

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BANTLI MİLMETRE DALGA FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN
YAPAY ZEKA ALGORİTMALARI İLE ANALİZİ VE SENTEZİ

Ufuk ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BANTLI MİLMETRE DALGA FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN
YAPAY ZEKA ALGORİTMALARI İLE ANALİZİ VE SENTEZİ

Ufuk ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 10/02/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Revna ACAR VURAL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN, Üye
Kırklareli Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan üç Bantlı Milimetre Dalga Frekans Seçici Yüzeylerin Yapay Zeka Algoritmaları ile Analizi ve Sentezi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ufuk şAHİN



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FBA-2021-4747 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme
ve
biricik eşime

TEŞEKKÜR

Tez kapsamında yürütülen çalışmanın tüm aşamalarında desteğini esirgemeyen ve bilgi birikimleri ile bana büyük katkılar sağlayan değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN'a, yapay zekâ algoritmaları konusunda destek veren değerli hocam Doç. Dr. Revna ACAR VURAL'a ve Elif Seher SERİNKEN'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca akademik hayatım boyunca destekleriyle yanımda olan kıymetli aileme ve eşime sonsuz teşekkür ederim.



Ufuk ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	5
2 FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER	6
2.1 Rezonans Yapıları.....	6
2.1.1 FSY Geometrik Tipleri.....	6
2.1.2 Kullanılan FSY Malzemeleri.....	8
2.2 Rezonans Analizi.....	9
2.2.1 S-Parametre Modelleri.....	9
2.2.2 Eşdeğer Devre Modelleri.....	12
3 5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ	15
3.1 5G'nin Tanımı ve Frekans Spektrumu.....	15
3.2 5G Uygulama Alanları.....	18
3.3 5G'nin RF Filtre Uygulamalarındaki Etkisi.....	20
4 5G HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MM DALGA FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI	22
4.1 5G Frekansları için Çift Bantlı Özgün Birim Hücre Modeli.....	22
4.1.1 Çift Bantlı Özgün Birim Hücre Tasarımı.....	22
4.1.2 Benzetim Sonuçları.....	24
4.1.3 İletim Hattı Modeli.....	28
4.2 5G Frekansları için Üç Bantlı Özgün Birim Hücre Modeli.....	30
4.2.1 Üç Bantlı Özgün Birim Hücre Tasarımı.....	30
4.2.2 Benzetim Sonuçları.....	32

4.2.3	İletim Hattı Modeli.....	36
5	ÜÇ BANTLI MİLİMETRE DALGA FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN YAPAY ZEKÂ ALGORİTMALARI İLE ANALİZİ VE SENTEZİ	37
5.1	FSY Analiz ve Sentez Kara-Kutu Modelleri.....	37
5.1.1	Problem Tanımı.....	37
5.1.2	Veri Yapısı.....	39
5.2	FSY Analiz ve Sentezi için Kullanılan Yapay Sinir Ağı Modelleri.....	41
5.2.1	Çok Katmanlı Algılayıcılar.....	41
5.2.2	Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağları.....	42
5.2.3	Radyal Tabanlı Fonksiyon.....	43
5.3	Yapay Sinir Ağı Algoritmaları ile Performans Değerlendirmesi.....	44
5.3.1	Performans Ölçütleri.....	44
5.3.2	YSA Algoritmalarının Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi...	45
5.3.3	YSA ile FSY Analiz ve Sentez Performansları.....	46
5.4	YSA Tabanlı Analiz ve Sentez Sonuç Karşılaştırmaları.....	63
5.4.1	FSY Analiz için YSA Modellerinin Performans Karşılaştırması...	64
5.4.2	FSY Sentez için YSA Modellerinin Performans Karşılaştırması...	65
6	ÜRETİM VE ÖLÇÜM	67
6.1	Frekans Seçici Yüzey Tasarımı.....	67
6.2	Ölçüm Düzeneği.....	68
6.3	Ölçüm Düzeneği Tasarımı.....	70
6.4	Üretim ve Ölçüm Sonuçları.....	72
6.4.1	Tasarlanan Frekans Seçici Yüzeyin Üretimi.....	72
6.4.2	Ölçüm Sonuçları.....	72
7	SONUÇ VE ÖNERİLER	77
	KAYNAKÇA	79
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	82

KISALTMA LİSTESİ

1G	Birinci Nesil (First Generation)
2G	İkinci Nesil (Second Generation)
3G	Üçüncü Nesil (Third Generation)
4G	Dördüncü Nesil (Fourth Generation)
5G	Beşinci Nesil (Fifth Generation)
BAW	Toplu Akustik Dalga (Bulk Acoustic Wave)
CST	Computer Simulation Technology
CSRR	Tamamlayıcı Bölünmüş Halka Rezonatör (Complementary Split Ring Resonator)
eMBB	Geliştirilmiş Mobil Bant (Enhanced Mobile Broadband)
FSY	Frekans Seçici Yüzey
GHz	Giga Hertz
GRNN	Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağları (General Regression Neural Network)
GSM	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem (Global System for Mobile)
IoT	Nesnelerin İnterneti
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MHz	Mega Hertz
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcılar (Multi-Layer Perceptron)
mMTC	Masif Makine Tipi İletişim (Massive Machine Type Communications)
MmWave	Milimetre Dalga (Millimeter Wave)
MSE	Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error)
RBF	Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function)
RF	Radyo Frekans (Radio Frequency)
RMSE	Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (Root Mean Square Error)
SAW	Yüzey Akustik Dalgası (Surface Acoustic Wave)
SRR	Bölünmüş Halka Rezonatör (Split Ring Resonator)
uRLLC	Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra Reliable Low Latency Communications)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Bazı basit FSY birim hücre geometrileri.....	7
Şekil 2.2	Temel FSY eleman grupları.....	7
Şekil 2.3	Bölünmüş halka rezonatör yapıları.....	8
Şekil 2.4	S-parametreleri.....	9
Şekil 2.5	Örnek olarak sunulan bir FSY tasarımı.....	10
Şekil 2.6	Örnek FSY'e ait birim hücrenin S-parametreleri.....	11
Şekil 2.7	Basit halka rezonatör yapısının parametreleri ve eşdeğer devresi.....	12
Şekil 2.8	Halka rezonatörlerin birim hücre yapıları.....	13
Şekil 2.9	Halka rezonatörlerin eşdeğer devre modelleri.....	13
Şekil 3.1	5G milimetre dalga frekans aralığı.....	17
Şekil 3.2	Kategorilerine göre 5G uygulamaları.....	19
Şekil 3.3	Yıllara göre 5G patent verileri.....	20
Şekil 4.1	Çift bantlı birim hücre yapısı ve fiziksel parametreler.....	23
Şekil 4.2	Çift bantlı birim hücrenin yansıma ve iletim katsayıları.....	25
Şekil 4.3	TE ve TM modunda yansıma ve iletim katsayıları.....	27
Şekil 4.4	Çift bantlı birim hücrenin açısal kararlılığı.....	28
Şekil 4.5	Birim hücrenin iletim hattı eşdeğer modeli.....	29
Şekil 4.6	Üç bantlı birim hücre yapısı ve fiziksel parametreler.....	31
Şekil 4.7	Üç bantlı birim hücrenin yansıma ve iletim katsayıları.....	32
Şekil 4.8	TE ve TM modları yansıma ve iletim katsayısı benzetim sonuçları.....	34
Şekil 4.9	Üç bantlı birim hücrenin açısal kararlılığı.....	35
Şekil 4.10	Birim hücrenin iletim hattı eşdeğer modeli.....	36
Şekil 5.1	Üç bantlı birim hücre yapısı.....	38
Şekil 5.2	Analiz için kullanılan YSA modeli giriş ve çıkışları.....	39
Şekil 5.3	Sentez için kullanılan YSA modeli giriş ve çıkışları.....	39
Şekil 5.4	MLP Ağı Yapısı.....	42
Şekil 5.5	GRNN Ağı Yapısı.....	43
Şekil 5.6	RBF Ağı Yapısı.....	44
Şekil 5.7	MLP ağ yapısı ile yapılan test birinci katlama için birinci frekans hedef değerleri ve birinci frekans ağ çıkışı değerleri.....	48
Şekil 5.8	MLP ağ yapısı ile yapılan test üçüncü katlama için ikinci frekans hedef değerleri ve ikinci frekans ağ çıkışı değerleri.....	49

Şekil 5.9	MLP ağ yapısı ile yapılan test beşinci katlama için üçüncü frekans hedef değerleri ve üçüncü frekans ağ çıkışı değerleri.....	49
Şekil 5.10	GRNN ağ yapısı ile yapılan test birinci katlama için birinci frekans hedef değerleri ve birinci frekans ağ çıkışı değerleri.....	51
Şekil 5.11	GRNN ağ yapısı ile yapılan test üçüncü katlama için ikinci frekans hedef değerleri ve ikinci frekans ağ çıkışı değerleri.....	51
Şekil 5.12	GRNN ağ yapısı ile yapılan test beşinci katlama için üçüncü frekans hedef değerleri ve üçüncü frekans ağ çıkışı değerleri.....	52
Şekil 5.13	RBF ağ yapısı ile yapılan test birinci katlama için birinci frekans hedef değerleri ve birinci frekans ağ çıkışı değerleri.....	53
Şekil 5.14	RBF ağ yapısı ile yapılan test üçüncü katlama için ikinci frekans hedef değerleri ve ikinci frekans ağ çıkışı değerleri.....	54
Şekil 5.15	RBF ağ yapısı ile yapılan test beşinci katlama için üçüncü frekans hedef değerleri ve üçüncü frekans ağ çıkışı değerleri.....	54
Şekil 5.16	MLP ağı ile yapılan test birinci katlama için d_{in} boyutu hedef değerleri ve d_{in} boyutu ağ çıkışı değerleri.....	57
Şekil 5.17	MLP ağı ile yapılan test üçüncü katlama için d_{out} boyutu hedef değerleri ve d_{out} boyutu ağ çıkışı değerleri.....	57
Şekil 5.18	MLP ağı ile yapılan test beşinci katlama için L_b boyutu hedef değerleri ve L_b boyutu ağ çıkışı değerleri.....	58
Şekil 5.19	GRNN ağı ile yapılan test birinci katlama için d_{in} boyutu hedef değerleri ve d_{in} boyutu ağ çıkışı değerleri.....	59
Şekil 5.20	GRNN ağı ile yapılan test üçüncü katlama için d_{out} boyutu hedef değerleri ve d_{out} boyutu ağ çıkışı değerleri.....	60
Şekil 5.21	GRNN ağı ile yapılan test beşinci katlama için L_b boyutu hedef değerleri ve L_b boyutu ağ çıkışı değerleri.....	60
Şekil 5.22	RBF ağı ile yapılan test birinci katlama için d_{in} boyutu hedef değerleri ve d_{in} boyutu ağ çıkışı değerleri.....	62
Şekil 5.23	RBF ağı ile yapılan test üçüncü katlama için d_{out} boyutu hedef değerleri ve d_{out} boyutu ağ çıkışı değerleri.....	62
Şekil 5.24	RBF ağı ile yapılan test beşinci katlama için L_b boyutu hedef değerleri ve L_b boyutu ağ çıkışı değerleri.....	63
Şekil 6.1	Üretimi yapılan frekans seçici yüzey.....	68
Şekil 6.2	Oluşturulan ölçüm düzeneği.....	68
Şekil 6.3	Kullanılan cihaz ve malzemeler.....	69
Şekil 6.4	Ölçüm platformunu oluşturan yapıların temsili görselleri.....	71
Şekil 6.5	Üretimi yapılan frekans seçici yüzeyin üstten görünümü.....	72
Şekil 6.6	Ölçüm düzeneği.....	73
Şekil 6.7	Frekans seçici yüzeyin TE modunda elde edilen iletim katsayıları.....	74

Şekil 6.8	Frekans seçici yüzeyin TM modunda elde edilen iletim katsayıları....	74
Şekil 6.9	Frekans seçici yüzeyin TE modunda açısal kararlılık ölçüm sonuçları.....	75
Şekil 6.10	Frekans seçici yüzeyin TM modunda açısal kararlılık ölçüm sonuçları.....	75
Şekil 6.11	Frekans seçici yüzeyin TE ve TM modlarındaki iletim katsayıları.....	76



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	S-parametrelerinin açıklaması.....	10
Tablo 2.2	Örnek FSY'in parametre değerleri.....	11
Tablo 3.1	4G ile 5G performans özelliklerinin kıyaslanması.....	16
Tablo 3.2	ITU-R'deki 5G hizmetleri için teknik kıyaslamalar.....	17
Tablo 3.3	5G uygulamaları için frekans spektrumu.....	18
Tablo 4.1	5G frekansları için tasarlanan çift bantlı birim hücrenin fiziksel boyutları.....	24
Tablo 4.2	5G milimetre dalga iletişiminin bant gereksinimleri ve çift bantlı birim hücrenin frekans yanıtı.....	25
Tablo 4.3	5G frekansları için tasarlanan üç bantlı birim hücrenin fiziksel boyutları.....	32
Tablo 4.4	5G milimetre dalga iletişiminin bant gereksinimleri ve özgün üç bantlı frekans seçici yüzey yapısının frekans yanıtı.....	33
Tablo 5.1	FSY Analizi için MLP Performans Sonuçları-Hata Değerleri.....	47
Tablo 5.2	FSY Analizi için MLP Performans Sonuçları-Başarım Oranları.....	48
Tablo 5.3	FSY Analizi için GRNN Performans Sonuçları-Hata Değerleri.....	50
Tablo 5.4	FSY Analizi için GRNN Performans Sonuçları-Başarım Oranları.....	50
Tablo 5.5	FSY Analizi için RBF Performans Sonuçları-Hata Değerleri.....	53
Tablo 5.6	FSY Analizi için RBF Performans Sonuçları-Başarım Oranları.....	53
Tablo 5.7	FSY Sentezi için MLP Performans Sonuçları-Hata Değerleri.....	56
Tablo 5.8	FSY Sentezi için MLP Performans Sonuçları-Başarım Oranları.....	56
Tablo 5.9	FSY Sentezi için GRNN Performans Sonuçları-Hata Değerleri.....	59
Tablo 5.10	FSY Sentezi için GRNN Performans Sonuçları/Başarım Oranları.....	59
Tablo 5.11	FSY Sentezi için RBF Performans Sonuçları-Hata Değerleri.....	61
Tablo 5.12	FSY Sentezi için RBF Performans Sonuçları-Doğruluk Oranı.....	61
Tablo 5.13	FSY Analizi için Karşılaştırmalı YSA Performans Sonuçları.....	65
Tablo 5.14	FSY Sentezi için Karşılaştırmalı YSA Performans Sonuçları.....	66

Üç Bantlı Milimetre Dalga Frekans Seçici Yüzeylerin Yapay Zekâ Algoritmaları ile Analizi ve Sentezi

Ufuk ŞAHİN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nurhan Türker TOKAN

Akıllı haberleşme uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilen 5G yeni nesil haberleşme sistemi kapsamında günümüze kadar birçok çalışma yapılmış olmasına karşın inovatif vaatler sunan araştırma ve geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. 5G uygulamaları için altyapı faaliyetlerinin yanı sıra yeni nesil teknoloji için en uygun malzeme ve tasarımlar üzerine çalışmalar yoğun olarak yürütülmektedir.

Bu tezin amacı, 5G milimetre dalga frekanslarında çalışan özgün frekans seçici yüzey (FSY) yapıları tasarlamaktır. Çift bantlı ve üç bantlı özgün FSY tasarımı yapılmıştır. Her iki FSY, 5G mm-dalga uygulama bantları olarak kullanılması planlanan frekans aralıklarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Çift bantlı birim hücre analizinde 5G uygulamaları için tahsis edilen, 24,75 – 25,25 GHz bandında 500MHz ve 37,60 – 40,00 GHz bandında 2,4GHz bant aralıkları hedeflenmiş, üç bantlı birim hücre analizinde 5G uygulamaları için tahsis edilen, 24,75 – 25,25 GHz bandında 500MHz, 27,50 – 28,35 GHz bandında 850MHz ve 37,60 – 40,00 GHz bandında 2,4GHz bant aralıkları hedeflenmiştir. Hedeflenen frekans bant

aralıklarında tasarlanan birim hücrelerin bant geçiren özellikle çalışmakta olduğu görülmüştür. Önerilen FSY yapıları için polarizasyon ve açısal kararlılık irdelenmiştir. Tasarlanan yapıların polarizasyon kararlılığına sahip olduğu saptanmıştır. Çift bantlı frekans seçici yüzeyin, birinci bantta 40° geliş açısına kadar kararlı olduğu, ikinci bantta ise 30° 'ye kadar açısal kararlılık sağladığı gözlenmiştir. Üç bantlı yapının birinci bandında hedeflenen bant genişliği $\theta = 40^\circ$ geliş açısına kadar korunmuş, ikinci bandında $\theta = 20^\circ$ 'ye kadar rezonans frekansında düşük kayma gözlenirken üçüncü bant aralığı için ise $\theta = 30^\circ$ 'ye kadar kararlı olduğu görülmüştür.

Tasarımı yapılan özgün üç bantlı birim hücrenin yapay zekâ algoritmaları kullanılarak analiz ve sentezi yapılmıştır. Üç bantlı birim hücrenin çalışması hedeflenen 5G frekans bantlarının sentezine yönelik yapay sinir ağına girdi olarak verilmiş ve bunun neticesinde üç bantlı FSY'nin fiziksel boyutları elde edilmiştir. Bu incelemeler neticesinde elde edilen fiziksel boyutlar ile oluşturulan FSY üretilmiş ve fiziksel ölçümü yapılmıştır. Üç bantlı FSY'nin ölçüm sonuçlarının, CST Microwave Studio programıyla elde edilen benzetim sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Frekans seçici yüzey, 5G milimetre dalga, bant geçiren filtre, açısal ve polarizasyon kararlılığı, yapay zekâ algoritmaları

Analysis and Synthesis of Triple Band Millimeter Wave Frequency Selective Surfaces by Artificial Intelligence Algorithms

Ufuk ŞAHİN

Department of Electronics and Communications Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Although many studies have been carried out to date within the scope of the 5G new generation communication system developed to meet the needs of smart communication applications, research and development studies that offer innovative promises are still continuing. In addition to infrastructure activities for 5G applications, studies on the most suitable materials and designs for new generation technology are carried out intensively.

The aim of this thesis is to design unique frequency selective surface (FSS) structures operating at 5G millimeter wave frequencies. Dual-band and tri-band original FSS design has been made. Both FSSs are designed to operate in the frequency ranges intended to be used as 5G mm-wave application bands. In the dual-band unit cell analysis, 500MHz in the 24,75 – 25,25 GHz band and 2,4GHz band ranges in the 37,60 – 40,00 GHz band are targeted, which are allocated for 5G applications, in addition in the tri-band unit cell analysis, 500MHz in the 24,75 – 25,25 GHz band, 850MHz in the 27,50 – 28,35 GHz band and 2,4GHz in the 37,60 – 40,00 GHz band, which are allocated for 5G applications, are targeted. It

has been seen that the designed unit cells work with bandpass feature in the targeted frequency band ranges. Polarization and angular stability are discussed for the proposed FSS structures. It has been determined that the designed structures have polarization stability. It has been observed that the dual band FSS is stable up to 40° incidence angle in the first band, and provides angular stability up to 30° in the second band. In the first band of the three-band structure, the targeted bandwidth was preserved up to the angle of incidence of $\theta=40^\circ$, while a low shift in the resonance frequency was observed up to $\theta=20^\circ$ in the second band, it was found to be stable up to $\theta=30^\circ$ for the third band.

Analysis and synthesis of the original three-band unit cell designed using artificial intelligence algorithms were made. The 5G frequency bands, which are aimed to work with the tri-band unit cell, were given as input to the synthesis artificial neural network, and as a result, the physical dimensions of the tri-band FSS were obtained. The FSS created with the physical dimensions obtained as a result of these investigations was produced and its physical measurement was taken. It has been observed that the measurement results and the simulation results of the three-band FSS obtained with the CST Microwave Studio program are similar.

Keywords: Frequency selective surface, 5G millimeter wave, bandpass filter, angular and polarization stability, artificial intelligence algorithms

1.1 Literatür Özeti

Gelişen teknoloji ile birlikte doğan ihtiyaçları karşılamak için haberleşme alanında yenilikçi gelişmeler gerekmektedir. 4G haberleşme sistemleri, mobil cihazlarla geniş bant hizmetlerine imkân sağlamasına karşın yüksek hız, anlık yanıt, yüksek güvenilirlik gibi özellikler gerektiren mobil hizmetlerin sağlanması için tam anlamıyla yeterli değildir. Yakın zaman içerisinde gündelik yaşamın kaçınılmaz uygulamaları haline gelecek olan makinelerin haberleşmesi, nesnelerin interneti gibi konular için ihtiyaçları karşılayabilecek yeni nesil haberleşme sistemleri arayışına gidilmiştir. Tüm bu ihtiyaçlar neticesinde yüksek hız, yüksek performans, yüksek verim, düşük gecikme süresi, geniş bant gibi özelliklere sahip olan beşinci nesil (5G) haberleşme sistemleri gündeme gelmiştir.

Beşinci nesil haberleşme sistemleri ile ilgili günümüze kadar birçok çalışma yapılmış olmasına karşın 5G uygulamaları için en uygun malzeme ve tasarımların belirlenmesi amacıyla araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Yeni nesil haberleşme teknolojisine geçiş için yürütülen ARGE çalışmaları büyük önem arz etmektedir. 5G uygulamaları milimetre dalga bandı olarak anılan frekans aralığını da kullanmaktadır. Frekans seçici yüzeyler, milimetre dalga frekanslarından terahertz frekanslarına kadar kullanılabilmesinden dolayı 5G uygulamaları için tercih edilmektedir.

Frekans seçici yüzeyler, üst üste basılan iletken katman ile dielektrik tabakadan oluşan birim hücrelerin periyodik olarak yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin tasarımları, hedeflenen iletim ve yansıma karakteristiğine göre çeşitlenmektedir. Rezonans frekansı, frekans seçici yüzeylere etki eden elektromanyetik dalgaların geliş açısına, birim hücre tasarımına, kullanılan malzemelerin cinsine, kalınlığına ve boyutlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Birim hücre tasarımlarında iletken malzeme döngü olarak veya oyulmuş şekilde kullanılabilir. Bir iletken katmanın oyulmasıyla oluşturulan desen, tamamlayıcı bölünmüş rezonatör (CSR) olarak tanımlanmakta iken; dielektrik katman üstünde yer alan iletken döngüler ise bölünmüş rezonatör (SR) olarak tanımlanmaktadır.

Frekans seçici yüzeyler anten [1], filtre [2], radar soğurucu [3], uydu [4] gibi birçok uygulamada geometrik yapıları ve desenleri değiştirilerek istenilen frekans bant aralığında çalıştırılmaktadır. Frekans seçici yüzeyler ile yapılan anten uygulamalarına örnek verilecek olunursa, [1]'de aktif silindirik frekans seçici yüzey yapısı kullanan yüksek kazançlı sektörel antenin tasarımı sunulmaktadır. Çalışma kapsamında önerilen antenin, kablosuz iletişim sistemlerinde baz istasyonu uygulamaları için uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bir başka örnek ise [5]'te sunulan yüksek kazançlı boşluk rezonans anteni (CRA) tasarımıdır. Bu çalışma kapsamında rezonans antenin üst tabakası olarak kullanılmak için yüksek derecede yansıtıcı bir yama tipi frekans seçici yüzey incelenmiştir.

Frekans seçici yüzeyler kullanılarak tasarlanan filtre uygulamalarına [6] numaralı çalışma örnek gösterilebilir. Bu çalışmada kompakt bir frekans seçici yüzey filtresi tasarlanmıştır. Filtrenin 800 MHz bant genişliğine ve -20 dB'den daha düşük bir yansımaya sahip olduğu sunulmuştur. [7]'deki çalışmada ise bant geçiren filtre ve huni anten işlevlerine sahip olan filtreleme anteni konusu incelenmiştir. Filtre, CST yazılımı ile simüle edilerek optimize edilmiş ve performansı deneylerle doğrulanmıştır. Simüle edilmiş ve ölçülen sonuçlardan, önerilen huni antenin geri dönüş kaybı, radyasyon modeli ve kazancı gibi özelliklerini istenen frekans bandında sağladığı görülmüştür. Bu yapı kullanılarak askeri platformlardaki iletişim sistemlerinin hacminin ve maliyetinin etkin bir şekilde azaltılabileceği değerlendirilmiştir.

[8]'de frekans seçici yüzey içeren geniş bantlı bir radar soğurucu incelenmektedir. Önerilen soğurucu, 10,7 ile 29 GHz frekans aralığında iletken levha için 10 dB'lik bir radar kesit azalması sağlayabildiği görülmektedir. [9]'da ise genetik algoritma (GA) yaklaşımı kullanılarak mikrodalga soğurma uygulaması için frekans seçici yüzeyin boyutlarını optimize etmek için bir çalışma ortaya koyulmuştur. 8-12 GHz

frekans aralığında maksimum soğurma elde etmek için frekans seçici yüzeyin radar soğurucu malzeme ile seçimi ve optimizasyonu yapılmıştır. Farklı frekans seçici yüzeylerin analizi için eşdeğer devre yöntemi kullanılmıştır. GA optimizasyonu, uygun frekans seçici yüzeyin boyutlarına sahip mevcut sekiz malzeme arasından uygun malzemeyi seçmek için önerilmiştir. Optimize edilmiş sonuçlar, veri tabanındaki materyali ve frekans seçici yüzeyin boyutlarını vermektedir.

[10]'daki çalışmada 5G milimetre dalgalarında çalışan frekans seçici yüzey içeren sabit uydu sistemi incelenmektedir. Bu tür çalışmalar, şu anda 5G sistemlerinin spektrum gereksinimleri için önem taşımaktadır. Frekans seçici yüzey radyasyonundan kaynaklanan girişimin, çeşitli çoklu anten konfigürasyonlarını göz önünde bulundurarak kapasite ve verim üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. [11]'de sunulan çalışma, ortak açıklıklı Ku/Ka-bant uydu iletişim antenleri için frekans seçici yüzey tasarımı sunmaktadır. Frekans seçici yüzey, 12 GHz'de iletici olup 20 GHz ve 30 GHz'de yansıtıcı olacak şekilde tasarlanmıştır. 18 cm $\times$ 18 cm'lik bir prototip üretilerek test edilmiştir ve test sonuçlarının simülasyonlarla benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Ölçülen kazançlar 20 GHz'de 28,5 dBi ve 30 GHz'de 32,25 dBi'dir.

[12]'de GSM sinyallerini korumak için tasarlanan çift bantlı frekans seçici yüzeyin polarizasyon kararlılığı irdelenmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan frekans seçici yüzeyin TE ve TM modlarında benzetimleri yapılmıştır. Frekans seçici yüzey, sırasıyla 100 ve 173 MHz bant genişliği için 18 dB koruma etkinliği ile 930 ve 1720 MHz frekanslarında bant durduran özelliği taşır ve böylece GSM sinyallerini korumaktadır. Tasarlanan frekans seçici yüzey simetrik olduğundan dolayı polarizasyon kararlılığına sahiptir. Ayrıca hem TE modu hem de TM modu için 60°'ye kadar açısal kararlılık sergilemektedir.

[13]'teki çalışmada makine öğrenimi kullanarak çok bantlı frekans seçici yüzeylerin sentezi sunulmaktadır. Yapının çok bantlı ve polarizasyondan bağımsız olması amacıyla frekans seçici yüzeyi oluşturan geometrik için parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Frekans seçici yüzey geometrileri, karar ağacı algoritması ile denetimli makine öğrenimi kullanılarak sentezlenmiştir. Üretilen prototiplerin

ölçüm değerleri ile benzetim sonuçları arasında benzerlik irdelenmiş ve sonuçların uyumlu olduğu saptanmıştır. [14]'teki çalışmada ise deneysel vektör ağ analizör (VNA) saçılma parametresi ölçümlerinden elde edilen karmaşık dielektrik malzeme özelliklerini belirlemek için yapay sinir ağları kullanılmıştır. Sinir ağı, denetimli bir öğrenme yaklaşımı kullanılarak eğitilmiştir ve elde edilen sonuçlar deneysel ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır.

[15]'teki çalışmada kare döngü ve kare slot frekans seçici yüzeylerinin eşdeğer devre modeli optimizasyonunu amaçlayan parametrik bir çalışma sunulmaktadır. Çeşitli frekanslar ve düzlem dalga geliş açıları için birim hücre boyutları, alt tabaka kalınlığı ve dielektrik malzeme özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan yapı, eşdeğer devre modeli ile analiz edilmiştir. Kare döngüler ve kare slotlar için rezonans frekansları sırasıyla 650 MHz ve 460 MHz mertebesinde. Modeller 2,4 GHz'de yankısız bir oda içinde iki fiziksel frekans seçici yüzey prototipi üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerle teyit edilmiştir. Frekans seçici yüzey prototiplerinin fiziksel ölçümleri ile eşdeğer devre modeliyle elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, 5G milimetre dalga frekanslarında çalışan iki özgün frekans seçici yüzey yapısı tasarlamaktır. Bu tasarımlarda frekans seçici yüzeylerin çift (dual) bantlı ve üç bantlı çalışması hedeflenmiştir. Frekans seçici yüzeylerin tasarım parametreleri rezonans frekanslarına etki etmektedir. Bu sebeple tez kapsamında hedeflenen 5G frekans aralıklarında çalışmaları için analizler yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda frekans seçici yüzeyler 5G milimetre dalga frekanslarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Çift bantlı birim hücre analizinde 5G uygulamaları için tahsis edilen 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz ve 37,60–40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir. Üç bantlı birim hücre analizinde de aynı şekilde 5G uygulamaları için tahsis edilen 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz, 27,50 – 28,35 GHz bandında 850 MHz ve 37,60 – 40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir. Hedeflenen frekans bant aralıklarında tasarlanan birim hücrelerin çalışmakta olduğu görülmüştür. Çift

bantlı yapı 25,7 GHz ve 38,1 GHz frekanslarında, üç bantlı yapı ise 25 GHz, 27 GHz ve 39 GHz frekanslarında rezonansa girmektedir.

Frekans seçici yüzeylerin, geliş açısı değişimlerinden en az seviyede etkilenmesi için orijine göre simetrik olması gerekmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzeylerin de polarizasyon ve açısal kararlılıklarına sahip olmasını sağlamak amacıyla orijine göre simetrik olarak tasarım yapılmıştır.

Tasarımı yapılan özgün üç bantlı birim hücrenin yapay zekâ algoritmaları ile analizi ve sentezi yapılmıştır. Üç bantlı birim hücrenin çalışması hedeflenen 5G frekans bantlarının sentezine yönelik yapay sinir ağına girdi olarak verilmiş ve bunun neticesinde üç bantlı frekans seçici yüzeyin fiziksel boyutları elde edilmiştir. Bu incelemeler neticesinde elde edilen fiziksel boyutlar ile oluşturulan frekans seçici yüzey üretilmiş ve fiziksel ölçümü yapılmıştır. Ölçüm yapılarak elde edilen sonuçların, CST Microwave Studio programıyla elde edilen benzetim sonuçlarıyla benzerlik göstermesi hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Bu proje ile 5G uygulamaları için tahsis edilen frekans aralıklarında çalışacak iki özgün frekans seçici yüzey tasarlanıp analizleri yapılmıştır. Özgün frekans seçici yüzeyler dielektrik katman ve üzerine metal plaka yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan frekans seçici yüzeylerin S-parametre analizleri için CST Microwave Studio programında benzetimler yapılmıştır. Tasarımı yapılan özgün üç bantlı birim hücrenin yapay zekâ algoritmaları ile analizi ve sentezi yapılmıştır. Üç bantlı birim hücrenin çalışması hedeflenen 5G frekans bantlarının sentezine yönelik yapay sinir ağına girdi olarak verilmiş ve bunun neticesinde üç bantlı frekans seçici yüzeyin fiziksel boyutları elde edilmiştir. Bu incelemeler neticesinde elde edilen fiziksel boyutlar ile oluşturulan frekans seçici yüzey üretilmiş ve fiziksel ölçümü yapılmıştır.

2.1 Rezonans Yapıları

Frekans seçici yüzeyler, üst üste basılan iletken katman ile dielektrik tabakadan oluşan birim hücrelerin periyodik olarak yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin tasarımları hedeflenen iletim ve yansıma karakteristiğine göre çeşitlilik göstermektedir. Frekans seçici yüzeyler (FSY'ler), mikrodalga ve optik sinyal uygulamalarında filtre olarak kullanımının yanı sıra son yıllarda daha kapsamlı çalışmalar ile gündeme gelmektedir [16].

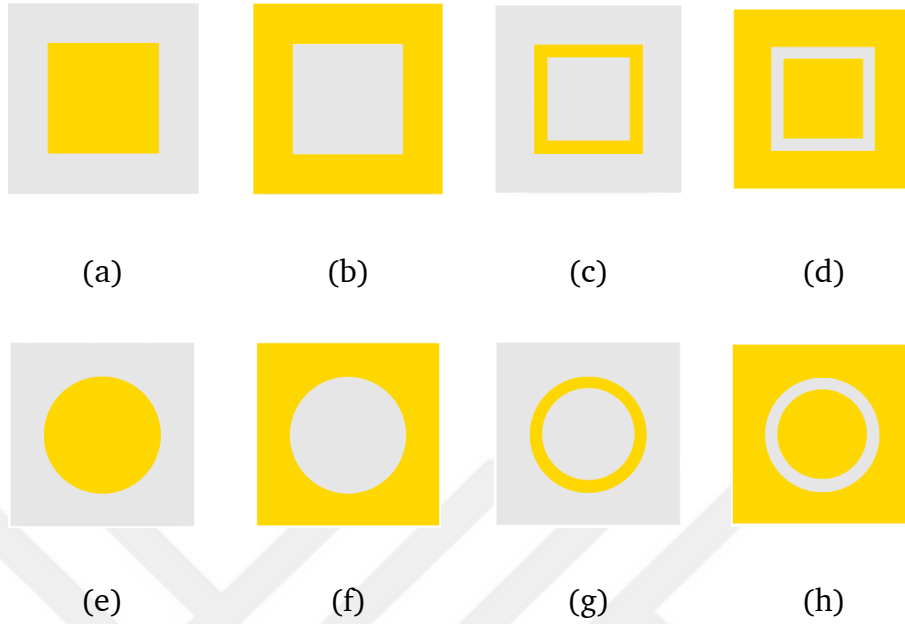
Monokromatik olmayan bir ışık demetini spektral düzenlerine ayırtırmak için kullanılan optikteki kırınım ızgaralarının araştırılması ile FSY'lerin fiziğinin altında yatan ilkeler aydınlığa kavuşmuştur. Bu araştırmalara bağlı çalışma, Francis Hopkinson ve David Rittenhouse tarafından 1786'da bir bilimsel makalede yayınlanmıştır [17]. Günümüzdeki FSY çalışmalarına ışık tutan tarihteki ilk frekans seçici yüzey çalışmaları ise Marconi ve Franklin tarafından 1919 yılında başlatılmıştır [18].

2.1.1 FSY Geometrik Tipleri

Rezonans frekansı FSY'lere etki eden elektromanyetik dalgaların geliş açısına ve FSY desen tasarımına bağlı olarak oluşmaktadır. FSY'lere gelen elektromanyetik dalgaların etki etmesi sonucu ortaya çıkan akım bu farklılıklara göre dağılım göstererek toplam bir alan meydana getirmektedir. Dolayısıyla rezonans frekansı FSY'in geometrik yapısıyla ilişkilidir. Ayrıca FSY'in açisal kararlılığa sahip olması için de geometrik yapısının orijine göre simetrik olması gerekmektedir [19].

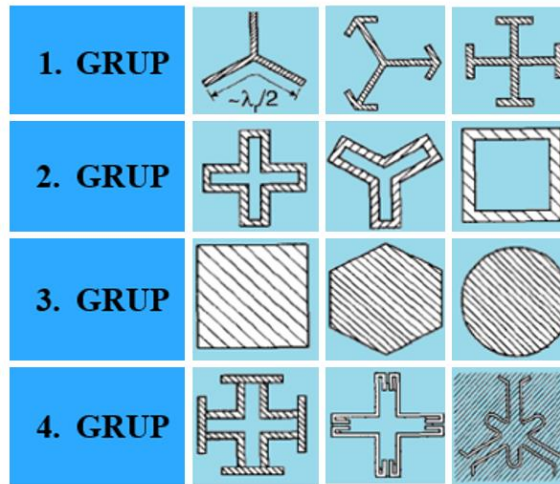
Şekil 2.1'de örnek olarak bazı basit FSY birim hücre geometrileri gösterilmektedir. Literatürde kullanılan birim hücre geometrilerine örnek olarak kare plaka, tam kare oyuk, dörtgen döngü, dörtgen oyuk, dairesel plaka, dairesel oyuk, çember döngü, çember oyuk tasarımları sunulmaktadır. Tasarımlarda altın sarısı olan

bölgeler iletken malzemeyi, gri olan bölgeler ise dielektrik malzemeyi temsil etmektedir.



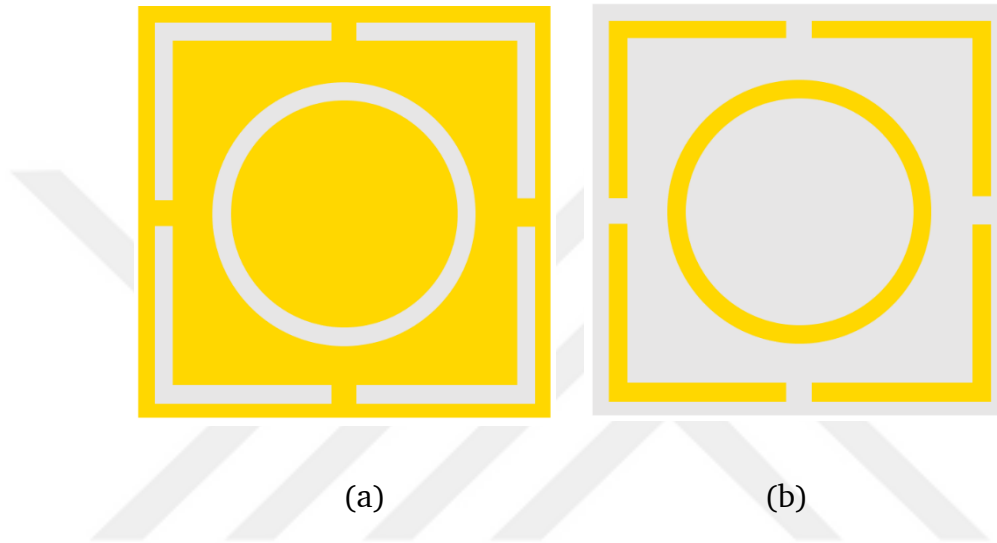
Şekil 2.1 Bazı basit FSY birim hücre geometrileri (a) kare plaka, (b) tam kare oyuk, (c)dörtgen döngü, (d) dörtgen oyuk, (e) dairesel plaka, (f) dairesel oyuk, (g) çember döngü, (h) çember oyuk

Frekans seçici yüzeyler eleman tiplerine göre dört temel eleman grubuna ayrılmaktadır. FSY'ler tasarlanırken hedeflenen uygulamalara uygunluğu gözetilerek bu gruplarda bulunan dizi elemanı veya kombinasyonlar tercih edilmektedir. Dört temel FSY eleman grubu Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Temel FSY eleman grupları [18]

Birim hücrelerin tasarımlarında iletken malzeme döngü olarak veya oyulmuş şekilde kullanılabilmektedir. Bir iletken katmanın oyulmasıyla oluşturulan desen, tamamlayıcı bölünmüş rezonatör (CSR) olarak tanımlanmakta iken; dielektrik katman üstünde yer alan iletken döngüler ise bölünmüş rezonatör (SR) olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.3'te tamamlayıcı ve iletken formundaki rezonatör tasarımları gösterilmektedir. Sunulan tasarımlarda altın sarısı olan bölgeler iletken malzemeyi, gri olan bölgeler ise dielektrik malzemeyi temsil etmektedir.



Şekil 2.3 Rezonatör yapıları (a) Tamamlayıcı rezonatör, (b) İletken rezonatör

Yarık ve iletken formundaki rezonatörler, hedeflenen frekans bant aralığında bant geçiren veya bant durduran özellik kazandırılabilir olması sebebiyle birçok alanda tercih edilmektedir. Bölünmüş halka rezonatörler anten, frekans seçici yüzey, filtre gibi birçok uygulamada geometrik yapıları ve desenleri değiştirilerek istenilen frekans bant aralığında çalıştırılması amacıyla kullanılmaktadır.

2.1.2 Kullanılan FSY Malzemeleri

Frekans seçici yüzeylerin yapısı iletken plaka ve dielektrik katmanın üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Uygulamalarda iletken malzeme olarak genellikle $5,96 \times 10^7 S/m$ iletkenlik değerine sahip bakır kullanılmaktadır. FSY'lerde kullanılan dielektrik malzeme olarak ise sıklıkla DiClad880, FR-4, Rogers RO3003 tercih edilmektedir. Bu malzemelerin dielektrik katsayıları sırasıyla $\epsilon_r = 2,2$, $\epsilon_r = 4,3$ ve $\epsilon_r = 3$ olarak bilinmektedir.

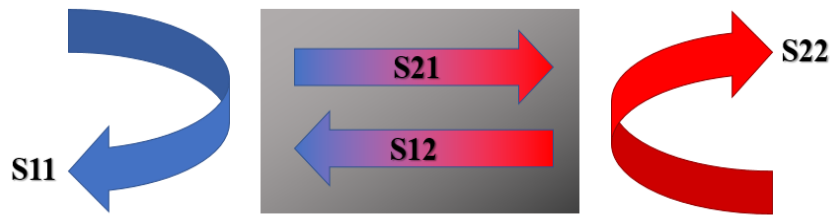
FSY'lerin rezonans frekansı, kullanılan malzemelerin cinsinden, kalınlığından ve boyutlarından etkilenmektedir. Dielektrik malzemenin kalınlığı ile geri dönüş kaybı ilişkilidir. 5G uygulamalarında yüksek performanslar beklenmesi sebebiyle geri dönüş kaybının düşük olması gerekmektedir. Bu sebeple kullanılan iletken ve dielektrik malzemelerin kalınlığının uygulanabilir düzeyde ince olması tercih edilmelidir. Ayrıca dielektrik malzemenin cinsi belirlenirken dielektrik katsayısı da önem arz etmektedir. Dielektrik katsayısı, rezonans frekansı ile ters orantılı ve aynı zamanda geri dönüş kaybı ile doğru orantılıdır [20].

2.2 Rezonans Analizi

Frekans seçici yüzeylerin analizinde, S-parametreleri ve eşdeğer devre modelleri kullanılmaktadır. Saçılma parametreleri sayesinde, portlar arasındaki sinyal transferine verilen tepkiler saptanmaktadır. Eşdeğer devre modelleri ise rezonatör etrafında meydana gelen toplam alanı devre elemanlarıyla ortaya koymaktadır. Bu analiz modelleri Başlık 2.2.1 ve Başlık 2.2.2'de açıklanmaktadır.

2.2.1 S-Parametre Modelleri

S-parametreleri, elektrik sinyalleri ile sürekli olarak uyarılmakta olan lineer devrelerin tepkilerini tanımlayan parametrelerdir. FSY'lerin analizinde kullanılan saçılma parametreleri iki portlu devre için S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} olarak tanımlanmaktadır. Saçılma parametrelerinin gösterimi Şekil 2.4'te sunulmuş olup açıklamaları Tablo 2.1'de gösterilmiştir.



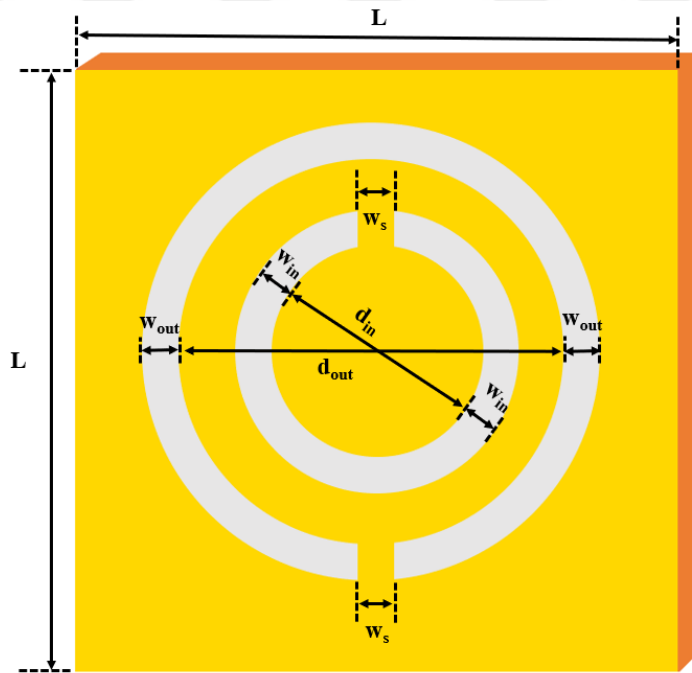
Şekil 2.4 S-parametreleri

Tablo 2.1 S-parametrelerinin açıklaması

S-Parametre	Açıklaması
S_{11}	Sinyalin birinci porttan yansıma oranı
S_{21}	Sinyalin birinci porttan ikinci porta iletim oranı
S_{12}	Sinyalin ikinci porttan birinci porta iletim oranı
S_{22}	Sinyalin ikinci porttan yansıma oranı

FSY tasarımlarının hedeflenen uygulamalar için elverişli olup olmadığının saptanması amacıyla CST Microwave Studio gibi benzetim programları ile S-parametreleri incelenmektedir. Üretimi tamamlanmış olan FSY'lerin ölçüm düzeneği ile incelenmesi için ise TX (verici) anten ile RX (alıcı) antenin arasına FSY yerleştirilerek vektör ağ analizörü kullanılmaktadır [21].

Bant geçiren veya bant durduran bir FSY'nin analizi için S_{11} ve S_{21} parametrelerinin incelenmesi yeterli olmaktadır. Şekil 2.5'te örnek olarak sunulan bir frekans seçici yüzeyin tasarımı ve parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Örnek olarak sunulan bir FSY tasarımı

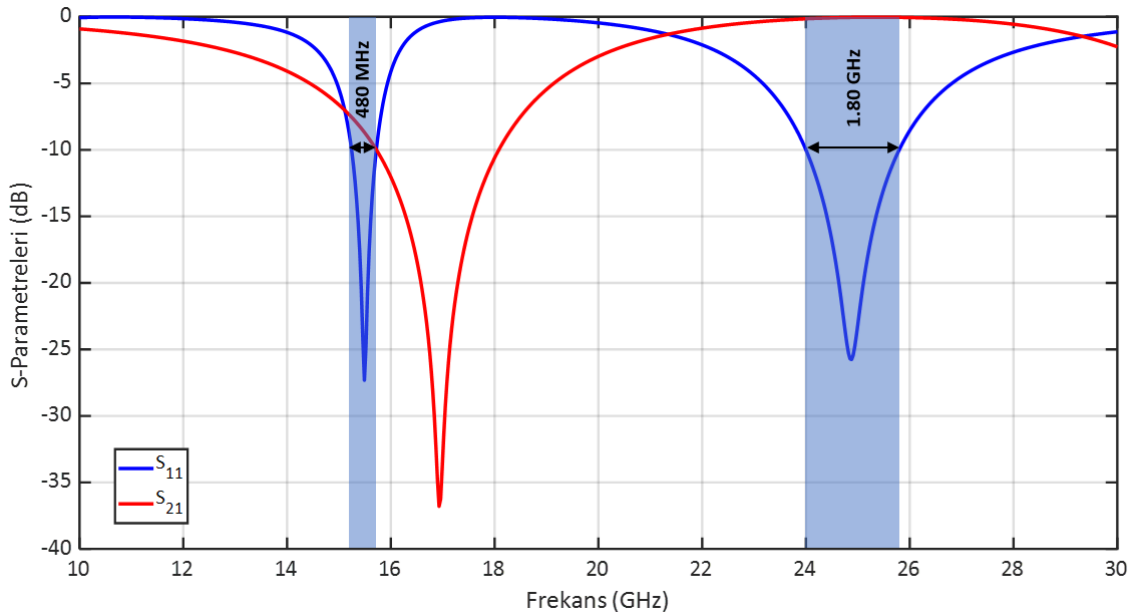
S-Parametre analizine örnek teşkil etmesi amacıyla halka rezonatör yapısı incelenmiştir. Bu birim hücre tasarımında taban malzemesi olarak düşük kayıplı, kalınlığı 0,51 mm, dielektrik sabiti $\epsilon_r=2,2$ ve kayıp tanjantı 1 GHz'de $\tan \delta =$

0,0009 olan DiClad880 tercih edilmiştir. İletken yüzey bakır ($\sigma = 5,96 \times 10^7 \text{ S/m}$) olup $17,5 \mu\text{m}$ kalınlığa sahiptir. Birim hücrenin benzetimleri CST Microwave Studio programıyla yapılmış olup parametre değerleri Tablo 2.2’de yer almaktadır.

Tablo 2.2 Örnek FSY’in parametre değerleri

Parametreler	Değerleri (mm)
L	6,00
d_{in}	4,60
d_{out}	2,40
w_s	0,80
w_{in}	0,40
w_{out}	0,40

Birim hücrenin S-parametreleri Şekil 2.6’da sunulmuştur. Grafik incelendiğinde bant geçiren filtre özelliği sergilediği görülmektedir. S_{11} parametresinden anlaşıldığı üzere, birim hücre 24,8GHz frekansında rezonansa girmekte, bant geçiren özellik taşımaktadır.



Şekil 2.6 Örnek FSY’e ait birim hücrenin S-parametreleri

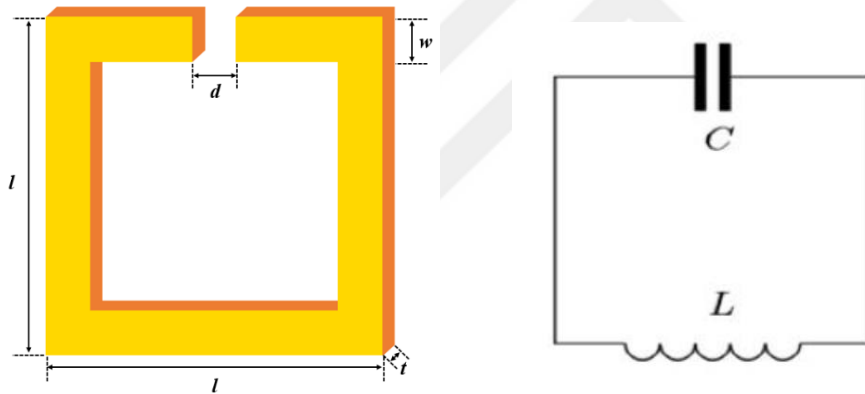
Analiz sonuçlarına göre, dış çemberi tanımlayan d_{out} ve w_{out} parametresinin değişimi birinci rezonansın bant genişliğini doğrudan etkilemektedir. İç çemberi

tanımlayan d_{in} ve w_{in} parametrelerinin değişimi ise ikinci rezonans frekansını etkilemektedir.

2.2.2 Eşdeğer Devre Modelleri

Eşdeğer devre yöntemi, hedeflenen çıktılar için gerekli yapının belirlenmesinde referans oluşturması amacıyla kullanılmaktadır. Eşdeğer devre yönteminin kullanılması ile frekans seçici yüzeyin frekans cevabı üzerindeki etkileri gözlenmekte ve tasarımlar bu gözlemler neticesinde son halini almaktadır.

Bu kısımda literatürde yer alan frekans seçici yüzeyler için oluşturulmuş eşdeğer devre modelleri üzerinden konu açıklanmaktadır. Şekil 2.7’de yarık kare rezonatör yapısı ve eşdeğer devresi gösterilmektedir. Yarık kare rezonatörler, iletken bir kare halkaya yarık açılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu halkalar kare, dairesel, sekizgen olacağı gibi hedeflenen çıktılara göre farklı şekiller alabilmektedir [22].



Şekil 2.7 Basit bir kare halka rezonatör yapısının parametreleri ve eşdeğer devresi [23]

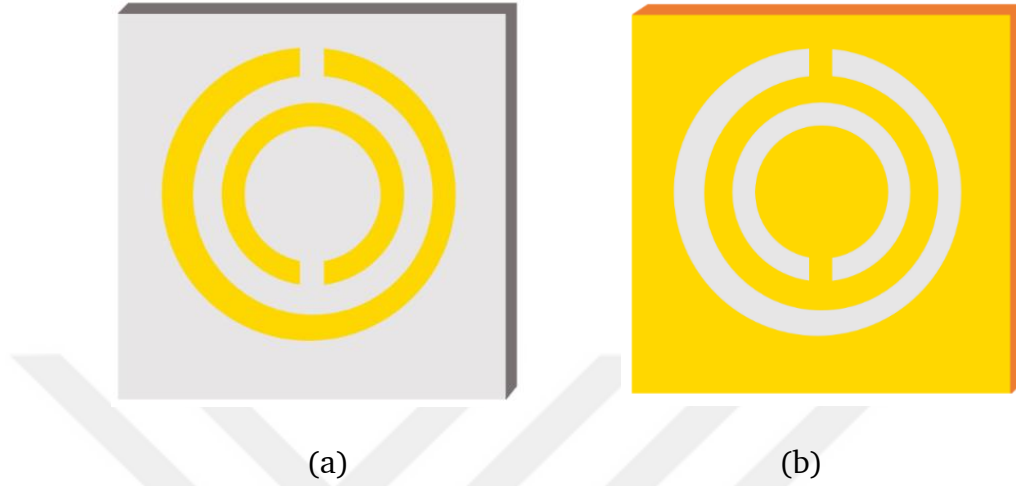
Bu yapıda bulunan iletken halkalar endüktans etkisi göstermekte ve iki iletken arasında yer alan yarık ise kapasitör etkisi göstermektedir. Eşdeğer devredeki kapasitif ve endüktif etkinin formülleri sırasıyla Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2’de gösterilmiştir. Ayrıca rezonans frekansının eşitliği Eşitlik 2.3’te gösterilmiştir [23].

$$C = \frac{\epsilon_c \left(\frac{\omega t}{d} \right)}{4\pi} \quad (2.1)$$

$$L = \frac{4\pi l^2}{c^2 t} \quad (2.2)$$

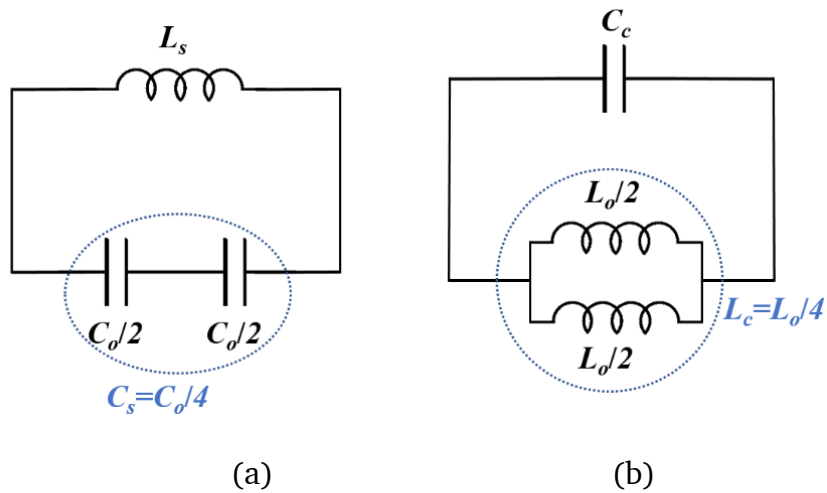
$$f_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

Literatürden incelemesi yapılan diğer çalışmada da aynı geometrik görüntüye sahip olan birim hücrelerin eşdeğer devre modellerinin farkları irdelenmiştir. Şekil 2.8’de bölünmüş halka rezonatör (SSR) ile ve tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörün (CSRR) birim hücre yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Halka rezonatörlerin (a) SSR ve (b) CSRR'nin birim hücre yapıları

Birim hücreler aynı geometrik görüntüye sahip olsalar bile iletken ve dielektrik topolojileri aynı olmadığından dolayı eşdeğer devre empedansları farklılık gösterecektir. Bu durumda da rezonans frekanslarının birbirinden farklı sonuç vermesine yol açacaktır. Şekil 2.8’de gösterilen birim hücre yapılarına dair eşdeğer devre modelleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Halka rezonatörlerin eşdeğer devre modelleri (a) SSR ve (b) CSRR

[24]

Aynı boyutlardaki bölünmüş halka rezonatör (SSR) ve tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör (CSRR) tasarımlarının eşdeğer endüktans ve kapasitans değerleri, aynı tasarım denklemleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. SSR'nin belirtilen boyutlara sahip rezonans frekansı (f_{SSR}), Eşitlik 2.4 ile sağlanmaktadır [25].

$$f_{SSR} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} \quad (2.4)$$

Bu denklemde L_S ve C_S , SSR'nin eşdeğer devresindeki etkin endüktans ve kapasitansı ifade etmektedir ve Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6'da gösterilmektedir.

$$L_S = 0.0002l \left(2.303 \log_{10} \left[\frac{4l}{c} \right] - 2.451 \right) \mu H \quad (2.5)$$

$$C_S = \left[\frac{\pi r_{avg} C_{pul}}{2} + \frac{\epsilon_o c h}{2g} \right] \quad (2.6)$$

Bu eşitliklerde belirtilen c halkanın genişliğini, l dış halkanın uzunluğunu, C_{pul} SSR'nin iç ve dış halkaları arasındaki birim uzunluk başına kapasitansı, r_{avg} ortalama halka yarıçapını, g halkanın bölünmüş boşluk boyutunu ve h alt tabakanın kalınlığını ifade etmektedir.

SSR ve CSRR tasarımlarına ait devre modellerinin parametrelerinin birbirleriyle ilişkili olduğu Eşitlik 2.7'de görülmektedir. Ayrıca CSRR'ye dair rezonans frekansı da Eşitlik 2.8'de belirtilmektedir [26].

$$C_c = 4\left(\frac{\epsilon_o}{\mu_o}\right)L_S \quad \text{ve} \quad C_S = 4\left(\frac{\epsilon_o}{\mu_o}\right)L_o \quad (2.7)$$

$$f_{CSRR} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (2.8)$$

3

5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ

3.1 5G'nin Tanımı ve Frekans Spektrumu

Gelişen teknoloji ile birlikte doğan ihtiyaçlara bağlı olarak haberleşme alanında birçok yeni gelişmeler yaşanmaktadır. Kablolu haberleşme sistemlerinin küresel çapta sürdürülebilir olmaması sebebiyle haberleşme sektörü, kablosuz haberleşme sistemlerini geliştirme amacı gütmektedir. Kablosuz haberleşmenin amacı, kablolu haberleşme standartlarında yüksek hız ve kalitede iletişim ortamı oluşturmaktır. İlk nesilden (1G) bu yana ortaya atılan ve geliştirilen yeni nesil haberleşme uygulamaları, bu amaçlar doğrultusunda büyük mesafeler kat ederek haberleşmenin gelişim sürecini oluşturmuştur. Bu gelişim süreci 1979'da 1G'den başlayarak günümüzde halen 5G uygulamalarındaki çalışmalarla devam etmektedir.

4G ağ hizmetlerinin kullanıma sunulmasıyla kablosuz iletişim uygulamaların kalitesi neredeyse kablolu bağlantıların kalitesine yetişmiştir. 4G haberleşme sistemleri sayesinde mobil cihazlarla geniş bant hizmetleri uygulanabilmektedir. Ancak 4G haberleşme sistemleri yüksek hız, anlık yanıt, yüksek güvenilirlik vb. özellikler gerektiren mobil hizmetlerin sağlanması için tam anlamıyla yeterli değildir. Modern çağın yakın zaman içerisinde gündelik uygulamaları haline gelecek olan makinelerin haberleşmesi, nesnelerin interneti (IoT), insansız araçların iletişimi (drone sürüleri vb.), otonom cihazların koordinesi gibi konular için ihtiyaçları karşılayabilecek yeni nesil haberleşme sistemleri arayışına gidilmiştir. Tüm bu ihtiyaçlar neticesinde yüksek hız, yüksek performans, yüksek verim, düşük gecikme süresi gibi özelliklere sahip olan beşinci nesil (5G) haberleşme sistemleri gündeme gelmiştir [27]. 5G performans özelliklerinin 4G haberleşme sistemlerine kıyasla üstünlükleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1 4G ile 5G performans özelliklerinin kıyaslanması [28]

Performans Özellikleri	4G	5G
Gecikme Süresi	10 ms	1 ms'den daha az
Veri Trafığı	7,2 exabyte/ay	50 exabyte/ay
En Yüksek Veri Hızı	1 Gb/s	20 Gb/s
Mevcut Spektrum	3 GHz	30 GHz
Bağlantı Yoğunluğu	100 bin bağlantı/km ²	1 milyon/ km ²
Frekans Bandı	600MHz ila 5,925 GHz	600MHz-mmWave (örneğin; 28GHz, 39GHz ve daha ilerisi 80 GHz)
Uplink Dalga Formu	Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (SC-FDMA)	Periyodik önek – Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (CP- OFDM)
Kanal Bant Genişliği	20MHz 200kHz(Cat-NB1 IoT için)	6GHz altında 100MHz, 6GHz üstünde 400MHz

5G haberleşme sistemlerinin karmaşık, çok boyutlu, kullanıcı merkezli veri ağları yaratacağı düşünülmektedir. 5G, iletişimi sağlamasının yanı sıra endüstriyel, tarımsal, medikal, trafik, finansal ve çevresel uygulamalardaki büyük veri alışverişini de etkin ve verimli şekilde sağlayacaktır. 5G, insanlar ve nesneler arasında kolay ve akıllı bağlantılar kurulmasını desteklemektedir [29]. Bu doğrultuda ITU-R, 5G hizmetinin uygulamalarını eMBB, mMTC ve URLLC şeklinde üç kategoride sınıflandırmaktadır [30].

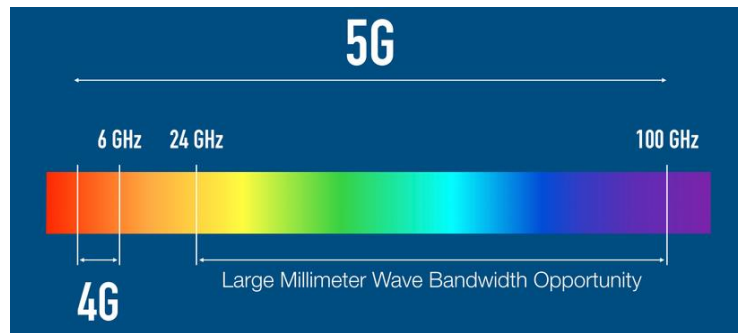
Geliştirilmiş Mobil Bant (eMBB), çok yüksek veri hızlarına sahip sürdürülebilir bağlantıları destekler. Masif Makine Tipi İletişim (mMTC), makinelerin birbiriyle iletişim kurmasını, nesnelerin internetini (IoT) destekler. Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC), verilerin çok yüksek güvenilirlikle düşük gecikmeli aktarılmasını destekler [31]. Tablo 3.2'de ITU-R'deki 5G hizmetleri için teknik kıyaslamalar gösterilmektedir.

Tablo 3.2 ITU-R'deki 5G hizmetleri için teknik kıyaslamalar [27]

Özellikler	eMMB	mMTC	URLLC
En Yüksek Veri Hızı	Yüksek	Düşük	Düşük
Kullanıcı Deneyimli Veri Hızı	Yüksek	Düşük	Düşük
Spektrum Verimliliği	Yüksek	Düşük	Düşük
Hareketlilik	Yüksek	Düşük	Yüksek
Gecikme	Orta	Düşük	Yüksek
Bağlantı Yoğunluğu	Orta	Yüksek	Düşük
Ağ Enerji Verimliliği	Yüksek	Orta	Düşük
Alan Trafik Kapasitesi	Yüksek	Düşük	Düşük

5G uygulamaları milimetre dalga (mm-dalga) bandı olarak anılan frekans aralığını kullanmaktadır. Milimetre dalganın dalga boyu genellikle 1 ile 10 mm olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla kızılötesi dalgalardan ve X ışınlarından daha büyük ancak radyo dalgalarından ve mikrodalgalardan daha küçük dalga boyuna sahip olduğu söylenebilmektedir. Elektromanyetik spektrumun mm-dalga bölgesi 30–300 GHz frekans aralığına karşılık gelmektedir. Mm-dalga yüksek hızlı internet, veri ve ses iletişimi için kullanılabilir [32].

Şekil 3.1’de Avustralya Mobil Telekomünikasyon Derneği (AMTA) tarafından hazırlanan 5G milimetre dalga olarak tanımlandığı frekans aralığı gösterilmektedir. Spektrumda yer alan 24GHz ve 100GHz frekans aralığının günümüzde ve gelecekte kullanılacağı ön görülmektedir.



Şekil 3.1 5G milimetre dalga frekans aralığı [33]

ITU tarafından 5G için tanımlanan frekans aralıkları Tablo 3.3’te verilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda bu frekans aralıkları referans alınmıştır.

Tablo 3.3 5G Uygulamaları için frekans spektrumu [30]

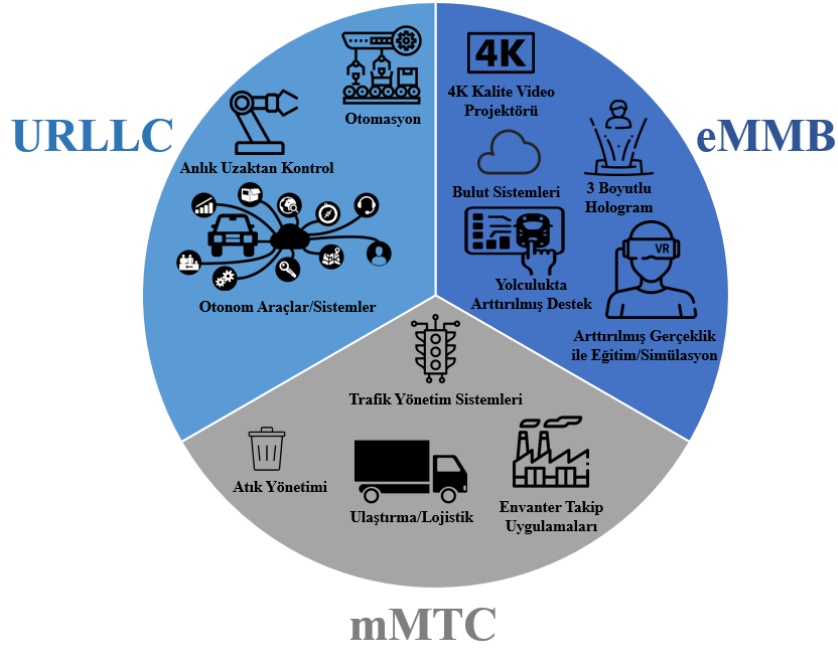
Frekans Aralığı	Bant Genişliği
24,25 GHz – 24,45 GHz	200 MHz
24,75 GHz – 25,25 GHz	500 MHz
27,50 GHz – 28,35 GHz	850 MHz
37,60 GHz – 40,00 GHz	2,4 GHz

3.2 5G Uygulama Alanları

5G, geleneksel haberleşme sistemlerinde olduğu gibi insanlar arasındaki iletişimi sağlama yetisinin yanı sıra sanayi, endüstri, tarım, sağlık, şehir hizmetleri, ulaştırma, güvenlik gibi sektörlerde akıllı sistemlerin kurulma olanağını sunmaktadır.

5G teknolojisi, insanlar ve/veya nesneler arasında akıllı bağlantılar kurulmasını desteklediğinden dolayı sektörlerin akıllı uygulamalarının gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. 5G ile üretim sektörlerinde ham maddenin girişinden paketlenmiş ürünün çıkış aşamasına kadarki süreçte tüm üretim zincirinin gerçek zamanlı akıllı sistemler tarafından yürütülmesi, sağlık sektöründe operatör robotlar, uzaktan vücut sağlığı inceleme sistemleri, akıllı tespit sistemleri vb. uygulamalar, güvenlik sektöründe otonom nesne arama robotları, devriye drone sürüleri, gözetleme ağı gibi uygulamalar, şehir hizmetlerinde akıllı trafik düzenlemeleri, aydınlatma ve ısıtma otomasyonları, hava kirliliği takip sistemleri gibi uygulamalar hayata geçirilecektir.

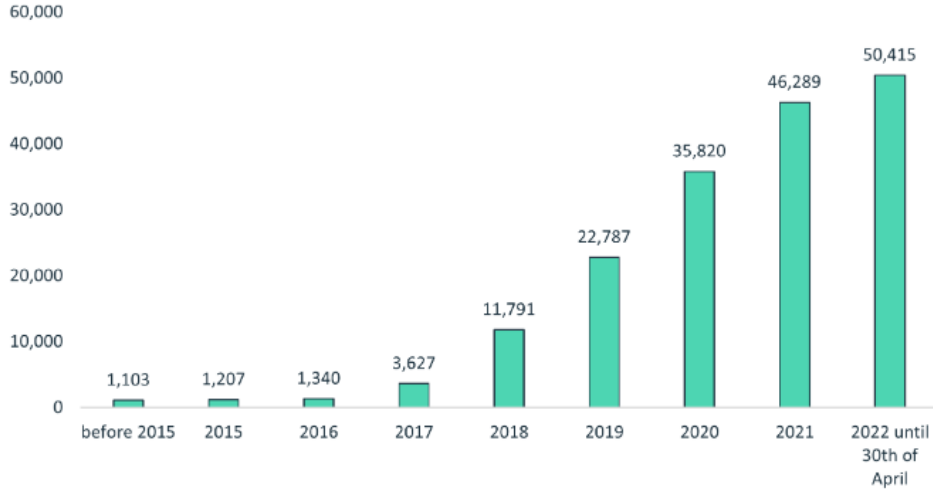
5G uygulamaları için ITU-R tarafından yapılan kategorizasyonda eMBB, mMTC ve URLLC sınıfları Şekil 3.2’de yer almaktadır.



Şekil 3.2 Kategorilerine göre 5G uygulamaları [34]

5G haberleşme sistemleri ile ilgili günümüze kadar birçok çalışma yapılmasına karşın bu teknolojinin inovatif vaatler sunmasından dolayı araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Yeni nesil haberleşme teknolojisine geçiş için yürütülen ARGE çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

Dünyanın farklı bölgelerinde büyük firmalar 5G uygulamaları için altyapı faaliyetlerinin yanı sıra yeni nesil teknolojilerdeki en uygun malzeme ve tasarımları bulmak için de çalışmalarını yürütmektedir. Başta mobil cihaz ve telekomünikasyon firmaları olmak üzere birçok kurum ve kuruluş bu alanda patentler edinmektedir. Onay bekleyen ve onaylanmış patent sayıları gün geçtikçe daha da artmaktadır. Şekil 3.3'te 2015 öncesi yıllardan günümüze kadar süregelen 5G alanındaki patent verileri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Yıllara göre 5G patent verileri [35]

İlk başvuru yılından bugüne kadar gelen 5G patent verilerine bakıldığında başvuru sayılarının her geçen gün katlanarak arttığı görülmektedir. Önümüzdeki yıllarda da önceki yıllara kıyasla çok daha fazla patent başvurusu olacağı değerlendirilmektedir.

3.3 5G'nin RF Filtre Uygulamalarındaki Etkisi

5G haberleşme sistemleri karmaşık ve çok boyutlu veri ağları yaratarak insanlar ve/veya nesneler arasında akıllı bağlantıların kurulmasını sağlamaktadır. Bu iletişimlerin sorunsuzca yerine getirilebilmesi için istenilen sinyallerin hedefe varması, istenmeyen sinyallerin ise engellenmesi gerekmektedir. RF filtrelerinin yardımıyla bu kontrolü sağlamak mümkündür.

RF filtreleri istenilen sinyallerin seçilmesini, istenmeyen sinyallerin ise filtrelenmesini sağlamaktadır. RF filtreleri olmadığı takdirde antenlerin performansı istenmeyen sinyalleri alarak düşmekte ve 5G avantajlarını olumsuz etkilemektedir. Filtreler, cihazların sinyal bantlarını ayırt etmesine olanak vererek istenen dalga boyunu işlenmesi için yönlendirir [36].

Mobil cihazlarda küçük boyutları ve yüksek performansları nedeniyle akustik filtreler tercih edilmektedir. Akustik filtreler, ürettikleri küçük dalgalanmalarla filtrenin hangi frekansları işleyeceğini belirlemektedir. Akustik filtre teknolojileri, dalgalanmaların yüzeyde veya kütlede yayıldığı Yüzey Akustik Dalgası (SAW) ve Toplu Akustik Dalgası (BAW) filtrelerini içermektedir [37].

Günümüzdeki mobil cihazlarda kullanılan BAW filtreleri 1,5 GHz'den 3,5 GHz'e kadar ve SAW filtreleri 600 MHz'den 2 GHz'e kadar çalışmaktayken Qualcomm Technologies firması tarafından gerçekleştirilen araştırmalar neticesinde kapsama aralığı oldukça genişlemiştir. Qualcomm ultraSAW filtreleri 600 MHz ila 2,7 GHz arasındaki düşük bant frekanslarını kapsarken, Qualcomm ultraBAW filtreleri 2,7 ila 7,2 GHz aralığını kapsayarak orta bant bağlantısını 7 GHz'e kadar genişletmektedir [38].

5G uygulamaları için gerekli olan ihtiyaçlar göz önünde bulunulduğunda, RF filtreleri üzerine önümüzdeki süreçte yeni ARGE çalışmalarının yürütülerek çalışma frekansları, boyut, ağırlık gibi birçok konuda gelişmeler gerekeceği ön görülmektedir.

5G HABERLEŞME UYGULAMALARI İÇİN MM DALGA FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

4.1 5G Frekansları için Çift Bantlı Özgün Birim Hücre Modeli

Çift (dual) bantlı yapılar, iki bağımsız ve belli uygulamalar için tahsis edilmiş frekans bandında çalışmaya olanak vermektedir. Belirlenen frekans aralıklarındaki iletimde daha fazla esneklik ve üstün performans sunmaktadır. Bu sebeple çift (dual) bantlı yapılar uygulama alanlarında tercih edilmektedir.

Tezin bu bölümünde, özgün olarak tasarlanan çift bantlı frekans seçici yüzeyin tasarım parametreleri ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Çift bantlı frekans seçici yüzeyin tam dalga analiz aracı ile elde edilen benzetim sonuçları irdelenmiştir.

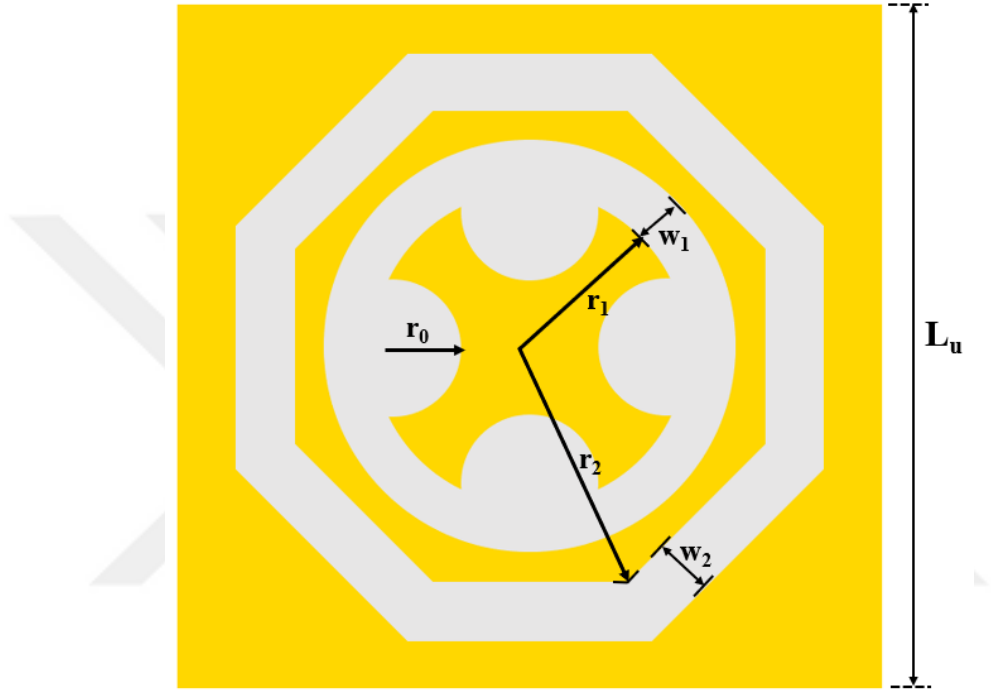
4.1.1 Çift Bantlı Özgün Birim Hücre Tasarımı

Frekans seçici yüzeyler bant geçiren veya bant durduran filtre olarak tasarlanabilmektedir. Bant geçiren filtre amacıyla tasarlanan bir filtrede yansıma katsayısı ve iletim katsayısı parametrelerine bakılarak istenilen frekans aralığında düşük yansımaya ve yüksek iletime sahip olması hedeflenmektedir. Bu sebeple S_{11} ve S_{22} 'nin -10 dB 'nin altında olmasına önem verilmektedir. S_{21} ve S_{12} parametrelerinin ise hedeflenen frekans bandında yüksek miktarda iletim olması için yüksek bir değere sahip olmasına özen gösterilmektedir.

Tasarımı yapılan frekans seçici yüzeylerin birim hücre analizleri CST Microwave Studio benzetim programı yardımıyla yapılarak S-parametreleri elde edilebilmektedir. Benzetimler yapılırken z-eksenine dik olarak yerleştirilmiş birim hücre iletkeni $z = 0$ düzleminde yer alacak şekilde konumlandırılmıştır. Birim hücre, $+z$ ve $-z$ doğrultusunda bulunan, birinci rezonans frekansında $\lambda/6$ uzaklığa yerleştirilen iki port ile uyarılmaktadır. Birim hücrelerin analizinde x-ekseni ve y-ekseni boyunca olan sınırlarda birim hücre sınırı kullanılarak bu

eksenler boyunca sonsuz tekrarlayan yapının eşdeğer sonuçları elde edilmiştir. Ek olarak z-eksenine dik olan sınırlarda ise açık sınır koşulu kullanılmıştır.

Çift bantlı bant geçiren filtre olarak tasarlanan yapıda kararlı sonuçlar elde edebilmek ve 5G uygulama bantlarında geçirgenlik özelliği sağlayabilmek hedeflenmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1 üzerinde birim hücreye dair fiziksel parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Çift bantlı birim hücre yapısı ve fiziksel parametreler

Tez kapsamında tasarlanan özgün frekans seçici yüzey yapılarının 5G uygulamalarında kullanılması hedeflenmektedir. Bu sebeple birim hücrenin parametreleri, 5G uygulama frekans bantlarını kapsayacak şekilde elde edilmiştir. Bunun için birim hücrenin parametrelerine optimizasyon prosedürü uygulanarak ilgili bant içerisinde rezonans yapması sağlanmıştır. Çift bantlı birim hücre analizinde ITU tarafından 5G uygulamaları için tahsis edilen, 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz ve 37,60–40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir [30]. Çift bantlı birim hücre tasarımında taban malzemesi olarak düşük kayıplı, kalınlığı 0,51 mm, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,2$ ve kayıp tanjantı 1 GHz’de $\tan \delta = 0,0009$ olan DiClad880 tercih edilmiştir. İletken yüzey bakır ($\sigma =$

$5,96 \times 10^7 S/m$) olup $17,5 \mu m$ kalınlığa sahiptir. Bu frekans bantlarında çalışan birim hücrenin parametrelerinin değerleri Tablo 4.1’de yer almaktadır.

Tablo 4.1 5G frekansları için tasarlanan çift bantlı birim hücrenin fiziksel boyutları

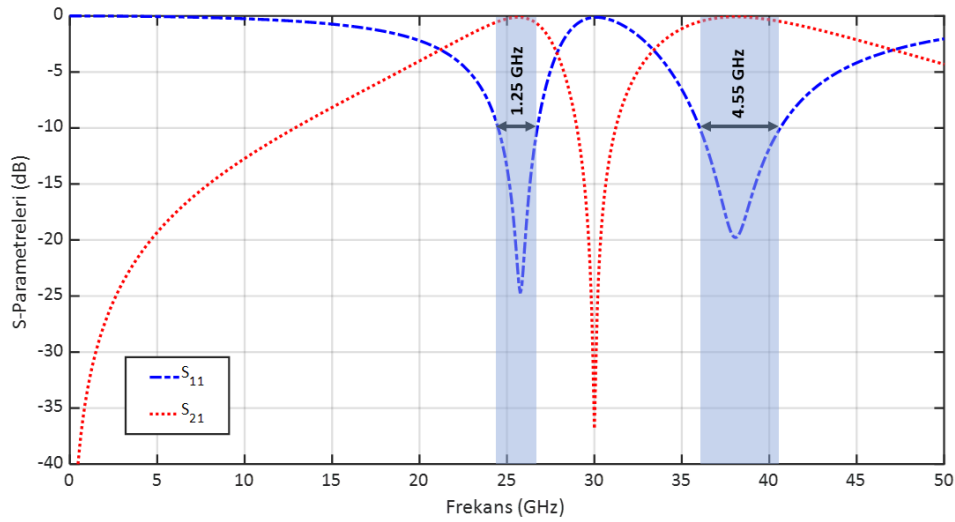
Parametreler	Değerleri (mm)
L_u	3,80
w_1	0,20
w_2	0,30
r_0	0,50
r_1	1,05
r_2	1,45

4.1.2 Benzetim Sonuçları

Bu bölümde tez kapsamında tasarlanan çift bantlı birim hücrenin CST Microwave Studio programı ile elde edilen benzetim sonuçları incelenmiştir. İncelemelerde çift bantlı birim hücreye ait S-parametrelerinin yanı sıra açılal ve polarizasyon kararlılıklarına dair sonuçlara da yer verilmiştir.

4.1.2.1 Yansıma ve İletim Katsayıları

Çift bantlı birim hücrenin S-parametreleri Şekil 4.2’de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde çift bantlı, bant geçiren filtre özelliği sergilediği görülmektedir. S_{11} parametresinden anlaşıldığı üzere, birim hücre 25,7 GHz ve 38,1 GHz frekanslarında rezonansa girmekte, bant geçiren özellik taşıdığı gözlenmektedir. Birim hücre analizinin parametrik analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, sekizgen yarığı tanımlayan r_2 ve w_2 parametrelerinin değişimi birinci rezonansın bant genişliğini doğrudan etkilemektedir. Çember formundaki yarığı tanımlayan r_1 ve w_1 parametrelerinin değişimi ise ikinci rezonans frekansını etkilemektedir.



Şekil 4.2 Çift bantlı birim hücrenin yansıtma ve iletim katsayıları

Şekil 4.2 üzerinde gösterilen mavi bölgeler, birim hücrenin çalışma frekans bantlarını göstermektedir. Çift bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin S-parametrelerinden S_{11} yansıtma katsayısına bakıldığında, ilk rezonans için -10 dB 'de bant genişliğinin 24,50-26,75 GHz aralığında olduğu görülmektedir. Bu aralık, 5G iletişim bandı olan 24,75-25,25 GHz frekans aralığını kapsamaktadır. İlk rezonans için $-24,80\text{ dB}$ 'ye kadar geri dönüş kaybı gözlenmektedir. İkinci rezonans için bant genişliğinin 36,05-40,60GHz olduğu görülmektedir. Simülasyon ile elde ettiğimiz bant genişliğinin -10 dB 'de 2,4 GHz bant genişliğinden daha büyük (4,59GHz) olduğu görülmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının büyük frekanslarda daha büyük bant genişliği sağlaması 5G uygulamaları için istenilen bir durumdur. Tablo 4.2'de çift bantlı frekans seçici yüzey yapısının frekans yanıtı 5G için hedeflenen bant aralıkları ile birlikte özetlenmiştir.

Tablo 4.2 5G milimetre dalgı iletişimının bant gereksinimleri [30] ve özgün çift bantlı birim hücrenin frekans yanıtı

Bant No	5G İçin Ayrılan Bant (GHz)	5G İçin Gereklı Bant Genişliği	FSY Bandı (GHz)	FSY Rezonans Frekansı	FSY Bant Genişliği
Bant 1	24,75 – 25,25	500 MHz	24,50–26,75	25,7 GHz	1,25 GHz
Bant 2	37,60 – 40,00	2,4 GHz	36,05–40,60	38,1 GHz	4,55 GHz

4.1.2.2 Polarizasyon ve Geliş Açısı Kararlılığı

Frekans seçici yüzeylerde farklı polarizasyon ve geliş açıları rezonans frekansının ve bant genişliğinin yanı sıra iletim ve yansıma karakteristiklerinin değişmesine sebep olmaktadır. Frekans seçici yüzeyler teoride sonsuz periyodik diziler olmasına karşın gerçekte sonsuz uzunlukta bir dizinin gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Sonlu sayıda eleman içeren bu yapılar özellikle dalganın geliş açısının değişiminden oldukça fazla etkilenmektedirler. Bu sebeple frekans seçici yüzey tasarımında açısal kararlılık ve polarizasyondan bağımsız olması önem arz etmektedir [39].

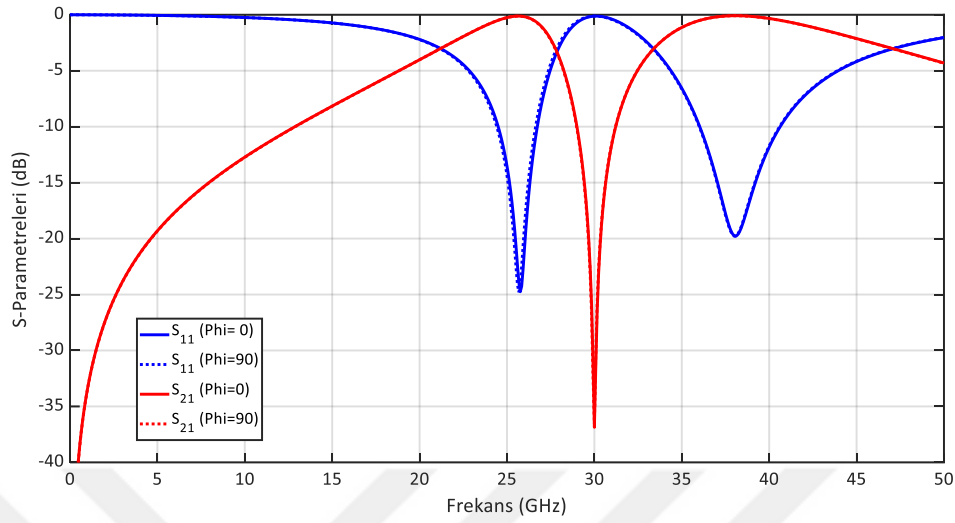
Tasarlanan birim hücrenin polarizasyon kararlılığını incelemek amacıyla TE (Transverse Electric) ve TM (Transverse Magnetic) modları için analiz yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. TE modu, iletim yönüne elektriksel alanın dik olduğu durum; TM modu ise iletim yönüne manyetik alanın dik olduğu durumdur.

CST Microwave Studio programında birim hücre z-eksenine dik olarak yerleştirilmiştir. Theta ve Phi açı değerleri değiştirilerek sinyalin geliş açısına göre benzetimi yapılabilmektedir. Bu sayede birim hücre, farklı açılardan gelen sinyaller ile analiz edilebilmektedir. Birim hücrenin polarizasyon kararlılığı incelenirken TE modu için Phi açısı sıfır derece, TM modunda ise Phi açısı 90 derece değerindedir.

Polarizasyon kararlılığına sahip bir birim hücrenin TE ve TM modu için aynı tepkiyi vermesi beklenir. 5G milimetre dalga uygulamaları için kullanılmak üzere tasarlanan frekans seçici yüzeylerin hem TE hem de TM dalgalarına cevabı irdelenmektedir. Birim hücrenin TE ve TM modundaki frekans cevabının minimum etkilenmesi için orijine göre simetrik yapıların tercih edilmesi önerilmektedir.

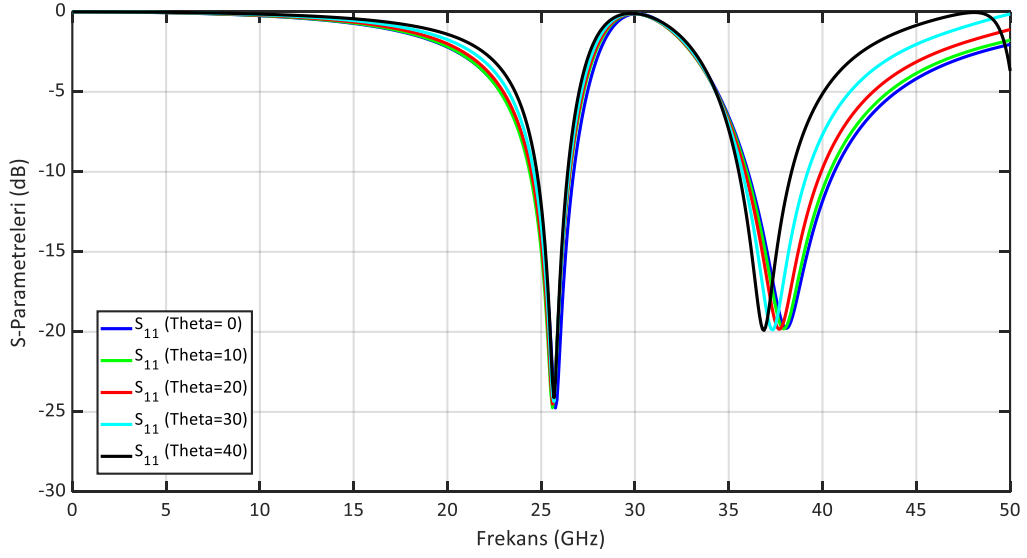
Bu açıklamalar ve hedefler doğrultusunda tasarlanan çift bantlı frekans seçici yüzey birim hücresinin TE ve TM modunda elde edilen S-parametreleri Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Şekilden birim hücrenin TE ve TM modunda benzer S_{11} ve S_{21} değişimine sahip olduğu görülmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzeyin orijine göre simetrik yapısı sebebiyle polarizasyon değişiminden minimum düzeyde

etkilenmiştir. Bu da tasarlanan birim hücre yapısının polarizasyon kararlılığını göstermektedir.

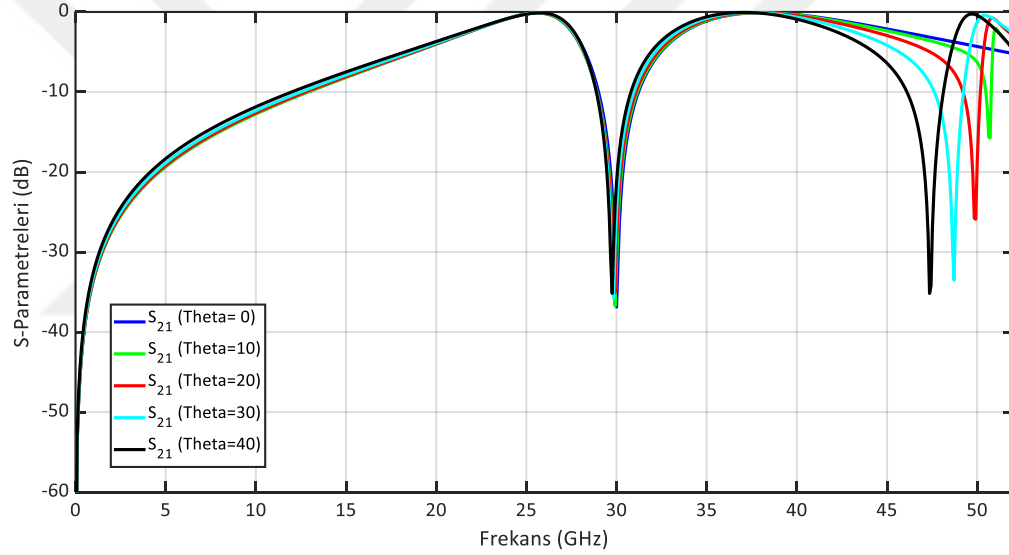


Şekil 4.3 TE ve TM modunda yansıma (S_{11}) ve iletim (S_{21}) katsayıları

Frekans seçici yüzeyler üzerine elektromanyetik dalga farklı geliş açılarıyla gelebilmektedir. Bu sebeple birim hücrenin farklı geliş açılarında benzer karakteristik göstermesi beklenmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzey birim hücresinin farklı geliş açıları için benzetimi CST Microwave Studio programı ile yapılmış ve yansıma ve iletim özellikleri elde edilmiştir. Şekil 4.4 (a) ve (b)'de sırasıyla S_{11} ve S_{21} parametrelerinin farklı geliş açılarındaki frekansa bağlı değişimi yer almaktadır. Tasarlanan iki bantlı birim hücrenin S_{11} ve S_{21} parametreleri incelendiğinde $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ değerlerinde birinci bantta açisal kararlılık olduğu görülmektedir. Birinci bantta hedeflenen 500 MHz'lik bant genişliği $\theta = 40^\circ$ geliş açısına kadar korunmuştur. İkinci bantta ise $\theta = 30^\circ$ değerine kadar rezonans frekansında düşük kayma gözlenirken daha yüksek geliş açılarında kayma düşük frekanslara doğru artmaktadır. Yüksek geliş açılarında bandın daraldığı da gözlenmektedir. Bu sonuçlar, önerilen birim hücrenin birinci rezonans bölgesi için açisal kararlılığının iyi olduğunu, ikinci rezonans bölgesinde ise $\theta = 40^\circ$ üzerindeki geliş açılarında bant dışına çıktığını göstermektedir. Ayrıca büyük geliş açısı değerleri için üçüncü bir rezonans bölgesi üretilmektedir.



(a)



(b)

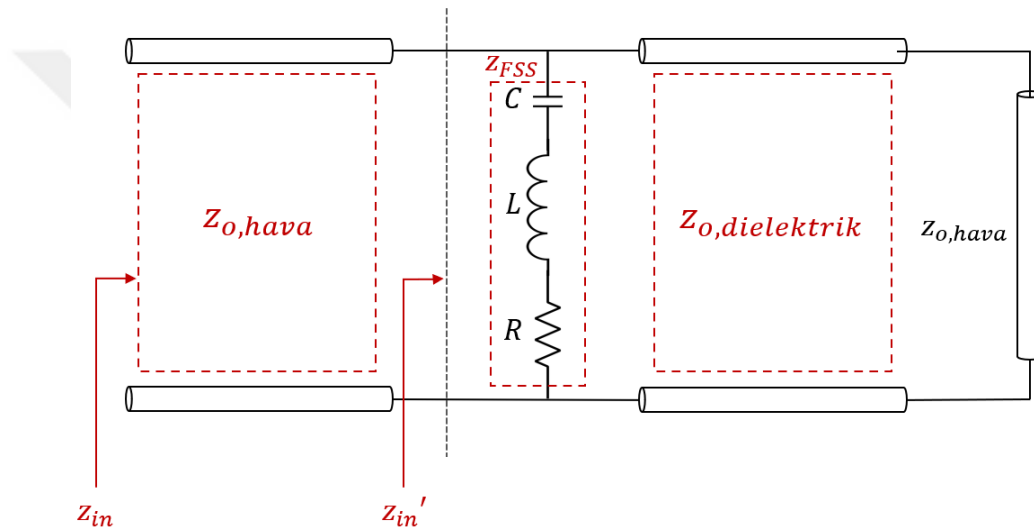
Şekil 4.4 Çift bantlı birim hücrenin açısal kararlılığı (a) yansıma katsayısı, (b) iletim katsayısı

4.1.3 İletim Hattı Modeli

Eşdeğer devre yöntemi, yapısal tasarımın belirlenmesinde referans oluşturması amacıyla kullanılmaktadır. Eşdeğer devre yönteminin kullanılması ile frekans seçici yüzeyin frekans cevabı üzerindeki etkileri gözlenmiş ve tasarımlar bu gözlemler neticesinde son halini almaktadır.

Tasarımı yapılan frekans seçici yüzey deseni, RLC devre ağı ile modellenebilir. Önerilen frekans seçici yüzeyin çift bant filtre özelliği, yarıklı modelin endüktif ve

Tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının iletim hattı eşdeğer modeli Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Birim hücrenin iletim hattı modelinde; RLC devre ağından oluşan FSS empedansı Z_{FSS} , giriş empedansı Z_{in}' , havanın karakteristik empedansı $Z_{o,hava}$, dielektrik alt tabakanın açık devre yük empedansı $Z_{o,dielektrik}$ ile sembollendirilmiştir. Bunlara ek olarak, malzeme ve iletim hattı kayıplarına modelde yer verilmiştir.



Frekans seçici yüzey birim hücresinin giriş empedansı olan Z_{in}' aşağıdaki Eşitlik 4.1 ile bulunmaktadır.

Burada $Z_{o,dielektrik}$ dielektrik alt tabakanın açık devre yük empedansıdır. $Z_{o,dielektrik}$ empedansı Eşitlik 4.2 ile verilir:

Bu eşitlikte η_1 dielektrik malzemenin karakteristik empedansı, k_d dalga sayısı ve h dielektrik malzemenin kalınlığıdır. Karşılık gelen yansıma katsayısı Eşitlik 4.3 ile ifade edilir.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} \times Z_{o,hava}}{Z_{in} + Z_{o,hava}} \quad (4.3)$$

Bu eşitliklerde havanın karakteristik empedansı Eşitlik 4.4 ile bulunmaktadır.

$$Z_{o,hava} = \eta_o (120\pi) \quad (4.4)$$

Bu doğrultuda $Z_{in}' \rightarrow Z_{o,hava}$ için metasurface ve açık alan arasında empedans eşleşmesi sağlanır ve bu eşitliğe göre sıfır yansıma katsayısı (Γ) elde edilir.

4.2 5G Frekansları İçin Üç Bantlı Özgün Birim Hücre Modeli

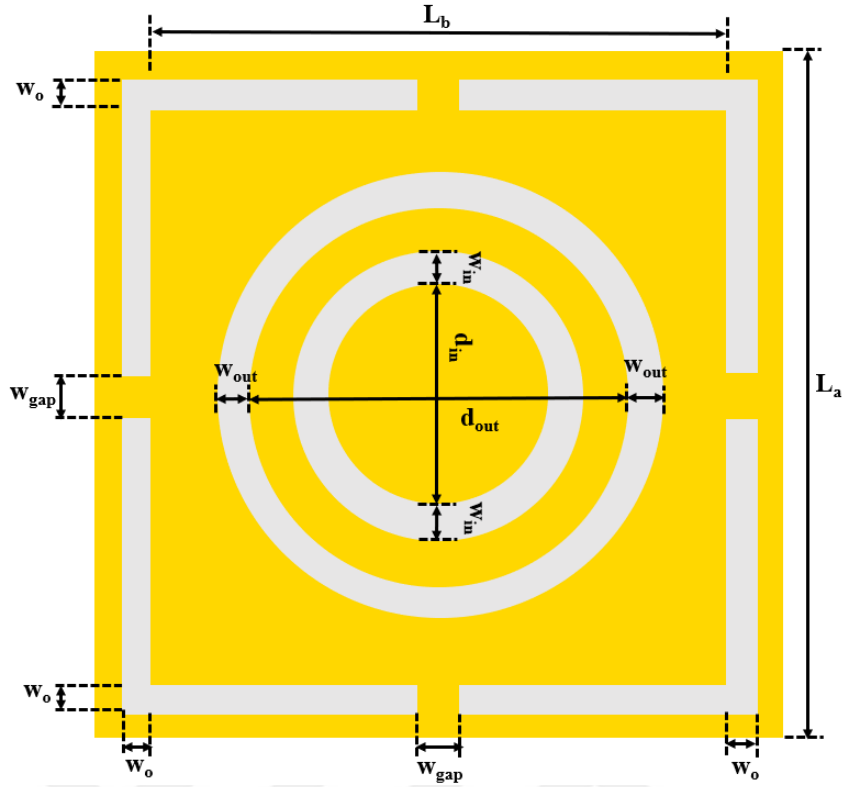
5G uygulamaları ile hedeflenen geniş bölgeye daha kaliteli iletim yapılması amacıyla üç bantlı yapılar sıklıkla kullanılmaktadır. 5G frekansları için belirli tasarımlar gerektiren ve aynı zamanda fiziksel mesafe ve hizmet alanına göre üç farklı hücre tipinden oluşan yapılar oluşturulmaktadır.

Bu bölümde, tez kapsamında özgün olarak tasarlanan üç bantlı frekans seçici yüzeye ait tasarım parametreleri ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Üç bantlı frekans seçici yüzeye ait birim hücrenin CST Microwave Studio programı ile elde edilen benzetim sonuçları incelenmiştir.

4.2.1 Üç Bantlı Özgün Birim Hücre Tasarımı

Tez kapsamında tasarlanan üç bantlı frekans seçici yüzeye ait birim hücrenin CST Microwave Studio programı ile benzetimleri yapılırken z-eksenine dik olarak yerleştirilmiş birim hücre iletkeni $z = 0$ düzleminde yer alacak şekilde konumlandırılmıştır. Birim hücre, $+z$ ve $-z$ doğrultusunda bulunan, birinci rezonans frekansında $\lambda/4$ uzaklığa yerleştirilen iki port ile uyarılmaktadır. Başlık 4.1.1'de olduğu gibi aynı biçimde birim hücrelerin analizinde x -ekseni ve y -ekseni boyunca olan sınırlarda birim hücre sınırı kullanılarak bu eksenler boyunca sonsuz tekrarlayan yapının eşdeğer sonuçları elde edilmiştir. z -eksenine dik olan sınırlarda ise açık sınır koşulu kullanılmıştır.

Üç bantlı frekans seçici yüzey tasarlanırken, kararlı sonuçlar elde edebilmek ve 5G uygulama bantlarında geçirgenlik özelliği sağlayabilmek amacı güdülmüştür. Bant geçiren filtre olarak tasarlanan üç bantlı birim hücre yapısı ve fiziksel parametreler Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Üç bantlı birim hücre yapısı ve fiziksel parametreler

Tez kapsamında tasarlanan özgün üç bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin parametreleri, 5G uygulama frekans bantlarını kapsayacak şekilde elde edilmiştir. Bunun için birim hücrenin parametrelerine optimizasyon prosedürü uygulanarak ilgili bant içerisinde rezonans yapması sağlanmıştır. Üç bantlı birim hücre analizinde 5G uygulamaları için tahsis edilen, 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz, 27,50 – 28,35 GHz bandında 850 MHz ve 37,60 – 40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir [30]. Üç bantlı birim hücre tasarımında taban malzemesi olarak düşük kayıplı, kalınlığı $0,51\text{ mm}$, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,2$ ve kayıp tanjanı 1 GHz’de $\tan \delta = 0,0009$ olan DiClad880 tercih edilmiştir. İletken yüzey bakır ($\sigma = 5,96 \times 10^7\text{ S/m}$) olup $17,5\text{ }\mu\text{m}$ kalınlığa sahiptir. Bu frekans bantlarında çalışan üç bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin parametrelerinin değerleri Tablo 4.3’te yer almaktadır.

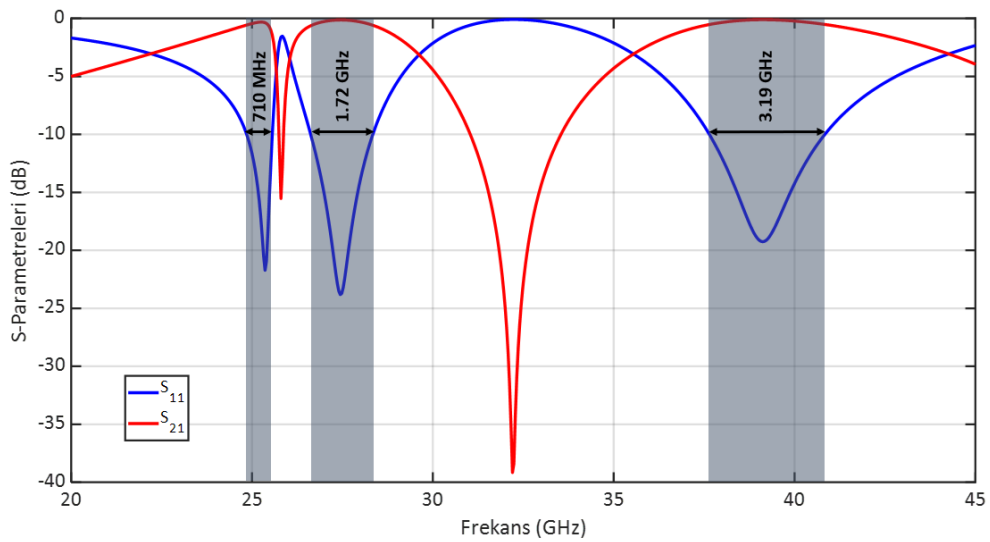
Tablo 4.3 5G frekansları için tasarlanan üç bantlı birim hücrenin fiziksel boyutları

Parametreler	Değerleri (mm)
L_a	5,40
L_b	5,00
d_{in}	2,00
d_{out}	3,00
w_{gap}	0,40
w_o	0,25
w_{in}	0,25
w_{out}	0,25

4.2.2 Benzetim Sonuçları

4.2.2.1 Yansıma ve İletim Katsayıları

Üç bantlı birim hücrenin S-parametreleri Şekil 4.7’de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde birim hücre 25 GHz, 27 GHz ve 39 GHz frekanslarında rezonansa girdiği, bant geçiren özellik taşıdığı görülmektedir. Birim hücre için yapılan analiz sonuçlarına göre, orta dış çemberi tanımlayan d_{out} ve w_{out} parametresinin değişimi birinci rezonansın bant genişliğini doğrudan etkilemektedir. Orta iç çemberi tanımlayan d_{in} ve w_{in} parametrelerinin değişimi ise ikinci rezonans frekansını etkilemektedir.



Şekil 4.7 Üç bantlı birim hücrenin yansıma ve iletim katsayıları

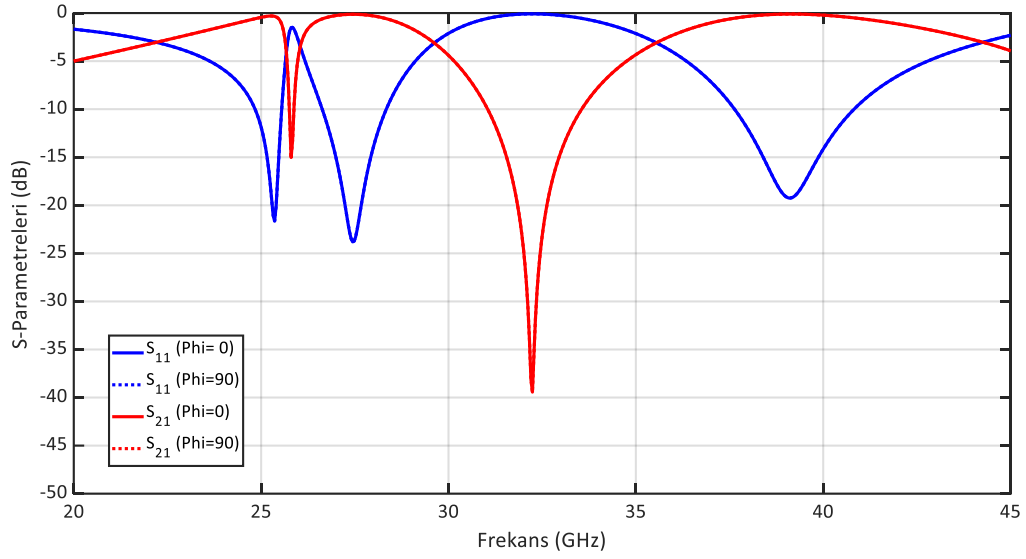
Şekil 4.7 üzerinde gösterilen mavi bölge, birim hücrenin çalışma frekans bantlarını göstermektedir. Üç bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin S-parametrelerinden S_{11} yansıma katsayısına bakıldığında, ilk rezonans için -10 dB’de bant genişliğinin 24,85–25,55GHz olduğu görülmektedir. Bu aralık, 5G iletişim bandı olan 24,75–25,25GHz aralığını kapsamaktadır. İlk rezonans için $-21,78$ dB’ye kadar geri dönüş kaybı gözlenmektedir. İkinci rezonansın -10 dB’de bant genişliği 26,60–28,34GHz’dir. Bu aralık, 5G iletişim bandı olan 27,50–28,35GHz’i kapsamaktadır. İkinci rezonans için $-23,86$ dB’ye kadar geri dönüş kaybı gözlenmektedir. Üçüncü rezonans için bant genişliğinin 37,60–40,83GHz olduğu ve bant genişliğinin -10 dB’de 2,4GHz bant genişliğinden daha büyük (3,19GHz) olduğu görülmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının büyük frekanslarda daha büyük bant genişliği sağlaması 5G uygulamaları için istenilen bir durumdur. Tablo 4.4’te üç bantlı frekans seçici yüzey yapısının frekans yanıtı 5G için hedeflenen bant aralıkları ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 4.4 5G milimetre dalga iletişiminin bant gereksinimleri [30] ve özgün üç bantlı frekans seçici yüzey yapısının frekans yanıtı

Bant No	5G İçin Ayrılan Bant (GHz)	5G İçin Gereklî Bant Genişliği	FSY Bandı (GHz)	FSY Rezonans Frekansı	FSY Bant Genişliği
Bant 1	24,75 – 25,25	500 MHz	24,85–25,55	25 GHz	710 MHz
Bant 2	27,50 – 28,35	850 MHz	26,62–28,34	27 GHz	1,72 GHz
Bant 3	37,60 – 40,00	2400 MHz	37,64–40,83	39 GHz	3,19 GHz

4.2.2.2 Polarizasyon ve Geliş Açısı Kararlılığı

Başlık 4.1.2.2’de anlatılan açıklamalar ve hedefler doğrultusunda tasarlanan üç bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin TE ve TM modunda elde edilen yansıma ve iletim katsayıları Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde birim hücrenin TE ve TM modunda benzer benzetim sonuçlarına sahip olduğu görülmektedir.



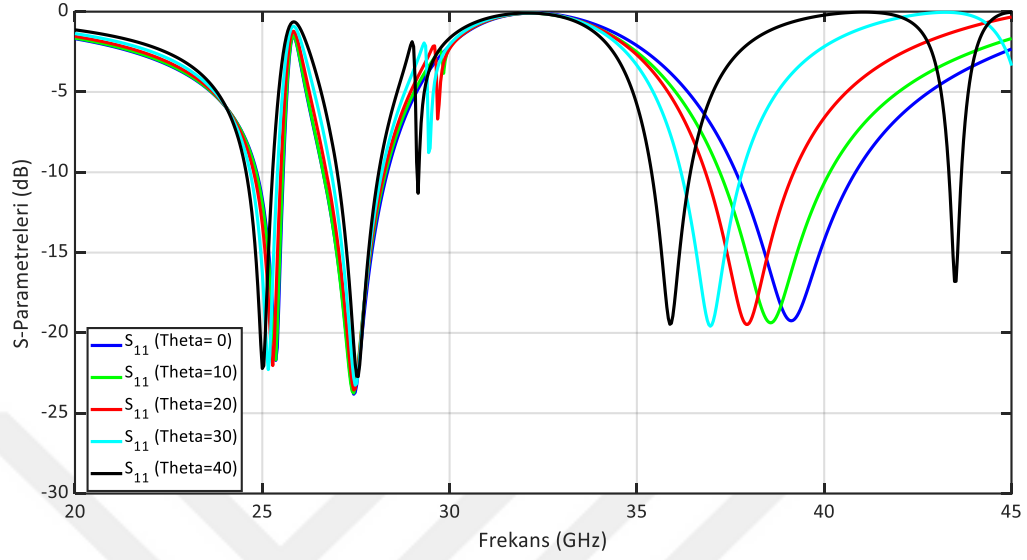
Şekil 4.8 TE ve TM modları yansıma (S_{11}) ve iletim (S_{21}) katsayısı benzetim sonuçları

Tasarlanan üç bantlı birim hücre yapısının CST Microwave Studio programı ile farklı geliş açıları için yapılan benzetim sonucunda elde edilen S_{11} ve S_{21} parametreleri Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Tasarlanan üç bantlı birim hücrenin S_{11} ve S_{21} parametreleri incelendiğinde birinci bantta $\theta = 40^\circ$ ’ye kadar rezonans frekansında düşük kayma gözlenirken daha yüksek geliş açılarında kayma düşük frekanslara doğru artmaktadır. Birinci bantta hedeflenen bant genişliği $\theta = 40^\circ$ geliş açısına kadar korunmuştur. İkinci bantta ise $\theta = 20^\circ$ ’ye kadar rezonans frekansında düşük kayma gözlenirken daha yüksek geliş açılarında kayma düşük frekanslara doğru artmaktadır. Yüksek geliş açılarında bandın daraldığı da gözlenmektedir. Üçüncü bant aralığı için ise $\theta = 30^\circ$ ’ye kadar kararlı olduğu görülmüştür.

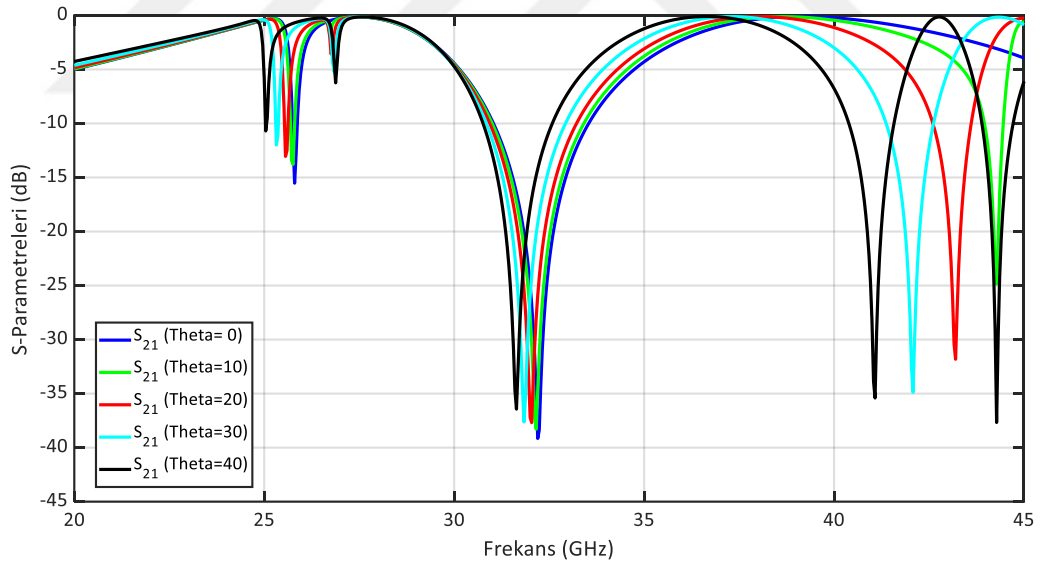
Bu sonuçlar, tasarlanan frekans seçici yüzeyin birinci rezonansı için açısal kararlılığının iyi olduğunu, ikinci ve üçüncü rezonans için 40 derecenin üzerindeki açılar için kabul edilebilir seviyenin dışında olduğunu göstermektedir. Ayrıca büyük geliş açısı değerleri için ikinci rezonansın ve üçüncü rezonansın ardından yeni rezonans bölgelerinin üretildiği de görülmektedir.

Tasarlanan frekans seçici yüzeyin polarizasyon kararlılığına sahip olması ve açısal değişimlerden minimum düzeyde etkilenmesi, yapının olabildiğince orijine göre simetrik yapılardan oluşması nedeniyledir. 5G milimetre dalga uygulamaları için

kullanılmak üzere tasarlanan çoğu frekans seçici yüzeyin sonuçları da bu sonuçlara benzer şekilde açisal kararlılık konusunda belirli bir dereceye kadar benzer durum taşıdığı bilinmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.9 Üç bantlı birim hücrenin açisal kararlılığı (a) Yansima katsayısı; (b) İletim katsayısı

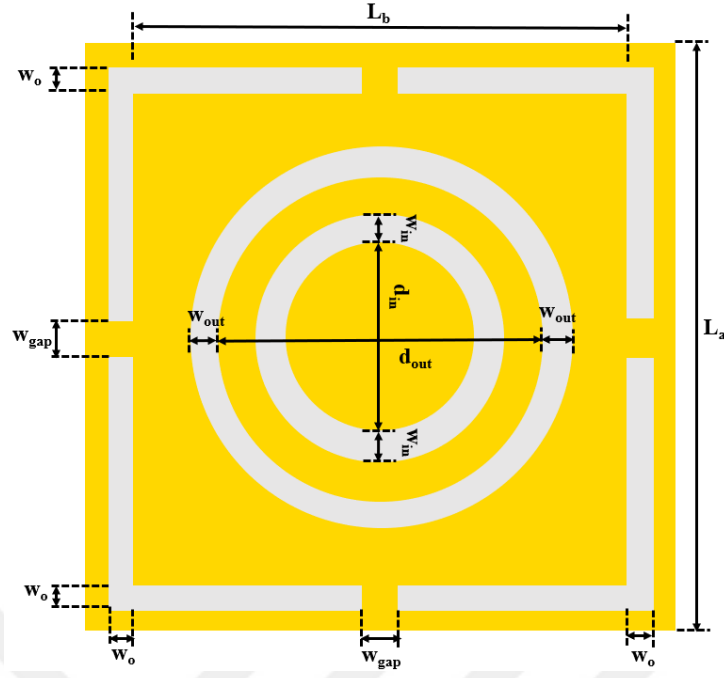
ÜÇ BANTLI MİLİMETRE DALGA FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLERİN YAPAY ZEKÂ ALGORİTMALARI İLE ANALİZİ VE SENTEZİ

5.1 FSY Analiz ve Sentez Kara-Kutu Modelleri

5.1.1 Problem Tanımı

Tez kapsamında 5G uygulamalarına yönelik frekans seçici yüzey (FSY) bant geçiren filtre tasarlanmış olup, tasarlanan filtrenin yansıma ve iletim katsayısı parametrelerine bağlı olarak istenilen frekans aralığında düşük yansımaya ve yüksek geçirgen özelliğe sahip olması hedeflenmektedir.

Üç bantlı birim hücre analizinde 5G uygulamaları için tahsis edilen 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz, 27,50 – 28,35 GHz bandında 850 MHz ve 37,60 – 40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir. Bu frekans bantlarında çalışan birim hücrenin boyutsal parametreleri sırasıyla L_a , L_b , d_{in} , d_{out} , w_{gap} , w_o , w_{in} , w_{out} olarak belirlenmiştir. Bu parametreler Şekil 5.1’de verilen birim hücre yapısı üzerinde açıkça gösterilmektedir. Rezonans frekanslarının oluşmasında fiziksel boyutların etkisi vardır. Üç bantlı FSY yapısında birinci rezonans karesel yarıklı halkanın boyutları ile, ikinci rezonans ortadaki halka yarığın boyutları ile, üçüncü rezonans ise en içerideki halka yarığın boyutları ile ilişkilidir. Buna karşın yarık yapılarının birbiri üzerinde oluşturduğu kuplaj etkisi de mevcuttur. Bu sebeple rezonans frekansının fonksiyonu olarak boyutların belirlenmesi nonlineer bir problemdir.

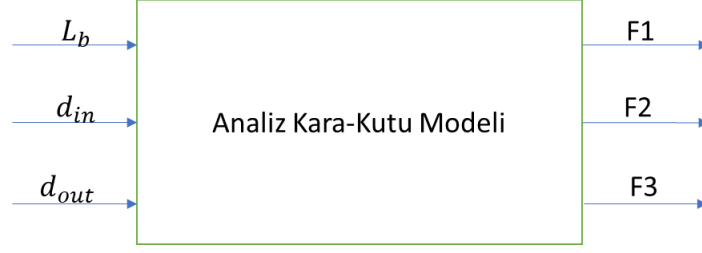


Şekil 5.1 Üç bantlı birim hücre yapısı

5.1.1.1 Analiz Kara-Kutu Modeli

Üç bantlı birim hücrenin boyut parametreleri ile 5G standartlarında üç farklı bant frekansı arasındaki ilişki, YSA (yapay sinir ağı) yapılarının oluşturulan veri kümesi ile eğitilmesi ve kullanılan ağ yapılarının genelleştirme yeteneği kazanması sağlanmıştır. Analiz işlemi için ağa eğitime işlemi sırasında sunulmayan verilerden fiziksel parametreler giriş olarak verilmiş ve ağ çıkışında eğitim sonucunda elde edilen saklı katman ağırlık değerleri kullanılarak ilgili frekans değerleri elde edilmiştir.

Bu modelde giriş olarak d_{in} , d_{out} ve L_b parametreleri seçilmiştir. Bu parametrelerin $F1$, $F2$, $F3$ frekans değerleri ile arasında matematiksel lineer bir bağıntı bulunmamaktadır. Bu sebeple bu problemin çözümünde kara kutu modeli olarak YSA modelleri Şekil 5.2’de gösterilen giriş ve çıkışlara sahip olacak şekilde kullanılmıştır.

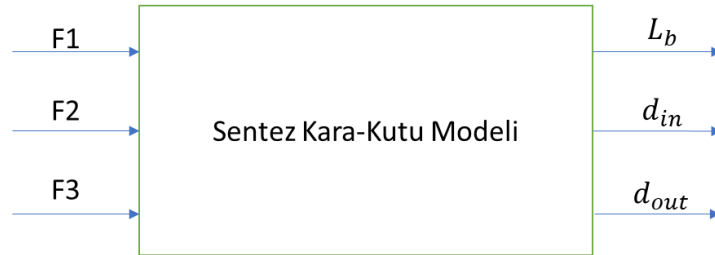


Şekil 5.2 Analiz için kullanılan YSA modeli giriş ve çıkışları

5.1.1.2 Sentez Kara-Kutu Modeli

Sentez çalışması kapsamında tasarlanan YSA modeli 5G standartlarındaki bant frekansları ile üç bantlı birim hücrenin boyut parametreleri arasındaki ilişkiyi, oluşturulan veri tabanı ile öğrenmiştir. Bu çalışmada veri tabanının girişleri $F1$, $F2$ ve $F3$ bant frekansları, çıkışları ise d_{in} , d_{out} ve L_b boyut parametreleri şeklinde düzenlenmiştir. Eğitim sonrasında, sentez işlemi için ağa daha önce sunulmayan verilerden bant frekansları giriş olarak verilmiş ve ağ çıkışında eğitim sonucunda elde edilen saklı katman ağırlık değerleri kullanılarak ilgili boyut parametreleri elde edilmiştir.

Analiz kara kutu modeli açıklanırken anlatıldığı üzere boyut parametreleri ile bant frekansları arasında matematiksel lineer bir bağıntı bulunmadığı için bu problemin çözümünde kara kutu modeli olarak YSA modelleri Şekil 5.3'te gösterilen giriş ve çıkışlara sahip olacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 5.3 Sentez için kullanılan YSA modeli giriş ve çıkışları

5.1.2 Veri Yapısı

Bu kısımda veri kümesinin içeriği, ağa uygulanmadan önce kullanılan normalizasyon tekniği ve 5-katlamalı çapraz doğrulama işlemi için verinin nasıl bölündüğü anlatılmaktadır.

5.1.2.1 Veri Kümesi

Frekans seçici yüzeyin boyut parametreleri arasında yer alan d_{in} , d_{out} ve L_b değerlerine, fiziksel imkanların sağlandığı minimum değerlerden maksimum değerlere kadar oransal artım ile karma kombinasyonlar atanarak CST Studio ile benzetimleri yapılmış, benzetimler sonucu her bir farklı boyut parametre kombinasyonu için $F1$, $F2$ ve $F3$ değerleri elde edilmiştir. Bu benzetimler sonucunda 1000 adet veriden oluşan veri kümesi elde edilmiştir.

Boyut parametrelerinin minimum değerleri belirlenirken başlangıçta en küçük değer olan d_{in} 'den yola çıkılarak d_{out} ve L_b parametrelerine değer ataması yapılmıştır. Örneğin; $d_{in} = 0,50$ olduğunda d_{out} en az 1,50 ve en fazla 3,50 olacak şekilde, L_b parametresi ise en az 2,50 ve en fazla 4,70 olacak şekilde değerler atanmıştır. Devam eden aşamalarda ise d_{out} ve L_b parametrelerinden yola çıkılarak benzer işlemler yürütülmüştür. Ayrıca YSA'nın problemi öğrenebilmesi ve eğitiminin başarılı olabilmesi için değerlerin artırımını sabit tutulmamıştır. Bu sebeple oluşturulan kombinasyonlarda 0,10, 0,11, 0,21, 0,27 vb. farklı değerlerde artırım yapılmıştır.

Analiz işlemi için ilk üç sütunda milimetre cinsinden üç bantlı birim hücrenin boyut parametreleri değerleri, son üç sütunda ise ilgili satırdaki boyut değerlerine karşılık gelen ve CST benzetimleri sonucunda elde edilen $F1$, $F2$, $F3$ bant frekansları verilmiştir. Sentez işlemi için veri kümesi yeniden düzenlenerek ilk üç sütunda bant frekansları, son üç sütunda ise ilgili boyut parametreleri verilmiştir.

5.1.2.2 Normalizasyon Tekniği

Eğitim aşamasında YSA algoritmalarının saklı katmanlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları dikkate alınarak kullanılan veri normalize edilmiştir. Minimum-maksimum (Min-Max) normalizasyon yönteminde veriler doğrusal olarak normalize edilmektedir. Bir veriyi Min-Max yöntemiyle 0 ila 1 aralığına indirmek için Eşitlik 5.1 kullanılmaktadır.

$$X' = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5.1)$$

Burada X' normalize edilmiş veriyi, X_i normalize edilecek veriyi, X_{min} veri kümesi içerisinde yer alan en küçük değeri, X_{max} ise veri kümesi içerisinde yer alan en büyük değeri ifade etmektedir.

5.1.2.3 K-Katlamalı Çapraz Doğrulama

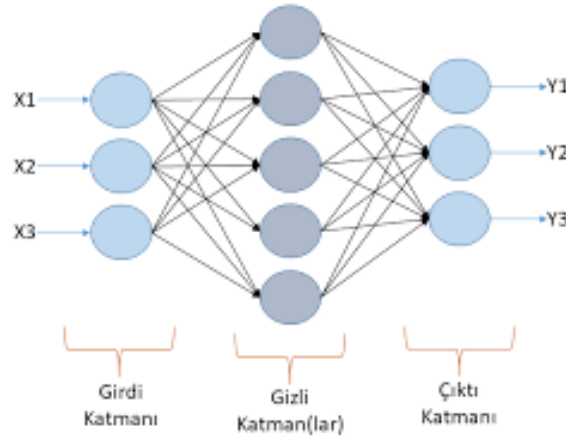
K-katlamalı çapraz doğrulama, makine öğrenme modellerinin performans değerlendirmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde veri seti, *Toplam Veri Sayısı/K* adet veri içerecek şekilde K adet alt kümelere bölünür. Her aşamada $K - 1$ adet alt küme eğitim işlemi için, 1 adet alt küme ise test işlemi için kullanılıp başarı değeri hesaplanmaktadır. Bu işlem K kere uygulanarak her seferinde farklı alt kümeler ile eğitim ve test için başarı değerleri elde edilmektedir. İşlemler tamamlandıktan sonra bu sonuçların aritmetik ortalaması alınmaktadır.

Tez kapsamında yapılan çalışmada 5-katlamalı çapraz doğrulama yapılmıştır. 1000 adet veri, her biri 200 veriden oluşan 5 alt kümeye ayrılmıştır. Her aşamada farklı 800 veri eğitim için, geriye kalan 200 veri ise test için kullanılmıştır.

5.2 FSY Analiz ve Sentezi için Kullanılacak Yapay Sinir Ağı Modelleri

5.2.1 Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP)

Rumelhart, Hinton ve Williams tarafından 1976 yılında geliştirilen çok katmanlı algılayıcı (Multi-Layer Perceptron–MLP) ağ yapısı doğrusal olmayan problemlerin çözümünü kolaylaştırmıştır. MLP, ağın beklenen çıktısı ile ağın ürettiği çıktı arasındaki farkı minimize edecek şekilde eğitilen, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi bir veya birden fazla gizli katmanı olan ileri beslemeli sinir ağlarıdır [40].



Şekil 5.4 MLP Ağı Yapısı

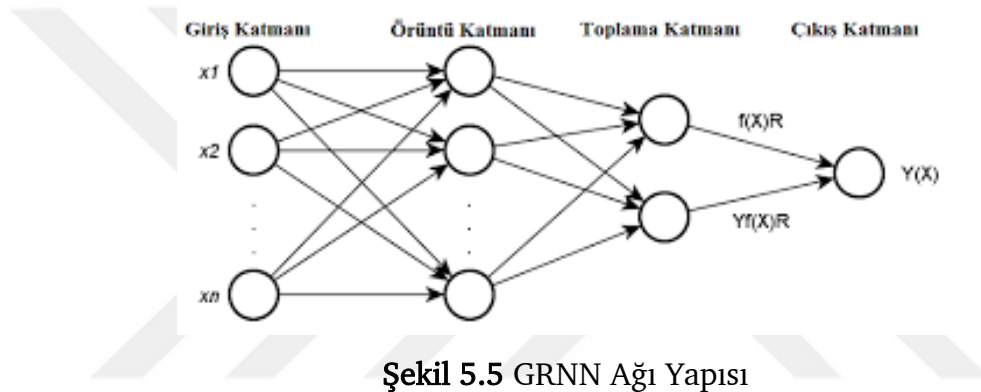
Giriş katmanındaki nöronların sayısı giriş verisinin boyutu kadardır. Giriş katmanından uygulanan veri ara bağlantı ağırlıkları ile çarpılarak her bir gizli katmanda aktivasyon fonksiyonundan geçirilmektedir. Aktivasyon fonksiyonu önceki katmandaki tüm girdilerin ağırlıklı toplamını alan ve daha sonra bir çıkış değeri (tipik olarak doğrusal olmayan) üreten ve bir sonraki katmana geçiren bir fonksiyondur. Ağ yapısındaki nonlineerlik sigmoid, tanjant hiperbolik ve softmax gibi aktivasyon fonksiyonlarının ve varsa bias değerlerinin uygulanması ile elde edilmektedir. Saklı katman çıkışları da saklı katman ağırlık değerleri ile çarpılarak her bir çıkış nöronuna iletilmektedir. Çıkış nöronlarının sayısı da çıkış verisinin boyutu kadar olacaktır. Saklı katmandaki nöron sayısı tipik olarak giriş katmanı ve çıkış katmanındaki nöron sayısından fazla seçilmelidir [40].

5.2.2 Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağları (GRNN)

Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağları (General Regression Neural Network–GRNN) Donald Specht tarafından 1991 yılında geliştirilmiş, sürekli değişkenlerin kestirimine olanak tanıyan ve temel regresyon yüzeyine yakınsayan hafıza tabanlı bir ağ yapısıdır. Tek adımda öğrenmeye dayalı bir algoritmaya sahip olmasından dolayı, iteratif yöntemle öğrenen ağ yapılarından çok daha hızlıdır. Ağda depolanan örnek sayısı arttıkça, optimum regresyon yüzeyine yakınsamakta ve kestirim hatası sifıra yaklaşmaktadır [41].

Şekil 5.5’te verildiği gibi giriş katmanı nöronları, medyan çıkarılarak ve çeyrekler arası aralığın bölünmesiyle değerleri normalleştirme ve bunları bir sonraki

katmana iletme görevini üstlenmektedir. Eğitim veri setinde her gözlem vakası için bir nöron vardır. Gizli katman nöronları, hedef değerlerin yanı sıra gözlem vakalarına ait öngörü değişkenlerinin değerlerini de tutmaktadır. Bu katmandaki nöronlar, test vakalarının merkezlerine olan Öklid uzaklıklarını hesaplamaktadır. Toplama katmanında pay ve payda birimleri olarak adlandırılan iki nöron vardır. Payda birimi, ağırlık değerlerini toplayarak tüm gizli katman nöronlarının katkılarını birleştirmektedir. Diğer ise ağırlık değerlerini hedef değerleriyle çarparak tüm gizli katman nöronlarının genel katkısını hesaplamaktadır. Son olarak çıkış katmanı basitçe pay biriminde biriktirilen değeri paydaya bölerek tahmin sonucunu üretmektedir [41].

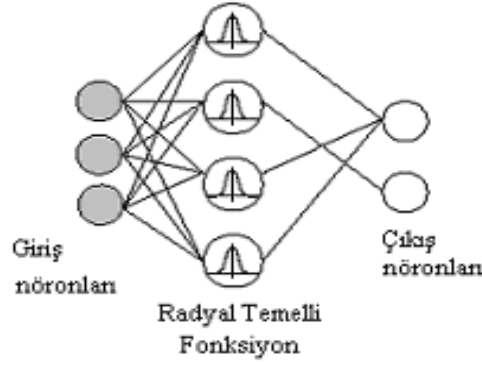


Şekil 5.5 GRNN Ağı Yapısı

5.2.3 Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF)

Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function–RBF), biyolojik sinir hücrelerinde görülen etki-tepki davranışlarından esinlenilerek Broomhead ve Lowe tarafından 1988 yılında geliştirilmiştir. RBF modellerinin eğitimini çok boyutlu uzayda eğri uydurma yaklaşımı olarak düşünülebilir [40].

RBF mimarisi, Şekil 5.6’da gösterildiği üzere genel YSA mimarisine benzer şekilde giriş katmanı, gizli katmanı ve çıktı katmanı olmak üzere 3 katman halinde tanımlanmaktadır. Ancak, klasik YSA yapılarından farklı olarak RBF yapısında, girdi katmanından gizli katmanına geçişte radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonları ve doğrusal olmayan bir kümeleme (cluster) analizi kullanılmaktadır. Gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki yapı ise diğer YSA yapılarında olduğu gibi işleyişini sürdürmekte olup asıl eğitim burada gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.6 RBF Ağı Yapısı

Radyal tabanlı fonksiyonların teorisi çok değişkenli fonksiyonların enterpolasyonuna dayanmaktadır. Burada amaç $(X^i, Y^i)_{i=1}^N$ ifadelerinin enterpolasyonunu yapmaktır. Bu denklemde F lineer uzayda (doğrusal) bir fonksiyon olduğundan radyal tabanlı fonksiyonlar yaklaşımında F enterpolasyon fonksiyonu temel bazı fonksiyonların lineer bir kombinasyonudur [40].

5.3 Yapay Sinir Ağı Algoritmaları ile Performans Değerlendirilmesi

5.3.1 Performans Ölçütleri

FSY analiz ve sentez işlemleri için tasarlanan YSA modellerinin öngördüğü tahmin değerleri ile gerçek değerlerin arasındaki hata değerini hesaplamak için tanımlı ölçütlerden Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE), Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error-MSE) ve Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (Root Mean Square Error-RMSE) kullanılacaktır. Tüm ağ yapıları için hedef hata değeri 1×10^{-5} olarak tanımlanmıştır.

$$MAE = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |G_{ij} - T_{ij}| \quad (5.2)$$

$$MSE = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (G_{ij} - T_{ij})^2 \quad (5.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (G_{ij} - T_{ij})^2 \right)} \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.2, 5.3 ve 5.4'te N ifadesi toplam veri sayısını, T_i ifadesi i nci veri için tahmin edilen değeri ve G_i ifadesi i nci veri için gerçek değeri göstermektedir. M

ifadesi, çıkış nöronlarının sayısına eşittir. Eğitim ve test hatası hesaplanırken N ifadesinin değeri sırasıyla 800 ve 200 olarak alınmıştır.

5.3.2 Yapay Sinir Ağı Algoritmalarının Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Tez kapsamında FSY analiz ve sentez işlemleri için kullanılan MLP, GRNN ve RBF ağları için farklı tasarım parametreleri denenmiş ve elde edilen performans değerlerine göre en iyi sonuçların elde edildiği parametre değerleri belirlenmiştir. Analiz ve sentez işlemlerinin her ikisi için de üç adet giriş nöronu ve üç adet çıkış nöronu kullanılmıştır.

5.3.2.1 Kullanılan MLP Yapısı

MLP ağ yapısı MATLAB ortamında derin öğrenme kütüphanesi ve “newff” algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. Öğrenme katsayısı 0,1 olarak alınmıştır. 12 nörona sahip tek gizli katman yapısı tercih edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak gizli katman için “tanjant sigmoid” ve çıkış katmanı için “purelin” kullanılmıştır. Ağın eğitimi ve ağırlıkların güncellenmesi için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma doğrusal olmayan bir fonksiyonun minimize edilmesi için kararlı ve hızlı bir çözüm sağlamaktadır. İterasyon sayısı 300 olarak belirlenmiştir.

5.3.2.2 Kullanılan GRNN Yapısı

GRNN ağ yapısı MATLAB ortamında derin öğrenme kütüphanesi ve “newgrnn” algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. GRNN radyal tabanlı ağ yapısı olduğundan Öklid uzaklığının hesaplanması için sigma değerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada farklı sigma değerleri atanarak denemeler yapılmış ve en başarılı sonuçlar $\sigma=0,01$ olarak seçildiğinde elde edilmiştir.

5.3.2.3 Kullanılan RBF Yapısı

RBF ağ yapısı MATLAB ortamında derin öğrenme kütüphanesi ve “newrb” algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. Saklı katmanda, Bayes Regulation (trainbr) fonksiyonu kullanılmıştır. Öğrenme oranı 0,1 ve sigma değeri 0,8 olarak seçilmiştir. İterasyon sayısı 400 olarak belirlenmiştir. Gizli katmanda kullanılan nöron sayısı 15 olarak seçilmiştir.

5.3.3 Yapay Sinir Ağları ile FSY Analiz ve Sentez Performansları

Bu kısımda, FSY analiz ve sentez işlemleri için verilen performans ölçütlerini sağlayacak şekilde Başlık 5.3.2’de belirlenen MLP, GRNN ve RBF ağlarının tasarım parametreleri ile elde edilen sonuçlar sunulmuş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Hem analiz hem de sentez işlemleri için veri tabanı 5 eşit alt kümeye bölünmüş ve 5-katlamalı çapraz doğrulama yapılmıştır. Böylece her katlama için 200 adet veri içeren 5 alt kümenin 4’ü eğitim için, geri kalan alt küme ise test için kullanılmıştır. Bu işlem $K = 5$ kere tekrarlanmış ve her tekrarda ağa farklı eğitim ve test kümeleri sunulularak başarının aritmetik ortalaması alınmıştır.

5.3.3.1 YSA Tabanlı FSY Analiz Sonuçları

Analiz işlemi için oluşturan veri tabanında toplam 1000 veri bulunmakta olup giriş verileri milimetre cinsinden üç bantlı birim hücrenin boyut parametreleri (d_{in} , d_{out} ve L_b), çıkışlar ise ilgili satırdaki boyut değerlerindeki FSY birim hücrenin CST benzetimleri sonucunda elde edilen GHz cinsinden $F1$, $F2$, $F3$ bant frekanslarıdır. Veriye normalizasyon işlemi uygulandıktan sonra YSA modellerine girdi olarak sunulmuş ve ağın öngördüğü çıkış ile hedef çıkış da normalize değerler üzerinden incelenmiştir. Tüm ağ yapılarında her katlama için performans değerleri, aritmetik ortalama sonuçları verilmiştir. Her ağ yapısına test işlemi sırasında eğitim işleminde tanıtılmamış boyut parametreleri giriş olarak sunulmuş ve bu boyutlara karşılık gelen bant frekanslarının değerleri ağ çıkışında elde edilmiştir.

- **MLP Tabanlı FSY Analizi**

MLP ağ yapısında ağırlık değerleri rastgele başlatıldığı için algoritmanın başarısını değerlendirmek üzere ağ üç defa koşturulmuştur. Her koşturma (run) için sonuçlar elde edilmiştir. Her koşturmada ağın eğitim ve test için performans ölçütleri üç farklı hata kriteri olarak elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz doğrulama işleminde her katlama için bu işlemler yapılmış ve ortalama değerler tablolarda en son sütunda sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde performans ölçütleri bakımından her koşturma için hem eğitim hem de test işlemlerinde en düşük ortalama hata değerinin MSE ile elde edildiği görülmüştür. Eğitim hataları her koşturma için ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer olarak

birinci koşturmada $RMSE = 0,0143$ olarak sonuçlanmıştır. Test hataları her koşturma için ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer olarak birinci koşturmada $RMSE = 0,0156$ sonucuna ulaşılmıştır. Birinci koşturmada 5-katlamalı çapraz değerlendirme sonucunda eğitim işlemi için ortalama $MSE = 0,000197$, $RMSE = 0,0143$, $MAE = 0,006$ değerleri sonuçlanmış olup test işlemi için ise ortalama $MSE = 0,000285$, $RMSE = 0,0156$, $MAE = 0,0065$ değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ikinci ve üçüncü koşturmada elde edilen hata değerlerinin birinci koşturmada elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Her katlama ve her koşturma için elde edilen değerlerin ortalaması alındığında eğitim işlemi için $MSE = 0,000173$, $RMSE = 0,0133$, $MAE = 0,00563$ olarak sonuçlanmış olup test işlemi için $MSE = 0,000335$, $RMSE = 0,0144$, $MAE = 0,0061$ değerleri elde edilmiştir. Ayrıca başarımlar oranları belirlenirken MAE , MSE ve $RMSE$ için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. FSY analizi için MLP performans sonuçları, sırasıyla hata değerleri ve başarımlar oranları Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de sunulmuştur.

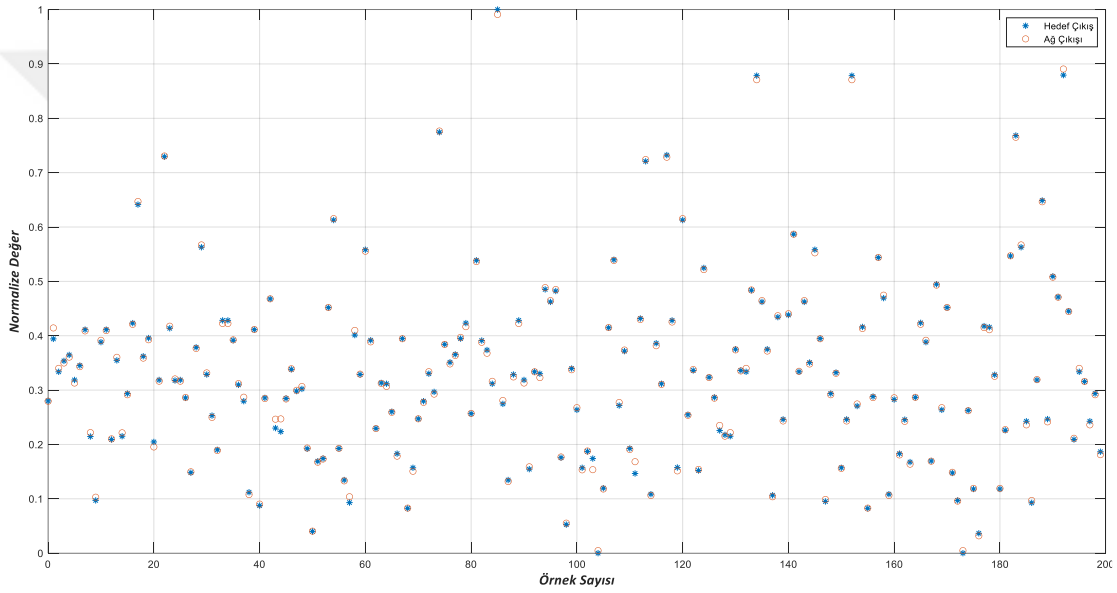
Tablo 5.1 FSY Analizi için MLP Performans Sonuçları-Hata Değerleri

		1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
RUN1	MLP Eğitim Hata Değeri	MSE : 2.258e-04 RMSE : 0.0150 MAE : 0.0061	MSE : 1.800e-04 RMSE : 0.0134 MAE : 0.0058	MSE : 1.826e-04 RMSE : 0.0135 MAE : 0.0056	MSE : 1.298e-04 RMSE : 0.0135 MAE : 0.0056	MSE : 2.665e-04 RMSE : 0.0163 MAE : 0.0070	MSE : 1.968e-04 RMSE : 0.0143 MAE : 0.0060
	MLP Test Hata Değeri	MSE : 6.459e-04 RMSE : 0.0254 MAE : 0.0084	MSE : 2.269e-04 RMSE : 0.0151 MAE : 0.0059	MSE : 8.403e-05 RMSE : 0.0092 MAE : 0.0050	MSE : 1.824e-04 RMSE : 0.0114 MAE : 0.0059	MSE : 2.878e-04 RMSE : 0.0170 MAE : 0.0074	MSE : 2.854e-04 RMSE : 0.0156 MAE : 0.0065
RUN2	MLP Eğitim Hata Değeri	MSE : 2.177e-04 RMSE : 0.0147 MAE : 0.0061	MSE : 1.558e-04 RMSE : 0.0125 MAE : 0.0053	MSE : 1.589e-04 RMSE : 0.0126 MAE : 0.0056	MSE : 1.741e-04 RMSE : 0.0132 MAE : 0.0055	MSE : 1.698e-04 RMSE : 0.0130 MAE : 0.0055	MSE : 1.754e-04 RMSE : 0.0132 MAE : 0.0056
	MLP Test Hata Değeri	MSE : 6.218e-04 RMSE : 0.0249 MAE : 0.0085	MSE : 2.235e-04 RMSE : 0.0150 MAE : 0.0055	MSE : 8.363e-05 RMSE : 0.0091 MAE : 0.0054	MSE : 6.620 e-04 RMSE : 0.0081 MAE : 0.0054	MSE : 2.051e-04 RMSE : 0.0143 MAE : 0.0061	MSE : 5.098e-04 RMSE : 0.0142 MAE : 0.00618
RUN3	MLP Eğitim Hata Değeri	MSE : 1.167e-04 RMSE : 0.0108 MAE : 0.0045	MSE : 1.347e-04 RMSE : 0.0116 MAE : 0.0051	MSE : 1.932e-04 RMSE : 0.0139 MAE : 0.0057	MSE : 1.326e-04 RMSE : 0.014 MAE : 0.0060	MSE : 1.582e-04 RMSE : 0.0126 MAE : 0.0051	MSE : 1.471e-04 RMSE : 0.0126 MAE : 0.0053
	MLP Test Hata Değeri	MSE : 4.223e-04 RMSE : 0.0205 MAE : 0.0066	MSE : 1.903e-04 RMSE : 0.0138 MAE : 0.0051	MSE : 8.416e-05 RMSE : 0.0092 MAE : 0.0051	MSE : 1.965e-04 RMSE : 0.0115 MAE : 0.0059	MSE : 1.544e-04 RMSE : 0.0124 MAE : 0.0052	MSE : 2.095e-04 RMSE : 0.0135 MAE : 0.0056
	ORTALAMA						MSE_TRAIN : 1.73e-04 MSE_TEST : 3.35e-04 RMSE_TRAIN : 0.0133 RMSE_TEST : 0.0144 MAE_TRAIN : 0.00563 MAE_TEST : 0.0061

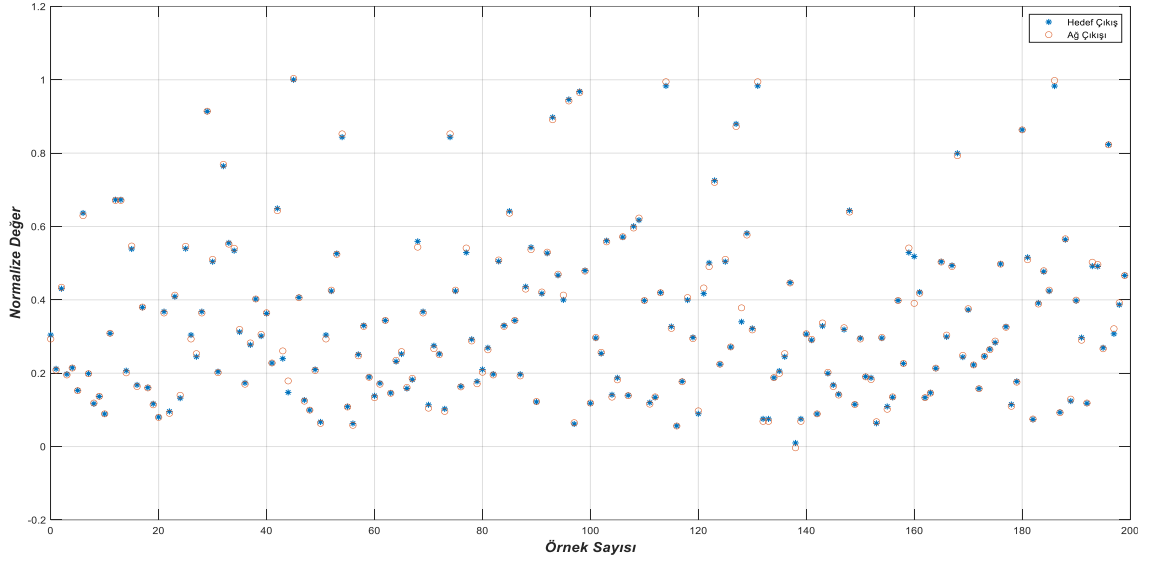
Tablo 5.2 FSY Analizi için MLP Performans Sonuçları-Başarım Oranları

	1. Katlama	2. Katlama	3. Katlama	4. Katlama	5. Katlama	Ortalama
MLP Eğitim Başarım Oranı	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9855 MAE : %95.1917	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9713 MAE : %94.7609	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9998 MAE : %99.9434	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9866 MAE : %97.9892	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9998 MAE : %95.2373	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9886 MAE : %96.6245
MLP Test Başarım Oranı	MSE : %99.0389 RMSE : %90.1962 MAE : %97.8979	MSE : %99.1615 RMSE : %90.8431 MAE : %98.0771	MSE : %99.5662 RMSE : %93.4135 MAE : %98.0483	MSE : % 99.3510 RMSE : % 91.9441 MAE : %97.4924	MSE : %99.0720 RMSE : %90.3665 MAE : %97.4325	MSE : % 99.2379 RMSE : % 91.3526 MAE : %97.7896

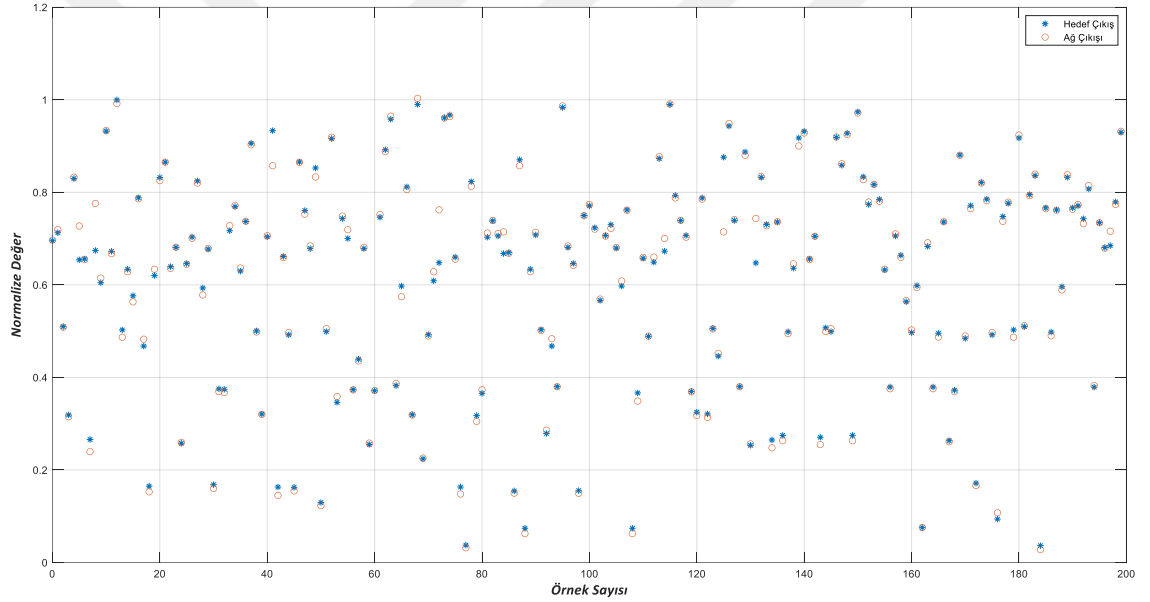
MLP ağ yapısı ile yapılan test işlemleri için her katlamada ağa 200 örnek sunulmuş ve girişler olarak tanımlanan boyut parametrelerine karşılık ağ çıkışında frekans değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da x eksenini örnek sayısını y eksenini ise ilgili frekansın normalize değerini göstermektedir.



Şekil 5.7 MLP ağ yapısı ile yapılan test birinci katlama için birinci frekans hedef değerleri ve birinci frekans ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.8 MLP ağ yapısı ile yapılan test üçüncü katlama için ikinci frekans hedef değerleri ve ikinci frekans ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.9 MLP ağ yapısı ile yapılan test beşinci katlama için üçüncü frekans hedef değerleri ve üçüncü frekans ağ çıkışı değerleri

• GRNN Tabanlı FSY Analizi

GRNN ağ yapısında örüntü katmanı sayesinde tek iterasyonda öğrenme işlemi gerçekleştirildiği için algoritmanın başarısı, ağ tek sefer koşturularak değerlendirilmiştir. Ağı eğitim ve test için performans ölçütleri üç farklı hata kriteri olarak elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz doğrulama işleminde her katlama için bu işlemler yapılmış ve ortalama değerler tablolarda en son sütunda sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde performans ölçütleri bakımından hem eğitim hem de test işlemlerinde en düşük ortalama hata değeri *MSE* ile elde

edildiği görülmüştür. Eğitim hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer olarak $RMSE = 0,0041$ elde edilmiştir. Test hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde ise en yüksek değer olarak $RMSE = 0,0121$ elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz değerlendirme sonucunda eğitim işlemi için ortalama $MSE = 0,000017$, $RMSE = 0,0041$, $MAE = 0,000184$ olarak sonuçlanmış olup 5-katlamalı çapraz değerlendirme sonucunda test işlemi için ortalama $MSE = 0,000143$, $RMSE = 0,0121$, $MAE = 0,00318$ değerleri elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken MAE , MSE ve $RMSE$ için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. FSY analizi için GRNN performans sonuçları, sırasıyla hata değerleri ve başarım oranları Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te sunulmuştur.

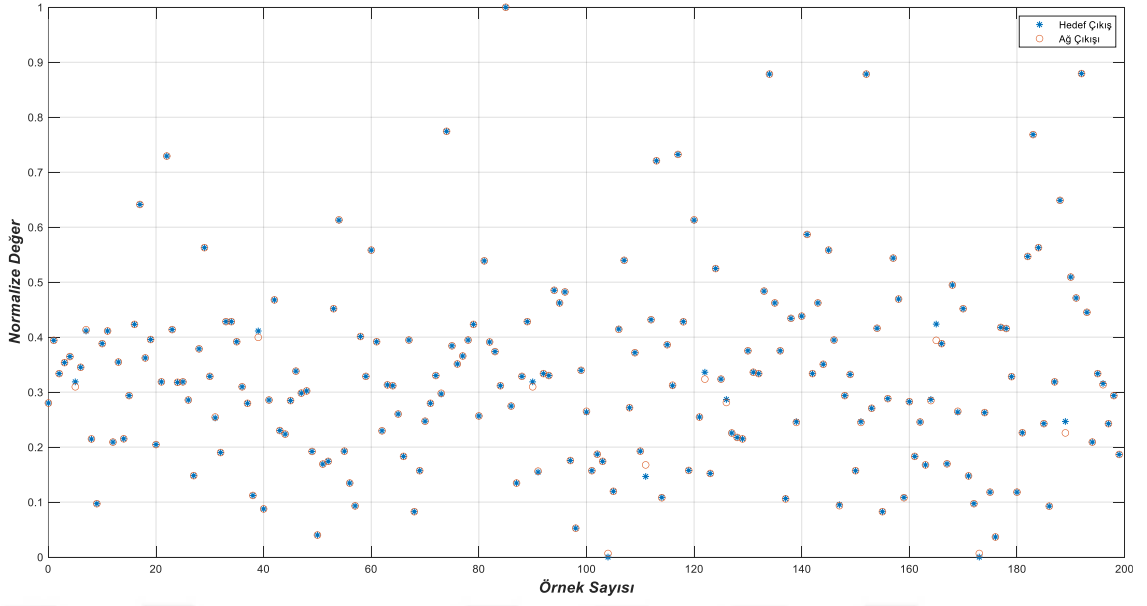
Tablo 5.3 FSY Analizi için GRNN Performans Sonuçları-Hata Değerleri

	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
GRNN Eğitim Hata Değeri	MSE : 1.807e-05 RMSE : 0.0043 MAE : 1.9102e-04	MSE : 1.808e-05 RMSE : 0.0043 MAE : 2.0234e-04	MSE : 1.356e-05 RMSE : 0.0037 MAE : 1.5274e-04	MSE : 2.169e-05 RMSE : 0.0047 MAE : 2.340e-04	MSE : 1.206e-05 RMSE : 0.0035 MAE : 1.402e-04	MSE : 1.669e-05 RMSE : 0.0041 MAE : 1.84e-04
GRNN Test Hata Değeri	MSE : 1.462e-04 RMSE : 0.0121 MAE : 0.0019	MSE : 2.719e-04 RMSE : 0.0165 MAE : 0.0045	MSE : 1.434e-04 RMSE : 0.0120 MAE : 0.0045	MSE : 1.459e-04 RMSE : 0.0121 MAE : 0.0036	MSE : 6.095e-05 RMSE : 0.0078 MAE : 0.0014	MSE : 1.426e-04 RMSE : 0.0121 MAE : 0.00318

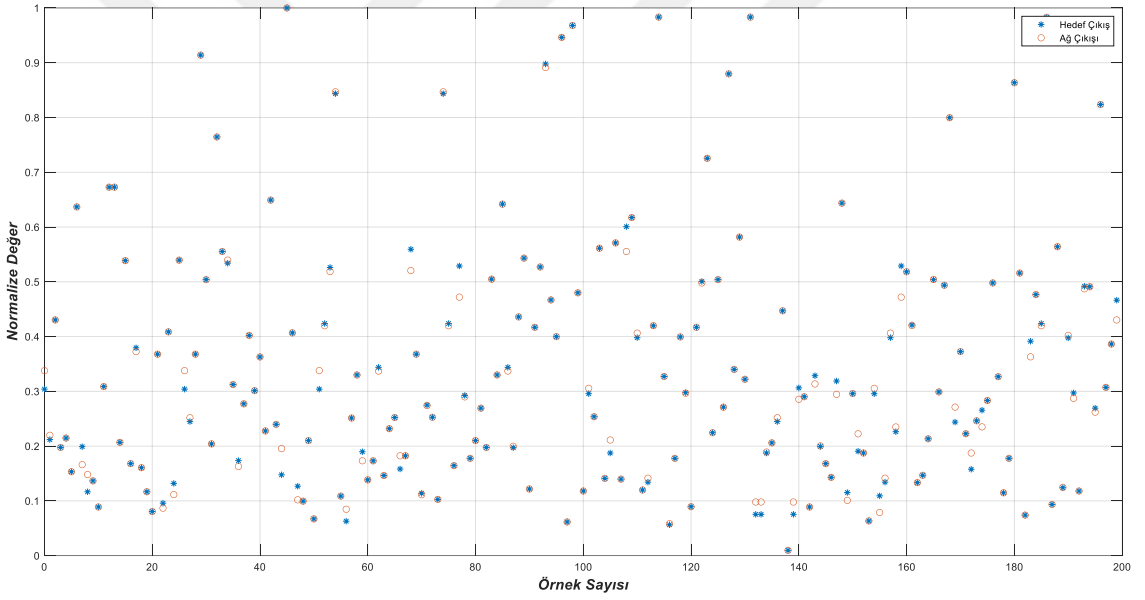
Tablo 5.4 FSY Analizi için GRNN Performans Sonuçları-Başarım Oranları

	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
GRNN Eğitim Başarım Oranı	MSE : %99.9968 RMSE : %99.4315 MAE : %99.9706	MSE : %99.9968 RMSE : %99.4303 MAE : %99.9674	MSE : %99.9972 RMSE : %99.4749 MAE : %99.9750	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %99.9644	MSE : %99.9976 RMSE : %99.5147 MAE : %99.9770	MSE : %99.9976 RMSE : %99.5702 MAE : %99.9708
GRNN Test Başarım Oranı	MSE : %99.9370 RMSE : %97.4898 MAE : %99.5265	MSE : %99.7333 RMSE : %94.8355 MAE : %98.5458	MSE : %99.3330 RMSE : %91.8331 MAE : %98.2078	MSE : %99.6443 RMSE : %94.0356 MAE : %98.3523	MSE : %99.7468 RMSE : %94.9685 MAE : %99.0523	MSE : %99.6788 RMSE : %94.6325 MAE : %98.7369

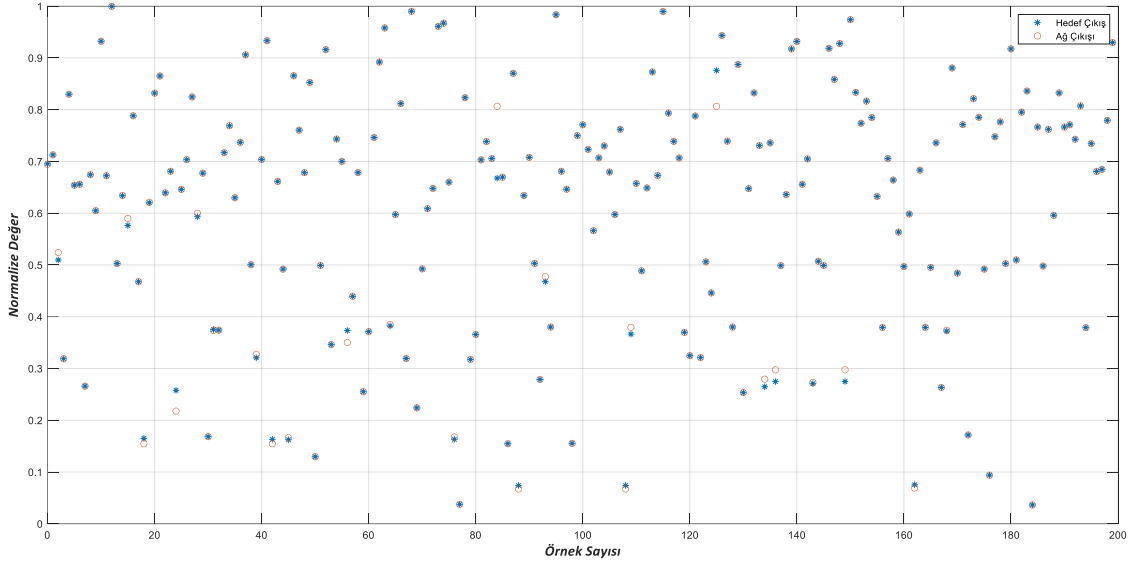
GRNN ağ yapısı ile yapılan test işlemleri için her katlamada ağa 200 örnek sunulmuş ve girişler olarak tanımlanan boyut parametrelerine karşılık ağ çıkışında frekans değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de x eksenini örnek sayısını, y eksenini ise ilgili frekansın normalize değerini göstermektedir.



Şekil 5.10 GRNN ağ yapısı ile yapılan test birinci katlama için birinci frekans hedef değerleri ve birinci frekans ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.11 GRNN ağ yapısı ile yapılan test üçüncü katlama için ikinci frekans hedef değerleri ve ikinci frekans ağ çıkışı değerleri



şekil 5.12 GRNN ağ yapısı ile yapılan test beşinci katlama için üçüncü frekans hedef değerleri ve üçüncü frekans ağ çıkışı değerleri

- **RBF Tabanlı FSY Analizi**

RBF ağ yapısında, algoritmanın başarısı ağ tek sefer 400 iterasyon için koşturularak değerlendirilmiştir. Ağın eğitim ve test için performans     tleri üç farklı hata kriteri olarak elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz doğrulama işleminde her katlama için bu işlemler yapılmış ve ortalama değerler tablolarda en son sütunda sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde performans     tleri bakımından hem eğitim hem de test işlemlerinde en düşük ortalama hata değer MSE ile elde edildiği g r lm ştir. Eğitim hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer olarak $RMSE = 0,0175$ elde edilmiştir. Test hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde ise en yüksek değer olarak $RMSE = 0,0187$ elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz değerleme sonucunda eğitim işlemi için ortalama $MSE = 0,000308$, $RMSE = 0,0175$, $MAE = 0,00742$ olarak sonuçlanmış olup 5-katlamalı çapraz değerleme sonucunda test işlemi için ortalama $MSE = 0,000366$, $RMSE = 0,0187$, $MAE = 0,00794$ değerleri elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken MAE , MSE ve $RMSE$ için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. FSY analizi için RBF performans sonuçları, sırasıyla hata değerleri ve başarım oranları Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da sunulmuştur.

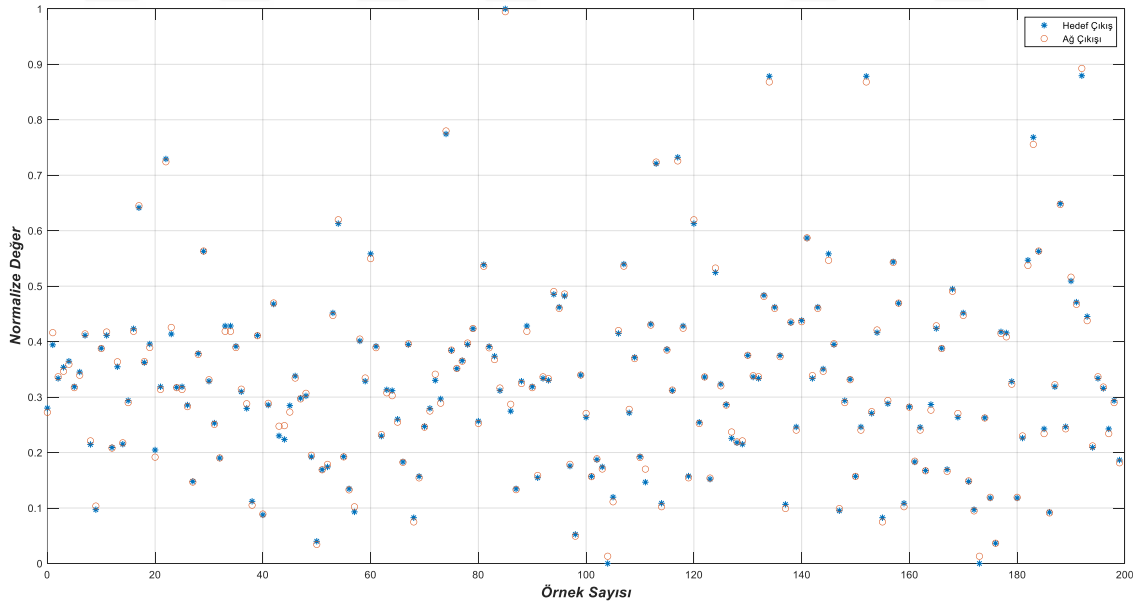
Tablo 5.5 FSY Analizi için RBF Performans Sonuçları-Hata Değerleri

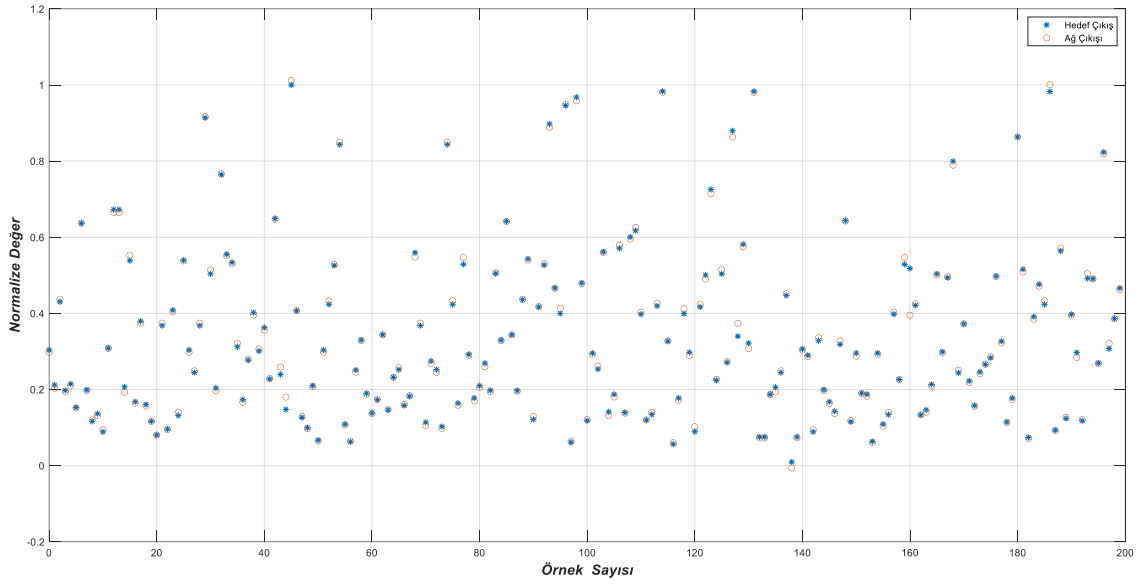
	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
RBF Eğitim Hata Değeri	MSE : 2.467e-04 RMSE : 0.0157 MAE : 0.0064	MSE : 3.159e-04 RMSE : 0.0178 MAE : 0.0073	MSE : 3.494e-04 RMSE : 0.0187 MAE : 0.0079	MSE : 3.556e-04 RMSE : 0.0189 MAE : 0.0083	MSE : 2.760e-04 RMSE : 0.0166 MAE : 0.0072	MSE : 3.08e-04 RMSE : 0.0175 MAE : 0.00742
RBF Test Hata Değeri	MSE : 6.718e-04 RMSE : 0.0259 MAE : 0.0088	MSE : 3.412e-04 RMSE : 0.0185 MAE : 0.0075	MSE : 2.268e-04 RMSE : 0.0151 MAE : 0.0075	MSE : 2.157e-04 RMSE : 0.0147 MAE : 0.0081	MSE : 3.745e-04 RMSE : 0.0194 MAE : 0.0078	MSE : 3.66e-04 RMSE : 0.0187 MAE : 0.00794

Tablo 5.6 FSY Analizi için RBF Performans Sonuçları-Başarım Oranları

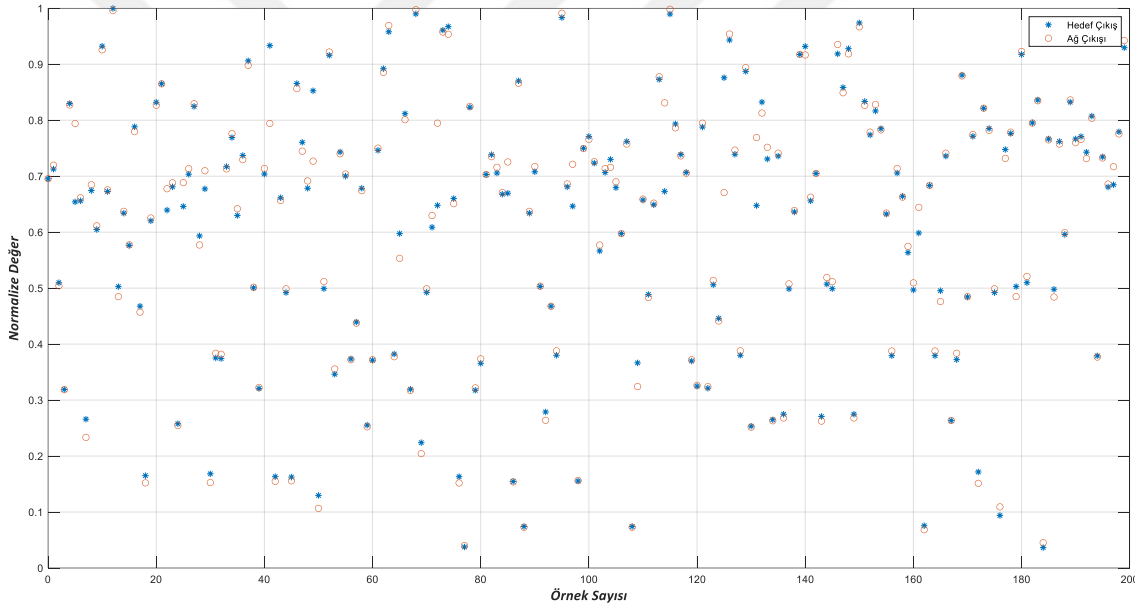
	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
RBF Eğitim Başarım Oranı	MSE : %99.9999 RMSE : %99.967 MAE : %94.0406	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9993 MAE : %93.7238	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9902 MAE : %93.7365	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9757 MAE : %97.6381	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9942 MAE : %99.9278	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9852 MAE : %95.8133
RBF Test Başarım Oranı	MSE : %99.6811 RMSE : %94.3531 MAE : %97.6534	MSE : %99.5515 RMSE : %93.3029 MAE : %97.8654	MSE : %99.4079 RMSE : %92.3051 MAE : %97.5816	MSE : %99.3567 RMSE : %91.9794 MAE : %97.2711	MSE : %99.1825 RMSE : %90.9582 MAE : %97.1486	MSE : %99.4357 RMSE : %92.5797 MAE : %97.5040

RBF Test işlemleri için her katlamada ağa 200 örnek sunulmuş ve girişler olarak tanımlanan boyut parametrelerine karşılık ağ çıkışında frekans değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te x eksenini örnek sayısını, y eksenini ise ilgili frekansın normalize değerini göstermektedir.

**Şekil 5.13** RBF ağ yapısı ile yapılan test birinci katlama için birinci frekans hedef değerleri ve birinci frekans ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.14 RBF ağ yapısı ile yapılan test üçüncü katlama için ikinci frekans hedef değerleri ve ikinci frekans ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.15 RBF ağ yapısı ile yapılan test beşinci katlama için üçüncü frekans hedef değerleri ve üçüncü frekans ağ çıkışı değerleri

5.3.3.2 YSA Tabanlı FSY Sentez Sonuçları

Sentez işlemi için oluşturan veri tabanında toplam 1000 veri bulunmakta olup çıkış verileri milimetre cinsinden üç bantlı birim hücrenin boyut parametreleri (d_{in} , d_{out} ve L_b), girişler ise ilgili satırdaki boyut değerlerinde FSY birim hücrenin CST benzetimleri sonucunda elde edilen GHz cinsinden $F1$, $F2$, $F3$ bant frekansları olarak düzenlenmiştir. Veriye normalizasyon işlemi uygulandıktan sonra YSA modellerine girdi olarak sunulmuş ve ağın öngördüğü çıkış ile hedef

çıkış da normalize değerler üzerinden incelenmiştir. Tüm ağ yapılarında her katlama için performans değerleri, aritmetik ortalama sonuçları verilmiştir. Her ağ yapısına test işlemi sırasında eğitim işleminde tanıtılmamış bant frekansları giriş olarak sunulmuş ve bu frekanslara karşılık gelen boyut parametreleri değerleri ağ çıkışında elde edilmiştir.

- **MLP Tabanlı FSY Sentezi**

MLP ağ yapısında ağırlık değerleri rastgele başlatıldığı için algoritmanın başarısını değerlendirmek üzere ağ üç defa koşturulmuştur. Her koşturma için sonuçlar elde edilmiştir. Her koşturmada ağın eğitim ve test için performans ölçütleri üç farklı hata kriteri olarak elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz doğrulama işleminde her katlama için bu işlemler yapılmış ve ortalama değerler tablolarda en son sütunda sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde performans ölçütleri bakımından her koşturma için hem eğitim hem de test işlemlerinde en düşük ortalama hata değeri MSE ile elde edildiği görülmüştür. Eğitim hataları her koşturma için ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer olarak üçüncü koşturmada $RMSE = 0,0495$ elde edilmiştir. Test hataları her koşturma için ortalama değer bakımından incelendiğinde ise en yüksek değer ikinci koşturmada $RMSE = 0,0553$ olarak elde edilmiştir. Birinci koşturmada, 5-katlamalı çapraz değerlendirme sonucunda eğitim işlemi için ortalama $MSE = 0,00226$, $RMSE = 0,0474$, $MAE = 0,0322$ olarak sonuçlanmış olup, test işlemi için ortalama $MSE = 0,00266$, $RMSE = 0,0514$, $MAE = 0,0349$ değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde birinci koşturmada elde edilen hata değerleri, ikinci ve üçüncü koşturmada elde edilen değerlere kıyasla daha düşüktür. Her katlama ve her koşturma için elde edilen değerlerin ortalaması alındığında eğitim işlemi için $MSE = 0,0025$, $RMSE = 0,0488$, $MAE = 0,0339$ olarak elde edilmiş, test işlemi için ise $MSE = 0,00292$, $RMSE = 0,0538$, $MAE = 0,0359$ olarak elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken MAE , MSE ve $RMSE$ için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. FSY sentezi için MLP performans sonuçları, sırasıyla hata değerleri ve başarım oranları Tablo 5.7 ve Tablo 5.8’de sunulmuştur.

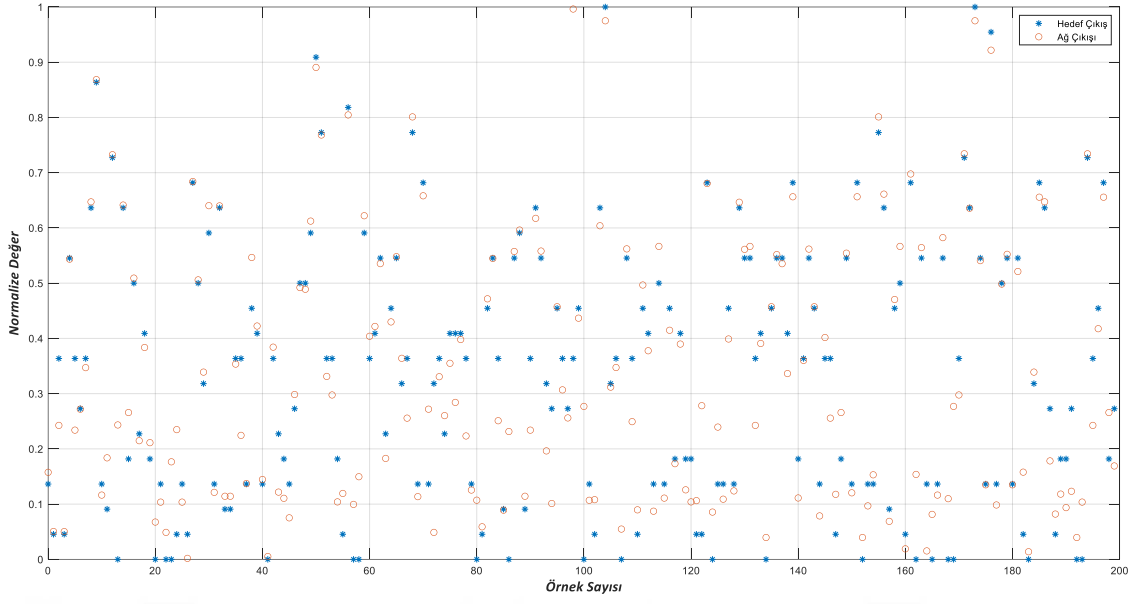
Tablo 5.7 FSY Sentezi için MLP Performans Sonuçları-Hata Değerleri

		1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
RUN1	MLP Eğitim Hata Değeri	MSE : 0.0020 RMSE : 0.0449 MAE : 0.03	MSE : 0.0019 RMSE : 0.0440 MAE : 0.0296	MSE : 0.0027 RMSE : 0.0518 MAE : 0.0352	MSE : 0.0023 RMSE : 0.0476 MAE : 0.0326	MSE : 0.0024 RMSE : 0.0489 MAE : 0.0336	MSE : 0.00226 RMSE : 0.0474 MAE : 0.0322
	MLP Test Hata Değeri	MSE : 0.0032 RMSE : 0.0570 MAE : 0.0359	MSE : 0.0028 RMSE : 0.0525 MAE : 0.0363	MSE : 0.0027 RMSE : 0.0519 MAE : 0.0366	MSE : 0.0025 RMSE : 0.0501 MAE : 0.0339	MSE : 0.0021 RMSE : 0.0453 MAE : 0.0316	MSE : 0.00266 RMSE : 0.0514 MAE : 0.0349
RUN2	MLP Eğitim Hata Değeri	MSE : 0.0023 RMSE : 0.0479 MAE : 0.0332	MSE : 0.0026 RMSE : 0.0512 MAE : 0.0326	MSE : 0.0025 RMSE : 0.0499 MAE : 0.0337	MSE : 0.0027 RMSE : 0.0519 MAE : 0.0355	MSE : 0.0021 RMSE : 0.0460 MAE : 0.0306	MSE : 0.00244 RMSE : 0.0494 MAE : 0.0331
	MLP Test Hata Değeri	MSE : 0.0038 RMSE : 0.0613 MAE : 0.0407	MSE : 0.0041 RMSE : 0.0637 MAE : 0.0402	MSE : 0.0028 RMSE : 0.0530 MAE : 0.0362	MSE : 0.0029 RMSE : 0.0536 MAE : 0.0367	MSE : 0.0020 RMSE : 0.0450 MAE : 0.0294	MSE : 0.00312 RMSE : 0.0553 MAE : 0.0366
RUN3	MLP Eğitim Hata Değeri	MSE : 0.0021 RMSE : 0.0456 MAE : 0.0312	MSE : 0.0027 RMSE : 0.0519 MAE : 0.0344	MSE : 0.0026 RMSE : 0.0509 MAE : 0.0345	MSE : 0.0031 RMSE : 0.0553 MAE : 0.0368	MSE : 0.0019 RMSE : 0.0437 MAE : 0.0302	MSE : 0.0028 RMSE : 0.0495 MAE : 0.0334
	MLP Test Hata Değeri	MSE : 0.0032 RMSE : 0.0563 MAE : 0.0362	MSE : 0.0038 RMSE : 0.0613 MAE : 0.0413	MSE : 0.0025 RMSE : 0.0504 MAE : 0.0355	MSE : 0.0035 RMSE : 0.0593 MAE : 0.0383	MSE : 0.0021 RMSE : 0.0458 MAE : 0.0308	MSE : 0.0030 RMSE : 0.0546 MAE : 0.0364
	ORTALAMA						TRAIN_MSE : 0.0025 TEST_MSE : 0.00292 TRAIN_RMSE : 0.0488 TEST_RMSE : 0.0538 TRAIN_MAE : 0.0339 TEST_MAE : 0.0359

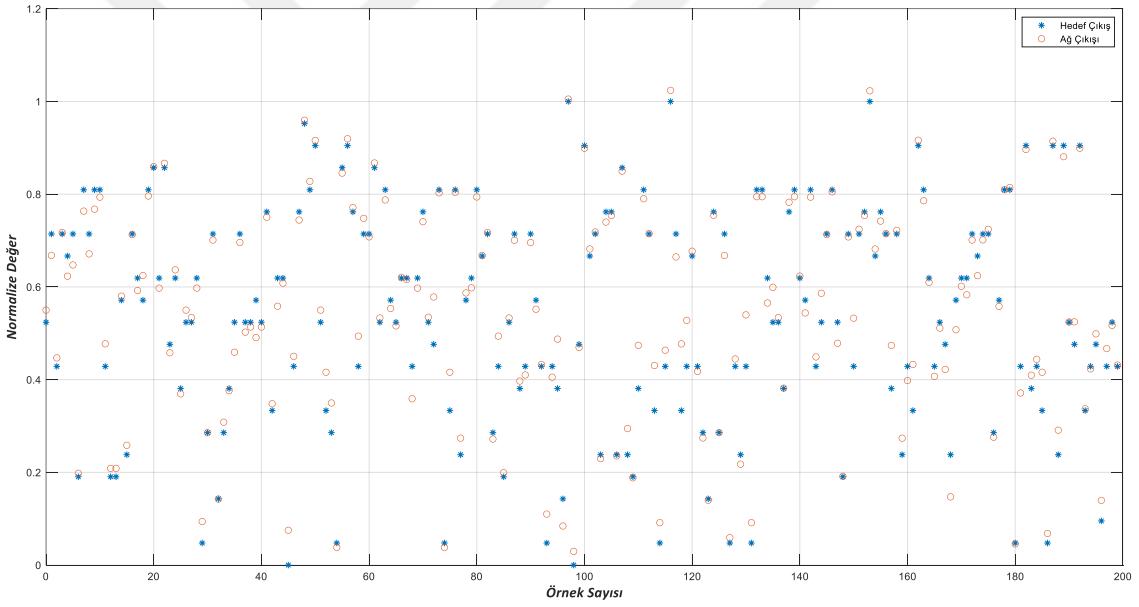
Tablo 5.8 FSY Sentezi için MLP Performans Sonuçları-Başarım Oranları

	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
MLP Eğitim Başarım Oranı	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9967 MAE : %86.3763	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9805 MAE : %86.5557	MSE : %99.9913 RMSE : %99.0666 MAE : %88.6571	MSE : %99.9987 RMSE : %99.6386 MAE : %85.8633	MSE : %99.9995 RMSE : %99.7769 MAE : %85.5950	MSE : %99.9978 RMSE : %99.6918 MAE : %86.6094
MLP Test Başarım Oranı	MSE : %84.8269 RMSE : %61.0473 MAE : %85.4561	MSE : %74.9685 RMSE : %49.9685 MAE : %81.3075	MSE : %92.1182 RMSE : %71.9254 MAE : %87.6527	MSE : %86.7264 RMSE : %63.5671 MAE : %87.3081	MSE : %90.9950 RMSE : %69.9917 MAE : %87.0581	MSE : %85.9270 RMSE : %63.3000 MAE : %85.7565

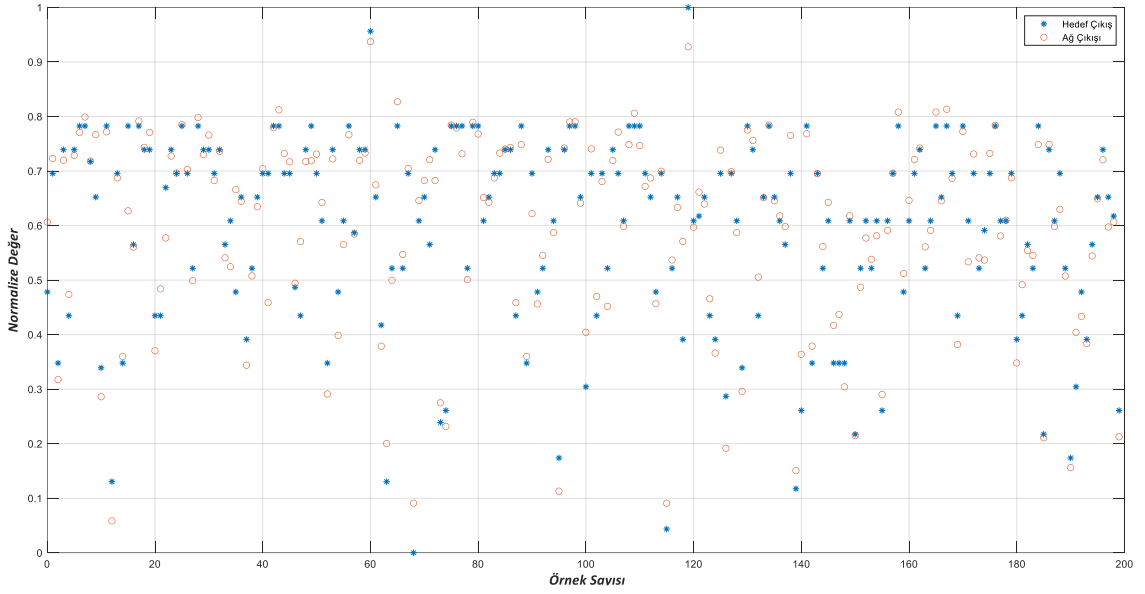
MLP ağı ile yapılan test işlemleri için her katlamada ağı 200 örnek sunulmuş ve girişler olarak tanımlanan frekans değerlerine karşılık ağı çıkışında boyut parametreleri elde edilmiştir. Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de x ekseni örnek sayısını, y ekseni ise ilgili boyut parametresinin normalize değerini göstermektedir.



Şekil 5.16 MLP ağı ile yapılan test birinci katlama için d_{in} boyutu hedef değerleri ve d_{in} boyutu ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.17 MLP ağı ile yapılan test üçüncü katlama için d_{out} boyutu hedef değerleri ve d_{out} boyutu ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.18 MLP ağı ile yapılan test beşinci katlama için L_b boyutu hedef değerleri ve L_b boyutu ağ çıkış değerleri

- **GRNN Tabanlı FSY Sentezi**

GRNN ağ yapısında örüntü katmanı sayesinde tek iterasyonda öğrenme işlemi gerçekleştirildiği için algoritmanın başarısı ağ tek sefer koşturularak değerlendirilmiştir. Ağın eğitim ve test için performans  l  tleri üç farklı hata kriteri olarak elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz doğrulama işleminde her katlama için bu işlemler yapılmış ve ortalama değerler tablolarda en son sütunda sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde performans  l  tleri bakımından hem eğitim hem de test işlemlerinde en düşük ortalama hata değeri MSE ile elde edildiği görülmüştür. Eğitim hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer olarak $RMSE = 0,0121$ elde edilmiştir. Test hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde ise en yüksek değer olarak $RMSE = 0,0295$ elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz değerleme sonucunda eğitim işlemi için ortalama $MSE = 0,000147$, $RMSE = 0,0121$, $MAE = 0,00392$ olarak sonuçlanmış olup, test işlemi için ise ortalama $MSE = 0,000909$, $RMSE = 0,0295$, $MAE = 0,0112$ değerleri elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken MAE , MSE ve $RMSE$ için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. FSY sentezi için GRNN performans sonuçları sırasıyla hata değerleri ve başarım oranları Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da sunulmuştur.

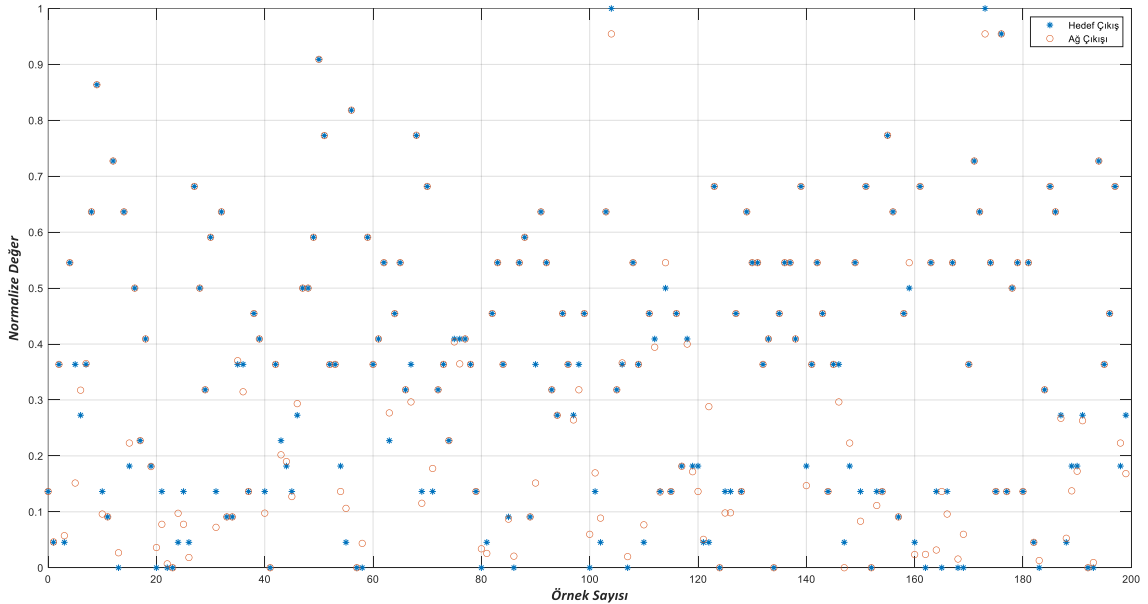
Tablo 5.9 FSY Sentezi için GRNN Performans Sonuçları-Hata Değerleri

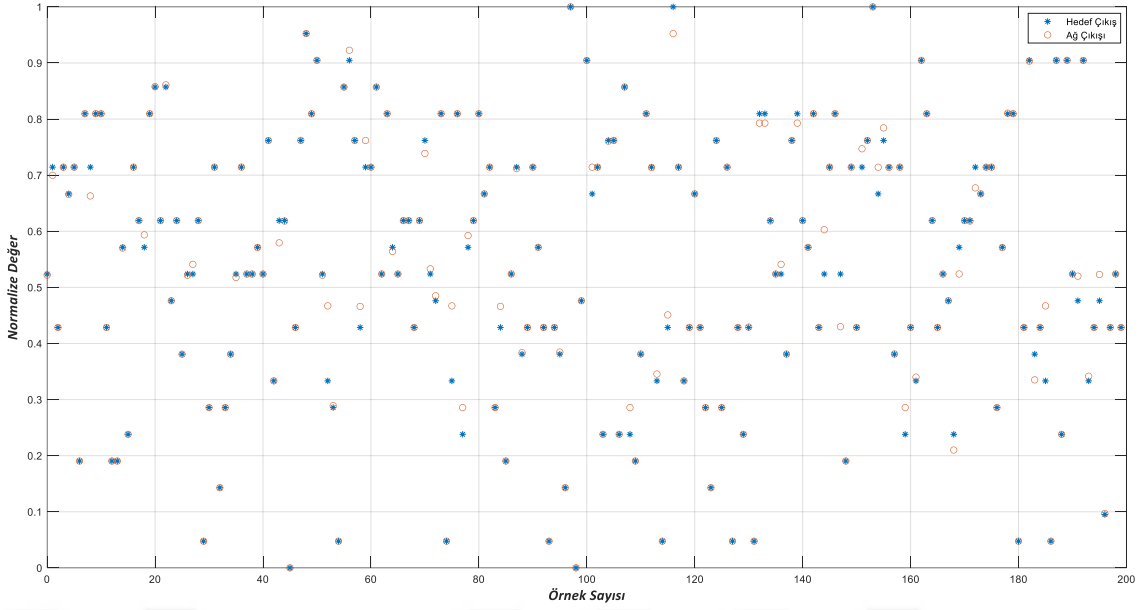
	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
GRNN Eğitim Hata Değeri	MSE : 1.537e-04 RMSE : 0.0124 MAE : 0.0041	MSE : 1.225e-04 RMSE : 0.0111 MAE : 0.0035	MSE : 1.471e-04 RMSE : 0.0121 MAE : 0.0039	MSE : 1.538e-04 RMSE : 0.0124 MAE : 0.0040	MSE : 1.593e-04 RMSE : 0.0126 MAE : 0.0041	MSE : 1.473e-04 RMSE : 0.0121 MAE : 0.00392
GRNN Test Hata Değeri	MSE : 7.562e-04 RMSE : 0.0275 MAE : 0.0098	MSE : 9.721e-04 RMSE : 0.0312 MAE : 0.0121	MSE : 0.0012 RMSE : 0.0342 MAE : 0.0142	MSE : 0.0012 RMSE : 0.0343 MAE : 0.0130	MSE : 4.140e-04 RMSE : 0.0203 MAE : 0.0068	MSE : 9.085e-04 RMSE : 0.0295 MAE : 0.0112

Tablo 5.10 FSY Sentezi için GRNN Performans Sonuçları-Başarım Oranları

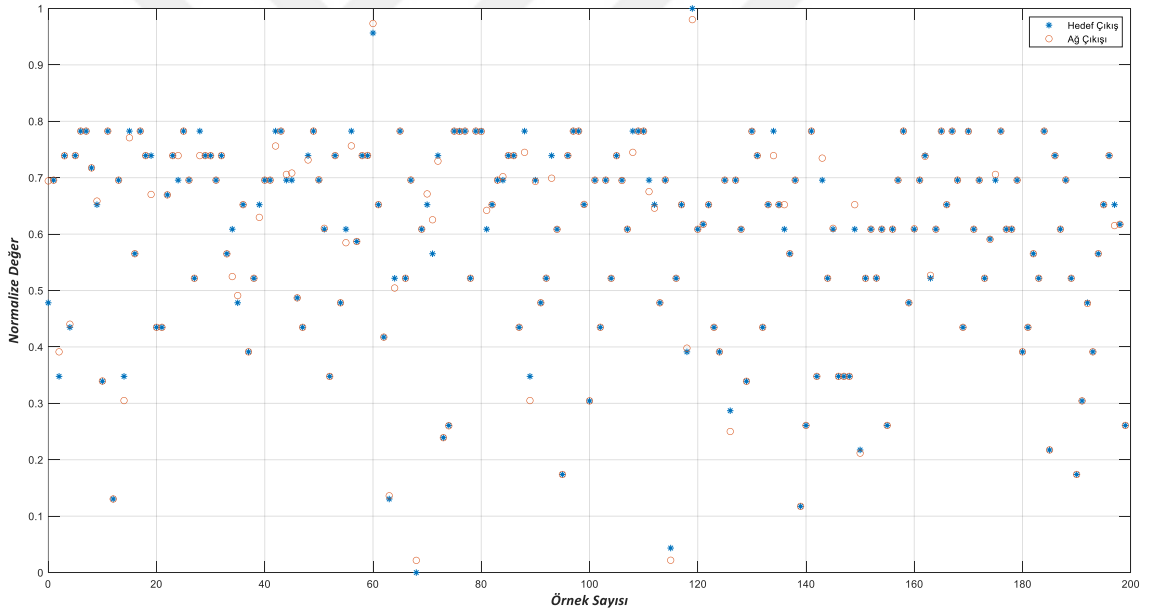
	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
GRNN Eğitim Başarım Oranı	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %97.5378	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %97.9498	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %97.7914	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %97.4933	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %97.5596	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9999 MAE : %97.6663
GRNN Test Başarım Oranı	MSE : %93.3560 RMSE : %74.2241 MAE : %95.1680	MSE : %94.6729 RMSE : %76.9195 MAE : %94.0229	MSE : %94.0182 RMSE : %75.5423 MAE : %92.3836	MSE : %97.6420 RMSE : %84.6441 MAE : %95.6535	MSE : %98.7444 RMSE : %88.7946 MAE : %97.0363	MSE : %95.6867 RMSE : %80.0249 MAE : %94.8528

GRNN ağı ile yapılan test işlemleri için her katlamada ağa 200 örnek sunulmuş ve girişler olarak tanımlanan frekans değerlerine karşılık ağ çıkışında boyut parametreleri elde edilmiştir. Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 x eksenı örnek sayısını, y eksenı ise ilgili boyut parametresinin normalize değerini göstermektedir.

**Şekil 5.19** GRNN ağı ile yapılan test birinci katlama için d_{in} boyutu hedef değerleri ve d_{in} boyutu ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.20 GRNN ağı ile yapılan test üçüncü katlama için d_{out} boyutu hedef değerleri ve d_{out} boyutu ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.21 GRNN ağı ile yapılan test beşinci katlama için L_b boyutu hedef değerleri ve L_b boyutu ağ çıkışı değerleri

- **RBF Tabanlı FSY Sentezi**

RBF ağ yapısında, algoritmanın başarısı ağ tek sefer 400 iterasyon için koşturularak değerlendirilmiştir. Ağın eğitim ve test için performans ölçütleri üç farklı hata kriteri olarak elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz doğrulama işleminde her katlama için bu işlemler yapılmış ve ortalama değerler tablolarda en son sütunda sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde performans ölçütleri

bakımından hem eğitim hem de test işlemlerinde en düşük ortalama hata değeri *MSE* ile elde edildiği görülmüştür. Eğitim hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde en yüksek değer *RMSE* = 0,054 elde edilmiştir. Test hatası ortalama değer bakımından incelendiğinde ise en yüksek değer *RMSE* = 0,0611 elde edilmiştir. 5-katlamalı çapraz değerlendirme sonucunda eğitim işlemi için ortalama *MSE* = 0,00294, *RMSE* = 0,054, *MAE* = 0,0372 olarak sonuçlanmış olup, test işlemi için ortalama *MSE* = 0,00376, *RMSE* = 0,0611, *MAE* = 0,0407 değerleri elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken *MAE*, *MSE* ve *RMSE* için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. FSY sentezi için RBF performans sonuçları sırasıyla hata değerleri ve başarım oranları Tablo 5.11 ve Tablo 5.12’de sunulmuştur.

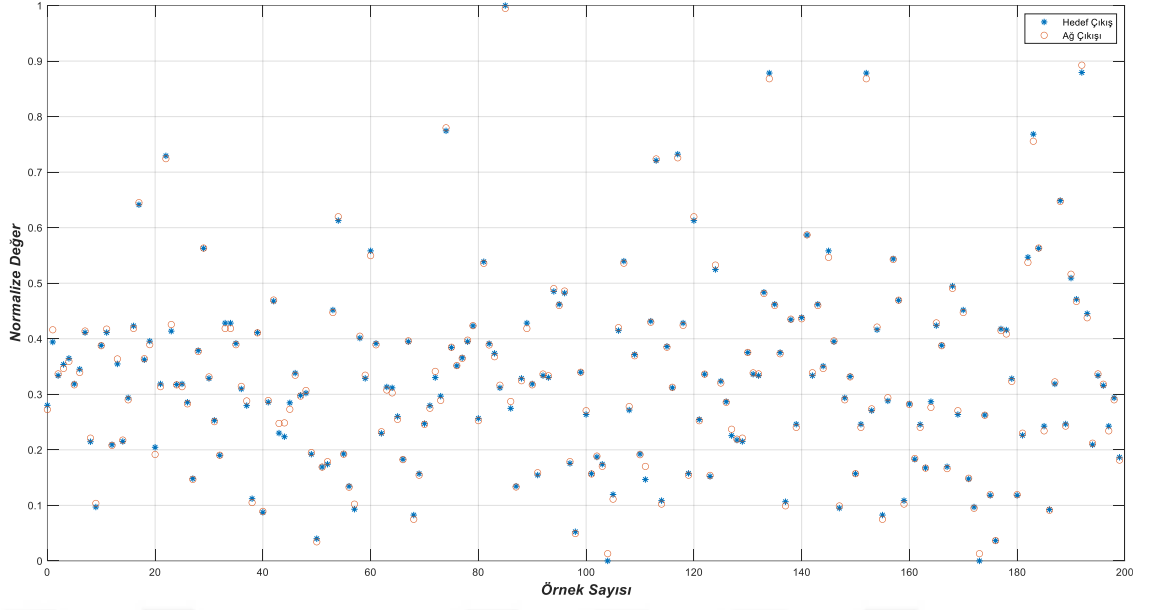
Tablo 5.11 FSY Sentezi için RBF Performans Sonuçları-Hata Değerleri

	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
RBF Eğitim Hata Değeri	MSE : 0.0029 RMSE : 0.0539 MAE : 0.0362	MSE : 0.0028 RMSE : 0.0531 MAE : 0.0360	MSE : 0.0029 RMSE : 0.0535 MAE : 0.0374	MSE : 0.0028 RMSE : 0.0525 MAE : 0.0368	MSE : 0.0033 RMSE : 0.0571 MAE : 0.0395	MSE : 0.00294 RMSE : 0.0540 MAE : 0.0372
RBF Test Hata Değeri	MSE : 0.0046 RMSE : 0.0681 MAE : 0.0412	MSE : 0.0044 RMSE : 0.0660 MAE : 0.0446	MSE : 0.0032 RMSE : 0.0563 MAE : 0.0376	MSE : 0.0031 RMSE : 0.0557 MAE : 0.0388	MSE : 0.0035 RMSE : 0.0595 MAE : 0.414	MSE : 0.00376 RMSE : 0.0611 MAE : 0.0407

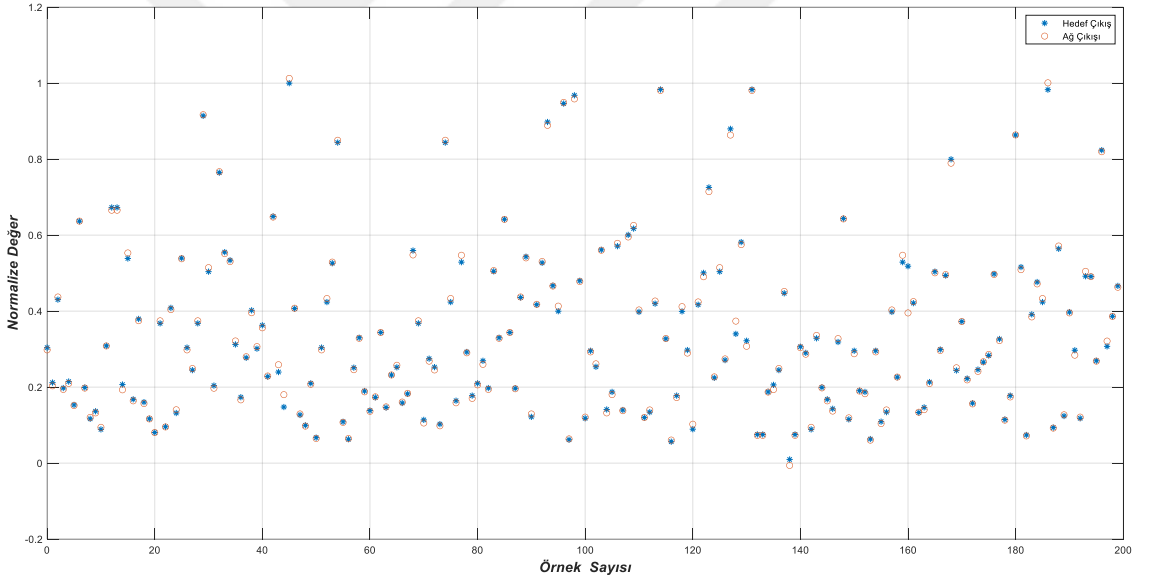
Tablo 5.12 FSY Sentezi için RBF Performans Sonuçları-Doğruluk Oranı

	1.Katlama	2.Katlama	3.Katlama	4.Katlama	5.Katlama	Ortalama
RBF Eğitim Başarım Oranı	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9953 MAE : %85.3280	MSE : %99.9894 RMSE : %98.9723 MAE : %85.5151	MSE : %99.9999 RMSE : %99.9870 MAE : %85.6879	MSE : %99.9982 RMSE : %99.5729 MAE : %85.3698	MSE : %99.9975 RMSE : %99.5049 MAE : %84.0774	MSE : %99.9969 RMSE : %99.6064 MAE : %85.1956
RBF Test Başarım Oranı	MSE : %84.5521 RMSE : %60.6962 MAE : %85.5381	MSE : %71.9501 RMSE : %47.0378 MAE : %79.5616	MSE : %78.5865 RMSE : %53.7252 MAE : %82.5981	MSE : %84.2106 RMSE : %60.2641 MAE : %86.8616	MSE : %88.0417 RMSE : %65.4158 MAE : %85.5252	MSE : %81.4682 RMSE : %57.4283 MAE : %84.0169

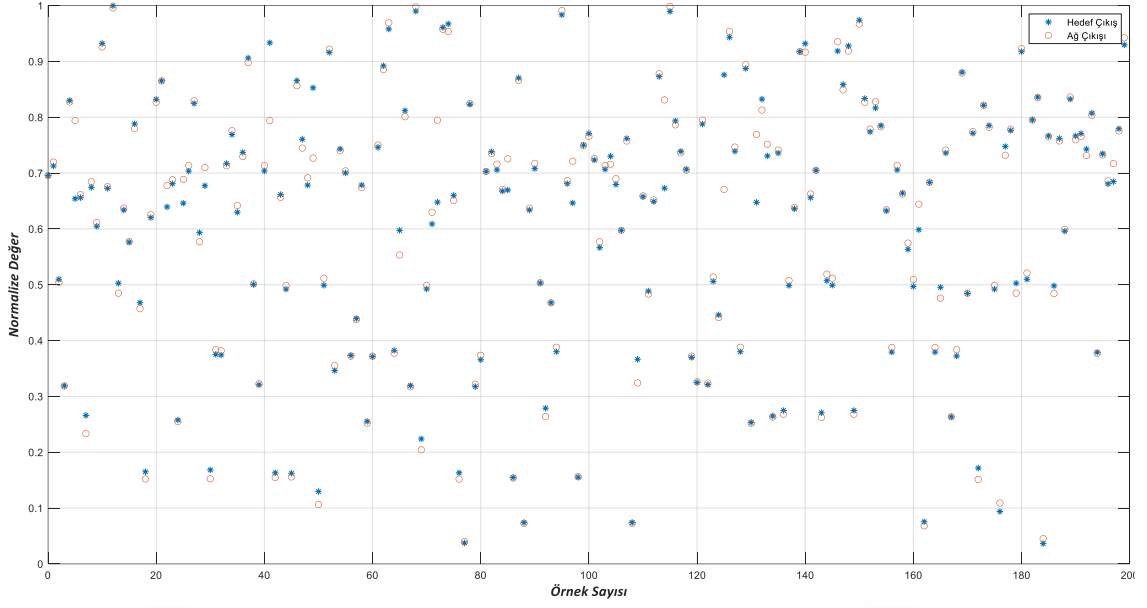
RBF ağı ile yapılan test işlemleri için her katlamada ağa 200 örnek sunulmuş ve girişler olarak tanımlanan frekans değerlerine karşılık ağ çıkışında boyut parametreleri elde edilmiştir. Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 x eksen örnek sayısını, y eksen ise ilgili boyut parametresinin normalize değerini göstermektedir.



Şekil 5.22 RBF ağı ile yapılan test birinci katlama için d_{in} boyutu hedef değerleri ve d_{in} boyutu ağ çıkışı değerleri



Şekil 5.23 RBF ağı ile yapılan test üçüncü katlama için d_{out} boyutu hedef değerleri ve d_{out} boyutu ağ çıkışı değerleri



şekil 5.24 RBF ağı ile yapılan test beşinci katlama için L_b boyutu hedef değerleri ve L_b boyutu ağ çıkışı değerleri

5.4 YSA Tabanlı Analiz ve Sentez Sonuç Karşılaştırmaları

   bantlı birim hücrenin boyut parametreleri ile 5G standartlarında üç farklı bant frekansı arasındaki ilişki, YSA yapılarının oluşturulan veri kümesi ile eğitilmesi suretiyle, YSA tarafından öğrenilmiş ve kullanılan ağ yapılarının genelleştirme yeteneği kazanması sağlanmıştır. Bu modelde giriş olarak FSY bant geçiren filtrenin boyut parametreleri olan d_{in} , d_{out} ve L_b seçilmiştir. Frekans seçici yüzeyin boyut parametreleri arasında yer alan d_{in} , d_{out} ve L_b değerlerine, fiziksel imkanların sağlandığı minimum değerlerden maksimum değerlere kadar oransal arttırım ile karma kombinasyonlar atanarak CST Studio ile benzetimleri yapılmış, benzetimler sonucu her bir farklı boyut parametre kombinasyonu için $F1$, $F2$ ve $F3$ değerleri elde edilmiştir. Bu benzetimler sonucunda 1000 adet veriden oluşan veri kümesi elde edilmiştir.

FSY analiz ve sentez işlemleri için MLP, GRNN ve RBF sinir ağları ile modelleme yapılmıştır. YSA modellerinin öngördüğü tahmin değerleri ile gerçek değerlerin arasındaki hata değerini hesaplamak için tanımlı ölçütlerden Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Karesel Hata (MSE) ve Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (RMSE) kullanılmış ve tüm ağ yapıları için hedef hata değeri 1×10^{-5} olarak tanımlanmıştır. Ağ yapılarının tasarım parametreleri, eğitim aşamasında en düşük

hata değeri nin elde edilmesine bağlı olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan bu işlemler neticesinde 5G uygulamalarında kullanılması hedeflenen FSY bant geçiren filtre tasarımı nın hem analiz hem de sentez işlemleri YSA yöntemleri ile başarılı ve hızlı şekilde modellenebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5.4.1 FSY Analiz için YSA Modellerinin Performans Karşılaştırması

Analiz için veri kümesi oluşturulurken 1000 adet örnek olarak ilk üç sütunda milimetre cinsinden  bantlı birim hücrenin boyut parametreleri değeri, son üç sütunda ise ilgili satırdaki boyut değeri nde FSY birim hücrenin CST benzetimleri sonucunda elde edilen $F1$, $F2$, $F3$ bant frekansları verilmiştir. Veriler normalize edilmiş ve YSA modelleme işlemlerinde 5-katlamalı çapraz doğrulama uygulanabilmesi için tüm veri 5 alt kümeye ayrılmıştır. Her katlama için 200 adet veri içeren 5 alt kümenin 4 eğitim için geri kalan alt küme ise test için kullanılmıştır. Bu işlem $K = 5$ kere tekrarlanmış ve her tekrarda ağa farklı eğitim ve test kümeleri sunularak başarımın aritmetik ortalaması alınmıştır. Eğitim ve test işlemleri için her katlamada ağa 800 ve 200 örnek sunulmuş, girişler olarak tanımlanan boyut parametrelerine karşılık ağ çıkışında frekans değeri elde edilmiştir.

GRNN ağ yapısında örüntü katmanı sayesinde tek iterasyonda öğrenme işlemi gerçekleştirildiği için algoritmanın başarısı ağ tek sefer koşturularak değeri lendirilmiştir. RBF ağ yapısında, algoritmanın başarısı ağ tek sefer 400 iterasyon için koşturularak değeri lendirilmiştir. MLP ağ yapısında ise ağırlık değeri ler rastgele başlatıldığı için algoritmanın başarısını değeri lendirmek üzere ağ üç defa koşturulmuştur. Her koşturma için sonuçlar hata değeri ler ve başarım oranları olarak elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken MAE, MSE ve RMSE için yüzdelik hata değeri ler dikkate alınmıştır. Tablo 5.13'te verilen karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde FSY analizi için test işlemlerinde en yüksek başarımly modellemenin GRNN ağı ile elde edildiği görülmüştür.

Tablo 5.13 FSY Analizi için Karşılaştırmalı YSA Performans Sonuçları

Analiz için Performans Sonuçları	MSE	RMSE	MAE
MLP Eğitim Başarım Oranı	%99,9999	%99,9886	%96,6245
MLP Test Başarım Oranı	%99,2370	%91,3526	%97,7896
GRNN Eğitim Başarım Oranı	%99,9976	%99,5702	%99,9708
GRNN Test Başarım Oranı	%99,6788	%94,6325	%98,7369
RBF Eğitim Başarım Oranı	%99,9999	%99,9852	%95,8133
RBF Test Başarım Oranı	%99,4357	%92,5797	%97,5040

5.4.2 FSY Sentez için YSA Modellerinin Performans Karşılaştırması

Sentez için veri kümesi, 1000 adet örnek için son üç sütunda milimetre cinsinden üç bantlı birim hücrenin boyut parametreleri değerleriyle ve son ilk sütunda ise ilgili satırdaki boyut değerlerinde FSY birim hücrenin CST benzetimleri sonucunda elde edilen $F1$, $F2$, $F3$ bant frekanslarıyla oluşturulmuştur. Veriler normalize edilerek YSA modelleme işlemlerinde 5-katlamalı çapraz doğrulama uygulanabilmesi için tüm veri 5 alt kümeye ayrılmıştır. Her katlama için 200 adet veri içeren 5 alt kümenin 4'ü eğitim için geri kalan alt küme ise test için kullanılmıştır. Bu işlem $K = 5$ kere tekrarlanmış ve her tekrarda ağ farklı eğitim ve test kümeleri sunularak başarımın aritmetik ortalaması alınmıştır. Eğitim ve test işlemleri için her katlamada ağa 800 ve 200 örnek sunulmuş, girişler olarak tanımlanan boyut parametrelerine karşılık ağ çıkışında frekans değerleri elde edilmiştir.

FSY analizi için uygulandığı üzere sentez için de aynı şekilde GRNN ağ yapısında örüntü katmanı sayesinde tek iterasyonda öğrenme işlemi gerçekleştirildiği için algoritmanın başarısı ağ tek sefer koşturularak değerlendirilmiştir. RBF ağ yapısında, algoritmanın başarısı ağ tek sefer 400 iterasyon için koşturularak değerlendirilmiştir. MLP ağ yapısında ise ağırlık değerleri rastgele başlatıldığı için algoritmanın başarısını değerlendirmek üzere ağ üç defa koşturulmuştur. Her koşturma için sonuçlar hata değerleri ve başarım oranları olarak elde edilmiştir. Başarım oranları belirlenirken MAE , MSE ve $RMSE$ için yüzdelik hata değerleri dikkate alınmıştır. Tablo 5.14'te verilen karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde

FSY sentezi için test işlemlerinde en yüksek başarımlı modellemenin GRNN ağı ile elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 5.14 FSY Sentezi için Karşılaştırmalı YSA Performans Sonuçları

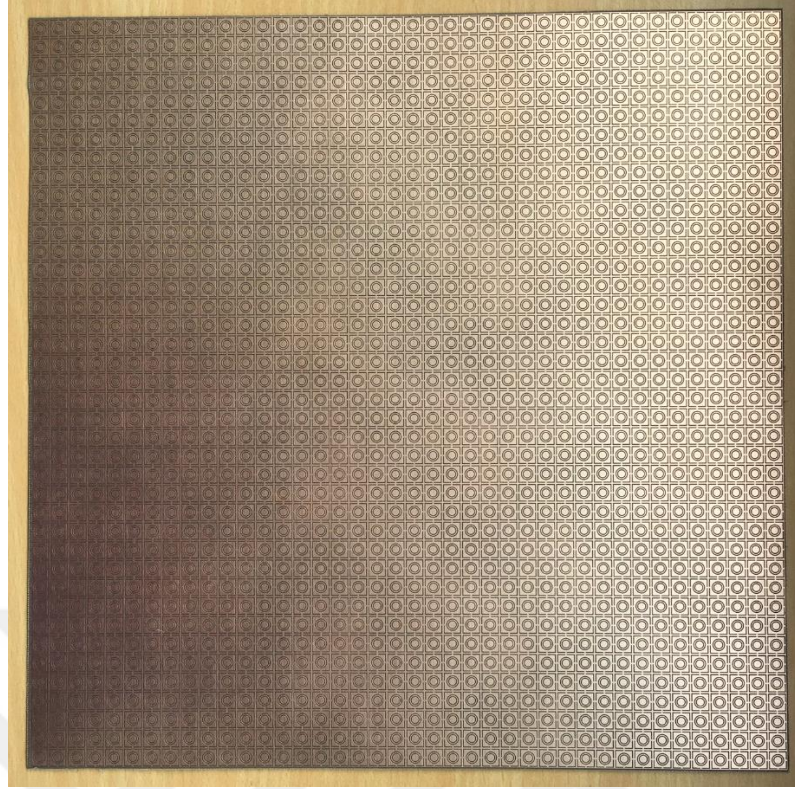
Sentez için Performans Sonuçları	MSE	RMSE	MAE
MLP Eğitim Başarım Oranı	%99,9978	%99,6918	%86,6094
MLP Test Başarım Oranı	%85,9270	%63,3000	%85,7565
GRNN Eğitim Başarım Oranı	%99,9999	%99,9999	%97,6663
GRNN Test Başarım Oranı	%95,6867	%80,0249	%94,8528
RBF Eğitim Başarım Oranı	%99,9969	%99,6064	%85,1956
RBF Test Başarım Oranı	%81,4682	%57,4283	%84,0169

6.1 Frekans Seçici Yüzey Tasarımı

Bölüm 5'te üç rezonans frekanslı birim hücrenin yapay zekâ algoritmaları ile analizi ve sentezi yapılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde üç rezonanslı birim hücrenin hem analizinde hem de sentezinde GRNN sinir ağının en verimli ve en yüksek doğrulukla sonuç verdiği görülmüştür. Bu bölümde de 5G frekans bantlarından 24,75 – 25,25 GHz, 27,50 – 28,35 GHz ve 37,60 – 40,00 GHz frekanslarında çalışan üç bantlı birim hücrenin tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla birinci bandın merkez frekansı olan 25 GHz, ikinci bandın merkez frekansı olan 27 GHz ve üçüncü bandın merkez frekansı 39 GHz değerleri senteze yönelik GRNN yapay sinir ağına girdi olarak verilmiş ve bunun neticesinde üç bantlı frekans seçici yüzeyin fiziksel boyutları elde edilmiştir. Bu incelemeler neticesinde elde edilen fiziksel boyutlar $d_{in} = 2,00 \text{ mm}$, $d_{out} = 3,00 \text{ mm}$ ve $L_b = 5,40 \text{ mm}$ olup dielektrik malzeme olarak DiClad880 kullanılmıştır. Bu parametre değerleri ile oluşturulan frekans seçici yüzey üretilmiş ve fiziksel ölçümü yapılmıştır. Bu sayede hedeflenen bantlarda yüksek doğrulukla çalışan frekans seçici yüzeyin oluşturulduğu görülmüştür.

Bu bölümde tez kapsamında hazırlanan özgün bir tasarıma sahip frekans seçici yüzeyin üretilmesi ve üretilen frekans seçici yüzeyin fiziksel ölçümünü yapmak amacıyla oluşturulan ölçüm düzeneği anlatılmaktadır.

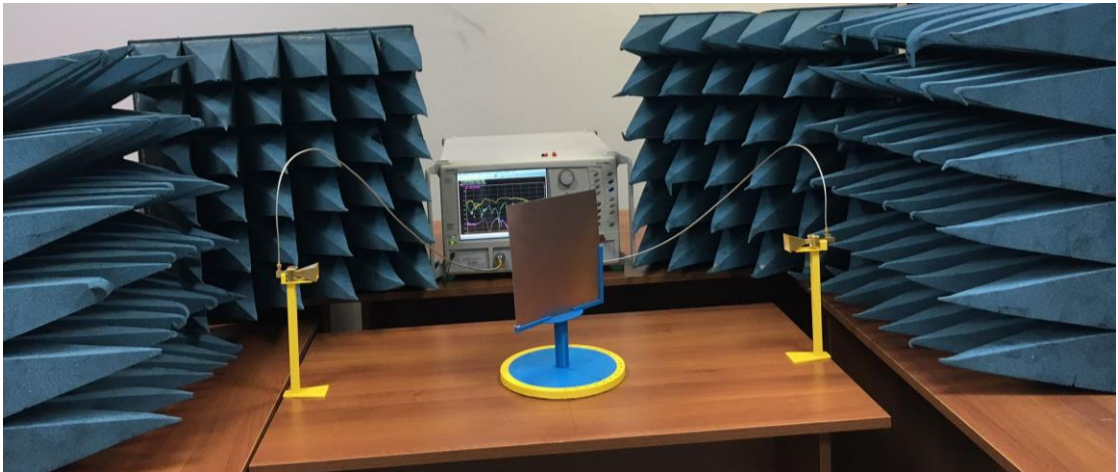
Tez kapsamında tasarlanarak Başlık 4.2'de detayları açıklanan özgün birim hücrenin 40×40 şekilde periyodik olarak dizilmesiyle frekans seçici yüzey oluşturulmuştur. Oluşturulan frekans seçici yüzey $216 \times 216 \text{ mm}^2$ boyuta sahiptir. Üretimi yapılan özgün frekans seçici yüzey Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Üretimi yapılan frekans seçici yüzey

6.2 Ölçüm Düzeneği

Üretimi yapılan özgün frekans seçici yüzeyin fiziksel ölçümleri, oluşturulan bir ölçüm düzeneği sayesinde yapılmıştır. Ölçüm düzeneği, verici (TX) horn anten, alıcı (RX) horn anten, horn antenlerin arasına konumlandırılmış frekans seçici yüzey ve vektör ağ analizör cihazından meydana gelmektedir. Oluşturulan ölçüm düzeneği Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Oluşturulan ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneğinde horn anten olarak Ocean Microwave marka OBH180400 model horn antenler kullanılmıştır. Kullanılan bu horn antenler 18GHz ile 40GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Network analizör cihazı olarak ise Anritsu marka MS4644A modeli kullanılmıştır. Bu network analizör cihazı 10MHz ile 40,5GHz arasında ölçüm yapabilmektedir. Network analizör cihazını horn antenler ile bağlayabilmek için 40GHz'e kadar düşük kayıpla çalışan iki adet konnektör kullanılmıştır. Ara bağlantı için kullanılan Pasternack marka PE-SR402FL kablunun RF koruması 110 dB, maksimum frekansı 20 GHz olup 1 GHz'de 12 dB zayıflamaya sahiptir. Ölçüm düzeneğinde kullanılan cihaz ve malzemeler Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.3 Kullanılan cihaz ve malzemeler; (a) network analizör, (b) horn anten, (c) kablo

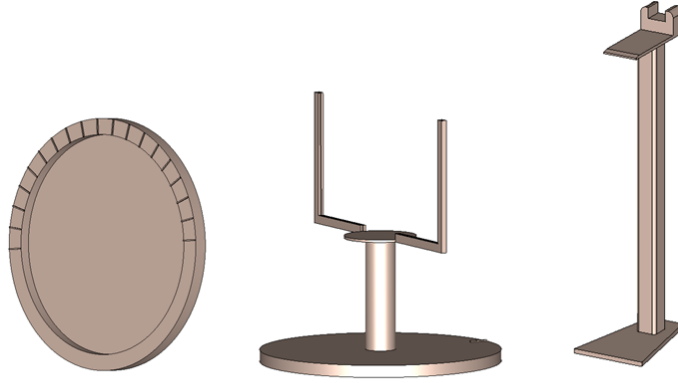
6.3 Ölçüm Düzeneği Tasarımı

Ölçüm düzeneği oluşturulurken horn antenlerin frekans seçici yüzeye olan uzaklıkları önem arz etmektedir. Frekans seçici yüzey, antenin radyasyon paterninin tam olarak oluştuğu bölge hesaplanarak konumlandırılmalıdır. Bu hesaplama Eşitlik (6.1)'de verilen formül ile yapılabilmektedir. Burada D antenin boyutlarını temsil etmektedir. Horn antenlerde bu boyut antenin en büyük açıklık uzunluğu olarak seçilmektedir. λ ise dalga boyunu temsil etmektedir.

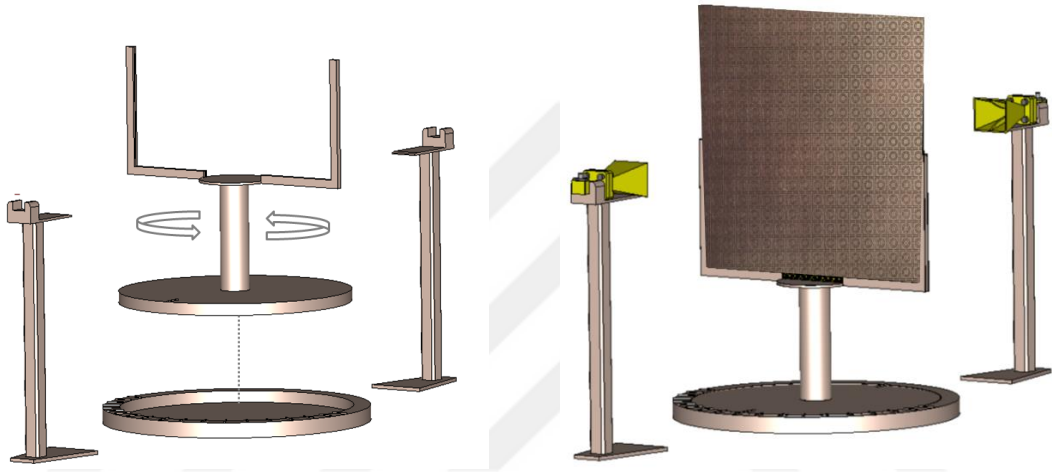
$$Uzak Alan \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6.1)$$

Tez kapsamında kullanılan Ocean Microwave marka OBH180400 model horn antenler 18GHz ile 40GHz frekans aralığında çalıştıkları için 18GHz ve 40GHz frekanslarında hesaplama yapılmıştır. 18 GHz'deki uzak alanı 12,30 cm ve 40 GHz'de ise 27,32 cm hesaplanmıştır. Bu sebeple horn antenler, frekans seçici yüzeye 25 cm uzaklıkta konumlandırılarak çalışma aralığındaki tüm frekanslarda uzak alanın olması hedeflenmiştir.

Frekans seçici yüzeyin yerleştirildiği platform kendi etrafında 360° dönebilecek bir tasarıma sahip olup taban kısmında bulunan dairenin üzerinde 10 derecelik açıları belirten işaretler yer almaktadır. Frekans seçici yüzeyin açısal ölçümleri taban dairesindeki bu açılar doğrultusunda döndürülerek yapılması hedeflenmiştir. Frekans seçici yüzeyin iki horn antenin arasında ve hizasında kalacak şekilde dik olarak yerleştirilmesi için bir çerçeve yapısı kullanılmıştır. Şekil 6.4'te tasarımlara ait görüntüler gösterilmiştir [20].

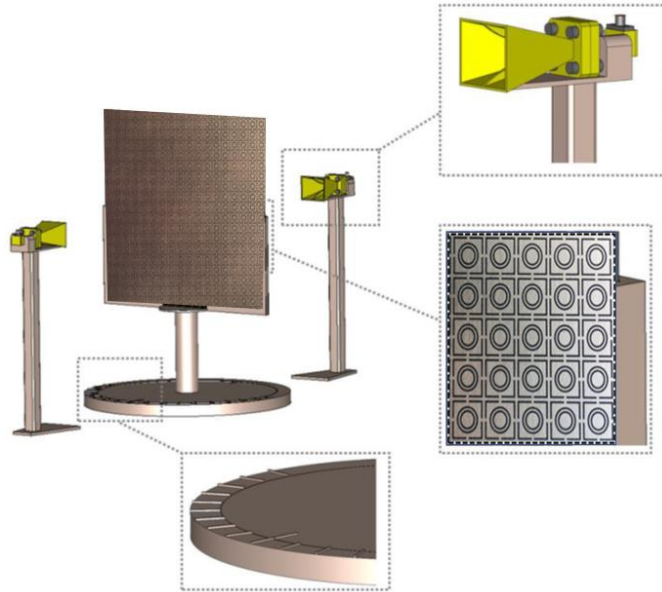


(a)



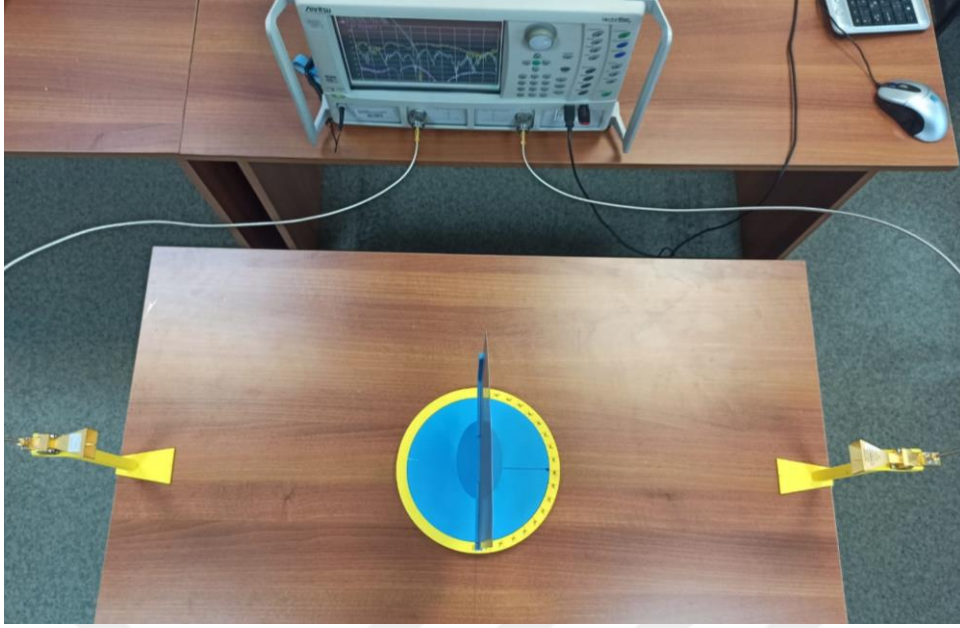
(b)

(c)



(d)

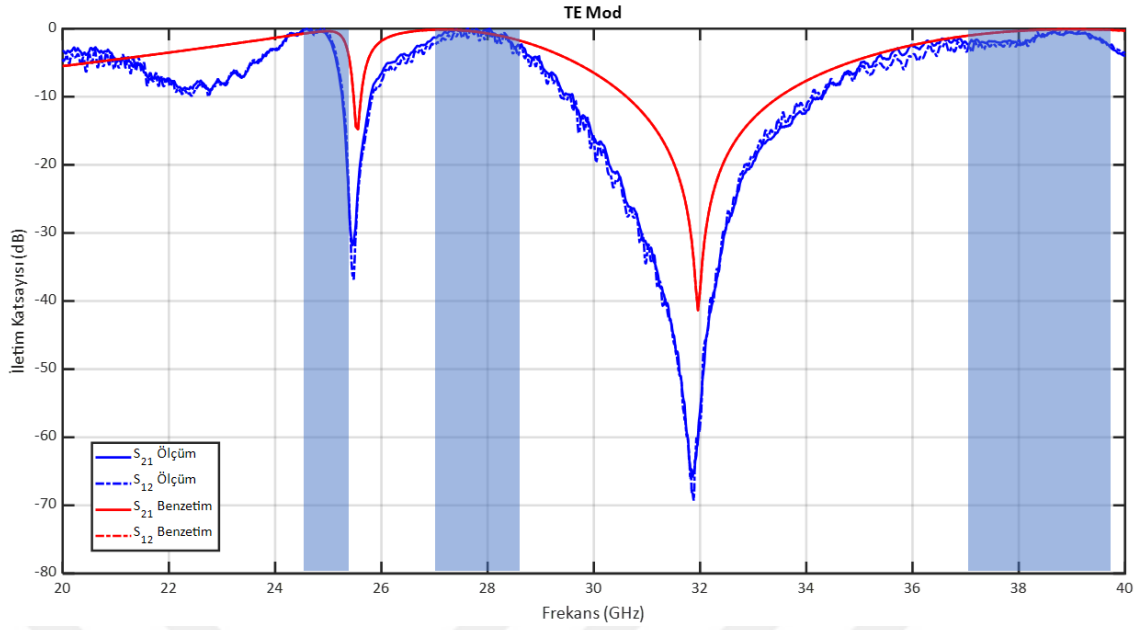
Şekil 6.4 Ölçüm platformunu oluşturan yapıların temsili görselleri [20]



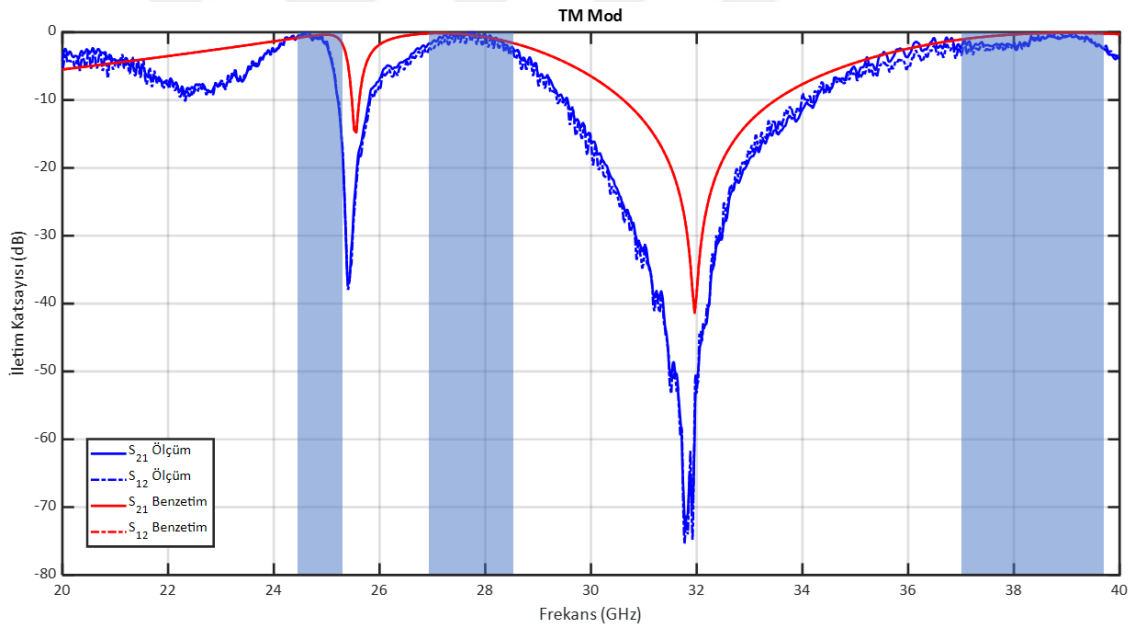
Şekil 6.6 Ölçüm düzeneği

Network analizör cihazı, kalibrasyon kiti kullanılarak kalibre edildikten sonra tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının fiziksel ölçümleri yapılmıştır. Kalibrasyon tamamlanmasının ardından öncelikle frekans seçici yüzey yapısı olmadan ölçüm alınmıştır. Frekans seçici yüzey olmadan alınan ölçümden, platformda frekans seçici yüzey varken alınan ölçüm çıkartılarak frekans seçici yüzeyin iletim katsayısı (S_{21}) elde edilmiştir. Bu doğrultuda yapılan ölçümlerle frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelenmiştir.

Üretimi yapılan frekans seçici yüzey yapısının TE modunda yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen iletim katsayıları ile benzetimi yapılarak elde edilen iletim katsayılarının karşılaştırmalı görüntüsü Şekil 6.7’de gösterilmektedir. TM modunda ölçüm sonuçlarından elde edilen iletim katsayıları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 6.8’de gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde ölçüm düzeneği sonucunda edilen S_{21} iletim katsayılarının benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında birinci ve ikinci bantların rezonans frekansları için benzer salınım yaptığı görülmektedir.



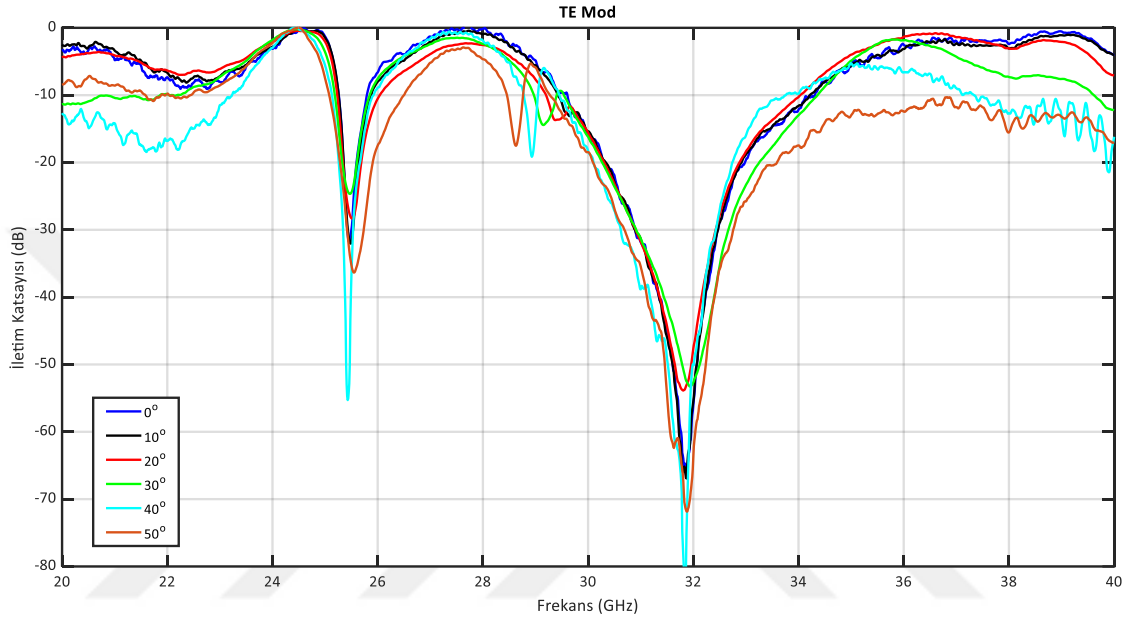
Şekil 6.7 Frekans seçici yüzeyin TE modunda elde edilen iletim katsayıları



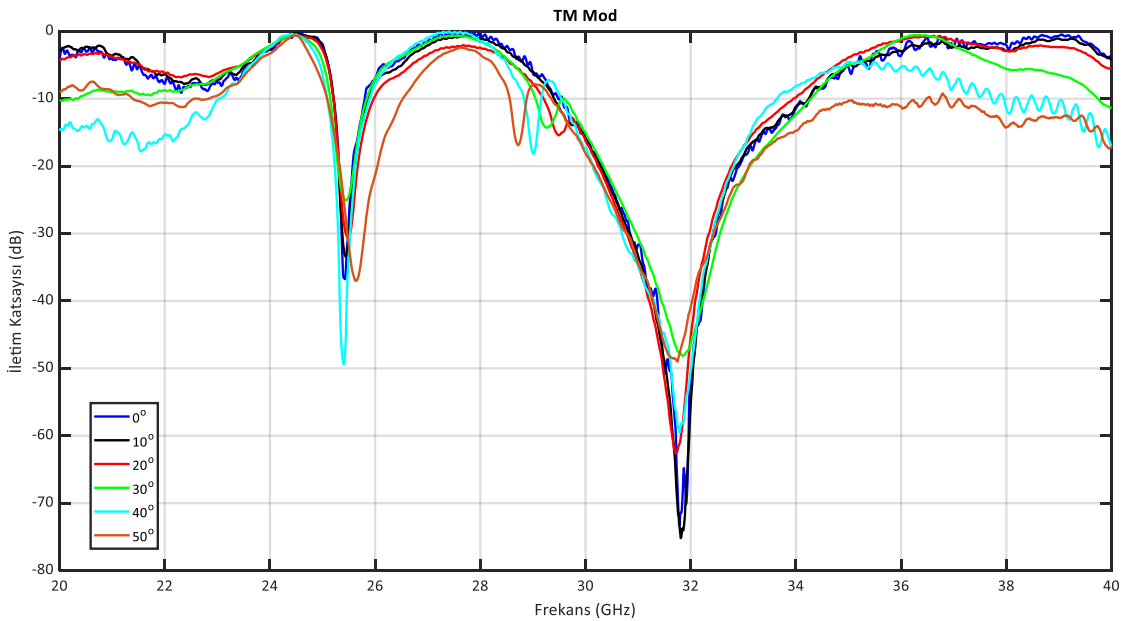
Şekil 6.8 Frekans seçici yüzeyin TM modunda elde edilen iletim katsayıları

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de gösterilen S_{21} eğrilerine bakıldığında rezonans bantları için iletim kaybının 0 dB olduğunu görülmektedir. Bu durum, bu frekanslardaki iletim verimliliğinin yaklaşık 1 olduğunu göstermektedir. Frekans seçici yüzey, çalışması istenilen frekanslarda bant geçiren filtre davranışı sergilemektedir. Sonuç olarak çalışma prototipinin ölçülen sonuçları ile benzetim sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Frekans seçici yüzeyin yerleştirildiği platformun taban kısmında yer alan dairenin üzerindeki 10 derecelik açıların her biri için ayrı ayrı ölçüm yapılarak frekans seçici yüzeyin açısal kararlılık ölçümleri yapılmıştır. Açısal kararlılık ölçümleri hem TE modu hem de TM modu için tekrardan gerçekleştirilmiştir. Üretilen frekans seçici yüzeyin açısal kararlılığının fiziksel ölçüm sonuçları TE modunda Şekil 6.9'da ve TM modunda Şekil 6.10'da gösterilmektedir.

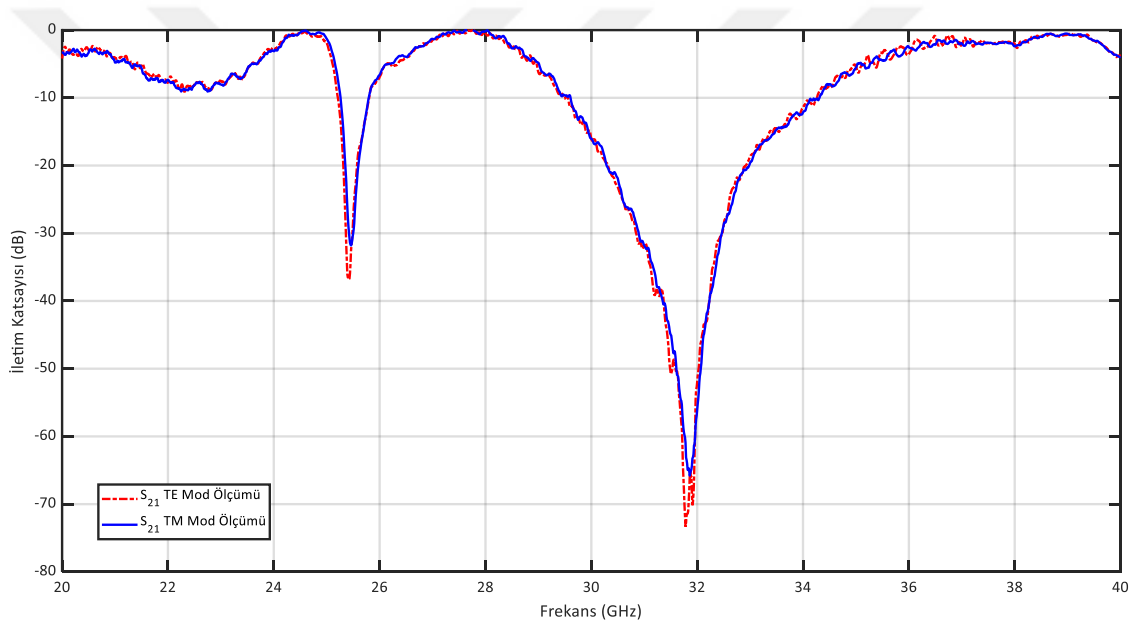


Şekil 6.9 Frekans seçici yüzeyin TE modunda açısal kararlılık ölçüm sonuçları



Şekil 6.10 Frekans seçici yüzeyin TM modunda açısal kararlılık ölçüm sonuçları

Açısal kararlılık için frekans seçici yüzeyin ölçümlerinde açı değeri 10 derecelik periyotlarla değiştirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Açısal kararlılık için ölçülen frekans seçici yüzeyin iletim katsayıları incelendiğinde, birinci rezonans frekansının 40°'ye kadar kararlı bir davranış sergilediği görülmüştür. İkinci rezonans frekansı için ise kararlılığı 20 dereceye kadar koruduğu görülmektedir. Benzetim sonuçları ile üretilen frekans seçici yüzeyin fiziksel ölçüm sonuçlarının benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Üretilen frekans seçici yüzeyin polarizasyon kararlılığını teyit etmek amacıyla fiziksel ölçüm sonuçları hem TE modu hem de TM modunda irdelenmiş ve irdelenen karşılaştırılma sonuçları Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.11 Frekans seçici yüzeyin TE ve TM modlarındaki iletim katsayıları

Şekil 6.11'de gösterilen grafik incelendiğinde tez kapsamında tasarlanan özgün frekans seçici yüzey yapısının polarizasyondan bağımsız olduğu görülmektedir. Hem TE modu hem de TM modunda yapılan ölçüm sonuçları benzer karakteristik sergilemektedir. Tez kapsamında tasarlanan frekans seçici yüzeyin benzetim programında elde edilen sonuçları ile üretilen prototipinin ölçüm sonuçlarının uyum içinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.1 Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında 5G milimetre dalga frekanslarında çalışan iki farklı özgün frekans seçici yüzey yapısı tasarlanmıştır. Bu tasarımlarda frekans seçici yüzeylerin biri çift bantlı diğeri de üç bantlı yapıya sahip olması amaçlanmıştır. Tez kapsamında hedeflenen frekans aralıklarında çalışmaları için gerekli fiziksel boyutları saptamak amacıyla analizler yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda frekans seçici yüzeyler 5G milimetre dalga frekanslarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Çift bantlı birim hücre analizinde 5G uygulamaları için tahsis edilen 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz ve 37,60–40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiş, üç bantlı birim hücre analizinde de aynı şekilde 5G uygulamaları için tahsis edilen 24,75 – 25,25 GHz bandında 500 MHz, 27,50 – 28,35 GHz bandında 850 MHz ve 37,60 – 40,00 GHz bandında 2,4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir. Ayrıca tasarlanan yapıların açısız ve polarizasyon kararlılığına sahip olması amaçlanmıştır.

Hedeflenen frekans bant aralıkları tasarlanan birim hücrelerin çalışmakta olduğu görülmüş, ayrıca çift bantlı yapı 25,7 GHz ve 38,1 GHz frekanslarında rezonansa girmekte, üç bantlı yapı ise 25 GHz, 27 GHz ve 39 GHz frekanslarında rezonansa girmektedir.

Tasarlanan iki bantlı birim hücrenin S_{11} ve S_{21} parametreleri incelendiğinde birinci rezonans bölgesi için açısız kararlılığının iyi olduğu, ikinci rezonans bölgesinde ise $\theta = 40^\circ$ üzerindeki geliş açılarında bant dışına çıktığını görülmektedir. Üç bantlı birim hücre yapısının farklı geliş açıları için yapılan benzetim sonucunda elde edilen S_{11} ve S_{21} parametreleri incelendiğinde birinci bantta hedeflenen bant genişliği $\theta = 40^\circ$ geliş açısına kadar korunmuştur. İkinci bantta ise $\theta = 20^\circ$ 'ye kadar rezonans frekansında düşük kayma gözlenirken daha yüksek geliş açılarında kayma düşük frekanslara doğru artmaktadır. Üçüncü bant aralığı için ise $\theta = 30^\circ$ 'ye kadar kararlı olduğu görülmüştür.

Birim hücrelerin TE ve TM modundaki frekans cevabının minimum etkilenmesi için orijine göre simetrik yapılar tercih edilmiştir. Bu sayede tasarlanan frekans seçici yüzeyler TE ve TM modunda benzer S_{11} ve S_{21} değişimine sahip olduğu görülmüştür. Bu da tasarlanan birim hücre yapılarının polarizasyon kararlılığını göstermektedir.

Üç rezonans frekanslı birim hücrenin yapay zekâ algoritmaları ile analizi ve sentezi yapılmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde üç rezonanslı birim hücrenin analizinde GRNN yapay sinir ağı, sentezinde GRNN sinir ağının en verimli ve en yüksek doğrulukla sonuç verdiği görülmüştür. Üç bantlı birim hücrenin 5G frekans bantlarından 24,75 – 25,25 GHz, 27,50 – 28,35 GHz ve 37,60 – 40,00 GHz frekanslarında çalışması amaçlandığından dolayı birinci bandın merkez frekansı olan 25 GHz, ikinci bandın merkez frekansı olan 27 GHz ve üçüncü bandın merkez frekansı 39 GHz senteze yönelik GRNN yapay sinir ağına girdi olarak verilmiş ve bunun neticesinde üç bantlı frekans seçici yüzeyin fiziksel boyutları elde edilmiştir. Bu incelemeler neticesinde elde edilen fiziksel boyutlar $d_{in} = 2,00 \text{ mm}$, $d_{out} = 3,00 \text{ mm}$ ve $L_b = 5,40 \text{ mm}$ değerleridir. Bu parametre değerleri ile oluşturulan frekans seçici yüzey üretilmiş ve fiziksel ölçümü yapılmıştır. Bu sayede hedeflenen bantlarda yüksek doğrulukla çalışan frekans seçici yüzeyin oluşturulmuştur.

Tez kapsamında üretimi yapılan üç bantlı özgün frekans seçici yüzeyin fiziksel ölçümleri, oluşturulan bir ölçüm düzeneği sayesinde yapılmıştır. Ölçüm düzeneği, verici (TX) horn anten, alıcı (RX) horn anten, horn antenlerin arasına konumlandırılmış frekans seçici yüzey ve vektör ağ analizör cihazından oluşmaktadır. Yapılan ölçüm neticesinde, fiziksel ölçüm sonuçlarının, CST Microwave Studio programı yardımıyla elde edilen benzetim sonuçları ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

- [1] A. Edalati, T. A. Denidni. "High-gain reconfigurable sectoral antenna using an active cylindrical FSS structure." *IEEE Transactions on antennas and propagation* 59.7, pp.2464-2472, 2011.
- [2] M. R. Silva, C. de L. Nóbrega, P. H. da F. Silva, A. G. D'Assunção "Dual-polarized band-stop FSS spatial filters using vicsek fractal geometry." *Microwave and Optical Technology Letters* 55.1, pp.31-34, 2013.
- [3] L Sun, H Cheng, Y Zhou, J Wang, "Design of a lightweight magnetic radar absorber embedded with resistive FSS." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11, pp.675-677, 2012.
- [4] T. Smith, U. Gothelf, O. S. Kim, O. Breinbjerg, "An FSS-backed 20/30 GHz circularly polarized reflectarray for a shared aperture L-and Ka-band satellite communication antenna." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62.2, pp.661-668, 2013.
- [5] A. Foroozesh, S. Lotfollah, "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, pp.258-270, 2009.
- [6] S. Cai, Q. Wang, Z. Wang, Yan-Fen Zhai, "Design of a FSS waveguide filter at 8.05 GHz." *2008 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components*. IEEE, pp.173-175, 2008.
- [7] G. Luo, W. Hong, H. Tang, J. Chen, "Filtenna consisting of horn antenna and substrate integrated waveguide cavity FSS." *IEEE transactions on antennas and propagation* 55.1, pp.92-98, 2007.
- [8] M. Li, S. Xiao, Y. Bai, B. Wang, "An ultrathin and broadband radar absorber using resistive FSS." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11, pp.748-751, 2012.
- [9] D. Singh, A. Kumar, S. Meena, V. Agarwala, "Analysis of frequency selective surfaces for radar absorbing materials." *Progress In Electromagnetics Research B* 38, pp.297-314, 2012.
- [10] F. Guidolin, M. Nekovee, "Investigating spectrum sharing between 5G millimeter wave networks and fixed satellite systems." *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, pp1-7, 2015.
- [11] M. Abdollahvand, K. Forooraghi, J. A. Encinar, Z. Atlasbaf, E. M. Rioja, "A 20/30 GHz reflectarray backed by FSS for shared aperture Ku/Ka-band satellite communication antennas." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 19.4, pp.566-570, 2020.
- [12] R. Sivasamy, L. Murugasamy, "A low-profile paper substrate-based dual-band FSS for GSM shielding." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 58.2, pp.611-614, 2016.

- [13] L. Fontoura, H. Lins, A. Bertuleza, "Synthesis of Multiband Frequency Selective Surfaces Using Machine Learning With the Decision Tree Algorithm." *IEEE Access* 9, pp.85785-85794, 2021.
- [14] R. Tempke, L. Thomas, C. Wildfire, "Machine learning approach to transform scattering parameters to complex permittivities." *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 55.4, pp.287-302, 2021.
- [15] D. Ferreira, R. Caldeirinha, I. Cuinas, "Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63.9, pp.3947-3955, 2015.
- [16] R. Mittra, C. Chan, T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review." *Proceedings of the IEEE* 76.12, pp.1593-1615, 1988.
- [17] F. Hopkinson, D. Rittenhouse. "An optical problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse." *Transactions of the American Philosophical Society* 2, pp.201-206, 1786.
- [18] B. A. Munk, New York Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, 2000.
- [19] R. Anwar, L Mao, H Ning, "Frequency selective surfaces: a review." *Applied Sciences* 8.9 (2018), pp.1689, 2018.
- [20] S. Gürdal, "5G Milimetre Dalga Uygulamaları İçin Üç Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı", Yıldız Teknik Üniversitesi, 2021.
- [21] S. Ghosh, K. Srivastava, "An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 14, pp.511-514, 2014.
- [22] K. Kandasamy, B. Majumder, "Dual-band circularly polarized split ring resonators loaded square slot antenna." *IEEE Transactions on antennas and Propagation* 64.8, pp.3640-3645, 2016.
- [23] P. Markos, C. Soukoulis, "Wave Propagation", Princeton University Press, pp.367, 2008.
- [24] N. Jacob, K. Muralidhar, K. Krishnamoorthy. "Omega shaped complementary split ring resonator loaded bandwidth reconfigurable antenna for cognitive radio applications." *Procedia Computer Science* 171, pp.1279-1285, 2020.
- [25] C. Saha, J. Y. Siddiqui, "Theoretical model for estimation of resonance frequency of rotational circular split-ring resonators." *Electromagnetics* 32.6, pp.345-355, 2012.
- [26] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. M. Sillero, F. Falcone, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. Garcia-Garcia, I. Gil, M. F. Portillo & M. Sorolla "Equivalent-circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 53, pp.1451-1461, 2005.
- [27] H. Yu, H. Lee, H. Jeon, "What is 5G? Emerging 5G mobile services and network requirements." *Sustainability*, pp.1848, 2017.

- [28] Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK), 5G ve Dikey Sektörler Raporu, 2018.
- [29] G. Liu, Y. Huang, F. Wang, J. Liu, "5G features from operation perspective and fundamental performance validation by field trial." China Communications, pp.33-50, 2018.
- [30] Recommendation ITU-R M.2083-0. "IMT Vision—Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond", pp.1-20, 2015.
- [31] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, "5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view." IEEE Access 6, pp.55765-55779, 2018.
- [32] B. Ceniklioğlu, İ. Develi, "5G ve Ötesi Sistemler için Mm-dalga İletişimi." International Conference on Human Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications. Vol. 4. No. 5., pp.208-211, 2019.
- [33] Spectrum for 5G and Beyond, <https://amta.org.au/wp-content/uploads/2021/12/AMTA-Policy-Position-Paper-Spectrum-for-5G-and-Beyond-Nov-2021.pdf>, 2021.
- [34] W.E. Chen, X.Y. Fan, L. Chen, "A CNN-based Packet Classification of eMBB, mMTC and URLLC Applications for 5G." 2019 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications (ICEA). IEEE, pp140-145, 2019.
- [35] Who is leading the 5G patent race?, <https://www.iam-media.com/article/-/who-leading-the-5g-patent-race-1> , 01.06.2022.
- [36] Why EU 5G Success Will Require Radio Frequency Filter Innovation, www.eetimes.eu/why-eu-5g-success-will-require-rf-filter-innovation/, 04.04.2022
- [37] 5G RF Filters Need More Innovation, www.5gtechnologyworld.com/5g-rf-filters-need-more-innovation/, 05.05.2021
- [38] Qualcomm Announces New RF Filter Technology to Enable Next Generation 5G and Wi-Fi Solutions, <https://www.qualcomm.com/news/releases/2021/10/qualcomm-announces-new-rf-filter-technology-enable-next-generation-5g>, 19.10.2021
- [39] A. Kocakaya, G. ÇAKIR, S. Çimen. "Açı ve Polarizasyondan Bağımsız Ultra Geniş Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı" Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 35.1, pp.287-296, 2020.
- [40] S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", Prentice Hall, ISBN 0-13-273350-1, 1998.
- [41] J.P. Kelwade, S.S. Salankar "A General Regression Neural Network." IEEE Transactions On Neural Networks vol. 2,6: 568-76. doi:10.1109/72.97934, pp.454-458, 1991.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

- [1] U. Şahin, N. Türker Tokan, “5G Milimetre Dalga Uygulamaları için Çift Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı”, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2022), pp.105-106.

Projeler

- [1] N. Türker Tokan, R. Acar Vural, U. Şahin, E. S. Serinken, “Üç Bantlı Milimetre Dalga Frekans Seçici Yüzeylerin Yapay Zekâ Algoritmaları ile Analizi ve Sentezi”, FBA-2021-4747, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, 07.12.2021-22.12.2022.

Ödüller

- [1] U. Şahin, N. Türker Tokan, “5G Milimetre Dalga Uygulamaları için Çift Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı”, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2022), En İyi Öğrenci Bildirisi Ödülü.