM birim hücre yapısı, çalışılan frekans aralığı, birim hücre boyutu, kullanılan alttaş kalınlığı, soğurma oranları ve tepe sayıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Lorenz kaotik çekicisi ile tasarlanan yapının soğurma özellikleri literatürde rapor edilen diğer tasarımlarla benzer sonuçlar göstermektedir.

Tablo 4.5. Tasarlanan yapının literatür çalışmalarıyla karşılaştırması

Kaynak	Tasarım	Çalışma Frekansı (THz)	Birim hücre boyutu (μm^2)	Alttaş Kalınlık (μm)	Soğurma Oranı (%)	Pik Sayısı	Yayın Yılı
(Abdulkarim, Alkurt, vd., 2022)	Bakır/Znse/Bakır	15-38	9,5x9,5	0,6	99-99-99	3	2022
(Daniel & Bawuah, 2020)	Al/TiO ₂ /Al	2-5	36x36	2	100-97	2	2020
(Jain vd., 2020)	Metal/Dielektrik Plaka/Metal	12-28	4x4	1,5	99	1	2020
(Meng vd., 2018)	Bakır/Polimid/ Silikon	0-4,5	80x80	18	99,96-98,92-99,83-99,35-99	5	2018
(Jain vd., 2020)	Au/Grafen/SiO ₂ / Au	4-8	43,8x43,8	8,1	99,3-99,2-99,4-95,2-98,1	5	2020
(B.-X. Wang vd., 2019)	Au/dielektrik plaka/Au	0-4,05	60x60	2	100-99-99	3	2019
(Cheng vd., 2018)	Altın/PDMS/Altın	1-3	55x50	15	93-100	2	2018
(Abdulkarim, Özkan Alkurt, vd., 2022)	Metal/ZnSe/Metal	13-40	8x8	0,6	99-99,85-92,25	3	2022
(Abdulkarim vd., 2021)	Bakır/Znse/Bakır	15-35	9,5x9,5	0,6	98,44-99,28	2	2021
(Ahmadivand vd., 2017)	Slica/Silikon/ Grafen/Gümüş	1-6	20	0,9	-	2	2017
Bu çalışma	Altın/Rogers RT5870/Altın	10-40	18x18	0,9	97,98-98,73-99,85-92,03-95,62-92,56-96,21-97,09	8	2024

Tablo 4.5'teki literatür çalışmalarıyla kıyaslama yapıldığında tasarlanan çalışmanın bu alanda kullanılabileceği sonucu çıkmaktadır. 10-40 THz gibi geniş bir frekans aralığında yakalanan pik sayısı diğerlerinden fazladır. Çoklu pik noktaları, elektromanyetik spektrumun geniş bir aralığında farklı uygulamalar geliştirilmesinde esneklik sağlayabilir.

Spektrumun kızılötesi bölgesinde çalışan, kaotik çekicilerden Lorenz çekicisi desenine sahip Rogers RT5870 alttaş ile mükemmel bir sekiz bantlı emici başarıyla tasarlanmış ve araştırılmıştır. Gerçekleştirilen tasarımın alt tabakası, elektromanyetik dalganın iletimini önlemek ve Emilimi artırmak için metal levha ile kaplanmış ve 8 bantlı MTM mükemmel sinyal emici elde edilmiştir. Sonuçlar, 14,24 – 15,44 – 19,72 – 21,04 – 33,92 – 35,16 – 36,44 ve 38,79 THz'de bire yakın soğurma oranlarına sahip sekiz tepe noktası göstermiştir. Bu yapı, birçok parametre (alttaş tipi, birim hücre boyutu, alttaş kalınlığı, polarizasyon açısı, vb) kullanılarak optimum şekilde tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Tasarımın soğurma özelliklerinin polarizasyon açısına kısmen duyarsız ve gelen dalgaya kısmen geniş açılı duyarsız olduğu tespit edilmiştir. MTM yapısının genel performansının, rapor edilen diğer yapılarla benzer özellikler sergilediği görülmüştür. Kaotik desenler kullanılarak tasarlanan rezonatörlerin MTM soğurucu tasarımında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kaotik çekicilerden elde edilen fraktal yapılı desenlerin hem sensör hem de soğurucu uygulamalarındaki kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu desenler metamateryalin rezonatör kısmının tasarımında kullanılmaktadır. Kaotik çekiciler, dinamik sistemlerde ortaya çıkan karmaşık ve öngörülemeyen davranışları temsil etmektedirler. Doğada, kaotik davranışlar birçok biçimde görülebilir. Örneğin, hava durumu, Lorenz çekicisi adı verilen kaotik bir sistemle modellenebilir ve bu model, çok küçük hava değişimlerinin uzun vadede büyük fırtınalara neden olabileceğini gösterir. Benzer şekilde, doğadaki popülasyon dinamikleri, su damlacıklarının yüzeyde oluşturduğu desenler, akarsuların yataklarındaki değişiklikler, insan vücudundaki kan damarları gibi süreçler de kaotik davranışlar gösterebilir. Kaos, doğada düzenin tamamen yokluğu anlamına gelmemektedir. Aksine, kaos teorisi doğanın karmaşık sistemlerinde gizli bir düzen olduğunu gösterir. Kaotik sistemlerin bu özellikleriyle metamateryal tasarımında rezonatör katmanında yenilikçi desenler oluşturulmasında büyük potansiyel oluşturmaktadır. Bu nedenle Öklid geometrisinden elde edilen desenler yerine tez çalışması kapsamında geliştirilen metamateryal tabanlı sensör ve soğurucuların tasarımında fraktal yapılı kaotik desenler kullanılmıştır. Fraktal yapılı kaotik desenlerin sensör ve soğurucu tasarımlarındaki performansı araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında, CST Microwave Studio Suite elektromanyetik simülatörü kullanılarak sensör ve soğurucunun sayısal analizleri yapılmıştır. Metamateryal tabanlı sensör çalışmasında Rossler kaotik çekicisinden elde edilen desenler rezonatör katmanında kullanılmıştır. Soğurucu tasarımında ise Lorenz kaotik çekicisinden elde edilen desenler kullanılmıştır. Sayısal analizlerde, metamateryallerin frekans yanıtları, sensör hassasiyetleri ve soğurma kapasiteleri incelenmiştir. Belirlenen frekans aralıklarında S-parametre analizleri yapılarak, bu metamateryallerin sensör ve soğurucu performansları detaylı olarak incelenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen uygulamalardan biri metamateryal tabanlı sensör uygulamasıdır. Spektrumun C bandı olarak bilenen 4-8 GHz frekans aralığında çalışılmıştır. Tasarım üç katmandan oluşmaktadır. Rezonatör katmanında Rossler kaotik çekicisinden elde edilen desen kullanılmıştır. Sensörün amacı kandaki glukoz oranlarını tespit etmektir. 0-250 mg/dl aralığında 25 mg/dl'lik artışlarla toplamda 11 farklı glukoz seviyesi ayırt

edilmiştir. Bu sensör, literatürdeki çalışmalara kıyasla daha yüksek bir hassasiyet göstermiştir. Kan örneklerinin rezonans frekanslarında 90 MHz ile 140 MHz arasında kaymalara neden olmaktadır. Bu frekans kaymaları sensörün algılama performansı açısından oldukça iyi bir değerdir. Sensörün kalite faktörü 42,89 ile 1941,33 değerleri arasında değişmektedir ve değerler sensörün yeterli duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca sensörün hassasiyeti dB/(mg/dl) cinsinden de hesaplanmış ve 0,051 olarak bulunmuştur. Bu değer sensörün minimum algılama hassasiyetidir. Bu değer literatürde elde edilen değerlerden daha iyi bir sonuçtur.

Sensör tasarımında Rossler kaotik çekicisinin başlangıç koşulu değişiminin sensör performansı üzerine etkisi de araştırılmıştır. 11 farklı desenden 11 farklı tasarım elde edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan sensör tasarımının kaotik bir sistemle kontrol edilebileceği görülmüştür.

Kaotik desenlere sahip metamateryal tabanlı sensörler, çevresel değişikliklere karşı hassas bir şekilde tepki verebilmektedir. Özellikle kandaki glukoz seviyelerinin tespitinde kullanılan bu sensörlerin, küçük dielektrik değişikliklerini algılama yetenekleriyle yüksek hassasiyet sunabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak sensör tasarımında kaotik desenlerin etkinliği ortaya koyulmuş ve gelecekteki sensör tasarımları için umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Rossler çekicisinden elde edilen desenlerin sensör performansında etkili olduğu görülmüştür.

Bu sensör tasarımının, farklı malzeme özelliklerine nasıl uyarlanabileceğini ve performanslarının nasıl optimize edilebileceğini anlamamıza olanak tanır. Örneğin, bu sensörün dielektrik katsayısı 47-70 aralığında değişen malzemelerle rahatlıkla kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu geniş dielektrik katsayısı aralığı, sensörün çeşitli uygulamalarda ve farklı malzemeler üzerinde çalışabileceğini göstermektedir. Bu sensör tasarımında alttaşı olarak FR-4 malzemesi kullanılmıştır. Tasarımda farklı alttaşı malzemeler kullanılarak da sensör performansı araştırılabilir. Ayrıca kaotik çekicinin diğer başlangıç koşullarındaki (x_0, y_0) değişimlerinin etkileri de detaylı bir şekilde araştırılabilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen başka bir uygulama ise metamateryal tabanlı soğuruculardır. Spektrumun kızılötesi bölgesinde (10-40 THz) çalışılmıştır. Üç katmandan oluşmaktadır. Rezonatör katmanında Lorenz kaotik çekicisinden elde edilen desenler rezonatör olarak kullanılmıştır. Bu çalışmadaki amaç kaotik desenlerin soğurucu

tasarımlarında kullanılabileceğini göstermektedir. Lorenz çekicisinin başlangıç koşullarındaki değişimlerinden 12 farklı fraktal yapıyla desen elde edilmiştir. Alttaşı olarak 4 farklı dielektrik malzemenin soğurma performansları karşılaştırılmış ve Rogers RT5870 malzemesi seçilmiştir. Kullanılan alttaşı malzemenin kalınlığı parametrik çalışmaya yapılarak $0,9 \mu m$ olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde birim hücre boyutu da $18 \mu m$ olarak belirlenmiştir. 12 farklı desenin sayısal analizleri yapılarak soğurma performansı diğerlerine göre daha iyi olanı belirlenmiştir. Daha sonra EM dalganın farklı geliş ve polarizasyon açılarına göre değerlendirilmiştir. Farklı geliş açıları olarak 0° ile 60° arasında 4 farklı açıda değerlendirilmiştir. EM dalganın farklı geliş açılarına göre kısmen bağımsız olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen tasarım çalışılan frekans aralığında 8 farklı noktada soğurma özelliği göstermiştir. Bu noktalar sırasıyla 14,24 – 15,44 – 19,72 – 21,04 – 33,92 – 35,16 – 36,44 ve 38,79 THz'dir. Bu noktalarda yüzde olarak 97,98 – 98,73 – 99,85 – 92,03 – 95,62 – 92,56 – 96,21 – 97,09 oranlarında soğurma performansı göstermiştir. Bu yakalanan çoklu pik noktaları, EM spektrumun geniş bir frekans aralığında farklı uygulamalar geliştirilmesinde esneklik sağlayabilir.

Soğurucu tasarımı, özellikle elektromanyetik dalgaların etkili bir şekilde soğurulması gereken kızılötesi bölgede gizlilik, görüntüleme ve algılama gibi uygulamalarda bir avantaj sağlayabilir. Bu soğurucu, çalışılan frekans aralığında 8 farklı frekans noktasında % 90'ın üzerinde soğurma özelliği sergilemiştir. Bu tasarımın, çeşitli uygulamalarda potansiyel olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

Soğurucu tasarımında, Lorenz çekicisi daha fazla başlangıç koşulu ve parametre için çözülerek daha fazla sayıda desen elde edilebilir. Bu desenler ile daha fazla analiz yapılabilir ve daha farklı sonuçlar elde edilebilir. 480×480 piksel olarak belirlenen görüntü boyutu artırılarak veya azaltılarak bunun sonuçlara etkisi incelenebilir. Desenlerin elde edilmesinde Julia setindeki c parametresi sabit tutulmuştur. Bu parametredeki değişimlerle elde edilecek desenlerin soğurma sonuçları araştırılabilir. Desen elde edilmesinde Julia seti yerine, Mandelbrot seti, Sierpinski Üçgeni gibi fraktal yapılar kullanılabilir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sensör ve soğurucu tasarımlarında, kaotik çekicilerden elde edilen desenlerin rezonatör olarak kullanılmasının yenilikçi ve etkili çözümler sunabileceği gösterilmektedir. Sensör uygulamasında bu tür desenlerin kullanımı, performansı artırmakta ve yeni uygulama alanlarına yönelik fırsatlar sunmaktadır. Soğurucu

uygulamasında ise kaotik desenlerin Öklid geometrisiyle gerçekleştirilen çalışmalarla benzer sonuçlar sergilediği gösterilmektedir. Gelecekte, bu tür metamalzemelerin daha geniş frekans aralıklarında ve farklı çevresel koşullarda test edilmesi, performanslarının optimize edilmesi ve pratik uygulamalara entegrasyonu üzerinde çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, deneysel çalışmalarla simülasyon sonuçlarının doğrulanması, bu tasarımların gerçekte uygulanabilirliğinin anlaşılmasında önemli bir adım olacaktır.

Genel olarak kaotik çekici desenlerin metamalzeme tasarımlarında kullanılması sensör ve soğurucu uygulamalarında önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmanın bulguları, metamalzeme tasarımlarında yenilikçi yaklaşımlar ve potansiyel uygulamalar için bir temel oluşturabilir. Kaotik desenlerin benzersiz özellikleri, metamalzemelerin algılama hassasiyetini ve soğurma kapasitesini artırabilir, elektromanyetik uygulamalarda etkili çözümler sunabilir.

Gelecekte kaotik desenlere sahip yapılar, sensör ve soğurucu uygulamalarının ötesinde, anten tasarımı, enerji hasadı, frekans seçici yüzeyler ve gizlilik teknolojileri gibi çeşitli alanlarda da potansiyel olarak geliştirilebilir. Bu tür yapılar, anten performansını iyileştirmek, enerji toplama verimliliğini artırmak, belirli frekansta seçici özellikler sağlamak ve gizlilik ve güvenlik uygulamalarında yenilikçi çözümler sunmak için kullanılabilir. Kaotik desenlerin, karmaşık ve düzensiz bir yapıda olmaları bu uygulamalarda benzersiz ve etkili performans özellikleri sağlayabilir, bu da onları çok çeşitli mühendislik ve teknolojik uygulamalar için cazip bir seçenek haline getirmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdulkarim, Y. I., Alkurt, F. Ö., Awl, H. N., Muhammadsharif, F. F., Bakır, M., Dalgac, S., Karaaslan, M., & Luo, H. (2021). An ultrathin and dual band metamaterial perfect absorber based on ZnSe for the polarization-independent in terahertz range. *Results in Physics*, 26, 104344.
- Abdulkarim, Y. I., Alkurt, F. Ö., Bakır, M., Awl, H. N., Muhammadsharif, F. F., Karaaslan, M., Appasani, B., Al-Badri, K. S. L., Zhu, Y., & Dong, J. (2022). A polarization-insensitive triple-band perfect metamaterial absorber incorporating ZnSe for terahertz sensing. *Journal of Optics*, 24(10), 105102.
- Abdulkarim, Y. I., Deng, L., Karaaslan, M., Dalgac, Ş., Mahmud, R. H., Ozkan Alkurt, F., Muhammadsharif, F. F., Awl, H. N., Huang, S., & Luo, H. (2020). The detection of chemical materials with a metamaterial-based sensor incorporating oval wing resonators. *Electronics*, 9(5), 825.
- Abdulkarim, Y. I., Mohanty, A., Acharya, O. P., Appasani, B., Khan, M. S., Mohapatra, S., Muhammadsharif, F. F., & Dong, J. (2022). A review on metamaterial absorbers: microwave to optical. *Frontiers in Physics*, 10, 893791.
- Abdulkarim, Y. I., Özkan Alkurt, F., Awl, H. N., Altıntaş, O., Muhammadsharif, F. F., Appasani, B., Bakır, M., Karaaslan, M., Taouzari, M., & Dong, J. (2022). A symmetrical terahertz triple-band metamaterial absorber using a four-capacitance loaded complementary circular split ring resonator and an ultra-thin ZnSe substrate. *Symmetry*, 14(7), 1477.
- Addison, P. S. (1997). *Fractals and chaos: an illustrated course*. CRC Press.
- Ahmadivand, A., Sinha, R., Karabiyik, M., Vabbina, P. K., Gerislioglu, B., Kaya, S., & Pala, N. (2017). Tunable THz wave absorption by graphene-assisted plasmonic metasurfaces based on metallic split ring resonators. *Journal of Nanoparticle Research*, 19, 1-14.
- Akçelik, H., Yücedağ, O. M., Torun, E., & Koçer, H. (2015). A metamaterial based broadband microstrip antenna. 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO),

- Ali, T., Khaleeq, M. M., Pathan, S., & Biradar, R. C. (2018). A multiband antenna loaded with metamaterial and slots for GPS/WLAN/WiMAX applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(1), 79-85.
- Alici, K. B., & Ozbay, E. (2007). Electrically small split ring resonator antennas. *Journal of applied physics*, 101(8).
- Alligood, K. T., Sauer, T. D., Yorke, J. A., & Chillingworth, D. (1998). Chaos: an introduction to dynamical systems. *SIAM Review*, 40(3), 732-732.
- Altıntaş, O., Aksoy, M., Ünal, E., & Karaaslan, M. (2019). Chemical liquid and transformer oil condition sensor based on metamaterial-inspired labyrinth resonator. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(6), B482.
- Alù, A., & Engheta, N. (2005). Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings. *Physical Review E*, 72(1), 016623.
- Aristov, A. I., Manousidaki, M., Danilov, A., Terzaki, K., Fotakis, C., Farsari, M., & Kabashin, A. V. (2016). 3D plasmonic crystal metamaterials for ultra-sensitive biosensing. *Scientific Reports*, 6(1), 25380.
- Arrowsmith, D., Mondragon-C, R., Pitts, J. M., & Woolf, M. (2003). *Internet packet traffic congestion*. 2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS),
- Ashraf, F. A. (2012). Implementation of the chaotic mobile robot for the complex missions. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 8-12.
- Bagmanci, M., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., Bakır, M., & Sabah, C. (2019). Solar energy harvesting with ultra-broadband metamaterial absorber. *International Journal of Modern Physics B*, 33(08), 1950056.
- Baker, G. L., & Gollub, J. P. (1996). *Chaotic dynamics: an introduction*. Cambridge university press.
- Bakır, M. (2016). *Metamalzeme tabanlı sensör, sinyal emici ve frekans seçici yüzey uygulaması* [Doktora Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi].
- Bakır, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Bagmancı, M., Akdoğan, V., & Temurtaş, F. (2018). Tunable energy harvesting on UHF bands especially for GSM frequencies. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10(1), 67-76.

- Bakır, M., Karaaslan, M., Karadag, F., Dalgac, S., Ünal, E., & Akgöl, O. (2019). Metamaterial sensor for transformer oil, and microfluidics. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 34(5), 799.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- Barnsley, M. F. (2014). *Fractals everywhere*. Academic press.
- Bartsch, M., Dehler, M., Dohlus, M., Ebeling, F., Hahne, P., Klatt, R., Krawczyk, F., Marx, M., Min, Z., & Pröpper, T. (1992). Solution of Maxwell's equations. *Computer Physics Communications*, 73(1-3), 22-39.
- Bashiri, M., Ghobadi, C., Nourinia, J., & Majidzadeh, M. (2017). WiMAX, WLAN, and X-band filtering mechanism: Simple-structured triple-band frequency selective surface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 3245-3248.
- Baxter, H. W., Worrall, A. A., Pang, J., Chen, R., & Yang, B. (2021). Volatile liquid detection by terahertz technologies. *Frontiers in Physics*, 9, 639151.
- Beeharry, T., Yahiaoui, R., Selemani, K., & Ouslimani, H. H. (2018). A co-polarization broadband radar absorber for RCS reduction. *Materials*, 11(9), 1668.
- Belevitch, V. (1962). Summary of the history of circuit theory. *Proceedings of the IRE*, 50(5), 848-855.
- Berenger, J.-P. (1996). Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44(1), 110-117.
- Bhatia, S. S., Sivia, J. S., & Sharma, N. (2018). An optimal design of fractal antenna with modified ground structure for wideband applications. *Wireless Personal Communications*, 103, 1977-1991.
- Bilal, R., Saeed, M., Choudhury, P., Baqir, M., Kamal, W., Ali, M. M., & Rahim, A. A. (2020). Elliptical metallic rings-shaped fractal metamaterial absorber in the visible regime. *Scientific Reports*, 10(1), 14035.
- Bilotti, F., Nucci, L., & Vegni, L. (2006). An SRR based microwave absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(11), 2171-2175.

- Bose, J. C. (1898). On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure. *Proceedings of the Royal Society of London*, 63(389-400), 146-152.
- Broer, H. W., & Takens, F. (2011). *Dynamical systems and chaos* (Vol. 172). Springer.
- Brumfiel, G. (2009). Ideal focus: before they were touted as invisibility cloaks, metamaterials promised a perfect lens. Geoff Brumfiel reports on the struggle for superior vision. *Nature*, 459(7246), 504-506.
- Buell, K., Mosallaei, H., & Sarabandi, K. (2006). A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 54(1), 135-146.
- Buscarino, A., Camerano, C., Fortuna, L., & Frasca, M. (2010). Chaotic mimic robots. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1918), 2179-2187.
- Bute, M., Hasar, U. C., & Barroso, J. J. (2017). *Retrieval parameters of chiral metamaterials with proposed crescent shaped split ring resonators*. 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC),
- Byford, J. A., Park, K. Y., & Chahal, P. (2015). *Metamaterial inspired periodic structure used for microfluidic sensing*. 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC),
- Caloz, C., & Itoh, T. (2005). *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons.
- Chau, K. T., & Wang, Z. (2011). *Chaos in electric drive systems: analysis, control and application*. John Wiley & Sons.
- Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorzczak, T. M., & Kong, J. A. (2005). Negative refraction of a combined double S-shaped metamaterial. *Applied Physics Letters*, 86(15), 151909.
- Chen, L.-F., Ong, C. K., Neo, C., Varadan, V. V., & Varadan, V. K. (2004). *Microwave electronics: measurement and materials characterization*. John Wiley & Sons.
- Chen, M., Zhou, D., & Shang, Y. (2004). Nonlinear feedback control of Lorenz system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 21(2), 295-304.

- Chen, T., Li, S., & Sun, H. (2012). Metamaterials application in sensing. *Sensors*, 12(3), 2742-2765.
- 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.
- Choi, H., Naylon, J., Luzio, S., Beutler, J., Birchall, J., Martin, C., & Porch, A. (2015). Design and in vitro interference test of microwave noninvasive blood glucose monitoring sensor. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 63(10), 3016-3025.
- Choi, W. H., Kwak, B. S., & Nam, Y. W. (2020). Radar absorbing serrated edge for broadband radar cross-section reduction. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(3), 1112-1116.
- Chua, L., Komuro, M., & Matsumoto, T. (1986). The double scroll family. *IEEE transactions on circuits and systems*, 33(11), 1072-1118.
- Clemens, M., Gjonaj, E., Pinder, P., & Weiland, T. (2000). Numerical simulation of coupled transient thermal and electromagnetic fields with the finite integration method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(4), 1448-1452.
- Courant, R. (1994). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Lecture notes in pure and applied mathematics*, 1-1.
- Cui, T. J., Qi, M. Q., Wan, X., Zhao, J., & Cheng, Q. (2014). Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: science & applications*, 3(10), e218-e218.
- Çilingir, F. (2023). Kaosun Geometrisi. *Doğa Bilimleri Ve Matematikte Güncel Yaklaşımlar*, 15.
- Çimen, M. E., GARİP, Z., PALA, M. A., BOZ, A. F., & AKGÜL, A. (2019). Modelling of a chaotic system motion in video with artificial neural networks. *Chaos Theory and Applications*, 1(1), 38-50.

- Dai, X.-W., Lin, S.-Y., Mao, S.-W., & Luo, G. Q. (2020). Broadband metamaterial absorber with double resonant modes using single-layer substrate. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 119, 153179.
- Daniel, S., & Bawuah, P. (2020). Right-angle shaped elements as dual-band metamaterial absorber in terahertz. *Photonic Sensors*, 10, 233-241.
- Delihasanlar, E. (2020). *Farklı Konfigürasyonlarda Tekstil Esaslı Metamalzeme Soğurucu Tasarımı Ve X-Bant Uygulamaları* [Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi].
- Delihasanlar, E., & Yuzer, A. (2020). Wearable Textile Fabric Based 3D Metamaterials Absorber in X-Band. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 35(2).
- Devaney, R. (2018). *An introduction to chaotic dynamical systems*. CRC press.
- Devaney, R. L., & Alligood, K. T. (1989). *Chaos and fractals: The mathematics behind the computer graphics: The mathematics behind the computer graphics* (Vol. 1). American Mathematical Soc.
- Dincer, F., Sabah, C., Karaaslan, M., Unal, E., Bakir, M., & Erdiven, U. (2013). Asymmetric transmission of linearly polarized waves and dynamically wave rotation using chiral metamaterial. *Progress In Electromagnetics Research*, 140, 227-239.
- Dingwell, J. B. (2006). Lyapunov exponents. *Wiley encyclopedia of biomedical engineering*.
- Dolling, G., Wegener, M., Soukoulis, C. M., & Linden, S. (2007). Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength. *Optics letters*, 32(1), 53-55.
- Dong, Z.-G., Lei, S.-Y., Li, Q., Xu, M.-X., Liu, H., Li, T., Wang, F.-M., & Zhu, S.-N. (2007). Non-left-handed transmission and bianisotropic effect in a π -shaped metallic metamaterial. *Physical Review B*, 75(7), 075117.
- Douady, A. (1982). Itération des polynômes quadratiques complexes. *CR Acad. Sci. Paris Sér. I Math.*, 294, 123-126.
- Du, J., Zhang, P., Qiu, L., Gao, X., Huang, S., He, L., & Deng, L. (2021). Chaos patterned metasurface absorber with multi-peak and broadband. *Journal of applied physics*, 130(16).

- Duan, X., Chen, X., & Zhou, L. (2016). A metamaterial electromagnetic energy rectifying surface with high harvesting efficiency. *AIP Advances*, 6(12).
- Dulkadir, Y. G. (2021). *Metamalzeme temelli mikroşerit sistemlerde elektromanyetik indüklenmiş saydamlık* [Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi].
- Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (2006). *Metamaterials: physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.
- Enoch, S., Tayeb, G., Sabouroux, P., Guérin, N., & Vincent, P. (2002). A metamaterial for directive emission. *Physical review letters*, 89(21), 213902.
- Erentok, A., Luljak, P. L., & Ziolkowski, R. W. (2005). Characterization of a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor for antenna applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(1), 160-172.
- Fang, N., Lee, H., Sun, C., & Zhang, X. (2005). Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *science*, 308(5721), 534-537.
- Farooq, U., Shafique, M. F., & Mughal, M. J. (2019). Polarization insensitive dual band frequency selective surface for RF shielding through glass windows. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(1), 93-100.
- Fatou, P. (1920). Sur les équations fonctionnelles Deuxième mémoire. *Bulletin de la Société mathématique de France*, 48, 33-94.
- Feigenbaum, M. J. (1978). Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *Journal of statistical physics*, 19(1), 25-52.
- Foroozesh, A., & Shafai, L. (2009). Investigation into the effects of the patch-type FSS superstrate on the high-gain cavity resonance antenna design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(2), 258-270.
- Gangwar, D., Das, S., Yadava, R. L., & Kanaujia, B. K. (2017). Frequency selective surface as superstrate on wideband dielectric resonator antenna for circular polarization and gain enhancement. *Wireless Personal Communications*, 97, 3149-3163.
- Garg, P., & Jain, P. (2020). Novel ultrathin penta-band metamaterial absorber. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 116, 153063.

- Geetharamani, G., & Aathmanesan, T. (2020). Design of metamaterial antenna for 2.4 GHz WiFi applications. *Wireless Personal Communications*, 113, 2289-2300.
- Ghebrebrhan, M., Aranda, F., Walsh, G., Ziegler, D., Giardini, S., Carlson, J., Kimball, B., Steeves, D., Xia, Z., & Yu, S. (2017). Textile frequency selective surface. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(11), 989-991.
- Goldhaber, M., & Teller, E. (1948). On nuclear dipole vibrations. *Physical Review*, 74(9), 1046.
- Govind, G., & Akhtar, M. J. (2019). Metamaterial-inspired microwave microfluidic sensor for glucose monitoring in aqueous solutions. *IEEE Sensors Journal*, 19(24), 11900-11907.
- Greengard, L., & Rokhlin, V. (1987). A fast algorithm for particle simulations. *Journal of computational physics*, 73(2), 325-348.
- Gric, T., Eldlio, M., Cada, M., & Pistora, J. (2015). Analytic solution to field distribution in two-dimensional inhomogeneous waveguides. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 29(8), 1068-1081.
- Guckenheimer, J., & Holmes, P. (2013). *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcations of vector fields* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.
- Hamill, D. C., Deane, J. H., & Jefferies, D. J. (1992). Modeling of chaotic DC-DC converters by iterated nonlinear mappings. *IEEE transactions on Power Electronics*, 7(1), 25-36.
- Hamill, D. C., & Jeffries, D. J. (1988). Subharmonics and chaos in a controlled switched-mode power converter. *IEEE transactions on circuits and systems*, 35(8), 1059-1061.
- Hao, Y., & Mittra, R. (2008). *FDTD modeling of metamaterials: Theory and applications*. Artech house.
- Hasar, U., Barroso, J., ERTUĞRUL, M., Sabah, C., & ÇAVUŞOĞLU, B. (2012). Application of a useful uncertainty analysis as a metric tool for assessing the performance of electromagnetic properties retrieval methods of bianisotropic metamaterials. *PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH-PIER*, 128.

- Hawkes, A. M., Katko, A. R., & Cummer, S. A. (2013). A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality. *Applied Physics Letters*, 103(16).
- Hénon, M. (2004). A two-dimensional mapping with a strange attractor. *The theory of chaotic attractors*, 94-102.
- Heshmatzadeh, M., Lotfi-Neyestanak, A., & Noghanian, S. (2023). *Improving Wireless Power Transfer Efficiency Using Fractal Metamaterial for Wearable Applications*. 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI),
- Hilborn, R. C. (2000). *Chaos and nonlinear dynamics: an introduction for scientists and engineers*. Oxford university press.
- Hossain, M. B., Faruque, M. R. I., & Islam, M. T. (2023). Double elliptical resonator based quadruple band metamaterial absorber for EMI shielding applications in microwave regime. *Alexandria Engineering Journal*, 69, 193-206.
- Iizuka, H., & Hall, P. S. (2007). Left-handed dipole antennas and their implementations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(5), 1246-1253.
- Islam, M. R., Islam, M. T., Bais, B., Almalki, S. H., Alsaif, H., & Islam, M. S. (2022). Metamaterial sensor based on rectangular enclosed adjacent triple circle split ring resonator with good quality factor for microwave sensing application. *Scientific Reports*, 12(1), 6792.
- Islam, S., Hasan, M., & Faruque, M. (2018). A new metamaterial-based wideband rectangular invisibility cloak. *Applied Physics A*, 124, 1-6.
- Islam, S. S., Faruque, M. R. I., & Islam, M. T. (2015). A near zero refractive index metamaterial for electromagnetic invisibility cloaking operation. *Materials*, 8(8), 4790-4804.
- Jackson, J. D. (1999). *Classical electrodynamics* John Wiley & sons. Inc., New York, 13.
- Jain, P., Bansal, S., Prakash, K., Sardana, N., Gupta, N., Kumar, S., & Singh, A. K. (2020). Graphene-based tunable multi-band metamaterial polarization-insensitive absorber for terahertz applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 11878-11886.

- Jang, C., Park, J.-K., Lee, H.-J., Yun, G.-H., & Yook, J.-G. (2020). Non-invasive fluidic glucose detection based on dual microwave complementary split ring resonators with a switching circuit for environmental effect elimination. *IEEE Sensors Journal*, 20(15), 8520-8527.
- Jin, P., & Ziolkowski, R. W. (2009). Broadband, efficient, electrically small metamaterial-inspired antennas facilitated by active near-field resonant parasitic elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(2), 318-327.
- Julia, G. (1918). Mémoire sur l'itération des fonctions rationnelles. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 1, 47-245.
- Jussaume, M. E. (2011). *Electromagnetic Modeling and Measurement of Adaptive Metamaterial Structural Elements* [Master Thesis, Air Force Air University].
- Kalaycı, O. (2022). *Kaos ve yapay zekâ teknikleri ile geleneksel endüstriyel karıştırıcıların performanslarının iyileştirilmesi* [Doktora Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi].
- Kar, S. (2021). Progress in Metamaterial and Metasurface Technology and Applications. In *Metamaterials* (pp. 1-29). CRC Press.
- Karaaslan, M., & Bakir, M. (2014). Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
- Karimov, T. I., Druzhina, O. S., Andreev, V. S., Tutueva, A. V., & Kopets, E. E. (2021). *Bifurcation spectral diagrams: a tool for nonlinear dynamics investigation*. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus),
- Kellert, S. H. (1993). *In the wake of chaos: Unpredictable order in dynamical systems*. University of Chicago press.
- Kesavan, A., Karimian, R., & Denidni, T. A. (2016). A novel wideband frequency selective surface for millimeter-wave applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 1711-1714.

- Kumari, R., Patel, P. N., & Yadav, R. (2018). An ENG resonator-based microwave sensor for the characterization of aqueous glucose. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(7), 075601.
- Kuroe, Y., & Hayashi, S. (1989). *Analysis of bifurcation in power electronic induction motor drive systems*. 20th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference,
- La Spada, L., Bilotti, F., & Vegni, L. (2011). *Metamaterial biosensor for cancer detection*. SENSORS, 2011 IEEE,
- Lai, S., Wu, Y., Zhu, X., Gu, W., & Wu, W. (2017). An optically transparent ultrabroadband microwave absorber. *IEEE photonics journal*, 9(6), 1-10.
- Lai, Y., Chen, H., Zhang, Z.-Q., & Chan, C. T. (2008). A complementary media invisibility cloak that can cloak objects at a distance outside the cloaking shell. *arXiv preprint arXiv:0811.0458*.
- 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, Y.-S. (2009). *Principles of terahertz science and technology* (Vol. 170). Springer Science & Business Media.
- Lee, Y., Tuong, P., Zheng, H., Rhee, J., & Jang, W. (2012). An application of metamaterials: Perfect absorbers. *Journal of the Korean Physical Society*, 60, 1203-1206.
- Li, Z., Mutlu, M., & Ozbay, E. (2013). Chiral metamaterials: from optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission. *Journal of Optics*, 15(2), 023001.
- Liu, X., Liu, Z., Hua, M., Wang, L., Wang, K., Zhang, W., Ning, Y., Shi, Y., Wang, X., & Yang, F. (2020). Tunable terahertz metamaterials based on anapole excitation with graphene for reconfigurable sensors. *ACS Applied Nano Materials*, 3(3), 2129-2133.
- Liu, X., Zhang, Y., Feng, H., Ning, Y., Shi, Y., Wang, X., & Yang, F. (2020). Manipulating optical absorption of indium selenide using plasmonic nanoparticles. *ACS omega*, 5(6), 3000-3005.

- Liu, Z., Durant, S., Lee, H., Pikus, Y., Xiong, Y., Sun, C., & Zhang, X. (2007). Experimental studies of far-field superlens for sub-diffractive optical imaging. *Optics Express*, 15(11), 6947-6954.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- Lu, F., Tan, Q., Ji, Y., Guo, Q., Guo, Y., & Xiong, J. (2018). A novel metamaterial inspired high-temperature microwave sensor in harsh environments. *Sensors*, 18(9), 2879.
- Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., & Han, Z. (2014). Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2), 757-789.
- Luukkonen, O., Maslovski, S. I., & Tretyakov, S. A. (2011). A stepwise Nicolson–Ross–Weir-based material parameter extraction method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 1295-1298.
- Lyapunov, A. M. (1992). The general problem of the stability of motion. *International journal of control*, 55(3), 531-534.
- Mandelbrot, B. B., & Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature* (Vol. 1). WH freeman New York.
- Mansour, E., Ahmed, M. I., Allam, A., Pokharel, R. K., & Abdel-Rahman, A. B. (2023). A Microwave Sensor Based on Double Complementary Split-Ring Resonator Using Hexagonal Configuration for Sensing Diabetics Glucose Levels. 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP),
- Martin, F. (2015). *Artificial transmission lines for RF and microwave applications*. John Wiley & Sons.
- Melik, R., Unal, E., Kosku Perkgoz, N., Puttlitz, C., & Demir, H. V. (2009). Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18).
- Melville, D. O., & Blaikie, R. J. (2005). Super-resolution imaging through a planar silver layer. *Optics Express*, 13(6), 2127-2134.
- Meng, T., Hu, D., & Zhu, Q. (2018). Design of a five-band terahertz perfect metamaterial absorber using two resonators. *Optics Communications*, 415, 151-155.

- Mitra, R., Chan, C. H., & Cwik, T. (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. *Proceedings of the IEEE*, 76(12), 1593-1615.
- Mohammadian, A. H., Shankar, V., & Hall, W. F. (1991). Computation of electromagnetic scattering and radiation using a time-domain finite-volume discretization procedure. *Computer Physics Communications*, 68(1-3), 175-196.
- Moon, F. C. (2008). *Chaotic and fractal dynamics: introduction for applied scientists and engineers*. John Wiley & Sons.
- Moon, G., Choi, J.-r., Lee, C., Oh, Y., Kim, K. H., & Kim, D. (2020). Machine learning-based design of meta-plasmonic biosensors with negative index metamaterials. *Biosensors and Bioelectronics*, 164, 112335.
- Moustafa, L., & Jecko, B. (2010). Design of a wideband highly directive EBG antenna using double-layer frequency selective surfaces and multifeed technique for application in the Ku-band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9, 342-346.
- Munk, B. A. (2005). *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons.
- Muthukumar, P., & Balasubramaniam, P. (2013). Feedback synchronization of the fractional order reverse butterfly-shaped chaotic system and its application to digital cryptography. *Nonlinear Dynamics*, 74, 1169-1181.
- Nandakumar, S., Trabelsi, Y., Vasudevan, B., & Gunasekaran, S. (2023). MXene fractal-based dual-band metamaterial absorber in the visible and near-infrared regime. *Optical and Quantum Electronics*, 55(11), 992.
- Naskar, M. A., Tamrakar, M., & Thiripurasundari, D. (2017). *Compact 'V'shaped metamaterial based resonator for wide band rejection*. 2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2),
- Natarajan, R., Kanagasabai, M., Baisakhiya, S., Sivasamy, R., Palaniswamy, S., & Pakkathillam, J. K. (2013). A compact frequency selective surface with stable response for WLAN applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 718-720.

- Nauman, M., Saleem, R., Rashid, A. K., & Shafique, M. F. (2016). A miniaturized flexible frequency selective surface for X-band applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58(2), 419-428.
- Naveed, M. A., Bilal, R. M. H., Baqir, M. A., Bashir, M. M., Ali, M. M., & Rahim, A. A. (2021). Ultrawideband fractal metamaterial absorber made of nickel operating in the UV to IR spectrum. *Optics Express*, 29(26), 42911-42923.
- Neimark, J. I., & Landa, P. S. (2012). *Stochastic and chaotic oscillations* (Vol. 77). Springer Science & Business Media.
- Nicolson, A., & Ross, G. (1970). Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 19(4), 377-382.
- Note, A. A. (2006). Agilent basics of measuring the dielectric properties of materials. *Agilent literature number*, 1-34.
- Oldham, K., & Spanier, J. (1974). *The fractional calculus theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order*. Elsevier.
- Omer, A. E., Shaker, G., Safavi-Naeini, S., Alquié, G., Deshours, F., Kokabi, H., & Shubair, R. M. (2020a). Low-cost portable microwave sensor for non-invasive monitoring of blood glucose level: Novel design utilizing a four-cell CSRR hexagonal configuration. *Scientific Reports*, 10(1), 15200.
- Omer, A. E., Shaker, G., Safavi-Naeini, S., Alquié, G., Deshours, F., Kokabi, H., & Shubair, R. M. (2020b). Non-invasive real-time monitoring of glucose level using novel microwave biosensor based on triple-pole CSRR. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 14(6), 1407-1420.
- Orfanidis, S. J. (2002). *Electromagnetic waves and antennas*. Rutgers University.
- Özer, Ş., & Zorlu, H. (2012). DOĞRUSAL OLMAYAN PAR SİSTEMLER KULLANILARAK KAOTİK ZAMAN SERİSİ KESTİRİMİ. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University/Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2).

- Pan, W., Huang, C., Chen, P., Ma, X., Hu, C., & Luo, X. (2013). A low-RCS and high-gain partially reflecting surface antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(2), 945-949.
- Pan, W., Yan, Y., Ma, Y., & Shen, D. (2019). A terahertz metamaterial based on electromagnetically induced transparency effect and its sensing performance. *Optics Communications*, 431, 115-119.
- Park, J. W., Van Tuong, P., Rhee, J. Y., Kim, K. W., Jang, W. H., Choi, E. H., Chen, L. Y., & Lee, Y. (2013). Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators. *Optics Express*, 21(8), 9691-9702.
- Pecora, L. M., & Carroll, T. L. (1990). Synchronization in chaotic systems. *Physical review letters*, 64(8), 821.
- Pehlivan, İ. (2007). *Yeni kaotik sistemler: elektronik devre gerçeklemeleri, senkronizasyon ve güvenli haberleşme uygulamaları* [Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi].
- Peitgen, H.-O., Jürgens, H., Saupe, D., & Feigenbaum, M. J. (2004). *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Vol. 106). Springer.
- Pekmezci, A. (2018). *Characterization of EM wave propagation in metamaterial environments* [Doktora Tezi, Doğuş Üniversitesi].
- Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85(18), 3966.
- Pendry, J. B., Holden, A., Stewart, W., & Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical review letters*, 76(25), 4773.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.
- Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *science*, 312(5781), 1780-1782.
- Plum, E. (2010). *Chirality and metamaterials* [Doctoral Thesis, University of Southampton].
- Poincaré, H. (1881). Mémoire sur les courbes définies par une équation différentielle. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 7, 375-422.

- Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John Wiley & sons.
- Prakash, D., & Gupta, N. (2022). Applications of metamaterial sensors: a review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14(1), 19-33.
- Qureshi, S. A., Abidin, Z. Z., Elamin, N., A. Majid, H., Ashyap, A. Y., Nebhen, J., Kamarudin, M., See, C. H., & Abd-Alhameed, R. (2022). Glucose level detection using millimetre-wave metamaterial-inspired resonator. *Plos one*, 17(6), e0269060.
- Rahimi, Z. (2011). *The finite integration technique (FIT) and the application in lithography simulations*. Friedrich-Alexander-Universitaet Erlangen-Nuernberg (Germany).
- Rajkumar, R., & Kommuri, U. K. (2018). A triangular complementary split ring resonator based compact metamaterial antenna for multiband operation. *Wireless Personal Communications*, 101, 1075-1089.
- Ramakrishna, S. A. (2005). Physics of negative refractive index materials. *Reports on progress in physics*, 68(2), 449.
- Ranjan, S. K., & Sahoo, S. (2024). A Review of Metamaterial-Based Microwave Absorbers and Sensors. *Journal of Electronic Materials*, 53(2), 571-595.
- Rosaline, S. I., & Raghavan, S. (2016). Design of split ring antennas for WLAN and WiMAX applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(9), 2117-2122.
- Rössler, O. E. (1976). An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 57(5), 397-398.
- Ruelle, D., & Takens, F. (1971). Note concerning our paper: "On the nature of turbulence".
- Ryu, Y.-S., Lee, D.-K., Kang, J.-H., Lee, S.-H., Yu, E.-S., & Seo, M. (2017). Ultrasensitive terahertz sensing of gold nanoparticles inside nano slot antennas. *Optics Express*, 25(24), 30591-30597.
- Sabah, C., Cakmak, A., Ozbay, E., & Uckun, S. (2010). Transmission measurements of a new metamaterial sample with negative refraction index. *Physica B: Condensed Matter*, 405(14), 2955-2958.
- Sabah, C., Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., & Demirel, E. (2014). Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on

- ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application. *Optics Communications*, 322, 137-142.
- Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., & Smith, D. R. (2006). Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *science*, 314(5801), 977-980.
- Schwaiger, S., Bröll, M., Krohn, A., Stemmann, A., Heyn, C., Stark, Y., Stickler, D., Heitmann, D., & Mendach, S. (2009). Rolled-up three-dimensional metamaterials with a tunable plasma frequency in the visible regime. *Physical review letters*, 102(16), 163903.
- Sen, G., & Das, S. (2018). Frequency tunable low cost microwave absorber for EMI/EMC application. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 74, 47-52.
- Seyedzadeh, S. M., & Mirzakuchaki, S. (2012). A fast color image encryption algorithm based on coupled two-dimensional piecewise chaotic map. *Signal processing*, 92(5), 1202-1215.
- Shahzad, W., Hu, W., Ali, Q., Raza, H., Abbas, S. M., & Ligthart, L. P. (2022). A Low-cost metamaterial sensor based on DS-CSRR for material characterization applications. *Sensors*, 22(5), 2000.
- Shao, S., & Gao, X. (2008). *General projective synchronization and fractional order chaotic masking scheme*. 2008 International Conference on Communications, Circuits and Systems,
- Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *science*, 292(5514), 77-79.
- Siddiqui, S. A., Zhang, Y., Lloret, J., Song, H., & Obradovic, Z. (2018). Pain-free blood glucose monitoring using wearable sensors: Recent advancements and future prospects. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 11, 21-35.
- Silveirinha, M., & Engheta, N. (2006). Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials. *Physical review letters*, 97(15), 157403.

- Sivasamy, R., Moorthy, B., Kanagasabai, M., Samsingh, V. R., & Alsath, M. G. N. (2017). A wideband frequency tunable FSS for electromagnetic shielding applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(1), 280-283.
- Smith, D. R., & Kroll, N. (2000). Negative refractive index in left-handed materials. *Physical review letters*, 85(14), 2933.
- Song, Y., Zhan, H., Jiang, C., Zhao, K., Zhu, J., Chen, R., Hao, S., & Yue, W. (2019). High water content prediction of oil–water emulsions based on terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterial. *ACS omega*, 4(1), 1810-1815.
- Sreekanth, K. V., Alapan, Y., ElKabbash, M., Ilker, E., Hinczewski, M., Gurkan, U. A., De Luca, A., & Strangi, G. (2016). Extreme sensitivity biosensing platform based on hyperbolic metamaterials. *Nature materials*, 15(6), 621-627.
- Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. CRC press.
- Syed, I. S., Ranga, Y., Matekovits, L., Esselle, K. P., & Hay, S. G. (2014). A single-layer frequency-selective surface for ultrawideband electromagnetic shielding. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(6), 1404-1411.
- Tagliazucchi, E., Balenzuela, P., Fraiman, D., & Chialvo, D. R. (2012). Criticality in large-scale brain fMRI dynamics unveiled by a novel point process analysis. *Frontiers in physiology*, 3, 15.
- Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., & Padilla, W. J. (2008). A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization. *Optics Express*, 16(10), 7181-7188.
- Thoma, P., & Weiland, T. (1995). *A subgridding method in combination with the finite integration technique*. 1995 25th European Microwave Conference,
- Tong, X.-j., & Cui, M.-g. (2007). *A new chaos encryption algorithm based on parameter randomly changing*. 2007 IFIP International Conference on Network and Parallel Computing Workshops (NPC 2007),

- Tütüncü, B., & Torpi, H. (2017). *Omega-shaped metamaterial lens design for microstrip patch antenna performance optimization at 12 GHz*. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO),
- Tütüncü, B., & Urul, B. (2019). BHR Metamateryal Lens Tasarımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 759-770.
- Unal, E., Karaaslan, M., & Ozdemir, E. (2010). Optimization of elliptically designed patch mushrooms and investigation of low profile dipole antenna–HIGP interaction. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 4(November 2010), 1898-1900.
- Ünaldı, S., Cimen, S., Çakır, G., & Ayten, U. E. (2016). A novel dual-band ultrathin FSS with closely settled frequency response. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1381-1384.
- Vahidi, O., Kwok, K., Gopaluni, R. B., & Knop, F. (2016). A comprehensive compartmental model of blood glucose regulation for healthy and type 2 diabetic subjects. *Medical & biological engineering & computing*, 54, 1383-1398.
- Van Valkenburg, M. E. (1974). Circuit theory: foundations and classical contributions. (No Title).
- Veselago, V. G. (1968). The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10, 509-514.
- Villena Gonzales, W., Mobashsher, A. T., & Abbosh, A. (2019). The progress of glucose monitoring—A review of invasive to minimally and non-invasive techniques, devices and sensors. *Sensors*, 19(4), 800.
- Vrba, J., & Vrba, D. (2015). A Microwave Metamaterial Inspired Sensor for Non-Invasive Blood Glucose Monitoring. *Radioengineering*, 24(4).
- Wang, B.-X., Tang, C., Niu, Q., He, Y., & Chen, T. (2019). Design of narrow discrete distances of dual-/triple-band terahertz metamaterial absorbers. *Nanoscale research letters*, 14, 1-7.
- Wang, B., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2009). Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber. *Physical Review B*, 80(3), 033108.

- Wang, N., Tong, J., Zhou, W., Jiang, W., Li, J., Dong, X., & Hu, S. (2015). Novel quadruple-band microwave metamaterial absorber. *IEEE photonics journal*, 7(1), 1-6.
- Wang, X., Chen, F., & Semouchkina, E. (2013). Implementation of low scattering microwave cloaking by all-dielectric metamaterials. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 23(2), 63-65.
- Wang, X. Y., & Gu, S. X. (2014). New chaotic encryption algorithm based on chaotic sequence and plain text. *IET Information Security*, 8(3), 213-216.
- Wang, Y., Cheng, W., Qin, J., & Han, Z. (2019). Terahertz refractive index sensor based on the guided resonance in a photonic crystal slab. *Optics Communications*, 434, 163-166.
- Wei, Z., Cao, Y., Fan, Y., Yu, X., & Li, H. (2011). Broadband polarization transformation via enhanced asymmetric transmission through arrays of twisted complementary split-ring resonators. *Applied Physics Letters*, 99(22).
- Weiland, T. (1977). A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, 31, 116-120.
- Weiland, T. (1996). Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 9(4), 295-319.
- Wildberger, M. (1994). Stability and nonlinear dynamics in power systems. *IEEE Power Engineering Review*, 14(10), 16-18.
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: nonlinear phenomena*, 16(3), 285-317.
- Wu, T.-K. (1995). Frequency selective surfaces. *Encyclopedia RF Microwave Engineering*.
- Xin, W., Binzhen, Z., Wanjun, W., Junlin, W., & Junping, D. (2017). Design and characterization of an ultrabroadband metamaterial microwave absorber. *IEEE photonics journal*, 9(3), 1-13.
- Xu, Y., Wang, H., Li, Y., & Pei, B. (2014). Image encryption based on synchronization of fractional chaotic systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19(10), 3735-3744.

- Yahya, R., Nakamura, A., Itami, M., & Denidni, T. A. (2017). A novel UWB FSS-based polarization diversity antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2525-2528.
- Yan, F., Li, L., Wang, R., Tian, H., Liu, J., Liu, J., Tian, F., & Zhang, J. (2019). Ultrasensitive tunable terahertz sensor with graphene plasmonic grating. *Journal of Lightwave Technology*, 37(4), 1103-1112.
- Yang, A., Zhang, L., Men, X., Zhou, Y., & Jiao, Y. (2013). The fractional calculus numerical algorithms and its application to the viscoelastic material problem. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5(12), 821-828.
- Yang, G., Zhang, T., Li, W., & Wu, Q. (2010). A novel stable miniaturized frequency selective surface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9, 1018-1021.
- Yang, J., Qi, L., Li, B., Wu, L., Shi, D., Uqaili, J. A., & Tao, X. (2021). A terahertz metamaterial sensor used for distinguishing glucose concentration. *Results in Physics*, 26, 104332.
- Ye, S., Chau, K., & Niu, S. (2006). *Chaoization of a single-phase induction motor for washing machines*. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting,
- Yıldız, İ., İkiz, T., Çolak, Ş., Karadağ, F., Karaaslan, M., & Gençdoğan, D. N. (2021). Near-Zero-Index Split Ring Resonator: A Lens Antenna. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(24), 474-478.
- Yuan, X., Zhang, C., Chen, M., Cheng, Q., Cheng, X., Huang, Y., & Fang, D. (2018). Wideband high-absorption electromagnetic absorber with chaos patterned surface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(1), 197-201.
- Zebiri, C., Mshwat, W., Kosha, J., Lashab, M., Elfergani, I., Sayad, D., Mosbah, S., Rodriguez, J., AlYasir, Y., & Abd-Alhameed, R. (2020). A metamaterial-based microwave sensor for liquid dielectrics characterization. *Pervasive Health Pervasive Comput. Technol. Healthc.*, 2, 97.
- Zhang, R., Ding, F., Yuan, X., & Chen, M. (2022). Influence of Spatial Correlation Function on Characteristics of Wideband Electromagnetic Wave Absorbers with Chaotic Surface. *Chinese Physics Letters*, 39(9), 094101.

- Zhang, S., Fan, W., Panoiu, N., Malloy, K., Osgood, R., & Brueck, S. (2005). Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials. *Physical review letters*, 95(13), 137404.
- Zhang, Z.-X., & Zhang, J.-C. (2016). *RCS reduction for patch antenna based on metamaterial absorber*. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS),
- Zhao, B., Thomsen, H. R., De Ponti, J. M., Riva, E., Van Damme, B., Bergamini, A., Chatzi, E., & Colombi, A. (2022). A graded metamaterial for broadband and high-capability piezoelectric energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 269, 116056.
- Zhao, R., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2010). Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate. *Optics Express*, 18(14), 14553-14567.
- Zhao, R., Zhang, L., Zhou, J., Koschny, T., & Soukoulis, C. (2011). Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index. *Physical Review B*, 83(3), 035105.
- Zhou, F., Bao, Y., Cao, W., Stuart, C. T., Gu, J., Zhang, W., & Sun, C. (2011). Hiding a realistic object using a broadband terahertz invisibility cloak. *Scientific Reports*, 1(1), 78.
- Ziolkowski, R. W., & Erentok, A. (2006). Metamaterial-based efficient electrically small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(7), 2113-2130.
- Ziolkowski, R. W., & Heyman, E. (2001). Wave propagation in media having negative permittivity and permeability. *Physical Review E*, 64(5), 056625.

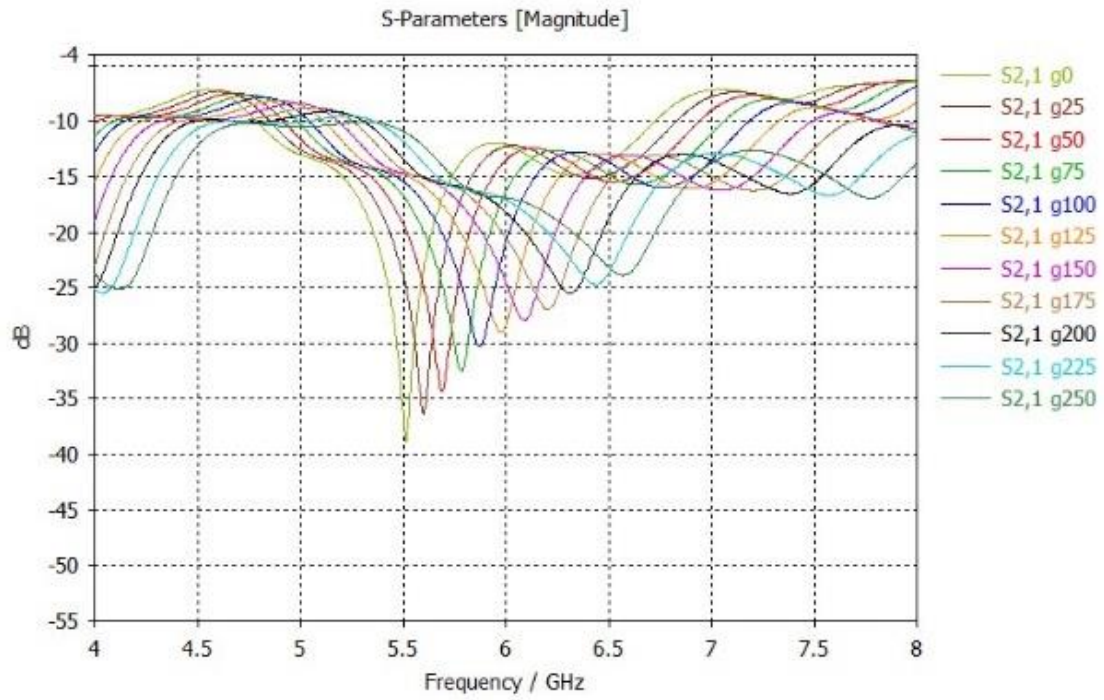
EKLER

Ek-1 Kandaki glukoz oranının tespiti

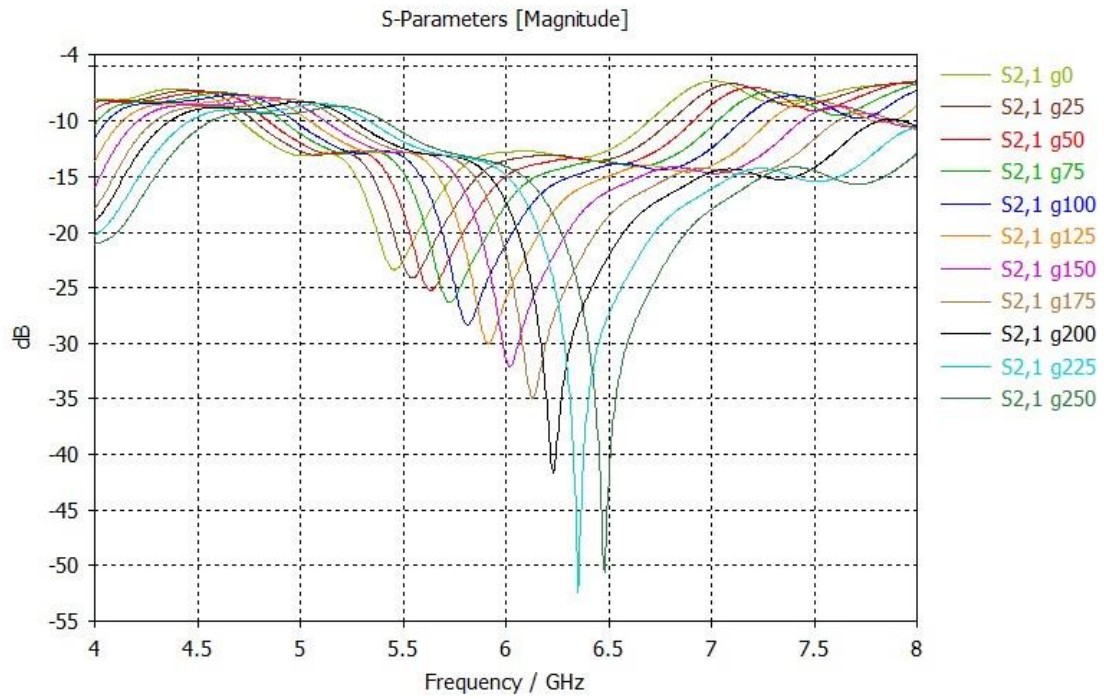
Ek-2 Tez kapsamında üretilen makale



Ek-1 Kan glukoz oranının tespiti

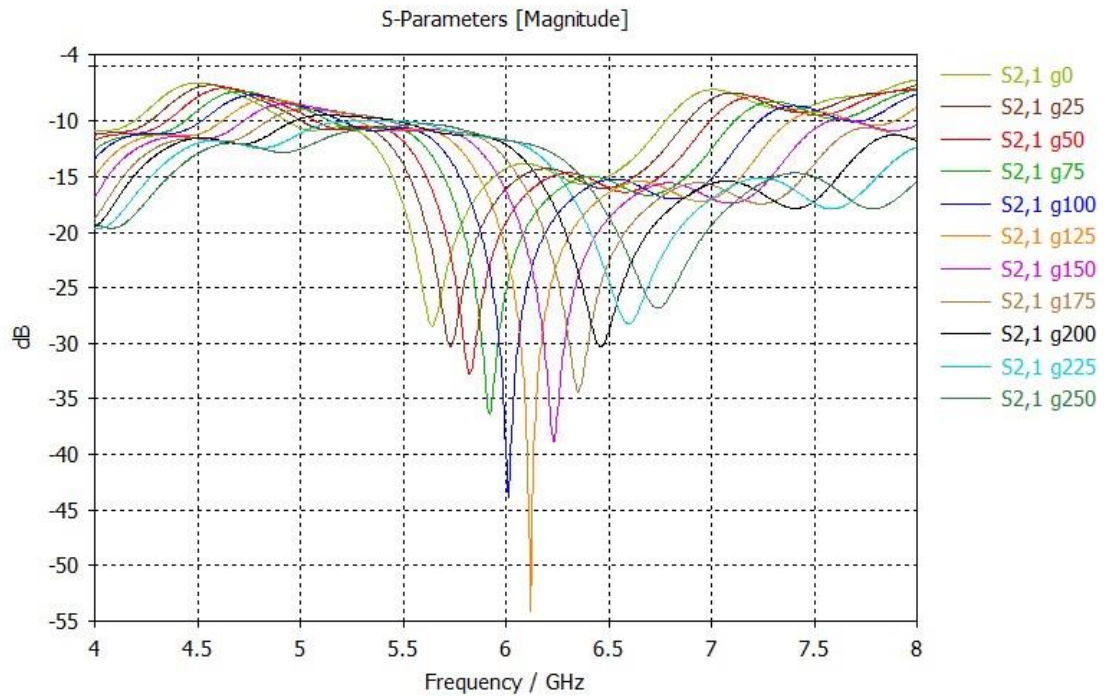


Ek-1.1. $y=0.06$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

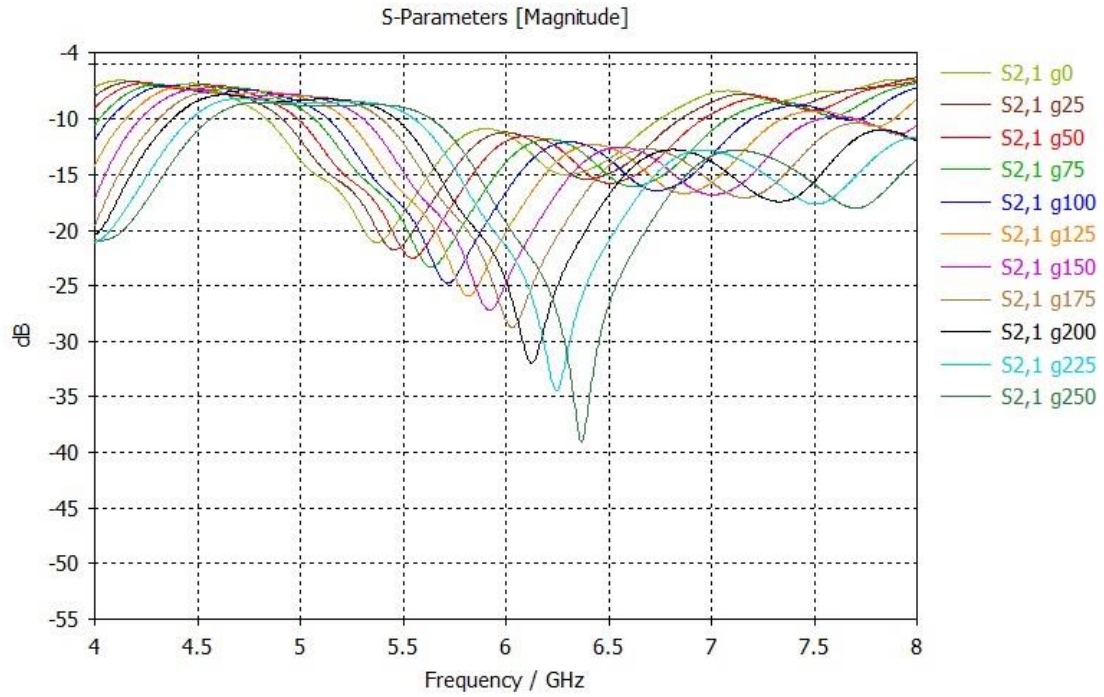


Ek-1.2. $y=0.07$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

Ek-1 (devam) kan glukoz oranının tespiti

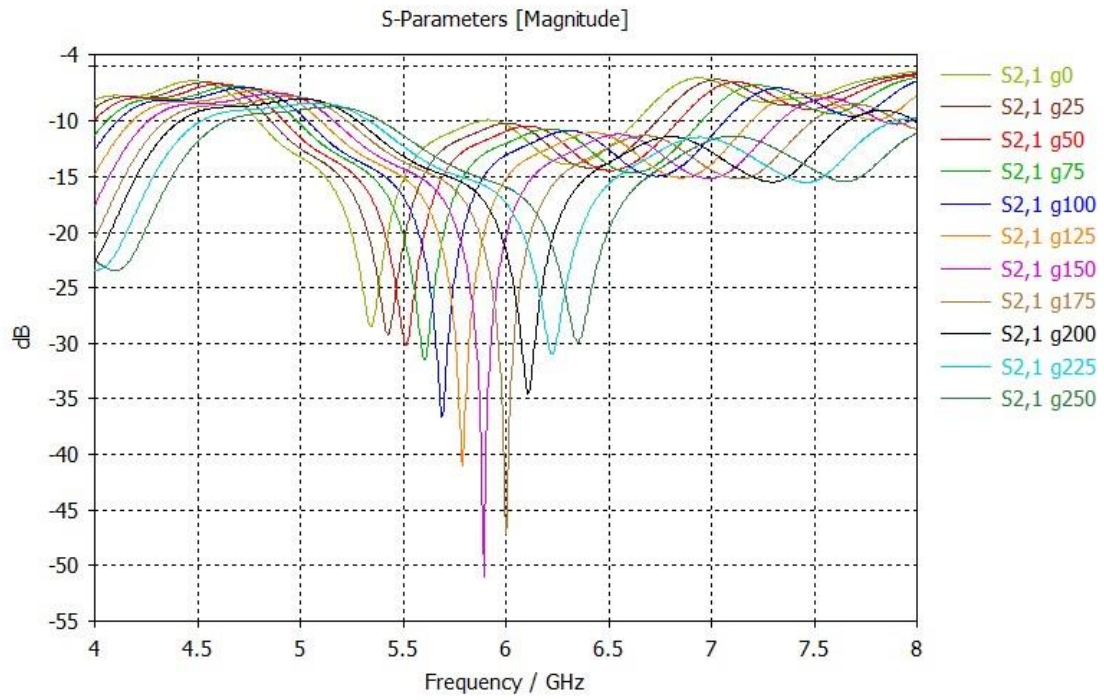


Ek-1.3. $y=0.08$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

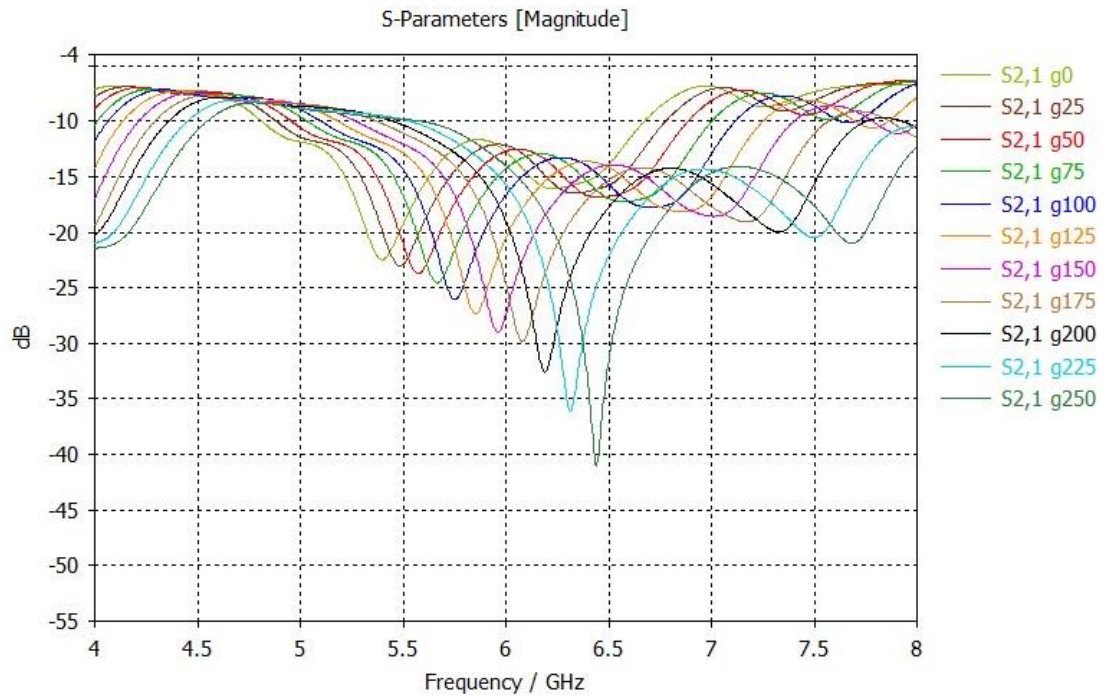


Ek-1.4. $y=0.09$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

Ek-1 (devam) kan glukoz oranının tespiti

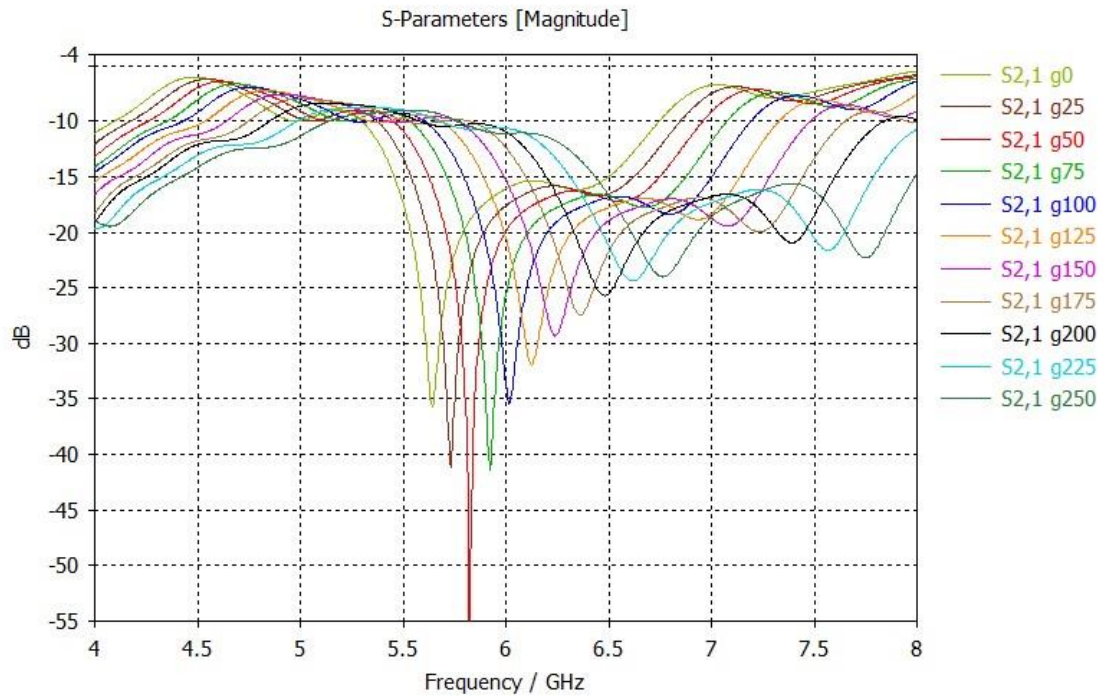


Ek-1.5. $y=0.1$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

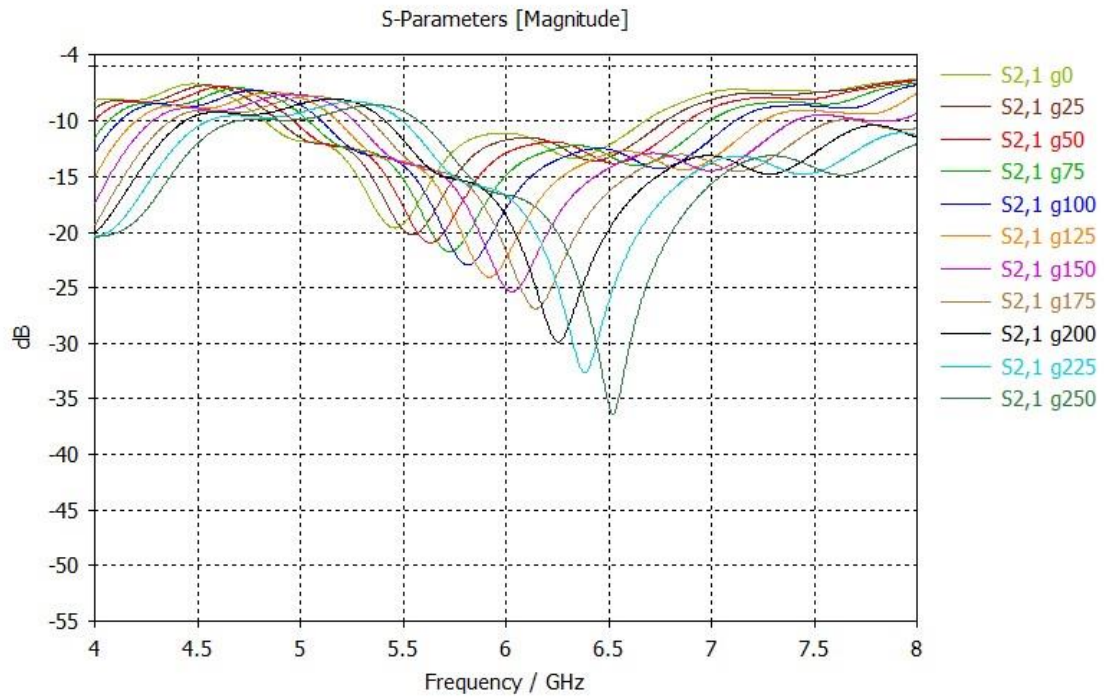


Ek-1.6. $y=0.11$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

Ek-1 (devam) kan glukoz oranının tespiti

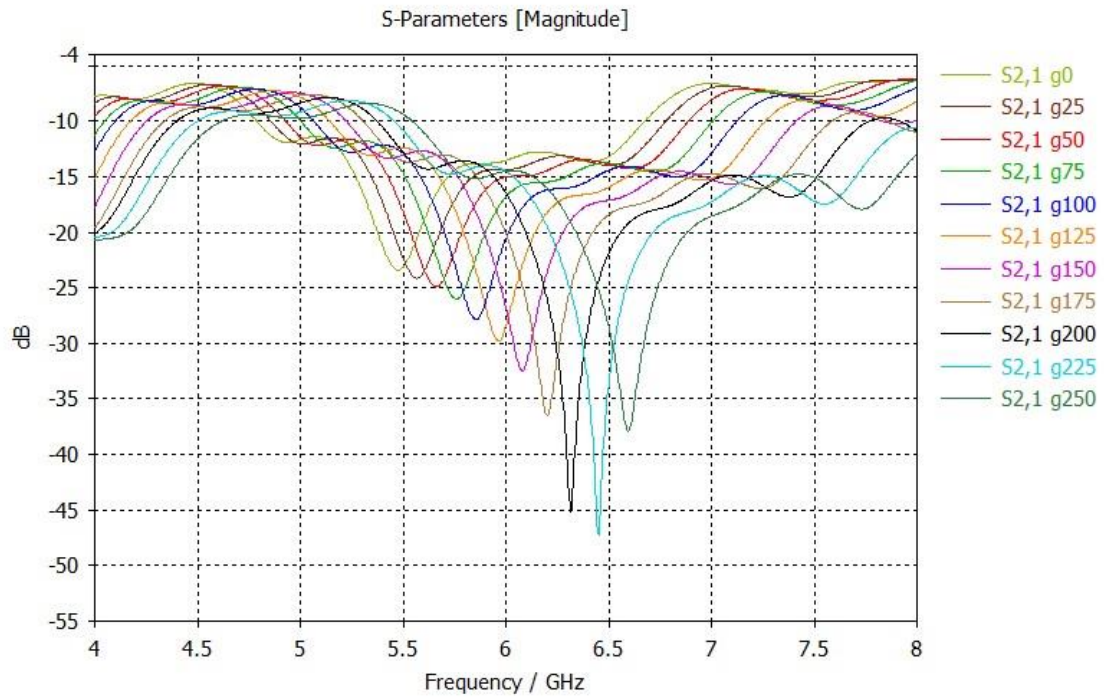


Ek-1.7. $y=0.12$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

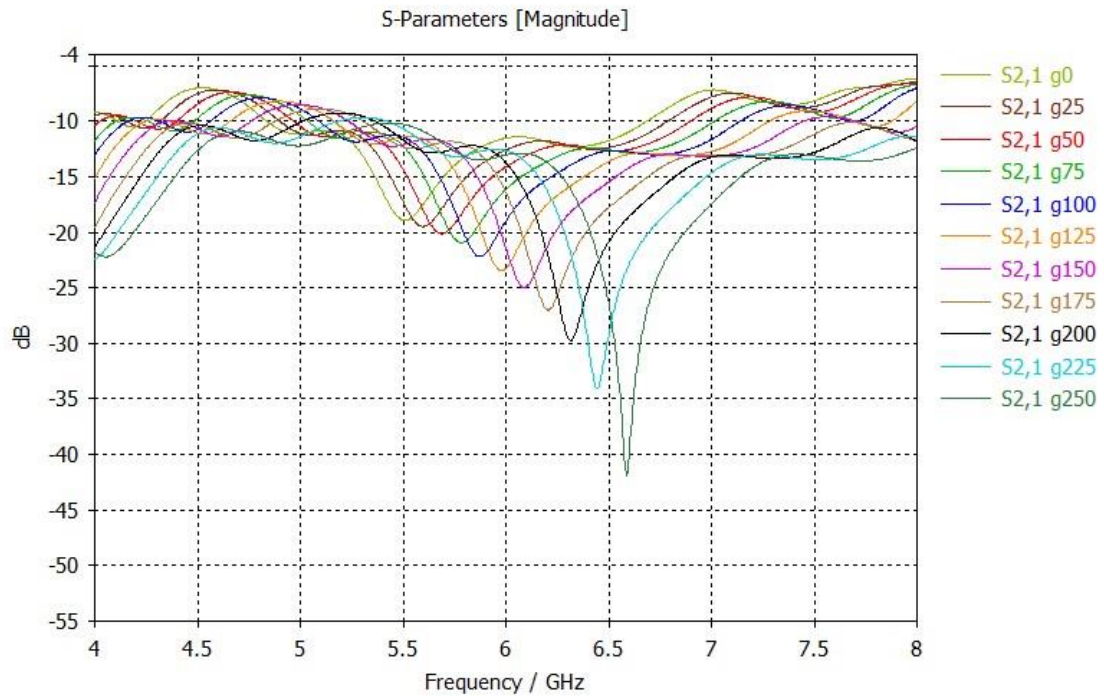


Ek-1.8. $y=0.13$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

Ek-1 (devam) kan glukoz oranının tespiti



Ek-1.9. $y=0.14$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi



Ek-1.10. $y=0.15$ parametresinin S_{21} sonuçlarına etkisi

Ek-2 Tez kapsamında üretilen makale

IOP Publishing

Phys. Scr. 98 (2023) 115522

<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad008e>

Physica Scripta



PAPER

Multiband absorber design and optimization with Lorenz chaotic attractor

RECEIVED
25 July 2023

REVISED
26 September 2023

ACCEPTED FOR PUBLICATION
5 October 2023

PUBLISHED
18 October 2023

Ahmet Sertol Köksal¹ and Sait Ünal^{2,*}

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Computer Engineering Department, 66100, Yozgat, Turkey

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Mechatronics Engineering Department, 66100, Yozgat, Turkey

* Author to whom any correspondence should be addressed.

E-mail: sait.unal@yobu.edu.tr

Keywords: metamaterial, chaotic attractor, lorenz attractor, excellent absorber

Abstract

Metamaterials are artificial materials that don't come from nature and have unusual electromagnetic properties. It has applications in many fields such as medical, image processing, signal absorption, invisibility cloak, sensor, and antenna. In this study, signal absorption of metamaterials was discussed and a simulation study was carried out. The most important difference of the proposed structure is that the pattern obtained from the Lorenz chaotic attractor was used in the resonator's design, unlike the geometric shaped works. The chaos pattern consists of units that have both random shapes and sizes. Chaos can be defined as the order of disorder, which is extremely sensitive to initial conditions and has a broad power spectrum like noise. In addition, this study aims to contribute to the science of chaos. The resonator structure used in the proposed structure showed similar results with the studies in the literature. Rogers RT5870 material was used as substrate in the design. The proposed design is an eight-band structure with excellent signal absorption, partially insensitive to polarization and angle of incidence. The results show that the proposed design absorbs signals in the infrared region of the spectrum at 14.24, 15.44, 19.72, 21.04, 33.92, 35.16, 36.44 and 38.79 THz. Near-perfect signal absorption at the indicated frequencies is 97.98%, 98.73%, 99.85%, 92.03%, 95.62%, 92.56%, 96.21% and 97.09%, respectively. The proposed design includes heat sensor and thermal imaging etc can be used in application areas.

Ek-2.1. Tez kapsamında üretilen makalenin özet kısmı