

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK SEVİYELİ MODÜLASYON TÜRLERİ  
KULLANAN OFDM-İM HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN  
SÖNÜMLÜ KANALLARDAKİ BAŞARIM ANALİZİ**

**Hazırlayan  
Senem CÖNGER**

**Danışman  
Prof. Dr. İbrahim DEVELİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Ocak 2023  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK SEVİYELİ MODÜLASYON TÜRLERİ  
KULLANAN OFDM-İM HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN  
SÖNÜMLÜ KANALLARDAKİ BAŞARIM ANALİZİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Hazırlayan  
Senem CÖNGER**

**Danışman  
Prof. Dr. İbrahim DEVELİ**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından FYL-2022-11728 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ocak 2023  
KAYSERİ**

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Senem Cönger

**“Yüksek Seviyeli Modülasyon Türleri Kullanan OFDM-IM Haberleşme Sistemlerinin Sönümlü Kanallardaki Başarım Analizi”** adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

**Hazırlayan**

Senem CÖNGER

**Danışman**

Prof. Dr. İbrahim DEVELİ

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı**

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İbrahim Develi'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam boyunca bana verdiği katkılardan ve desteklerden ötürü hocam Sayın Arş. Gör. Büşra Ceniklioğlu'na teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bana güvenen ve benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (FYL-2022-11728) teşekkür ederim.

Senem CÖNGER

Ocak 2023, KAYSERİ

# YÜKSEK SEVİYELİ MODÜLASYON TÜRLERİ KULLANAN OFDM-IM HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN SÖNÜMLÜ KANALLARDAKİ BAŞARIM ANALİZİ

Senem CÖNGER

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2023  
Danışman: Prof. Dr. İbrahim DEVELİ

## ÖZET

Çok taşıyıcılı iletim, son yıllarda geniş bant sayısal iletişim için birçok kablosuz standartta kullanılan önemli bir teknoloji haline gelmektedir. Dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM), kablosuz iletişim sistemlerinde en popüler çok taşıyıcılı iletim tekniği olmuştur. Alternatif olarak, kablosuz iletişim sistemlerinde, aktif anten indislerini ek bilgi bitlerini iletmek için kullanan indis modülasyonu (IM), yüksek spektral ve enerji verimliliğine sahip yeni bir sayısal modülasyon şemasıdır. İndis modülasyonu ile dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM-IM), spektral ve enerji verimliliği açısından iyi performans gösterebilen bir modülasyon tekniğidir. M'li karesel genlik modülasyonu (M-QAM) seviyesinin artmasıyla birlikte bant genişliği verimliliği artar. Bu tez çalışmasında, Nakagami- $m$  ve Weibull sönümlü kanallar üzerinden yüksek seviye modülasyonlu (16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM gibi) OFDM-IM sistemleri ele alınmış ve incelenmiştir. Sistem performansı, bilgisayar benzetimleri kullanılarak ve ortalama bit hata oranı (ABER) dikkate alınarak analiz edilmiştir. Her bir sönümlü kanal için modülasyon seviyesi arttıkça ABER değerinin de arttığı gözlemlenmektedir. Sonuçlar, yüksek seviyeli modülasyonun bant genişliği verimliliğini artırdığını, bununla beraber beklendiği üzere ABER değerini de yükselttiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dik frekans bölmeli çoğullama, İndis Modülasyonu, Yüksek seviyeli modülasyon, Nakagami- $m$  sönümlü kanal, Weibull sönümlü kanal

**PERFORMANCE ANALYSIS OF OFDM-IM COMMUNICATION SYSTEMS  
THAT EMPLOY HIGH LEVEL MODULATION TYPES OVER FADING  
CHANNELS**

**Senem CONGER**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Master Thesis, January 2023  
Supervisor: Prof. Dr. Ibrahim DEVELI**

**ABSTRACT**

In recent years, multi-carrier transmission is becoming an important technology used in many wireless standards for broadband digital communication. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) which is utilized the most popular multicarrier transmission technique in wireless communication systems. Alternatively, index modulation (IM), in which the indices of the building blocks of the considered wireless communication systems are used to convey additional information bits, is a novel digital modulation scheme with high spectral and energy efficiency. Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM) is a modulation technique that can outperform spectral and energy efficiency.  $M$  is the size of the considered signal constellation such as  $M$ -ary quadrature amplitude modulation ( $M$ -QAM). Increasing  $M$  causes the modulation level to increase, and high-level modulation increases bandwidth efficiency. This thesis investigates OFDM-IM systems with high level modulations (such as 16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM) over Nakagami- $m$  and Weibull fading channels. The system performance is analyzed by considering the average bit error rate (ABER) by utilizing computer simulations. We observed that the ABER value increased as the modulation level increased for each fading channel. The results show that high-level modulation increases bandwidth efficiency but also increases the ABER value.

**Keywords:** Orthogonal frequency division multiplexing, Index Modulation, High-level modulation, Nakagami- $m$  Fading Channel, Weibull Fading Channel.

## İÇİNDEKİLER

### YÜKSEK SEVİYELİ MODÜLASYON TÜRLERİ KULLANAN OFDM-İM HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN SÖNÜMLÜ KANALLARDAKİ BAŞARIM ANALİZİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY .....	iv
ÖNSÖZ .....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiv
GİRİŞ .....	1

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler.....	3
1.2. Tezin Amacı ve Önemi .....	4
1.3. Literatür Değerlendirmesi.....	5

## 2. BÖLÜM

### BEŞİNCİ NESİL (5G) HABERLEŞME SİSTEMLERİ

2.1.Kablosuz Haberleşmenin Tarihçesi.....	6
2.2. 5G Teknolojisi .....	8
2.3. 5G Ağ Mimarisi.....	10
2.4. 5G Kullanım Deneyimleri.....	11

2.5. 5G Kullanım Alanları.....	12
--------------------------------	----

### 3. BÖLÜM

#### YÖNTEM VE MATERYAL

3.1 OFDM Tekniği .....	15
3.2 İndis Modülasyonu.....	18
3.3 OFDM-IM Sistemi .....	21
3.4 Sönümlü Kanal Modelleri.....	26
3.4.1 Rayleigh Sönümlü Kanal Modeli .....	27
3.4.2 Rician Sönümlü Kanal Modeli .....	28
3.4.3 Nakagami- $m$ Sönümlü Kanal Modeli.....	29
3.4.4 Weibull Sönümlü Kanal Modeli.....	29
3.5 M-QAM.....	30

### 4. BÖLÜM

#### OFDM-IM DONANIM TASARIMI VE FPGA UYGULAMASI

4.1 FPGA'lara Genel Bakış .....	31
4.2 VHDL Programlama Dili.....	32
4.3 FPGA Uygulaması ve Benzetim Sonuçları.....	33

### 5. BÖLÜM

#### BENZETİM SONUÇLARI

5.1 Farklı Seviyeli M-QAM Kullanan Nakagami- $m$ ve Weibull Sönümlü Kanallarına Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları .....	35
5.2 Nakagami- $m$ ve Weibull Sönümlü Kanallarında Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları.....	37
5.3 Nakagami- $m$ ve Weibull Sönümlü Kanallarında Toplam Aktif Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları .....	38

<b>5.4 Farklı Seviyeli M-QAM Kullanan Rayleigh ve Rician Sönümlü Kanallarına Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları.....</b>	<b>40</b>
<b>5.5 Rayleigh ve Rician Sönümlü Kanallarında Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları.....</b>	<b>41</b>
<b>5.6 Rayleigh ve Rician Sönümlü Kanallarında Toplam Aktif Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları .....</b>	<b>43</b>

## **6. BÖLÜM SONUÇLAR**

<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>47</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>51</b>
<b>YAYINLAR.....</b>	<b>51</b>

## KISALTMALAR

5G:5. Nesil

ABER: Ortalama Bit Hata Oranı

AWGN: Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü

BER: Bit Hata Oranı

BPSK: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama

BS: Baz İstasyonu

CP:Çevrimsel Önek

D2D: Cihazdan Cihaza İletişim

DFT:Ayrık Fourier Dönüşümü

FDM:Frekans Bölmeli Çoğullama

FFT:Hızlı Fourier Dönüşümü

FPGA:Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri

HPA:Yüksek Güçlü Kuvvetlendirici

IDFT:Ters Ayrık Fourier Dönüşümü

IFFT:Ters Hızlı Fourier Dönüşümü

IM: İndis Modülasyonu

ISI: Semboller Arası Girişim

LOS: Görüş Hattı

LTE: Uzun Vadeli Evrim

MIMO:Çok Girişli Çok Çıkışlı Mimari

M-QAM:M'li Karesel Genlik Modülasyonu

M-PSK:M-li Faz Kaydırmalı Anahtarlama

ML: En Büyük Olabilirlikli Sezici

MMS: Çoklu Ortam Mesajları

OFDM: Dik Frekans Bölmeli Çoğullama

OFDM-IM: İndis Modülasyonu ile Dik Frekans Bölmeli Çoğullama

PAPR: Tepe Ortalama Güç Oranı

PDF:Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu

PSK: Faz Kaydırmalı Anahtarlama

QAM: Karesel Genlik Modülasyonu

RTL: Saklayıcı Transfer Seviyesi

RF: Radyo Frekansı

SNR: İşaret/Gürültü Oranı

SM: Uzaysal Modülasyon

SMS: Kısa Mesaj Servisi

VHDL: Çok Yüksek Hızlı Entegre Devre Donanım Tanımlama Dili

VLC: Görünür Işık İletişimi

UWB: Ultra Geniş Bant



## TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Dört verici antene sahip olan SM sisteminin verici anten seçim tablosu ..... 20



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 4G ve 5G Teknolojilerinin Karşılaştırılması .....	8
Şekil 2.2 5G Teknolojisinin Hayatımıza Getireceği Yenilikler .....	9
Şekil 2.3 5G Kullanım Alanları .....	13
Şekil 3.1 FDM Sisteminde Dik Alt Taşıyıcıların Yerleşimi.....	15
Şekil 3.2 OFDM Sisteminde Dik Alt Taşıyıcıların Yerleşimi .....	16
Şekil 3.3 OFDM sisteminde verici ve alıcı birimlerine ait blok diyagram.....	17
Şekil 3.4 SM Sistem Modeli .....	19
Şekil 3.5 OFDM-IM Verici Sistem Modeli .....	21
Şekil 3.6 OFDM-IM Alıcı Sistem Modeli .....	25
Şekil 4.1 OFDM-IM Sisteminin RTL Devre Şemasına Ait Ekran Görüntüsü .....	34
Şekil 4.2 OFDM-IM Sisteminin Benzetim Sonuçlarına Ait Ekran Görüntüsü .....	34
Şekil 5.1 Nakagami- $m$ sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması.....	35
Şekil 5.2 Weibull sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması.....	36
Şekil 5.3 Nakagami- $m$ sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	37
Şekil 5.4 Weibull sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	38
Şekil 5.5 Nakagami- $m$ sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	39
Şekil 5.6 Weibull sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	39
Şekil 5.7 Rayleigh sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması.....	40
Şekil 5.8 Rician sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması.....	41
Şekil 5.9 Rayleigh sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	42

Şekil 5.10 Rician sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	42
Şekil 5.11 Rayleigh sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	43
Şekil 5.12 Rician sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması.....	44



## GİRİŞ

Son zamanlarda kablosuz iletişim sistemlerini kullanan uygulamaların yaygınlaşması ile kullanıcı sayısında ve veri trafiğinde büyük bir artış yaşanmaktadır. Bu artıştan dolayı yeni nesil haberleşme sistemleri için bant verimliliği, kanal kapasitesi ve enerji verimliliğine sahip yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Yüksek veri hızı, düşük gecikme süresi ve enerji tüketimi gibi gereksinimler ortaya çıkmaktadır. Bu gereklilikleri karşılamak için Long-Term Evolution (LTE), LTE Advanced ve 5G gibi birçok kablosuz iletişim standardında ortogonal frekans bölme (OFDM) tekniği kullanılmaktadır. OFDM, kablosuz kanalın frekans seçiciliğinin neden olduğu semboller arası girişimle etkili bir şekilde mücadele edebilir.

Haberleşme sisteminin ana bileşenlerinin indislerini kullanarak ek bilgi iletimini sağlayan IM, yeni nesil haberleşme sistemleri için enerji ve bant verimliliği olan tekniklerden biridir. Geleneksel iletişim sistemlerine kıyasla bilgi iletiminin modern yollarını dikkate alan indis modülasyonu (IM) teknikleri, donanım basitliğinin yanı sıra spektral ve enerji verimliliği açısından sundukları ilgi çekici avantajlar nedeniyle yeni nesil kablosuz ağlar için rekabetçi adaylar olarak görünmektedir [1]. IM sistemleri, iletim için sinüzoidal bir taşıyıcı sinyalin genlik/faz/frekans modülasyonuna bağlı olan geleneksel sayısal modülasyon şemalarının aksine, bilgi iletmek için farklı yollar üretir. IM, bilgi bitlerinin iletiminde yapılan modülasyonlara göre yenilikçi bir çözüm sunar. Başka bir deyişle IM tekniği, bilgi bitlerinin iletimine yepyeni bir boyut katar.

IM tekniğinde bilgi biti iletimi için kullanılan aktif anten indis prensibi, OFDM tekniğinde alt taşıyıcılar için uygulanabilir. İndis modülasyonu ile ortogonal frekans bölme (OFDM-IM), IM kavramını kullanarak spektral ve enerji verimliliği açısından klasik OFDM modülasyonunu geride bırakabilen bir modülasyon tekniğidir. Bu sistemin klasik OFDM'den en çarpıcı farkı, bilgi bitlerinin aktif alt taşıyıcıların indisleri ile iletilmesidir.

Klasik OFDM sistemlerinde, BPSK (ikili faz kaydırmalı anahtarlama) gibi farklı sayısal modülasyon teknikleri ve farklı düzey karesel genlik modülasyonu (M-QAM) (burada

M, takımyıldız boyutudur), sabit sayıda bilgi bitini bir sinyal takımyıldızı sembolüne eşler [2]. OFDM-IM'de bilgi, yalnızca M-ary sinyal takımyıldızları tarafından değil, aynı zamanda gelen bilgi bitlerine göre aktif olan alt taşıyıcıların indisleri tarafından da iletilir [3]. İndis modülasyonu ile OFDM, klasik OFDM'de olduğu gibi M-li sinyal takımyıldızları tarafından bilgi taşınması dışında, aktif alt taşıyıcıları seçerek ek bilgi bitlerini iletir [4]. Alt taşıyıcıların alt kümesi, gelen bilgi bit dizisine göre M-li sembollerini taşımak üzere etkinleştirilirken, alt taşıyıcıların geri kalanı etkin değildir [5]. Artan M, modülasyon seviyesinin artmasına neden olur ve yüksek seviyeli modülasyon, bant genişliği verimliliğini artırır.

Bu tez çalışmasında, Nakagami- $m$  ve Weibull sönümlü kanallar üzerinden yüksek seviye modülasyonlu (16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM gibi) OFDM-IM sistemleri ele alınmış ve incelenmiştir. Sistem performansı, bilgisayar benzetimleri kullanılarak ve ortalama bit hata oranı (ABER) dikkate alınarak analiz edilmiştir.

Tezin 1. bölümünde genel bilgiler ve literatür değerlendirilmesine yer verilmiştir. 2. bölümde 5G haberleşme sistemlerinin ağ mimarisi ve kullanım alanlarına detaylı bir şekilde değinilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan yöntem ve materyallere 3. bölümde değinilirken 4. bölümde OFDM-IM donanım tasarımı ve FPGA uygulaması konusu işlenmiştir. Son olarak 5. bölümde ABER bilgisayar benzetim sonuçları yorumlanmıştır.

# 1. BÖLÜM

## GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 1.1. Genel Bilgiler

Dünya genelinde akıllı cihaz sayısının hızla artması, teknolojik gelişmeler, kullanıcıların hız, kapasite ve kapsama kalitesini artırma talepleri gibi etkenler kablosuz iletişim teknolojilerinde yeni gelişmeleri de beraberinde getirmektedir. Dünyanın çeşitli ülkelerindeki mobil kullanıcı, telekomünikasyon şirketi ve operatör sayısındaki bu devasa artış, yeni kablosuz teknolojinin gerektirdiği yüksek veri hızlarına ve mobiliteye ulaşmak için beşinci nesil (5G) kablosuz sistemler üzerindeki çalışmaları yoğunlaştırmıştır. 5G teknolojisinin kullanıma sunulmasıyla, muazzam bant genişliği ve önemli ölçüde daha düşük gecikme süresi ile çok daha yüksek veri hızlarına ulaşılabilecektir [4]. Son birkaç yıldır kablosuz ağlar için değişken dalga biçimleri hakkında uzun tartışmalardan sonra, OFDM tekniği Long-Term Evolution (LTE), LTE Advanced ve 5G gibi birçok kablosuz iletişim standardında kullanılmaktadır. Farklı frekans aralıklarına sahip OFDM sinyallerinin bir arada kullanılarak 5G'nin bir dalga formu olarak standardize edilmesine karar verilmiştir [3].

İndis modülasyonu (IM) tekniği, klasik modülasyonlara kıyasla bilgi bitlerinin iletimi için yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Seçilen indise göre iletim ünitelerinin açık/kapalı durumları belirlenerek açık iletim ünitesi üzerinden iletim gerçekleştirilmektedir. Başka bir deyişle IM, bit bilgisinin iletimine yepyeni bir boyut katmaktadır. İletim birimi sayısına bağlı olarak, eklediği yeni boyut sayesinde geleneksel modülasyon türlerine göre bant verimi oldukça iyidir. Ayrıca, bir iletim süresi boyunca iletim birimlerinden biri veya birkaçı aktif, diğerleri pasif olacak şekilde ayarlandığı için iletim enerjisi daha verimli kullanılmaktadır. Sonuç olarak IM, donanım karmaşıklığını artırmadan yüksek enerji ve bant verimliliği sağlamaktadır [6]. Öte yandan, OFDM'in geliştirilmiş bir

modülasyon tekniği olan, yeni nesil haberleşme sistemleri için OFDM-IM önerilmiştir [3, 4, 5, 7]. Klasik OFDM'den farklı olarak OFDM IM, bilgileri taşımak için aktif alt taşıyıcıları ve bu taşıyıcıların indislerini kullanmaktadır. Bu sayede tüm alt taşıyıcıları aktif olarak kullanmadan klasik OFDM gibi tam spektrum veriminde iletim yapmak mümkün hale gelmektedir. OFDM-IM, M-ary karesel genlik modülasyonu (M-QAM) tekniklerini kullanarak bilgi iletmeye ek olarak, aktif alt taşıyıcıların seçimi yoluyla ek bilgi bitlerini iletmeye potansiyeline sahiptir. Burada M, karesel genlik modülasyonunun derecesini ifade etmektedir [7]. Artan M, her sembol için daha fazla bilgi bitinin iletilmesine izin veren spektral etkinliğin artmasına neden olmaktadır.

## 1.2. Tezin Amacı ve Önemi

Son dönemlerde kablosuz iletişim sistemlerini kullanan uygulamaların çoğalmasıyla birlikte kullanıcı sayısında ve veri trafiğinde devasa bir artış meydana gelmiştir. Nesnelerin interneti, araçlar arası haberleşme gibi ileri nesil kablosuz iletişim uygulamalarının yakın gelecekte gündelik hayata girmesi ön görülmektedir. Günden güne artan talebe karşın, frekans spektrumu ve fiziksel donanım gerçekleştirmeleri göz önüne alındığında mevcut kaynaklar kısıtlı kalmaktadır. Gelecek nesil iletişim sistemlerinde; bu gibi kaynak kısıtlamaları altında yüksek bant verimliliği, kanal kapasitesi ve enerji verimliliğine sahip yöntemler geliştirmek hedeflenmektedir [3]. Özellikle 5G vizyonunun tanımlanmasıyla birlikte yüksek veri hızı, düşük gecikme ve enerji tüketimine sahip sistemlere duyulan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak için OFDM tekniği; Wi-Fi, LTE, LTE Advanced ve 5G New Radio (NR) gibi birçok kablosuz haberleşme standardında kullanılmaktadır. OFDM tekniği sayesinde frekans seçici kanallarda meydana gelen simgeler arası girişimin etkisini azaltmak mümkün olmaktadır. Ayrıca hızlı fourier dönüşümü (fast fourier transform) (FFT) bloğu sayesinde OFDM tekniği daha basit donanımlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca çoklu-giriş çoklu-çıkış (multiple-input multiple-output, MIMO) teknikleri de artan hız ihtiyacını karşılamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son dönemlerde klasik MIMO yapılarına alternatif olarak uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) tekniği araştırılmaktadır [3, 4, 8]. Klasik SM tekniğinde her iletim aralığında sadece bir tane anten aktiftir. Bu teknik, bilgi bitlerinin iletimi için hem klasik genlik ve faz modülasyonlarını kullanırken hem de aktif anten indisinden

yararlanmaktadır. SM tekniğinde bilgi biti iletimi için kullanılan aktif anten indisi prensibi OFDM tekniğinde alt taşıyıcılar için uygulanabilir. OFDM-IM tekniği bilgi iletimi için hem klasik genlik ve faz modülasyonlarını hem de gelen bilgi bitlerine göre belirlenen aktif alt taşıyıcı indislerini kullanmaktadır. OFDM-IM tekniği bilgi iletiminde indis modülasyonundan yararlandığı için aynı bant verimliliği altında bit hata oranı (bit error rate, BER) performansı OFDM tekniğinden daha iyidir [1].

Bu tez çalışmasında; OFDM-IM haberleşme sistemlerinin, yüksek seviyeli klasik genlik (8QAM, 16QAM, 64QAM, 128QAM ve 256QAM gibi) modülasyonları ile Weibull ve Nakagami- $m$  gibi farklı sönümlü kanallardaki başarımların analizleri Matlab ortamında simüle edilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

### 1.3. Literatür Değerlendirmesi

Çok taşıyıcılı iletim sayısal iletişimde öncü bir teknoloji olmuş ve günümüzde birçok kablosuz iletişim standartlarında yerini almıştır. OFDM ise en yaygın olarak kullanılan çok taşıyıcılı iletim sistemidir [5,7, 9]. MIMO sistemler için önerilen ve anten indisleriyle bilgi iletimi sağlayan IM tekniği de son yıllarda araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiştir [1, 3, 4, 8]. IM tekniğinden esinlenerek frekans seçici bir Rayleigh sönümlü kanal için OFDM-IM olarak adlandırılan yeni bir haberleşme sistemi önerilmiştir. OFDM-IM haberleşme sisteminin Rayleigh sönümlü kanal üzerinden ortalama bit hata olasılığı analitik olarak elde edilmiştir. OFDM-IM haberleşme sistemi için benzetim sonuçları sunulmuş ve önerilen bu sistem klasik OFDM ile karşılaştırılmıştır. Tüm benzetimlerde BPSK modülasyonu kullanılmıştır. Bilgisayar benzetimleri ve teorik analizler sonucu OFDM-IM haberleşme sisteminin klasik OFDM'den oldukça iyi hata başarımı sağladığı gösterilmiştir [5, 7, 9]. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) tabanlı OFDM sisteminde Doppler frekansının Rayleigh sönümleme kanalı üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Bu çalışmada, OFDM'in performansı üzerindeki çok yönlü sönümleme kanalı etkisi ve Bit hata Oranı (BER), kullanıcının hareketliliğinin dikkate alındığı durumlar için araştırılmıştır. Rayleigh sönümleme kanallı OFDM sistemi üzerindeki Doppler frekans etkisini anlamak için Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK) modülasyonu tekniği kullanılırken, Rayleigh ve AWGN kanallı OFDM sisteminde BER performansını incelemek için QAM modülasyonu kullanılmıştır. Her iki kanalın performansına bakıldığında, QAM modülasyonunun

diğer modülasyonlardan daha iyi olduğu görülmüştür [10]. Doppler frekans arttıkça BER değerinin yüksek oranda etkilendiği ve sistem performansının düştüğü görülmüştür [10]. OFDM-IM haberleşme sistemlerinin; 4-QAM ve 16-QAM modülasyonları ile Rayleigh kanalındaki başarımları analizleri Matlab ortamında simüle edilmiştir. OFDM-IM için bit hata oranı (bit error rate, BER) ve Spektral Verimlilik (Spectral Efficiency, SE) gibi performans parametreleri belirlenip analiz edilmiştir ve OFDM ile karşılaştırılmıştır [11]. OFDM-IM sisteminin OFDM sistemine göre bit hata oranı performansının daha iyi olduğu ve spektral verimliliğinin arttığı görülmüştür [11]. OFDM-IM haberleşme sistemlerinin; 4-QAM ve BPSK modülasyonları ile Rician kanalındaki başarımları analizleri Matlab ortamında simüle edilmiştir [12]. Bahsedilen tüm çalışmalar, düşük seviyeli modülasyonda OFDM-IM sisteminin performansını araştırmıştır. Ancak, OFDM-IM sistemlerinin performansını, yüksek seviyeli modülasyon kullanımının nasıl etkileneceği henüz keşfedilmemiştir. Literatürde; OFDM-IM haberleşme sistemlerinin, yüksek seviyeli klasik genlik (8QAM, 16QAM, 64QAM gibi) ve faz (BPSK, QPSK gibi) modülasyonları kullanılarak Weibull ve Nakagami- $m$  gibi farklı sönümlü kanallardaki hata başarımları analizi gerçekleştiren bir çalışma bulunmamaktadır [5, 7, 9, 11]. Bu hususlar göz önünde bulundurularak bu tez çalışmasında, Weibull ve Nakagami- $m$  gibi popüler sönümlü kanallar üzerinden üst düzey modülasyonlar (16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM gibi) kullanan OFDM-IM sistemlerinin performansını inceleyerek literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

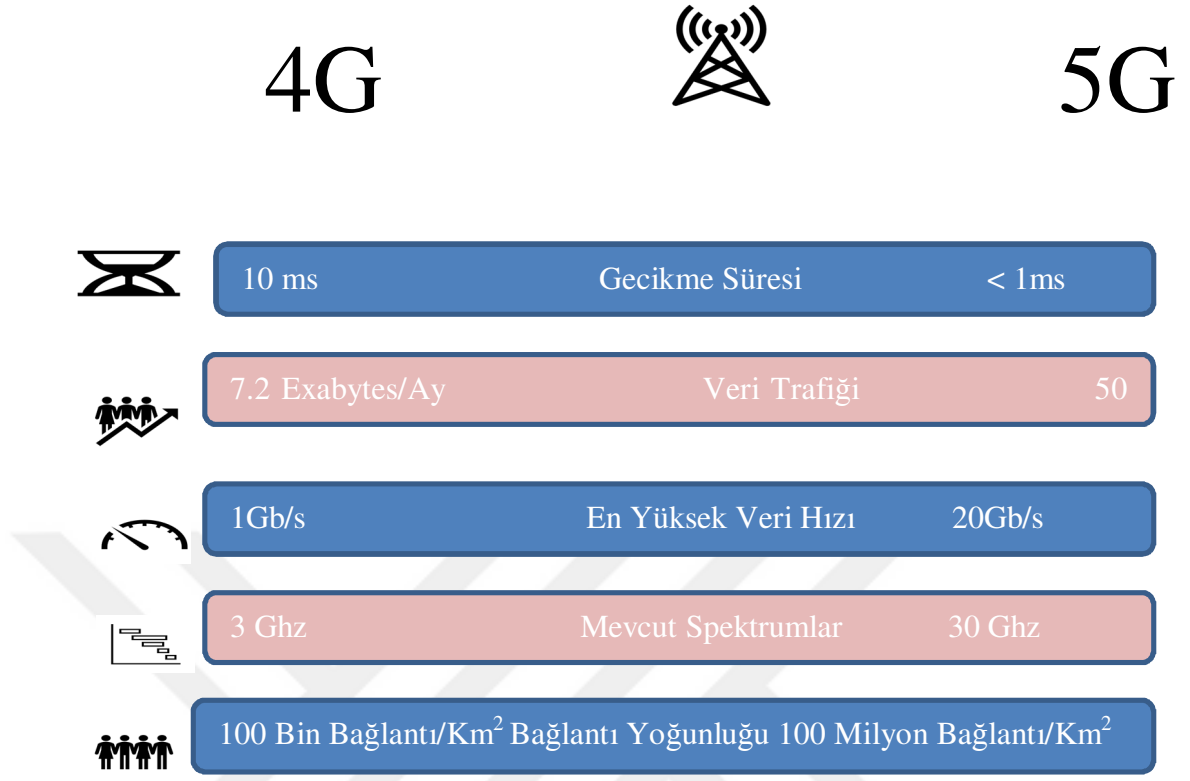
## 2. BÖLÜM

### BEŞİNCİ NESİL (5G) HABERLEŞME SİSTEMLERİ

#### 2.1. Kablosuz Haberleşmenin Tarihçesi

Günümüzde gezgin ve yeni nesil haberleşme teknolojilerine duyulan gereksinimlerin artmasıyla birlikte haberleşme teknolojileri her geçen gün gelişme göstermektedir. Bu gelişmelere uyum sağlamak için mevcut teknolojilerin geliştirilmesi tüm dünyada kaçınılmaz bir hal almıştır. Gezgin haberleşme teknolojilerinin zamanla gelişimi, 1G teknolojisinin hayatımıza girmesiyle başlamıştır. Tamamen analog sistem olan 1G hücreli sistem, sistem tipine ve hizmetlere bağlı olarak 10 ila 30 Khz arasında değişen bir bant genişliğine sahiptir. Sunulan veri hızları, analogdan sayısala dönüşümden sonra yaklaşık 10kbps idi. 1G sadece ses hizmetleri için uygundur. Sayısal iletişim, kablosuz iletişim kalitesini önemli ölçüde artıran 2G ile hayatımıza girerek analog teknolojinin yerini almıştır. 2. nesil sistemlerde kullanılan GSM, en başarılı ve en yaygın kullanım alanına sahip standarttır. 2G ağlarının öncekilere göre temel avantajı, telefon konuşmalarının sayısal olarak şifrelenmiş olmasıydı [13]. 2G sistemleri, çok daha yüksek cep telefonu penetrasyon seviyelerine izin veren spektrumda önemli ölçüde daha verimliydi. 2G, Kısa Mesaj Servisi (SMS) metin mesajlarından başlayarak mobil cihazlar için veri servislerini tanıttı. Ayrıca 2G teknolojileri; çeşitli cep telefonu ağlarının metin mesajları, resimli mesajlar ve çoklu ortam mesajları (MMS) gibi hizmetleri sunmasını sağladı. 2G üzerinden gönderilen tüm metin mesajları sayısal olarak şifrelenir ve verilerin yalnızca istenen alıcının alıp okuyabileceği şekilde aktarılmasına izin verilir. Bu nesilde iki sayısal modülasyon şeması kullanılmaktadır; biri TDMA ve ikincisi CDMA'dır. Abonenin şebeke içinde veya diğer şebekelerde bulunan aboneler ile bağlantısını sağlayan ve abonelik işlemlerini yürüten şebeke parçası, çekirdek şebeke olarak adlandırılmaktadır. GSM, devre anahtarlamalı bir çekirdek şebekeye sahiptir. Mevcut hücreli şebekenin devre anahtarlamalı yapısından

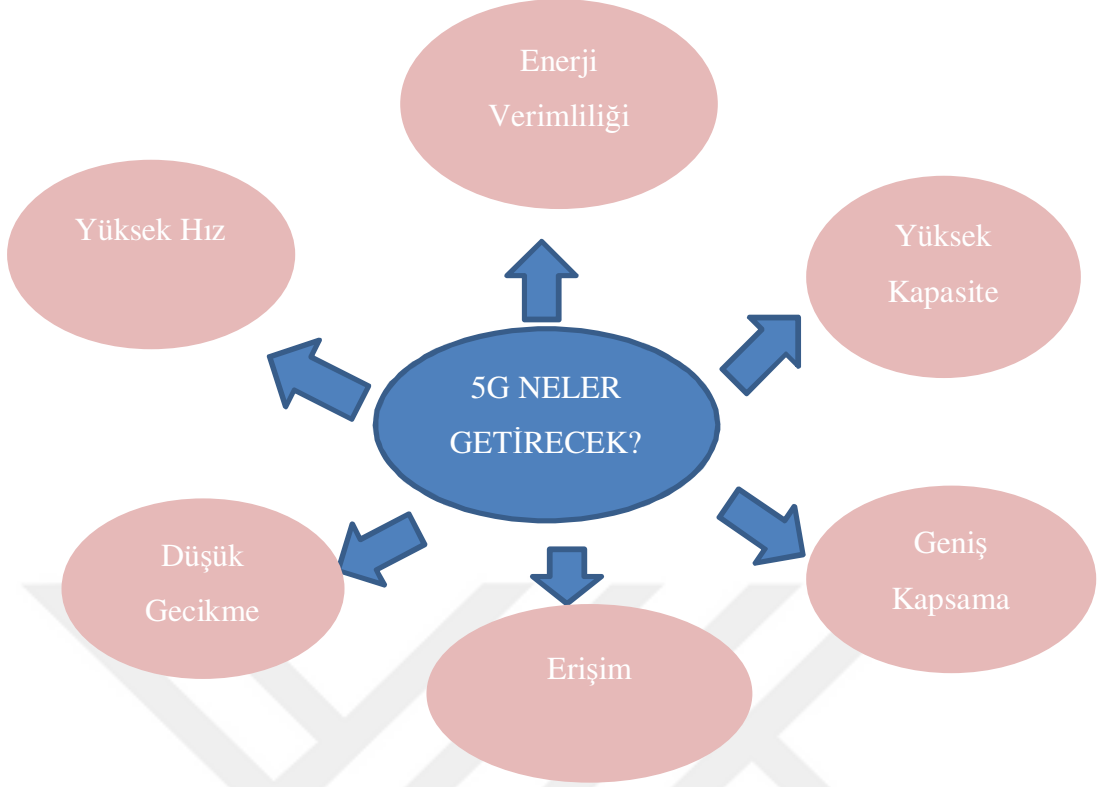
dolayı tüm trafik kanalı bir tek kullanıcı tarafından işgal edilir. Bu durum sınırlı olan radyo kanalı kaynaklarının verimsiz kullanımına sebep olur. Bunun yanında paket anahtarlamalı şebekede trafik kanalı sadece ihtiyaç duyulduğunda işgal edilir, veri iletimi gerçekleştikten hemen sonra serbest kalır. Dolayısıyla pek çok kullanıcı istatistiksel çoğullama ile aynı fiziksel kanalı paylaşabilir. Ücretlendirme açısından da mevcut şebekeler, kanalın meşgul edilme süresi ile orantılı olarak ücretlendirildiği için kullanıcı açısından dezavantajlıdır. Paket Anahtarlamalı şebekede ise ücretlendirme transfer edilen veri miktarı üzerinden yapılır. Bu da sürekli hatta kalmayı olanaklı kılar. İnternetin geldiği nokta, paket anahtarlamalı teknolojilerdeki gelişme, gezgin haberleşmeye olan ilginin beklenenin çok üzerinde olması 3. Nesil haberleşme sistemlerine geçişin nedenlerini oluşturmaktadır [13]. Üçüncü nesil (3G) teknolojilerinde sesli iletişime ek olarak veri iletişimi de ana odak noktası olmuştur ve hem ses hem de veri iletişimini sağlayan bir ağ ortaya çıkmaktadır. 3G sistemler için, ilk aşamada 2 Mbps ile başlayan en yüksek veri hızı, 5 MHz'lik sabit geniş bant genişliğinde 50 Mbps'ye yaklaşmıştır. Üçüncü nesil sistemler, kod bölmeli çoklu erişim yöntemiyle sürekli servis sağlamasının yanı sıra hem devre anahtarlamalı ve hem de paket anahtarlamalı servisleri desteklemektedir. Dünya çapında yaygın kullanımı olan, Long-Term Evolution (LTE) ve onun daha gelişmiş olan LTE-Advanced sistemleri, 4G sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. 4G sistemi, 3G teknolojisinin sunduğu hizmetlere ek olarak, kablosuz modemli dizüstü bilgisayarlara, akıllı telefonlara ve diğer mobil cihazlara mobil geniş bant internet erişimi sağlar. Dördüncü nesil sistemler, modülasyon tekniği olarak OFDM kullanırlar. 4G kablosuz ağlar, yerel kablosuz erişim gibi düşük mobilite için 1 Gb/s, yüksek mobilite için 100 Mb/s veri hızlarını destekleyebilir [14]. Bu gelişmelere paralel olarak, her yıl mobil genişbant sistemlerine abone olan kullanıcı sayısında önemli bir artış yaşanmaktadır. Yeni kablosuz uygulamalarla birlikte daha yüksek veri hızı, daha geniş ağ kapasiteleri, daha iyi kapsama alanı, daha yüksek spektral verimlilik ve yüksek mobilite gereksinimleri de ortaya çıkmaktadır. Bu gereksinimler 5G haberleşme teknolojilerine olan yönelimi arttırmıştır. Şekil 2.1.'de 4G ve 5G teknolojilerinin karşılaştırılması görülmektedir [14, 15].



Şekil 2.1 4G ve 5G teknolojilerinin karşılaştırılması

## 2.2. 5G Teknolojisi

Dünya genelinde akıllı cihaz sayısındaki hızlı artış, teknolojik gelişmeler; kullanıcıların hız, kapasite ve kapsama kalitesinin artması yönündeki talepleri gibi etkenler mobil genişbant teknolojilerindeki yeni gelişmeleri beraberinde getirmektedir. İnternete bağlı cihaz sayısındaki hızlı artış, makineden makineye (Machine to Machine - M2M) uygulamaları, IoT, haberleşme cihaz ve ekipmanlarındaki enerji verimliliği, artan hız ve kapasite talebi, 5G ve ötesini gündeme getirmiştir. 5G teknolojisi, kullanıcılara zengin bir yüksek kaliteli kişiselleştirilmiş hizmetler yelpazesini desteklemek için büyük veri bant genişliği, sonsuz ağ oluşturma yeteneği ve kapsamlı sinyal kapsamı sağlamayı amaçlar. 5G hücreli teknolojisi, özellikler ve performans açısından LTE'den daha iyi performans göstermektedir. 4G hücreli ağlarıyla karşılaştırıldığında, 5G'nin kilometre kare başına önemli ölçüde daha yüksek cihaz yoğunluğuna, çok daha düşük gecikme süresine ve çok daha yüksek sistem kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Artan sistem kapasitesi, muazzam sayıda bağlantı, daha yüksek veri hızı, azaltılmış uçtan uca gecikme süresi, esnek bant genişliği, ağ esnekliği ve daha verimli iletişime geçiş, 5G'ye geçişin nedenleridir [15].



Şekil 2.2 5G teknolojisinin hayatımıza getireceği yenilikler

Şekil 2.2 'de 5G teknolojisinin hayatımıza getireceği yenilikler verilmiştir [15]. 5G teknolojisinin getirdiği yenilikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

**Yüksek Hız:** Gigabit ve üstü hızlar sayesinde ultra yüksek çözünürlükteki içeriklere ulaşabilecek ve sanal gerçeklik uygulamaları kullanılabilir [15].

**Düşük Gecikme:** Ağdaki gecikmelerin 1 milisaniyenin altında olmasıyla birlikte gerçek zamanlı mobil kontrol ve uzaktan araca erişim uygulamalarının hayata geçirilmesi sağlanmış olacaktır [15].

**Yüksek Kapasite:** 5G teknolojisinin sağlamış olduğu yüksek kapasite sayesinde milyarlarca aygıt sürekli olarak erişilmeye imkân sağlayacaktır. Şu andaki kapasiteden yaklaşık olarak 1000 kat fazla kapasiteye sahip birim alana ulaşılmasına imkân sunacaktır [15].

**Enerji Verimliliği:** 5G teknolojisinin sağlamış olduğu 1000 kata varan enerji verimliliği ile cihazların batarya sorunu büyük ölçüde çözülmüş olacaktır [15].

Yüksek Coğrafi Kapsama ve Erişim: 5G, cihazdan cihaza iletişim (Device to Device-D2D) gibi değişik erişim teknolojilerini birleştirerek daha geniş bir kapsama alanı ve daha yüksek hareketlilik sağlayacaktır [15].

### 2.3. 5G Ağ Mimarisi

Kablosuz kullanıcılarının zamanın yaklaşık %80'ini içeride geçirirken, zamanın yalnızca yaklaşık %20'sini dışarıda geçirdikleri iyi bilinmektedir. Mevcut geleneksel hücrel mimari ister içeride ister dışarıda kalsınlar, mobil kullanıcılarla iletişim kuran bir hücrenin ortasında normalde bir dış mekân baz istasyonu kullanır [16]. Dış mekân baz istasyonu ile iletişim kuran iç mekân kullanıcıları için, sinyallerin bina duvarlarından geçmesi gerekir ve bu, kablosuz iletimlerin veri hızına, spektral verimliliğine ve enerji verimliliğine önemli ölçüde zarar veren çok yüksek penetrasyon kaybına neden olur. 5G hücrel mimarisini tasarlamamanın ana fikri, bina duvarlarından penetrasyon kaybının bir şekilde önlenmesi için dış ve iç mekân senaryolarını ayırmaktır [17]. Buna, dağıtılmış anten sistemi (DAS) ve onlarca veya yüzlerce anten elemanı içeren coğrafi olarak dağıtılmış anten dizilerinin konuşlandırıldığı büyük MIMO teknolojisi yardımcı olacaktır. Mevcut MIMO sistemlerinin çoğu iki ila dört anten kullanırken, büyük MIMO sistemlerinin amacı, daha büyük anten dizilerinde ortaya çıkabilecek potansiyel olarak büyük kapasite kazançlarından yararlanmaktır. Dış mekân baz istasyonları hem DAS hem de büyük MIMO teknolojilerinden yararlanan, hücre etrafına dağıtılmış ve baz istasyonlarına optik fiberler yoluyla bağlanan bazı anten elemanlarına (ayrıca büyük anten dizileri) sahip büyük anten dizileriyle donatılacaktır. Dış mekân mobil kullanıcıları normalde sınırlı sayıda anten elemanı ile donatılmıştır, ancak bunlar, baz istasyonu anten dizileriyle birlikte sanal büyük MIMO bağlantıları oluşturulacak olan sanal bir büyük anten dizisi oluşturmak için birbirleriyle iş birliği yapabilirler. Büyük anten dizileri ayrıca, muhtemelen görüş hattı (LOS) bileşenleri ile birlikte, baz istasyonlarının dağıtılmış anten elemanları için dış mekân baz istasyonları ile iletişim kurmak üzere her binanın dışına kurulacaktır. Büyük anten dizilerinde, iç mekân kullanıcıları ile iletişim kuran bina içindeki kablosuz erişim noktalarına bağlı kablo bulunur. Bu, uzun vadede hücre ortalama verimini, spektral verimi, enerji verimliliğini ve hücrel sistemin veri hızını önemli ölçüde iyileştirirken, kısa vadede altyapı maliyetini kesinlikle artıracaktır [16]. Bu tür bir hücrel mimari kullanılarak, iç mekân kullanıcılarının yalnızca binaların dışına kurulan büyük anten dizilerine sahip iç mekan

kablosuz erişim noktalarıyla (dış mekan (baz istasyonu) BS'leri değil) iletişim kurması gerektiğinden, yüksek veri hızlarıyla kısa mesafeli iletişim için uygun olan birçok teknoloji kullanılabilir. Bazı örnekler arasında WiFi, femtocell, ultra geniş bant (UWB), mm dalga iletişimi (3-300 GHz) ve görünür ışık iletişimi (VLC) (400-490 THz.) mm dalga ve VLC teknolojilerinin geleneksel olarak hücreli iletişim için kullanılmayan daha yüksek frekanslar kullandığını belirtmekte fayda var. Bu yüksek frekanslı dalgalar, katı maddelere çok iyi nüfuz etmez ve gazlar, yağmur ve yapraklar tarafından kolayca emilebilir veya dağılır. Bu nedenle, bu dalgaları dış mekan ve uzun mesafe uygulamalarında kullanmak zordur. 5G hücreli mimarisi ayrıca makro hücreler, küçük hücreler ve röleler ile heterojen bir yapı olmalıdır. Araçlardaki ve hızlı trenlerdeki kullanıcılar gibi yüksek hareketliliğe sahip kullanıcıları barındırmak için, mobil röle ve femtocell kavramlarını birleştiren mobil femtocell (MFemtocell) önerilmiştir [18]. Femtocell'ler, araç içindeki kullanıcılarla iletişim kurmak için araçların içine yerleştirilirken, büyük anten dizileri, dışarıdaki BS'lerle iletişim kurmak için aracın dışına yerleştirilmiştir. Bir Femtocell ve ilişkili kullanıcılarının tümü, BS için tek bir birim olarak görülür. Kullanıcı bakış açısından, bir MFemtocell normal bir BS olarak görülüyor. Bu, yukarıdaki iç mekan (aracın içi) ve dış mekan senaryolarını ayırma fikrine çok benzer. Femtocell'leri kullanan kullanıcıların, azaltılmış sinyal yükü ile yüksek veri hızlı hizmetlerden yararlanabilecekleri gösterilmiştir [19].

#### 2.4. 5G Kullanım Deneyimleri Kategorileri

5G teknolojisinin, beklentilere cevap verebilecek bir ürün oluşturmak üzere üç temel yetenek (gereksinim) üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu gereksinimler;

- Gelişmiş gezgin geniş bant (enhanced mobile broadband, eMBB),
- Masif makine tipi iletişim (massive machine type communications, mMTC),
- Ultra-güvenilir düşük gecikme iletişimi (ultra-reliable and low-latency communications, URLLC),

olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu gereksinimlerden ilki olan gelişmiş gezgin geniş bant (*enhanced mobile broadband, eMBB*) sayesinde çok yüksek kapasite ve saniyeler içerisinde gigabitler seviyesinde

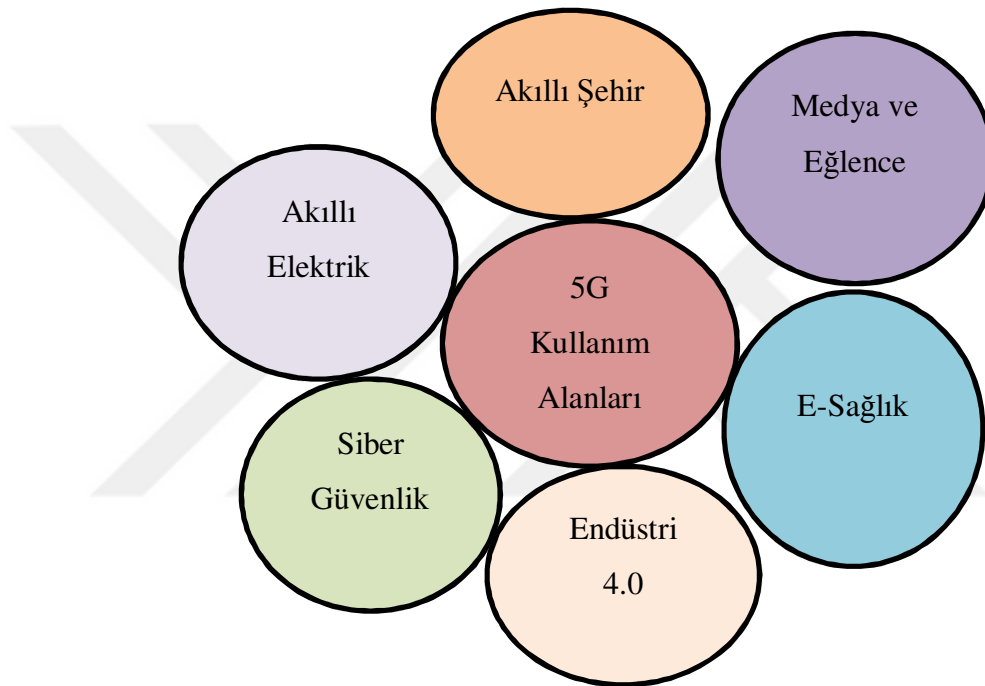
aktarım mümkün hale gelecektir. Ayrıca düşük gecikme bu deneyimle hayatımıza girecektir. Bu deneyim sayesinde yoğun yerlerde kesintisiz iletişim, araç içinde hızlı bağlantı, yüksek kalitede canlı yayın, sanal ve artırılmış gerçeklik ile eğitim ve oyun gibi uygulamalar mümkün olabilecektir. Diğer bir kullanım durumu ise trilyonlarca makine bağlantısının olacağı, pil ömrünün cihaz başına 10 yıl yaşam süresinin olacağı, masif makine tipi iletişim (massive machine type communications, mMTC) dir. Bu sayede taşıma hizmetleri, akıllı ev, takip sistemleri, giyilebilir tekstil, atık düzenleme uygulamalarına olanak sağlanacaktır. Düşük gecikme ve kesintisizliğin öne çıktığı Ultra-güvenilir düşük gecikme iletişimi (ultra-reliable and low-latency communications, URLLC) dir. Bu deneyim ile fabrikaların otomasyonu, uzaktan araçsürebilmek, uzaktan ameliyat yapabilme, akıllı enerji şebekelerinde anlık karar verebilme, otonom sürüş, istenilince kesintisiz acil haberleşme, uzaktan canlı komuta sistemleri hayatımızda yer almış olacaktır [15].

### **2.5. 5G Kullanım Alanları**

5G ile hayatımızın birçok alanında yenilikler gerçekleşecektir. Örneğin 4G teknolojisinde kısmi geniş bant deneyimi yanında elektrik sayaçları, atık su arıtma tesisleri ve sayısal reklam panoları gibi çok az sayıda nesnelerin internete bağlanması gerçekleşebiliyordu. Ama 5G teknolojisinin hayatımıza girmesiyle birlikte zengin içerikli video aktarımı, otonom araçlar ve dron gibi çok daha gelişmiş kullanım deneyimleri geniş ölçekte mümkün olacaktır. 4G teknolojisi ile sanal ve artırılmış gerçeklik deneyimi yalnızca oyun ve videolarda kullanılabiliyordu. Ancak 5G teknolojisi ile şimdi sağlık ve ameliyat eğitimi için kullanılmaya başlanmıştır. Bütün bunlara ek olarak sanal turizm, evden mağaza içi alışveriş deneyimi, sanal otopsi ve ameliyat hazırlığı gibi konularda da 5G teknolojisinin kullanımı kaçınılmaz olacaktır. 5G teknolojisinin hayatımızda mümkün kılacağı deneyimleri birkaç genel kategoride Şekil 2.3'te verilmiştir [15].

**Akıllı Şehir:** Eldeki kaynakların çeşitli sensörlerle toplanan veriler yardımıyla, verimli bir şekilde yönetildiği yerleşim yerleri için “akıllı şehir” kavramı kullanılmaktadır. Şehir altyapısının daha bütünleşik ve ortak hedefe yönelik çalışmasını sağlayan akıllı şehir uygulamalarında nesnelerin entegrasyonu, sensörler vasıtasıyla veri toplama ve görüntü çıkarımı gibi uygulamaların sağlanmasından ziyade, kararın uygulama

mekanizmalarının oluşturulmasında veri akışı sağlanması gerekmektedir. Bu veri akışının sağlanması noktasında 5G teknolojisi devreye girmektedir. Ulaşım, enerji gibi birçok alanda akıllı şehir uygulamaları etkili olacaktır. Akıllı şehir uygulaması ile su ve elektrik tasarrufu, trafikte bekleme süresi, çevrenin korunması, kavşak, aydınlatma, geri dönüşüm, atık toplama alanlarında önemli gelişmeler yaşanacaktır [15].



Şekil 2.3 5G kullanım alanları

**Akıllı Elektrik:** Şebekeye sağlanan elektrik kullanılmadığı durumda ziyan olmaktadır. Çünkü enerji depolanmasının günlük hayatta bir yolu yoktur. Elektrik tüketimini anlık olarak izleyebilen sistemlerin yoksunluğundan dolayı şebekeye verilen enerjinin verimli kullanılması da mümkün olmamaktadır. Akıllı şehir uygulamalarının getirdiği yenilikler sayesinde sayaçlara internet bağlanabilecektir. Bu sayede tüketim değerlerinin merkezi bir yapıya iletilmesi mümkün hale gelecektir. Bu verilerin incelenmesini sağlayan yapay zekâ uygulamaları, enerjide verimsizlik olup olmadığını tespit ederek kullanıcı ya da elektrik üreticilerini yönlendirebileceklerdir. Akıllı ağların oluşturulup enerji dağıtımı yapılmasıyla anlık artışların ve enerji tüketimi merkezlerinin yönlendirilmesi mümkün olacaktır [15].

**Siber Güvenlik:** 5G teknolojisinin hayatımıza getirdiği birçok yenilikle birlikte şebekeye bağlı cihazlardaki farklılıklar sonucunda yeni güvenlik tehditleri ortaya çıkacaktır. 5G teknolojiyle birlikte cihazlara ve uygulamalara bağlı olarak güven tanımını değişiklik gösterecektir [15].

**Endüstri 4.0:** Endüstri 4.0, mevcut haldeki veri sağlayıcılara ilave olarak, çok sayıda veri üreten cihazın anlık olarak takip edilmesi ve incelenmesi sonucu toplam verimliliği artıracak çözümler içermektedir. Bu verimlilik artışına paralel olarak, bu kadar çok cihazın olduğu durumda kablosuz haberleşme teknolojilerinin kullanılması kaçınılmaz olacaktır. 5G teknolojisinin hayatımıza katmış olduğu Nesnelerin İnterneti içeriği, sanayide kullanılan pek çok ekipmanı da içine almaktadır. 5G teknolojisinin sunduğu geniş bant teknolojisi; endüstri kameraları ve sensörleri, uzaktan kontrol ve veri işleme gibi uygulamaları mümkün kılmaktadır. Öte yandan uzaktan izleme ve takip sistemleri ise 5G'nin nesnelerin interneti platformuna ihtiyaç duymaktadır [15].

**E-Sağlık:** 5G teknolojisinin hayatımıza katacağı yüksek güvenilirliğe sahip haberleşme sayesinde, uzaktan ameliyat yöntemi gerçekleşmiş olacaktır. Bu sayede az sayıda sağlık personeli ile çok sayıda hastaya ulaşma imkânı oluşacaktır [15].

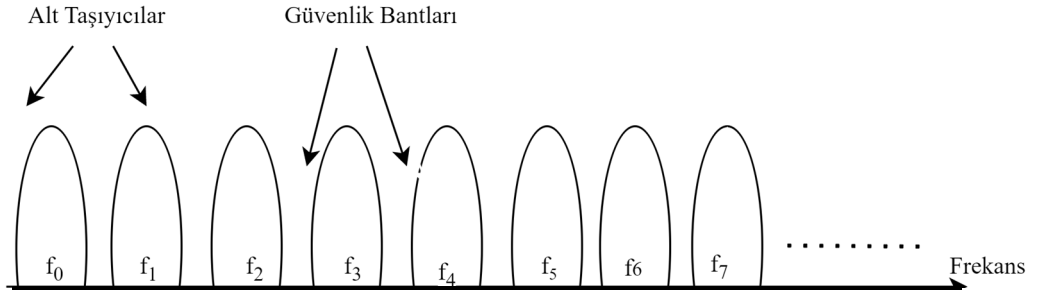
**Medya ve Eğlence:** 5G teknolojisinin hayatımıza girmesiyle birlikte birçok medya ve eğlence alanlarında da değişiklik olması beklenmektedir. 5G teknolojilerinde hem hız hem minimum gecikme hem de kesintisiz kalite artırılmış ve sanal gerçeklik hayatımızda yer alacaktır. Evlerdeki televizyonlar için ultra-yüksek çözünürlüklü televizyon deneyimi 4K ile başlayan süreç yüksek veri akışı hızı gerektiren 8K TV yayınlarına doğru ilerlemektedir [15].

## 3. BÖLÜM

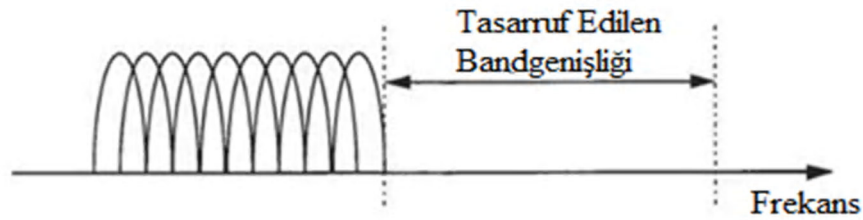
### YÖNTEM VE MATERYAL

#### 3.1 OFDM Tekniği

Kablosuz iletişim endüstrisi hızla geliştikçe, yüksek veri hızlarına olan talep artmakta ve öngörülemeyen kablosuz iletişim kanallarıyla ilgili sorunları daha karmaşık hale getirmektedir. Sayısal haberleşme sistemlerinde yüksek veri hızına olan ihtiyaç ve çok yollu sönümlenme ve semboller arası girişime (ISI) karşı sağlamlık, çok taşıyıcılı iletimin özel bir durumu olan OFDM'e geçişe yol açar. OFDM'nin ana ilkesi; alt taşıyıcılar arasındaki ortogonallik ile spektrumun etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Geleneksel çok taşıyıcılı tekniğin ve OFDM tekniğinin spektrum kullanımı sırasıyla şekil 3.1 ve şekil 3.2'de gösterilmektedir. OFDM ilkesinin ana konsepti, bitişik alt taşıyıcılar arasındaki ortogonalliktir. Alt taşıyıcıların sinüs ve kosinüs dalgaları olduğu bilinmektedir ve bu alt taşıyıcılar, sembolün bir periyodu altındaki alanlarının integrali sıfıra eşit olduğuunda ortogonal olarak tanımlanır. IDFT/DFT, alt taşıyıcılar arasında dikgenliği sağlayan gerekli süreçleri ifade eder.

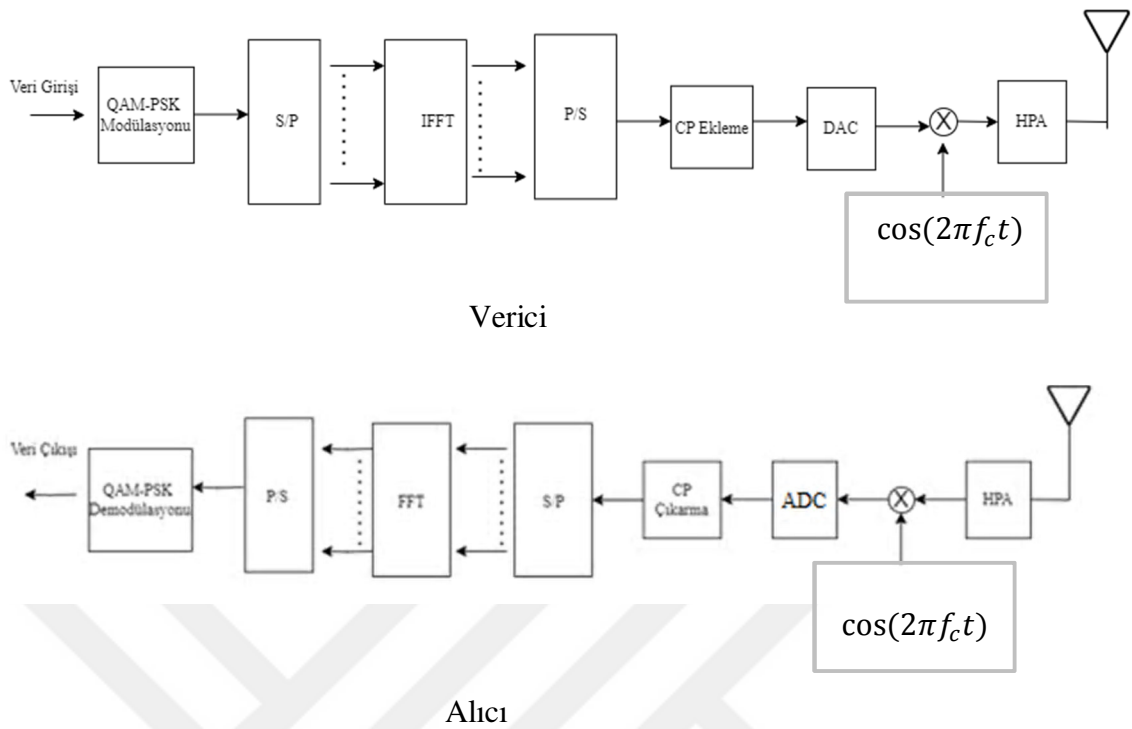


şekil 3.1 FDM sisteminde dik alt taşıyıcıların yerleşimi



Şekil 3.2 OFDM sisteminde dik alt taşıyıcıların yerleşimi

DFT/IDFT, sırasıyla hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ve ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) olarak adlandırılan hızlı algoritmaları kullanır [20]. Şekil 3.3, OFDM alıcı-vericisinin genel bir blok diyagramıdır. İlk olarak sistemin verici biriminde, sayısal mesaj dizisine QAM veya PSK eşleştirmesi yapılır. Bilgi,  $N$  alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak seri paralel dönüştürücü (S/P) ile paralel verilere dönüştürülerek IFFT işlemi gerçekleştirilir. IFFT, sinyali ayrık frekans ekseninden ayrık zaman eksenine dönüştürür. Çok yollu sönmlemenin neden olduğu semboller arası girişimin üstesinden gelmek ve OFDM işaretlerinin periyodikliğini sağlamak için IFFT'nin çıkışına periyodik ön ek (CP) olarak adlandırılan koruma aralığı eklenir. Periyodik ön ek, mevcut OFDM sembolünün son örneklerini içeren koruma aralığıdır. ISI'nın üstesinden gelmek için mevcut OFDM sembolünün başına ön ek eklenir ve kanal maksimum gecikmesinden daha büyük olmalıdır [20]. Paralel seri dönüştürücü, (P/S) paralel sembolleri seri sembollere dönüştürür. Ardından (P/S)'nin çıktısı, ortam üzerinden iletilecek sembolleri sayısalan analoğa dönüştüren sayısal analog dönüştürücünün (D/A) girişine uygulanır. Son olarak vericide iletilecek işaret, yüksek güç kuvvetlendiricisi (HPA) tarafından kuvvetlendirilerek haberleşme kanalına uygulanır. Sistemin alıcı kısmında ise taşıyıcı demodülasyonu işlemi ile alt taşıyıcıların temel bant seviyesine indirgenmesi sağlanmaktadır. Alıcı tarafında alınan sinyal, sinyali analogdan sayısala çeviren analog sayısal dönüştürücü (A/D) için girdidir. Sonraki aşamada sinyal seri paralel dönüştürücüye gelir. Alınan OFDM sinyali, periyodik ön ek olarak adlandırılan koruma aralığını kaldırmak için CP çıkarma bloğuna geçer. FFT bloğu, OFDM sinyalini zaman alanından frekans alanına dönüştürmek için kullanılır. (P/S) ile paralel veriler seriye dönüştürülür. OFDM sisteminin en önemli faydaları, bant genişliği için verimli kullanım ile çok yollu sönmlemeye ve ISI'ya karşı sağlamlığıdır.



Şekil 3.3 OFDM sisteminde verici ve alıcı birimlerine ait blok diyagram

Sürekli zaman alanında, geçiş bantlı OFDM sinyali şu şekilde yazılabilir:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi f_k (t - T_{sym})} \quad (3.1)$$

Burada:

$x(t)$ : OFDM işaretinin sürekli zaman gösterimi,

$X(k)$ : İletilecek bilgi,

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ,

$N$ : Alt taşıyıcı sayısı,

$f_k$ : Alt taşıyıcı frekansı,

$T_{sym}$ : OFDM sembolünün süresi.

OFDM sinyali, ayrık zaman alanında olacak şekilde örneklenir:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi n k \frac{j2\pi n k}{N}} \quad (3.2)$$

Burada,

$x(n)$ : Ayrık zamanlı OFDM sinyali,

$n=0,1,\dots,N-1$ .

Alıcı tarafında, FFT işlemi kullanılarak alınan eşlenmiş veriler şu şekilde ifade edilir:

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (3.3)$$

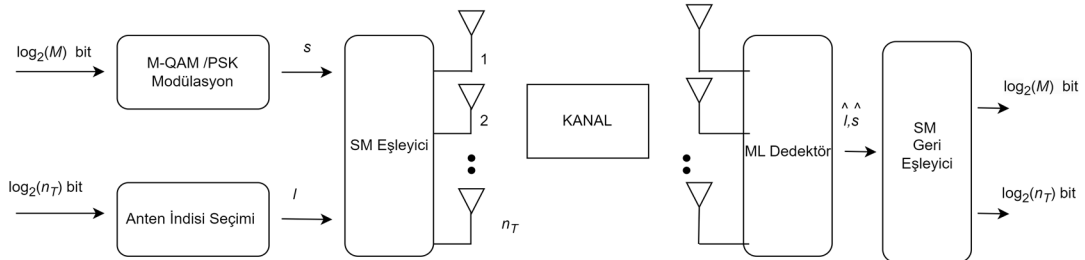
### 3.2 İndis Modülasyonu

Son birkaç yılda İndis Modülasyonu (IM) şemalarına muazzam bir ilgi oluşmuştur. IM, ek bilgi bitlerinin iletilmesine karşılık gelen haberleşme sistemlerinin yapı taşlarının indislerini kullanan, spektrum ve enerji açısından oldukça verimli, basit bir sayısal modülasyon tekniğidir [1, 3, 4, 8, 20, 21]. IM sistemleri, son 50 yılda haberleşme alanında yaygın olarak kabul edilen iletim için sinüzoidal bir taşıyıcı sinyalin genlik/faz/frekans modülasyonuna dayanan geleneksel sayısal modülasyon şemalarının aksine bilgi iletmek için alternatif yollar sağlar. IM ile bilgi bitleri; verici anten, alt taşıyıcı, radyo frekans (RF) aynası gibi iletim birimlerinin indisleri ile iletilir. Başka bir deyişle, IM veri iletimi için tamamen yeni bir boyut kazandırır. Bu yapı bloklarının indisleri, bir açma/kapama anahtarlama mekanizması yoluyla bilgi iletmek için kullanılabilirdiğinden, IM şemaları, mevcut iletim enerjisini aktif olmayan verici antenden aktif olan verici antenlere aktarma yeteneğine sahiptir. Bundan dolayı aynı toplam iletim enerjisini kullanan geleneksel modülasyon şemalarına kıyasla önemli ölçüde enerji verimliliği sağlanmış olur. Öte yandan, IM şemaları, sistemin bazı ana öğelerini devre dışı bırakırken, bunları veri aktarımı amacıyla kullanmaya devam ederek bilgileri daha verimli bir şekilde iletmeye yeteneğine sahiptir. IM sayısal bilgiyi iletmeye yeni boyutlar getirdiği için, ele alınan haberleşme sisteminin spektral verimliliği, donanım karmaşıklığını artırmadan etkili bir şekilde artırılabilir. SM sayesinde donanım karmaşıklığı, haberleşme sistemleri için bir problem olmaktan çıkmıştır. Bir MIMO sisteminin verici antenleri için IM'yi dikkate alan SM, son birkaç yılda büyük ilgi görmüştür. SM sistemleri, literatürde geniş yer bulan klasik MIMO sistemlerine göre önemli avantajlar sağlamaktadır [22, 23]. SM sisteminin verici tarafında bir adet RF katı bulunduğu için verici antenler arasında senkronizasyona gerek duyulmaz. Sonuç olarak SM, spektrum ve enerji açısından verimli yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için olası bir aday olarak kabul edilmiştir [25]. SM,  $n_T$  ve  $n_R$ 'nin sırasıyla verici ve alıcı

anten sayısını gösterdiği geleneksel  $M$ 'li sinyal takımlarına ek olarak, bir  $n_T \times n_R$  MIMO sistemine ait verici antenlerin indisleri aracılığıyla bilgi iletmenin yeni bir yoludur. SM sistem modeli Şekil 3.4'te görülmektedir. SM'de iki bilgi taşıma birimi vardır: aktif verici antenlerin indisleri ve  $M$ 'li geleneksel modülasyon sembolleri.  $n_T$  verici  $n_R$  alıcı antene sahip bir sistemde her bir iletim aralığı için toplam

$$\log_2 n_T + \log_2 M \quad (3.4)$$

bit SM sisteminin vericisine girer. Burada  $M$ ,  $M$ -li faz kaydırmalı anahtarlama (M-PSK) veya  $M$ -li karesel genlik modülasyonu (M-QAM) gibi dikkate alınan sinyal takımının boyutudur. Gelen bit dizisinin  $\log_2(M)$  biti, geleneksel olarak bir taşıyıcı sinyalin fazını ve/veya genliğini modüle etmek için kullanılır. Gelen bit dizisinin geri kalan  $\log_2(n_T)$  biti ise modüle edilmiş sinyalin iletimini gerçekleştiren aktif verici antenin indisinin ( $l$ ) seçimi için ayrılmıştır.



Şekil 3.4 SM sistem modeli

Sonuç olarak, SM'nin  $n_T \times 1$  boyutlarına sahip iletim vektörü şu hale gelir:

$$\mathbf{s} = [0 \dots 0 \quad s \quad 0 \dots 0]^T \quad (3.5)$$

$\mathbf{s}$  vektörünün sadece  $l$ . elemanı olan  $s$ , sıfır değildir ve sadece  $l$  indisli anten etkindir. Tablo 3.1'de dört verici antene sahip bir sistem için bilgi bitlerine göre etkin anten seçiminin nasıl yapılacağı gösterilmektedir.  $s$  simgesinin iletimi  $l$  indisli anten üzerinden gerçekleşir. Bu durumda kanal çıkışı,

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadede  $\mathbf{H}$  işaretin iletildiği  $n_R \times n_T$  boyutlu kanal matrisini ifade ederken  $\mathbf{n}$  ise kanaldaki toplamsal beyaz gauss gürültüsünü (additive white gaussian noise, AWGN) ifade etmektedir.

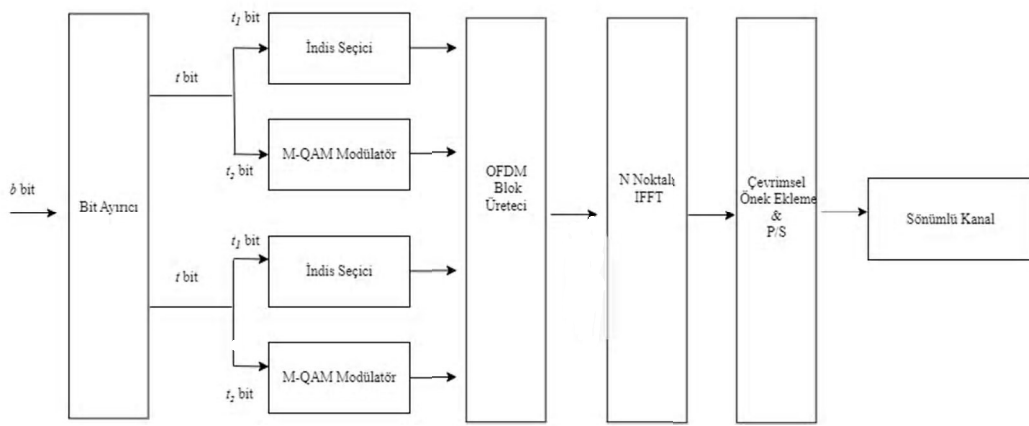
Tablo 3.1 Dört verici antene sahip olan SM sisteminin verici anten seçim tablosu

İndis Bitleri	Etkin Verici Anten
[0 0]	1. anten
[0 1]	2. anten
[1 0]	3. anten
[1 1]	4. anten

SM şemasının alıcısı, iki ana görevle uğraşmak zorundadır: Bunlardan ilki indis bitlerinin demodülasyonu için aktif verici anten indisini tespit etmek. İkincisi ise M-li data sembollerini tespit ederek demodüle etmek ve bilgi bitlerini elde etmektir. Gönderilen bitlerin alıcı kısımda doğru bir şekilde çözülmesi oldukça önemlidir. Çözüm işleminin doğru bir şekilde yapılması için anten indislerine ve gönderilen simgeye doğru karar vermek gerekir. Optimum alıcı yapısı olan en büyük olabirlikli (Maksimum likelihood, ML) sezici tekniği, bu işlemin en az hata ile yapılmasında kilit rol oynamaktadır. SM şemasının optimum maksimum olabirlik (ML) dedektörü hem iletilen simgeye hem de etkinleştirilen verici antenin indisine karar vermek için tüm olası verici antenleri ve M-li data sembollerini ortaklaşa arar. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, SM şemasının ML dedektörü, olası tüm aktif verici anten durumları için olası tüm M-li data sembollerini, alınan sembol ile karşılaştırır. Bu karşılaştırma neticesinde en yakın sembole ilgili verici anten için karar verir. SM'nin ML dedektörü, yukarıda belirtilen iki görevi tek tek ele alır. Önce aktifleştirilmiş verici anteni belirler, ardından bu anten üzerinden iletilen veri sembolünü bulur. Bu nedenle, arama uzayının boyutu, ML dedektörü için  $n_T \times M$ 'dir [26]. Verici anten sayısının fazla olmasından dolayı karar mekanizmasının karmaşıklığı da fazladır. Ancak ML sezici hata başarımında büyük avantaj sağladığı için düşük hata oranı gerektiren uygulamalarda yoğun bir şekilde tercih edilmektedir.

### 3.3 OFDM-IM Sistemi

OFDM, frekans bölmeli çoğullama (FDM) ile yakından ilgilidir. Frekans bölmeli çoğullama, verinin verimini artırmak için birkaç bağlantıyı paralel olarak iletmeye dayanır. Ayrıca iletim sırasında ortogonal olmayan alt taşıyıcılara izin verir. OFDM'de ise istenen hıza ulaşmak için bir bağlantı yeterli değilse, başka bağlantılar eklenebilir. Bununla birlikte OFDM, ortogonal alt taşıyıcılar kullanarak daha az spektrum kullanımı sağlamış olur. Bu şekilde spektral verimlilik artmış olur [9].



Şekil 3.5 OFDM-IM verici sistem modeli

FDM, birinci nesil telefonlar tarafından kullanılmıştır. FDM'de komşu alt taşıyıcılardaki frekans sızıntısını önlemek için önemli bir koruma bandı gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu frekans koruma bantları spektrumu işgal ederek bant genişliğini boşa harcar. OFDM'nin FDM'den farkı alt taşıyıcı örtüşmesine izin vermesidir. Bu örtüşme, her bir alt taşıyıcı spektrumunun, tüm komşuları birbirini ile dik olduğunda maksimumunu gösterecek şekilde ayarlanmasıyla mümkündür. Dolayısıyla her bir alt taşıyıcı dalga biçimi, komşularından etkilenmemiş olur. Bu durum, alt taşıyıcıların birbirinden bağımsız veya ortogonal olduğu anlamına gelir. OFDM, FDM şemalarına kıyasla daha basit olan FFT tabanlı bir algoritma kullanılarak uygulanabildiği için esnek bir şemadır. Verici ve alıcıdaki her  $N$  alt taşıyıcı için  $N$  filtre ve  $N$  alt taşıyıcı çoğaltıcı gerektirirler. Ayrıca klasik tek taşıyıcılı sistemlerde, dögüsel önekin (CP) ihtiyaçlarını en aza indirdiği ve uygulamalarını basitleştirdiği OFDM'nin aksine, çok yollu sönümlenme ile başa çıkmak için karmaşık dengeleyicilerin uygulanması gerekir [27].

Döngüsel bir ön ekin kullanılması, farklı alt taşıyıcıların aralarında belirli bir gecikme oluşmasına sebep olmasına rağmen ortogonalite özelliğinin korunmasına izin verir.

OFDM-IM, geleneksel OFDM'nin bir modifikasyonudur. OFDM-IM, taşıyıcılara indis modülasyonu (IM) kavramının uygulanmasıyla ortaya çıkan sonuçtur. OFDM-IM, diğer alt taşıyıcıları kapatırken M-li takım sembollerini taşımak için alt taşıyıcıların bir alt kümesini etkinleştirmektedir. Alt taşıyıcı aktivasyon paternleri (SAP) verilere göre belirlenir, bu nedenle bilgi iletmek için de kullanılırlar. Bu durum genel olarak iletilen güçten tasarruf sağlar ve klasik OFDM'ye kıyasla daha iyi BER performansı elde etmeyi sağlar.

Her bir OFDM sembolünü iletmek için OFDM-IM sisteminin vericisine veri seti  $b$  bit gelir. Daha sonra bu  $b$  bit verileri  $c$  gruplara ayrılır ve bu grupların her biri  $t$  bit içerir. Böylece  $b = tc$  olur.  $t$  bit içeren her bir veri dizisi,  $n = N/c$  uzunluğundaki bir OFDM alt bloğuna eşlenir.  $N$ , OFDM bloğunun bir dizi alt taşıyıcısıdır ve FFT'nin boyutuna eşittir. OFDM'den farklı olarak, buradaki eşleme işlemi sadece modülasyon sembolleri yapılmaz. Buna ek olarak alt taşıyıcıların indisleri de kullanılarak yapılır. Ek veriler, OFDM alt taşıyıcıların bir alt kümesi tarafından iletilir. Her bir alt blokta alt taşıyıcılardan  $K$  tanesi kullanılır. Aktif olacak  $K$  tane etkin alt taşıyıcıların indislerini belirlemek için  $t$  bitlik bilgi dizisinin ilk  $t_1$  biti kullanılır. Etkin olmayan alt taşıyıcılara karşılık gelen simgeler sıfıra eşitlenir ve bu alt taşıyıcılardan veri aktarımı gerçekleşmez. Dizinin geri kalan  $t_2 = K(\log_2 M)$  biti, aktif alt taşıyıcıları QAM veya PSK gibi çok seviyeli modülasyon yöntemlerinden biriyle modüle edecek veri simgelerini belirlemek için kullanılır. Böylece  $b = b_1 + b_2$  şeklindedir. Başka bir ifade ile, OFDM-IM sisteminde bilgi hem modülasyon sembolleri hem de modüle edilen aktif alt taşıyıcıların indisleri ile de taşınır. OFDM-IM sisteminde mevcut tüm alt taşıyıcılar kullanılmaz. Bu yüzden iletilen veri sayısında kayıp olur. Ancak verilerin OFDM-IM bloğunun modüle edilen aktif alt taşıyıcıların indisleri ile iletilmesiyle bu kayıp telafi edilir. Şekil 3.5'te OFDM-IM vericisine ait sistem modeli göz önüne alındığında her  $\beta$  alt bloğu için  $t_1$  bit, mevcut  $N$  indisten aktif alt taşıyıcı  $K$  'yı seçen indis seçiciye aktarılır. Burada seçilen indisler aşağıdaki biçimde ifade edilir;

$$I_{\beta} = \{i_{\beta,1}, \dots, i_{\beta,K}\} \quad (3.7)$$

Burada  $\gamma = 1, \dots, K$  ve  $\beta = 1, \dots, c$  ve  $i_{\beta,\gamma} \in [1, \dots, M]$  şeklindedir. OFDM bloğundaki aktif indislerin konumları tarafından taşınan toplam bilgi biti sayısı,

$$b_1 = t_1 c = \log_2(C(N, K)) c \quad (3.8)$$

Bu ifadede  $C(N, K)$  binom katsayısını ifade etmektedir. Öte yandan, modülasyon sembollerinin taşıdığı toplam bit sayısı şu şekilde ifade edilebilir:

$$b_2 = t_2 c = [K \log_2(M)] c \quad (3.9)$$

Sonuç olarak  $b = b_1 + b_2$  veri OFDM-IM sisteminin tek bloğunda aktarılır. Verilerin  $t_2$  bitini tutan modülatör çıkışındaki modülasyon sembolleri için vektör şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{s}_\beta = \{s_\beta(1) \dots s_\beta(K)\}. \quad (3.10)$$

Burada  $s_\beta(\gamma) \in S$ ,  $\beta = 1, 2, \dots, c$  ve  $\gamma = 1, 2, \dots, K$  dir.  $S$  ise  $M$ 'li karmaşık işaret uzayını ifade etmektedir. Örneğin  $N = 5$  ve  $K = 2$  olması durumunda  $\mathbf{s}_4 = [s_4(1) s_4(2)]$  ifadesi 4. alt blokta bulunan 5 tane alt taşıyıcıdan 2 tanesinin aktif olduğunu ve  $s_4(1)$  ve  $s_4(2)$  modülasyonlu işaretleri taşıdığını göstermektedir.

OFDM-IM blok üreticinde  $I_\beta$  ve  $\mathbf{s}_\beta$  'lar kullanılarak alt bloklar birleştirilir. Bu birleşim sonucunda IFFT'si alınacak olan vektör ortaya çıkar. Bu vektör aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{x}_F = [x(1) x(2) \dots x(N)]^T. \quad (3.11)$$

Burada  $x(\alpha) \in \{0, S\}$  ve  $\alpha = 1, \dots, N$  dir. Bu eşitlikte  $(\cdot)^T$  evriği ifade etmektedir. OFDM-IM sisteminde  $\mathbf{x}_F$  vektörünün bazı elemanları sifıra eşittir. OFDM-IM tekniğinde OFDM-IM blok üretici çıkışından sonra  $\mathbf{x}_F$  vektörünün IFFT'si alınır. Daha sonra CP ekleme işlemi yapılır. Paralelden seriye dönüşüm işlemi ve işareti sayısalardan analoğa çevrilmesi işlemleri de OFDM ile aynı şekilde gerçekleşir.

OFDM-IM blok üretici çıkışından sonra  $\mathbf{x}_F$  vektörünün IFFT'si alındıktan sonra oluşan  $\mathbf{x}_T$  işareti aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{x}_T = \frac{N}{\sqrt{K}} \text{IFFT}\{\mathbf{x}_F\} = \frac{1}{\sqrt{K}} \mathbf{W}_N^H \mathbf{x}_F = [X(1) \dots X(N)]^T. \quad (3.12)$$

Bu eşitlikte, ayrık Fourier dönüşümü matrisini  $\mathbf{W}_N$  ifade etmektedir. Burada,  $\mathbf{W}_N^H = \mathbf{M}_N$  şeklindedir.  $\mathbf{I}_N$ , burada  $N \times N$  boyutundaki birim matristir. CP adımında  $\mathbf{x}_T = [X(1) \dots X(N)]^T$  vektörünün başına eklenmesi için vektörün son  $L$  tane elemanı kopyalanır. CP eklenmesi sonucunda oluşan vektör aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{x}_{T.CP} = [X(N-L+1) \dots X(N) X(1) \dots X(N)]^T. \quad (3.13)$$

CP işlemi gerçekleştirildikten sonra vektör paralelden seriye dönüştürülür. Daha sonra sayısal-analog çeviriciden geçer. Sayısal-analog çeviriciden geçtikten sonra frekans seçici sönümlü kanala iletilecektir.

Kanalın genlik cevabı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\mathbf{h}_T = [h_T(1) \dots h_T(v)]^T. \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemde  $v$  değeri, işaretin iletileceği sönümlü kanalın derecesini ifade etmektedir.  $h_T(\omega)$  ( $\omega = 1, \dots, v$ ) kanal sönümleme katsayıları  $\mathbf{h}_T$  vektörünün elemanlarını oluşturur. OFDM bloğunun iletimi sırasında kanalın hala sürekli olduğunu ve CP uzunluğunun işaretin iletileceği sönümlü kanalın derecesinden büyük olduğu ( $L > v$ ) varsayılırsa, OFDM şemasının frekans bölgesindeki giriş ve çıkış eşdeğer ilişkisi şöyle olacaktır:

$$y_F(\theta) = x(\theta) h_F(\theta) + w_F(\theta). \quad (3.15)$$

Burada  $y_F(\theta)$  alınan sinyaller, frekans bölgesindeki sönümleme kanalının katsayısı  $h_F(\theta)$ , ve gürültü örneklerinin katsayısı  $w_F(\theta)$  olarak verilmiştir.

OFDM-IM sinyali kanaldan geçtikten sonra alıcıya ulaşır. Şekil 3.6'da OFDM-IM alıcısının sistem modeli verilmiştir. Alıcı tarafında ise çevrimsel önek çıkartma işlemi gerçekleştirildikten sonra işarete FFT işlemi uygulanır. Daha sonra işaret OFDM-IM blok ayırıcıya gelir ve burada alt bloklara ayrılır. Alt bloklara ayrılan işaret en büyük olasılıklı (maximum likelihood, ML) prensibine göre çalışan bloğa gönderilir. OFDM-IM sistemine ait en büyük olasılıklı (ML) sezicisi her bir alt blokta bulunan etkin alt

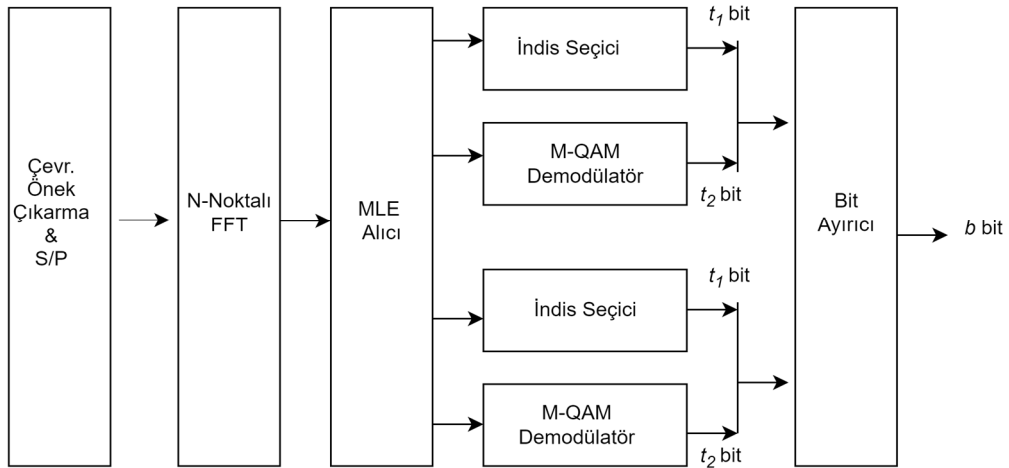
taşıyıcı indislerinin ve işaret uzayı simgelerinin taramasını yapar. Her bir alt blokta bulunan etkin alt taşıyıcı indislere ve işaret uzayı simgelerine birlikte karar vermektedir.

Denklem (3.15)'de yer alan  $x_F(\theta)$ ,  $x(\theta)$ ,  $h_F(\theta)$  ve  $w_F(\theta)$  sırasıyla  $\mathbf{y}_F = [\mathbf{y}_{1,F}^T, \mathbf{y}_{2,F}^T, \dots, \mathbf{y}_{g,F}^T]^T$ ,  $\mathbf{x}_F = [\mathbf{x}_{1,F}^T, \mathbf{x}_{2,F}^T, \dots, \mathbf{x}_{g,F}^T]^T$ ,  $\mathbf{h}_F = [\mathbf{h}_{1,F}^T, \mathbf{h}_{2,F}^T, \dots, \mathbf{h}_{g,F}^T]^T$  ve  $\mathbf{w}_F = [\mathbf{w}_{1,F}^T, \mathbf{w}_{2,F}^T, \dots, \mathbf{w}_{g,F}^T]^T$  şeklinde vektörel olarak ifade edilir. Denklem (3.15)  $\beta$ . alt blok için aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir ( $\beta = 1, \dots, c$ ):

$$\mathbf{y}_{\beta,F} = \mathbf{X}_{\beta,F} \mathbf{h}_{\beta,F} + \mathbf{w}_{\beta,F}. \quad (3.16)$$

Bu eşitlikte  $\mathbf{X}_{\beta,F} = \text{diag}(\mathbf{x}_{\beta})$  şeklinde ifade edilir. ML alıcının karar kuralı ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\mathbf{X}'_{\beta,F} = \arg \min_{\mathbf{X}_{\beta,F}} \|\mathbf{y}_{\beta,F} - \mathbf{X}_{\beta,F} \mathbf{h}_{\beta,F}\|^2 \quad (3.17)$$



Şekil 3.6 OFDM-IM alıcı sistem modeli

OFDM-IM, klasik OFDM'ye kıyasla birçok avantaja sahiptir:

- OFDM-IM, verileri iletmek için aktif alt taşıyıcı indislerini kullanır ve bu teknik sayesinde BER performansında büyük bir iyileşme olur [28].

- Güç verimliliği açısından OFDM-IM, OFDM'den daha iyidir çünkü alt taşıyıcıların yalnızca bir kısmını kullanır ve her zaman tüm alt taşıyıcıları kullanan OFDM'ye kıyasla güç tüketiminin yarısından tasarruf sağlar [29].
- OFDM-IM, Tepe-ortalama güç oranı (PAPR) açısından OFDM ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmüştür [30].

### 3.4 Sönümlü Kanal Modelleri

Kablosuz haberleşmede radyo dalgaları, verici istasyondan alıcı istasyona boş alandan geçerken yayılır. Bu yayılma süresi boyunca dalgalar yansıma, kırılma, kırınım ve saçılma süreçlerinden geçmek zorundadır. Zemin arazisi, atmosfer, binalar, köprüler, tepeler, ağaçlar ve daha pek çok şey dalgaları etkiler. Bu nedenlerden dolayı, alıcı tarafta alınan sinyal, iletilen ile tam olarak aynı değildir.

Çoğunlukla hücresel sistemlerde antenin yüksekliği çevredeki yapılardan daha küçüktür. Bu nedenle, verici ve alıcı arasındaki basit bir görüş yollu (LOS) iletişimi son derece imkansızdır. Bu durumlarda iletişim, çoğunlukla çevre ortamdaki farklı yapılardan yansıma, kırılma, kırınım ve saçılma nedeniyle olur. Bu nedenle, sinyaller alıcıya birkaç yol ve farklı zaman gecikmeleri şeklinde ulaşır ve bu da çok yollu yayılıma yol açar. Bu sinyaller alıcıya ulaştığında, dağıtılmış genliklere ve fazlara sahiptirler. Bu rasgele genlikler ve fazlar, çoğunlukla sonraki durumda yapıcı veya yıkıcı bir şekilde birleşir. Bu durum, alınan sinyal genliğinde gözle görülür dalgalanmalara neden olur. Bu durum sönümlenme olarak ifade edilir. Farklı sönümlenme türleri vardır; küçük ölçekli sönümleme, kısa yer değiştirme durumunda çokyollu yayılma nedeniyle sinyal genliğindeki dalgalanmadır. Oysa ortalama sinyal seviyesindeki uzun vadeli değişim, büyük ölçekli sönümleme olarak adlandırılır. İkinci etki, sinyallerin, verici ile alıcı arasındaki kanalda çok fazla değişikliğe neden olabilecek uzun mesafeler boyunca hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Büyük ölçekli sönümleme aynı zamanda gölgeleme olarak da bilinir çünkü bu genellikle gezgin birim binalar ve tepeler gibi daha uzun nesnelere doğru hareket ettiğinde meydana gelir. Çoklu yol nedeniyle, hareket halindeki bir alıcı bazen çok kısa bir süre içinde birkaç sönüm yaşayabilir. Kablosuz iletişimi tam olarak anlamak için, bir vericiden alıcıya giderken sinyallere ne olduğunu bilmek önemlidir. Verici ve alıcı arasındaki yolun önemli yönlerinden biri sönümlemedir. Bu nedenle, vericiler ve alıcılar

arasındaki kanal cevabının tahmin edilmesine yardımcı olan farklı kanal sönümlenme modelleri tanımlanmıştır. Belirli bir sinyal gürültü oranına (SNR) göre bit hata oranı (BER) bulunabilir, kanal kapasitesi de belirlenebilir. Ede edilen cevap neticesinde hangi kanal modelinin gerçek zamanlı iletişim senaryolarına daha uygun olduğu bulunabilir.

Mobil istasyon anteni, iletilen sinyali her zaman LOS üzerinden almaz. Çok yönlü yayılım, bir radyo sinyali antenden iletdikten sonra ve alıcı anten tarafından alınmadan önce iki veya daha fazla farklı yol izlediğinde gerçekleşir. Çok yönlü yayılımın bir sonucu olarak bir dizi yansıyan, kırılan ve saçılan dalgaları alır. Sonuç olarak fazlar rastgeledir ve nihayetinde alınan güç de rastgele bir değişken haline gelir. Sinyaller alıcı antene dolaylı yollardan (yansıma, saçılma, kırılma, kırınımdan geçtikten sonra) ulaşır. Bu ışınlar alıcıya ulaşmak için bir yol bulsa da farklı açılar ve gecikmelerle gelirler. Ayrıca alıcıya ulaşmaları daha uzun sürer ve genellikle zayıf bir güce sahiptirler. Her kısmi dalganın fazına bağlı olarak, alıcıdaki süperpozisyon yapıcı veya yıkıcı olabilir.

Yararlı bir iletişim kanalını modellemenin farklı yolları vardır. Bu kanal modelleri, gerçek dünyadaki iletişim sistemlerinin önemli istatistiksel özelliklerinin modellenmesine yardımcı olabilir ve ayrıca alıcı tarafında alınabilecek iletilen sinyallerin sinyal genlikleri hakkında bir fikir verebilir. Bu tahminleri yapabilmek için farklı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Sayfanın ilerleyen kısımlarında sönümlü kanal modellerinden bahsedilecektir.

### **3.4.1 Rayleigh Sönümlü Kanal Modeli**

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, bir radyo dalgası bir haberleşme kanalı aracılığıyla yayıldığında, verici ve alıcı arasındaki yayılmasını etkileyen farklı faktörler vardır. Haberleşme kanallarının modellenmesine yardımcı olan farklı istatistiksel modeller sunulmuştur. Rayleigh sönümlü kanal modeli, vericiden iletilen sinyalin alıcının LOS yolunun olmadığı sönümlü kanal modellerinden biridir. Alınan sinyalin sadece çevreden yansıyan bileşenlerden oluştuğu sönümlü kanal modelidir. Rayleigh sönümlemesi, yayılma ortamının bir radyo sinyali üzerindeki etkisini tahmin etmek için kullanılan modellerdendir. Ayrıca, verici ile alıcı arasında LOS iletişimi olmadığını ve çok yönlü bir yayılma ortamının da var olduğunu varsayar.

Kanalda alıcıdaki sinyali etkileyen çok sayıda saçıcı olduğunda ve verici ile alıcı arasında LOS olmadığına, kanal performansını tahmin etmek için Rayleigh sönümlenmesi kullanılır.

Rayleigh sönümlü kanal, Rayleigh dağılımına dayalı olarak aşağıdaki olasılık yoğunluk fonksiyonuna (PDF) sahip rastgele karmaşık çok yönlü bileşenlerin toplamının zarfı olarak tanımlanabilir.

$$f_{|h|}(z) = \frac{2z}{\Omega} \exp\left(-\frac{z^2}{\Omega}\right) \quad z \geq 0 \quad (3.18)$$

burada  $|h|$  Rayleigh rasgele değişkeni  $z$  olan sönümlenme değişkeninin zarfıdır ve  $\Omega$  sönümlenme kanalının ortalama gücüdür. Rayleigh dağılımı, tek parametre  $\Omega$  ile karakterize edilir. Sönümlü kanallar için anlık ve ortalama Sinyal Gürültü Oranı (SNR) ifadeleri sırasıyla  $\gamma = P|h|^2 / \sigma^2$  ve  $\gamma = P\Omega / \sigma^2$  şeklinde yazılabilir. Burada  $P$  iletim gücünü tanımlarken  $\sigma$  varyansı temsil eder [31].

### 3.4.2 Rician Sönümlü Kanal Modeli

Kablosuz iletişimde verici ile alıcı arasındaki görüş hattında herhangi bir engelin olmadığı durumlar da olabilir. Böylece alıcıya gelen sinyal, direkt (LOS) gelen sinyaller ve farklı yollardan yansıyan dalgalardan oluşmaktadır. Bu gibi durumlarda doğrudan gelen bileşen (LOS) diğer bileşenlere göre daha baskındır. Doğrudan görüş hattındaki bileşenin baskın olduğu durumda, kanal Rician sönümlü kanal olarak modellenebilir. Rician dağılımının PDF'si,

$$f(v) = \frac{v}{\sigma_t^2} e^{-\frac{(v^2+D^2)}{2\sigma_t^2}} I_0\left(\frac{vD}{\sigma_t^2}\right), \quad v \geq 0 \quad (3.19)$$

olarak ifade edilir. Burada  $D^2$  doğrudan bileşenin gücüdür,  $I_0(.)$  birinci türden sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel işlevidir ve  $\sigma_t^2$  varyansı temsil eder [32].

Rayleigh ve Rician sönümlenme kanalları, literatürde performans analizini incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Rayleigh kanal modeli, verici ile alıcı arasında doğrudan görüş hattının (NLOS) olmadığı durumu temsil ederken, Rician kanal modeli, verici ile alıcı arasında doğrudan görüş hattının (LOS) olduğu durumu açıklar.

Tüm bu kanal modellerine ek olarak diğer kanal modellerine göre daha az karmaşık olan Weibull ve Nakagami- $m$  sönümlü kanal modelleri günümüzde farklı kablosuz haberleşme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu nedenle tez çalışmamızda bu sönümlü kanal modelleri de kullanılmaktadır.

### 3.4.3 Nakagami- $m$ Sönümlü Kanal Modeli

Nakagami- $m$  dağılımı, bir sönümlü kanal üzerinden alınan sinyal genliğini tanımlamak için kullanılabilir daha yaygın bir yaklaşımdır. Çok yollu dalgalar için en genel durumda türetilen Nakagami- $m$  dağılımı, çeşitli kanal koşulları altında benzer şekilde sönümleme senaryosunu ve alınan sinyalin sönümleme istatistiklerini modellemek için kullanılır. Nakagami- $m$  dağılımı, hem Rayleigh hem de Rician dağılımlarını açıklama yeteneğine sahiptir [33]. Rician dağılımından farklı olarak Nakagami- $m$  dağılımı, verici ve alıcı arasında LOS koşullarını varsaymaz, deneysel verileri tanımlamak ve yaklaşık dağılımı elde etmek için parametrik bir gama dağılımına dayalı yoğunluk fonksiyonu kullanır. Nakagami- $m$  dağılımının olasılık yoğunluk işlevi (PDF) şu şekildedir:

$$f(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mr^2}{\Omega}\right), \quad r \geq 0, \quad (3.20)$$

$m$ , değeri  $1/2$  ile  $\infty$  arasında değişen Nakagami- $m$  sönümleme parametresidir. Ayrıca  $\Omega$ , çok yollu dağılım alanının ortalama gücüdür. Burada  $\Gamma(m)$  gama fonksiyonunu tanımlar. Böylece,  $r$  ile temsil edilen alınan sinyal zarfı bir Nakagami- $m$  dağılımına sahip olacaktır [33].

### 3.4.4 Weibull Sönümlü Kanal Modeli

Çok kanallı veri iletimi, özellikle veri tespitinde karmaşık ve zor bir problemdir. Neyse ki, Weibull dağılımı özellikleri nedeniyle bu problemlerin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabilir. Weibull dağılımı hem iç hem de dış ortam yayılma ortamları için kablosuz haberleşme sistemlerinde çok yollu sönümleme kanallarını tanımlamak için kullanılan, esnek ve kullanışlı bir istatistiksel modeldir. Burada  $X$  rastgele bir değişken olduğu kabul edilirse, Weibull Dağılımı'nın PDF'si şu şekildedir:

$$f_X(X) = \frac{mX^{m-1}}{\gamma} \exp\left(-\frac{X}{\gamma}\right), \quad (3.21)$$

burada  $m$ , yalnızca 0 ile  $\infty$  arasında tamsayı değerleri alabilen sönümlenme parametresidir. Ayrıca  $\gamma$ , sönümlenme parametresine ilişkin pozitif bir parametredir [34].

### 3.5 M-QAM

Kablosuz haberleşme sistemlerinde önemli işlemlerden biri sinyallerin modülasyonudur. Modülasyon işlemi, bilgiyi taşıyacak olan taşıyıcı dalganın çeşitli parametrelerini bilgi işaretine bağlı olarak düzenli bir şekilde değiştirilmesidir.

Modülasyon, analog modülasyon ve sayısal modülasyon olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Sürekli bir işaretin özelliklerinin bilgi sinyaline bağlı olarak değişmesi analog modülasyon olarak adlandırılırken sayısal bilgiye göre analog taşıyıcının karakteristik özelliklerinin değiştirilmesi ise sayısal modülasyon olarak adlandırılmaktadır [11].

M-QAM; birbirleri arasında 90 derece faz farkı bulunup aynı frekansta olan iki taşıyıcı sinyalin modüle edilmesini, genlik ve faz değerlerinin ikisinin çıkış olarak alınmasını sağlayan modülasyon çeşitidir. Sinyallerden biri "I" diğeri de "Q" olarak adlandırılır. Matematiksel olarak da biri sinüs dalga, diğeri de kosinüs dalga olarak ifade edilir. Modüle edilmiş bu iki taşıyıcı sinyal iletmek üzere sinyal kaynağı üzerinde bir araya getirilmiştir. Hedefte de bu iki sinyal tekrar ayrılır. Daha sonra veriler birbirinden çıkartılmakta ve bu veriler orijinal modülasyon bilgisi ile tekrardan bir araya getirilmektedir. Sayısal haberleşme uygulamalarında QAM, standart genlik ve faz modülasyonlarına göre daha yüksek oranda veri iletilmesini sağlamaktadır [2].

M-QAM, geniş bantlı kablosuz ağ haberleşmelerinde büyük bant genişliği sağlamak amacı ile tasarlanmıştır. M'li kodlama sisteminde  $2^N = M$  formülünde  $N=2$ ,  $M=4$  değerlerinin yer aldığı modülasyon biçimidir [2].

M'li Karesel Genlik Modülasyonu (M-QAM) türleri yaygın olarak kablosuz iletişimlerde bant genişliği verimini sağlamak için kullanılır [2].

Çok düzeyli Karesel Genlik Modülasyonu (M-QAM), yüksek spektral verimlilik içermesi sebebiyle kablosuz haberleşmede oldukça etkili bir modülasyon şeklidir [2].

## 4. BÖLÜM

### OFDM-IM DONANIM TASARIMI VE FPGA UYGULAMASI

#### 4.1 FPGA'lara Genel Bakış

Elektronik, geçtiğimiz yüzyılda büyük bir ilerleme kaydetmiştir ve önümüzdeki yüzyılda da büyümeye devam etmektedir. Bilgisayar endüstrisinin başlangıcı ve büyümesi, son zamanlarda elektroniğin büyümesinden sorumlu olmuştur. Bundan kırk yıl önce, 1980'lerde mikroişlemciler ve bellek yongaları gibi temel bileşenlerin baskı devre kartları üzerindeki sayısal mantık bileşenleri ile bağlanmasıyla elektronik sistemler oluşturulmuştur. Elektronik büyüdükçe, tümleşik devrelerin içindeki transistör sayısındaki artış, giriş/çıkış pinlerinin sayısındaki artış nedeniyle kararlı baskı devre kartları üretmek daha karmaşık ve zor hale gelmiştir. Bu büyük ilerleme hata olasılığı artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla çalışan bir sistemi üretmeden önce tasarlamak ve test etmek zorlaşmıştır. Çalışan bir sistemi üretimden önce tasarlama ve test etme ihtiyacı, Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA) adı verilen yeni bir teknolojinin ortaya çıkmasını sağlamıştır [35].

FPGA, "Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri" anlamında İngilizce "Field Programmable Gate Array" sözcüklerinin kısaltmasından oluşmaktadır. FPGA, istenen bileşenler arasında programlanabilir bağlantı sağlayan basit "mantık kapısı" teknolojisi olarak tanımlanabilir. FPGA'ların en önemli özelliği tüm tasarımların tek bir entegre devre üzerinde sayısal olarak yapılabilmesidir. Sahada programlanabilir olması ve tasarımları test edip doğrulayabilmesi, FPGA'ları günümüzde popüler kılan özelliklerdir. Bu işlevsellik, tasarımcının üretimden önce geliştirme aşamasında hataları yakalamasına yardımcı olur. Bu hatalar, FPGA'yı basitçe programlayarak düzeltilebilir. Yeniden programlama, mantık blokları dizisi ve yönlendirme kanalları tarafından sağlanır. Böylece FPGA kullanmak, maliyetli ve zaman alıcı kart tasarım prosedüründen kaçınır ve tasarım risklerini azaltır. FPGA'ların esnekliği, farklı örneklerin üzerine

çeşitli uygulamaları onların programlanabilmesini sağlar [35]. FPGA'lar sinyal işlemede iyi performans gösterdiğinden, daha hızlı çıktı ve daha yüksek verim sağladığından, haberleşme sistemlerinde çok sık kullanılabilirler. Özellikle görüntü işleme ve sinyal işleme gibi bilgi girişinin yoğun olduğu ve elde edilen verilerin kısa sürede işlenmesi gibi durumlarda oldukça sık kullanılmaktadır. Neden-sonuç ilişkisi olmayan işlemleri paralel olarak gerçekleştirebilmesi FPGA'ları neredeyse rakipsiz kılmaktadır. Temel olarak FPGA'lar üç temel kaynaktan oluşur: mantık hücreleri/blokları, dış dünya ile bağlantıyı içeren giriş/çıkış (I/O) blokları ve mantık hücrelerini birbirine bağlayan programlama pinleri ve ara bağlantı kabloları. Bu yapılar sayesinde yarı iletken yapı gerekli sinyalleri dışarıya gönderip alabilmektedir [36].

Kullanılmaya başlanan her yeni teknikle birlikte kullanılan ekipmanların da değişmesi gerekecektir. Kullanılan altyapının (baz istasyonları vb.) değiştirilmesi son derece maliyetlidir. Bu maliyetlerin önüne geçebilmek için kullanılmaya başlanan teknolojinin altyapı değiştirilmeden sisteme entegre edilmesi gerekmektedir. FPGA'ların sahada programlanabilir özellikleri sayesinde mevcut donanımın değiştirilmesi veya mevcut donanıma yeni bir tasarım eklenmesi son derece avantajlıdır. FPGA, kaynak/güç verimli olma potansiyeline sahip olduğundan, 5G altyapısının bileşenlerini oluşturmak için kullanılabilir. FPGA'nın saha içi programlama özellikleri, daha iyi kablosuz sistem geliştirmeye yardımcı olmaktadır [36].

#### **4.2 VHDL Programlama Dili**

FPGA'ların programlanması şematik tasarım ve donanım programlama dilleri ile yapılmaktadır. Donanım programlama dili, karmaşık bir yazılım dilidir. Kararlı ve çalışan tasarımlar oluşturmak için donanım altyapısı gerektirir. En yaygın kullanılan programlama dili VHDL'dir. VHDL, Çok Yüksek Hızlı Entegre Devre (Very High Speed Integrated Circuit –VHSIC) anlamına gelmektedir. VHDL, projeyi adım adım geliştirmek ve tasarım parçalarını ayrı ayrı oluşturmak için kullanılır. VHDL ile üst düzey modelleme aşamasında donanım yerleşimi düzeyi gibi davranışsal düzeyden alt düzey tasarıma kadar geniş bir yelpazede tasarım yapmak mümkündür. Ancak daha alt seviyelere inildikçe dikkat edilmesi gereken durumlardan dolayı tasarımın karmaşıklığı artacaktır. VHDL ile tasarlanan devre sentezi araçları, donanım düzeyine indirilebilir. Saklayıcı Transfer Seviyesi (RTL) bağlantısının, kullanılan ifade aracına bağlı olarak

farklılık göstermesi mümkündür. RTL tasarımı mandalları, aritmetik mantık birimlerini, çoklayıcıları ve ara bağlantıları içerir. Sentez aracındaki tüm bu RTL bağlantıları oluşturulduktan sonra, sentez işlemi nedeniyle mantık geçidi seviyesindeki bağlantılar oluşturulacaktır. Daha sonra lojik optimizasyon araçları ile optimize edilmiş lojik kapı tasarımı oluşturulacak ve bu bağlantı tipi FPGA'ya gönderilebilecektir. VHDL ile yazılan kodlar karşılığında ise derleme sayesinde FPGA üzerinde çalışacak bir mantık devresi sentezlenerek fiziksel bir devre elde edilmektedir.

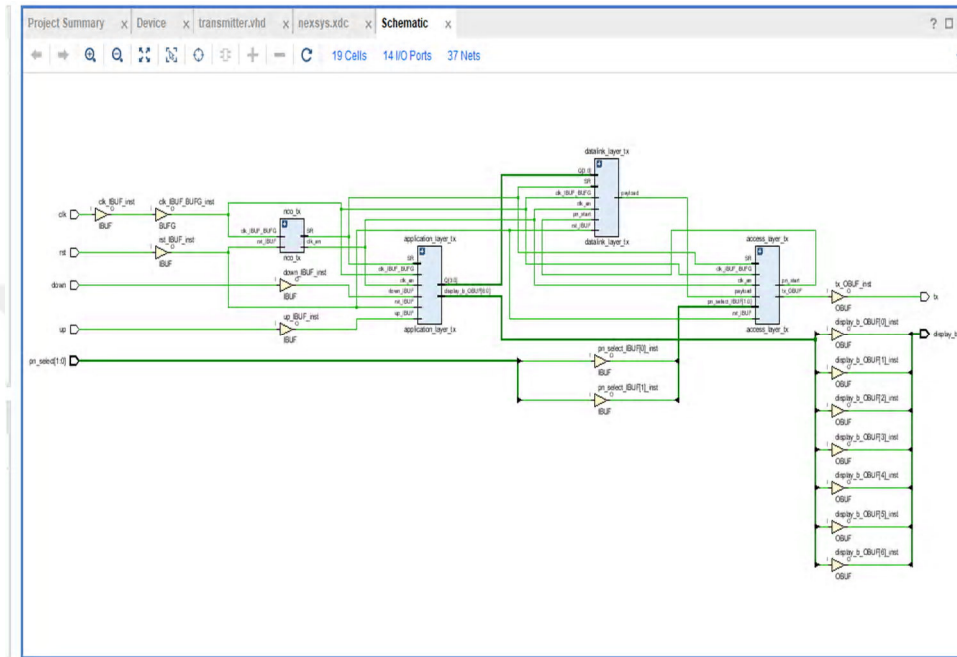
Diğer tüm yazılım dillerinde olduğu gibi VHDL kodları yazılırken dikkat edilmesi gereken bazı kurallar vardır. VHDL kodu oluşturulurken değişken isimleri Türkçe ve özel karakter (alt tire hariç) içermemelidir. Değişkenlerin mutlaka harf ile başlaması gerekmektedir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken konu ise VHDL'in büyük küçük harf duyarlılığının olmamasıdır. Küçük harf ile tanımlanan bir değişken ya da komut büyük harf ile de kullanıldığında hata alınmaz. Bu özellik VHDL'e ait hazır komutlarda da geçerlidir [36].

VHDL kod bloğu temel olarak Kütüphane (library) tanımlama, Varlık (entity) oluşturma ve Mimari (architecture) oluşturma olmak üzere 3 temel kısımdan oluşmaktadır. Kütüphane kısmı, tasarımda kullanılacak olan kütüphanelerin tanımlamalarının yapıldığı kısım olarak ifade edilir. Varlık kısmı, tasarıma ait giriş ve çıkışların belirlendiği kısım olarak ifade edilirken mimari kısım kütüphanesi ve giriş çıkışları tanımlanan tasarımın yapacağı işlem olarak tanımlanmaktadır [36].

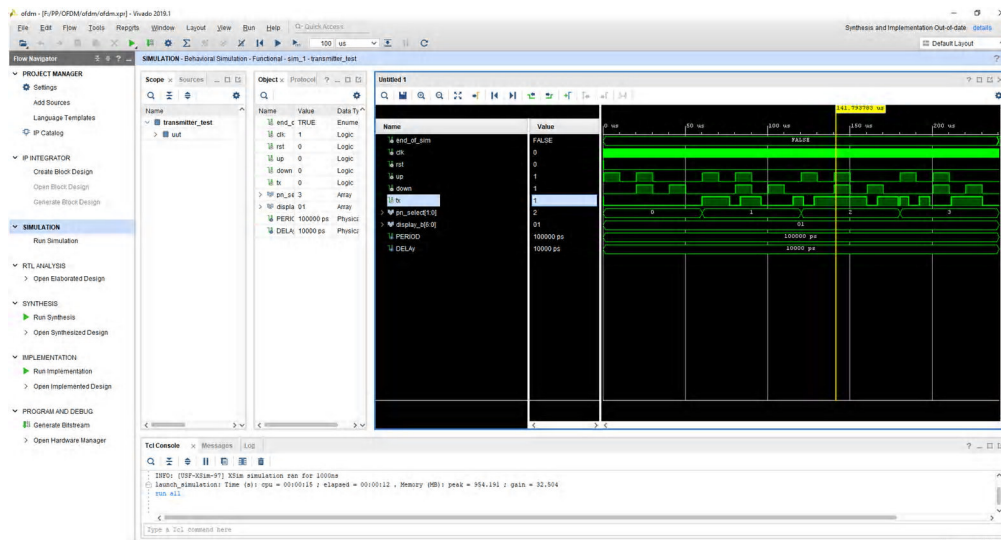
### 4.3 FPGA Uygulaması ve Benzetim Sonuçları

OFDM-IM tekniğini kullanan çalışmalar genellikle MATLAB gibi araçlarla benzetime dayalı olsa da donanım uygulamaları da son zamanlarda popüler olmuştur. 5G haberleşme sistemlerinin temelini oluşturan OFDM-IM tekniğindeki temel alıcı-verici bloklarının FPGA üzerinde uygulanmasını sağlayan VHDL kodları oluşturulmuştur. OFDM-IM haberleşme sisteminde modülasyon tipi olarak yüksek seviye M-QAM seçilmiştir. OFDM-IM sistem algoritmasını FPGA üzerinde gerçekleştirmek için tasarlanan mimaride; RAM modülleri ile toplama, çıkarma ve çarpma işlemleri kullanılmıştır. Toplama, çıkarma ve çarpma işlemlerinden sonra sonuçlar ilgili adımın RAM modüllerinde tutulmuştur. Sentez sonucu ortaya çıkan RTL devre şeması Şekil 4.1'de verilmiştir. OFDM-IM sistemine ait VHDL kodu, uygulama için Nexys Video

Artix-7 kartına indirilmeden önce Vivado yazılımında modellenmiş ve simüle edilmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir [37]. Sentezden çıkan VHDL kodu FPGA'ya yüklenmiş ve modülasyon bloğu uygulanmıştır. Sistem tasarımı bir Nexys Video Artix-7 FPGA üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 OFDM-IM sisteminin RTL devre şemasına ait ekran görüntüsü



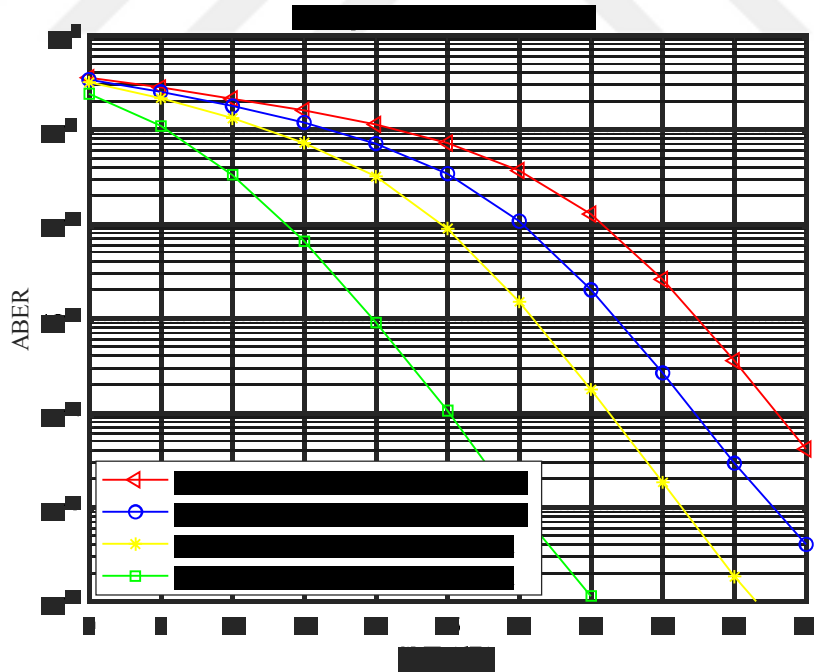
Şekil 4.2 OFDM-IM sisteminin benzetim sonucuna ait ekran görüntüsü

## 5. BÖLÜM

### BENZETİM SONUÇLARI

#### 5.1 Farklı Seviyeli M-QAM Kullanan Nakagami- $m$ ve Weibull Sönümlü Kanallarına Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları

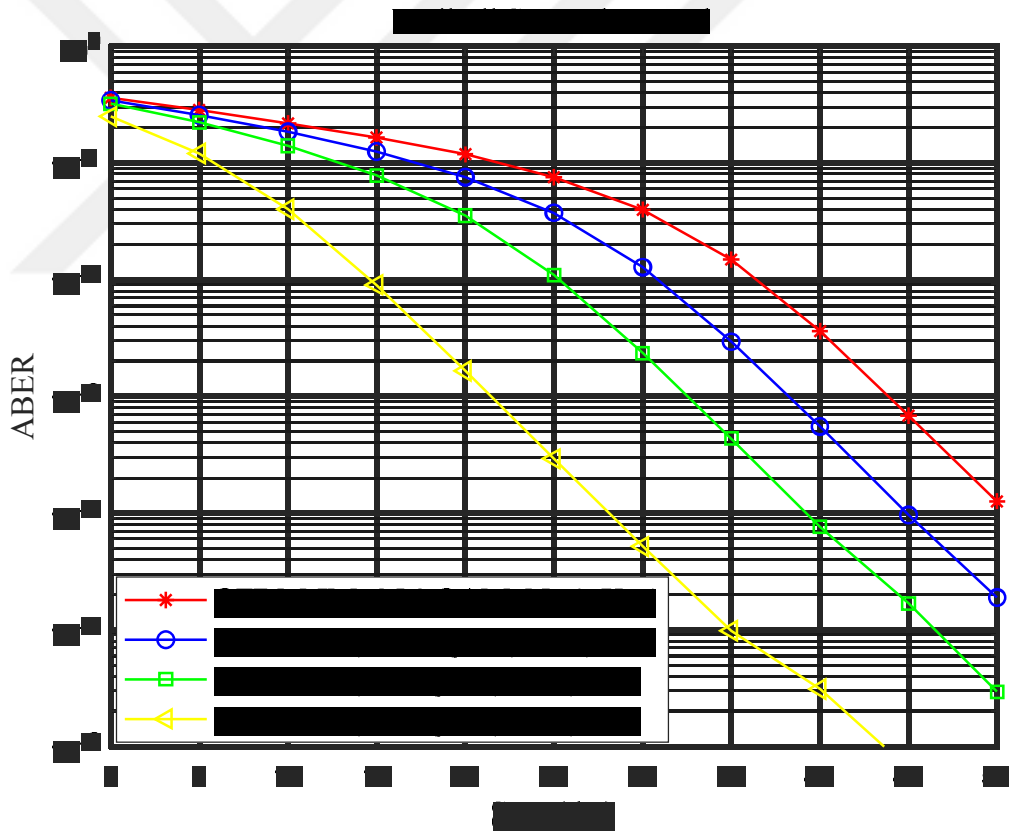
Weibull ve Nakagami- $m$  sönümlü kanalları üzerinden farklı düzey M-QAM ve 1000 OFDM-IM sembolüne sahip OFDM-IM haberleşme sisteminin ABER-SNR değeri MATLAB programı kullanılarak simüle edilmiştir. Böylece kablosuz haberleşme sistemlerinde üst düzey modülasyonların kullanılmasının sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır [38].



Şekil 5.1 Nakagami- $m$  sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması

Şekil 5.1'de, Nakagami- $m$  sönümlü kanal üzerinden farklı düzey M-QAM kullanan (16QAM, 64QAM, 128 QAM ve 256 QAM gibi) OFDM-IM haberleşme sistemlerinin ABER değeri karşılaştırılmıştır. Burada alt taşıyıcı sayısı  $N$ , 4 ( $N=4$ ) ve toplam aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$ , 1 ( $K=1$ ) olarak alınmıştır. 64 QAM, 128 QAM ve 256 QAM ile karşılaştırıldığında 16QAM'in en iyi performansı (en düşük ABER) verdiği görülmektedir [38].

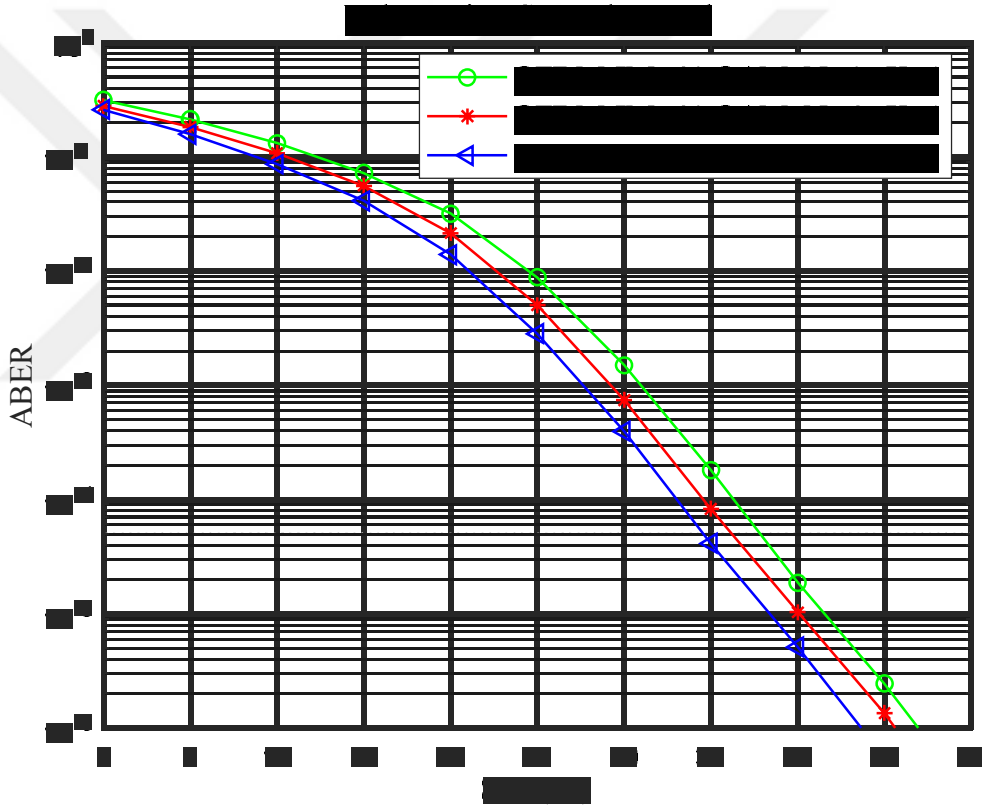
Son zamanlarda çok popüler hale gelen Weibull sönümlü kanal üzerinden OFDM-IM sistemlerinde farklı M-QAM seviyelerinin sistem performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Şekil 5.2'de, aynı SNR değeri için modülasyon seviyesi arttıkça ABER değerinin arttığı görülmektedir. [38].



Şekil 5.2 Weibull sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması

## 5.2 Nakagami- $m$ ve Weibull Sönümlü Kanallarında Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları

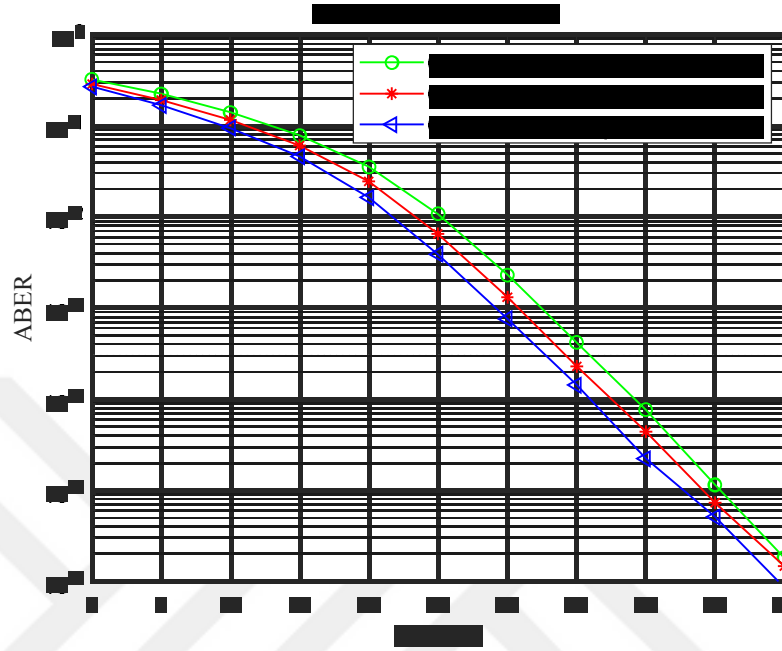
Alternatif olarak, toplam alt taşıyıcı sayısı,  $N$  değerinin OFDM-IM sisteminin ABER değeri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun için tüm konfigürasyonda toplam aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$ , 1 iken ( $K=1$ ), toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$  sırasıyla 4, 6 ve 8 değerlerini almaktadır. Nakagami- $m$  sönümlü kanal üzerinden 64QAM tabanlı OFDM-IM sistemleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda Şekil 5.3'te, toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$  değeri arttıkça sistem performansının da arttığı görülmektedir [38].



Şekil 5.3 Nakagami- $m$  sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

Son zamanlarda çok popüler hale gelen Weibull sönümleme kanalı üzerinden 64QAM tabanlı OFDM-IM sistemlerinde toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$  değerinin etkinliği de araştırılmıştır. Bunun için tüm konfigürasyonda toplam aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$ , 1 ( $K=1$ ) iken, toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$  sırasıyla 4, 6 ve 8 değerlerini almaktadır. Bu

inceleme sonucunda Şekil 5.4'te en düşük ABER değerinin toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$ , 8'e ( $N=8$ ) eşit olduğu durumu görebiliriz [38].

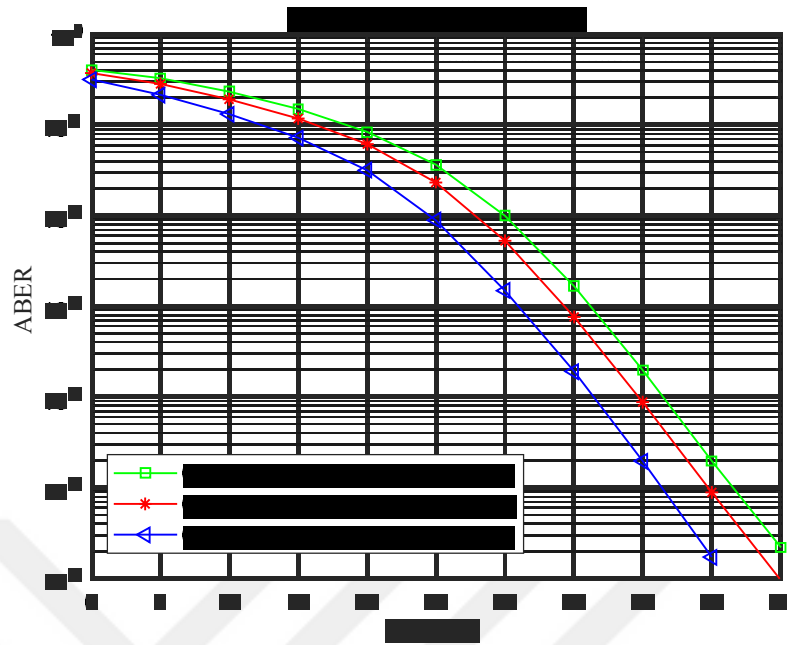


Şekil 5.4. Weibull sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

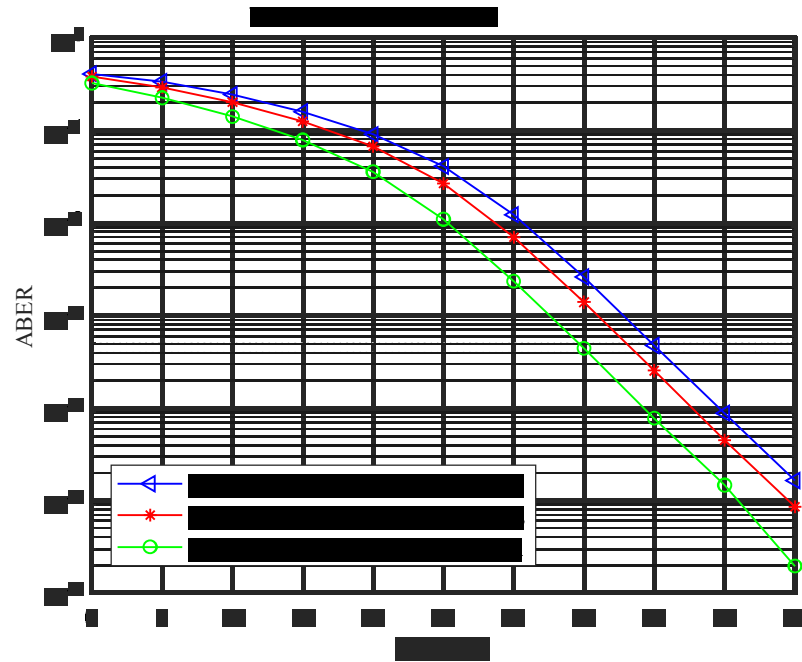
### 5.3 Nakagami- $m$ ve Weibull Sönümlü Kanallarında Toplam Aktif Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları

OFDM-IM sisteminin diğer senaryosu, farklı toplam aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$  değerleri için elde edilen ABER benzetim sonuçları Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Burada toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$ , 4 ( $N=4$ ) iken aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$ , sırasıyla 1, 2 ve 3'tür. Nakagami- $m$  sönümlü kanalı üzerinden 64 QAM tabanlı OFDM-IM sistemi için ABER-SNR değeri incelenmiştir. Alt taşıyıcı sayısı  $N$ , 4'e ( $N=4$ ) eşit olduğunda  $K$  değeri arttıkça ABER değerinin de aktif alt taşıyıcı sayısı artışıyla yükseldiği benzetim sonuçlarından görülmektedir [38].

Benzer şekilde, 64QAM tabanlı OFDM-IM sistem performansı için ABER-SNR değeri, Weibull sönümlü kanalı üzerinden grup başına farklı sayıda aktif alt taşıyıcı için araştırılmıştır. Şekil 5.6'da alt taşıyıcı sayısı  $N$ , 4'e ( $N=4$ ) eşit olduğunda aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$  değeri arttıkça ABER değerinin de arttığı görülmüştür [38].



Şekil 5.5 Nakagami- $m$  sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

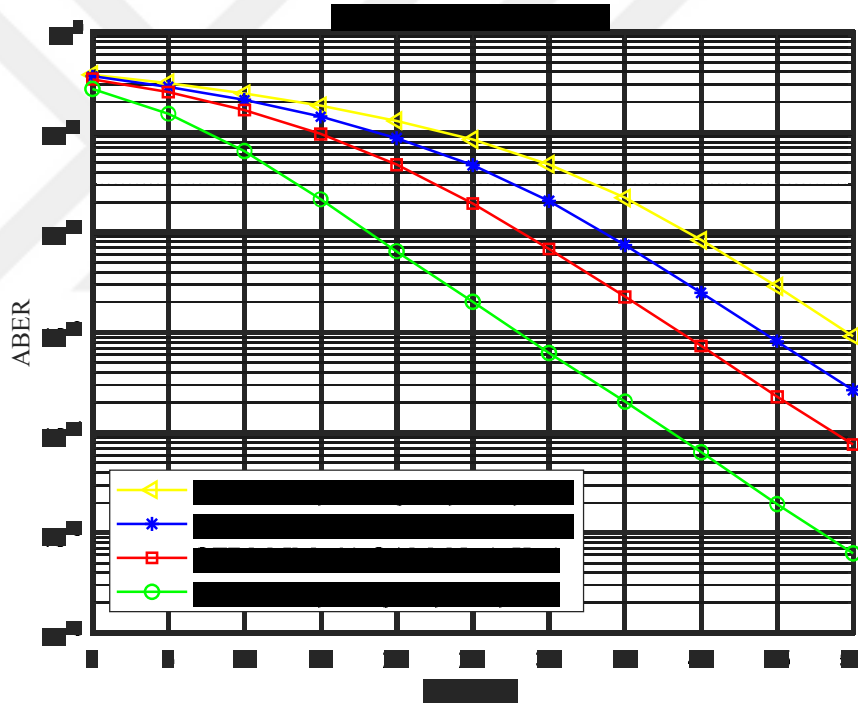


Şekil 5.6 Weibull sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

#### 5.4 Farklı Seviyeli M-QAM Kullanan Rayleigh ve Rician Sönümlü Kanallarına Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları

OFDM-IM sisteminin farklı QAM modülasyon şemalarına sahip ABER-SNR, Rayleigh ve Rician sönümlü kanalları üzerinden simüle edilmiştir.

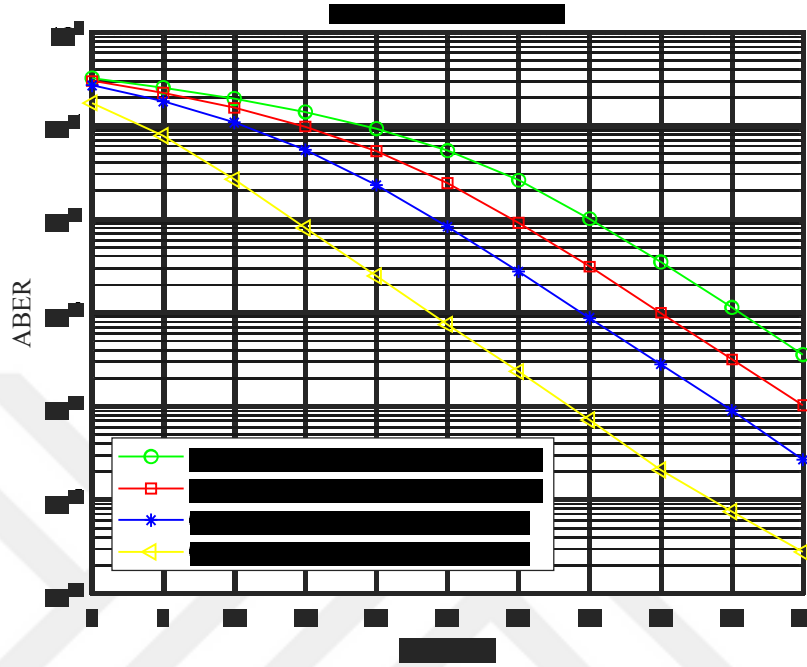
16, 64, 128 ve 256 QAM tabanlı OFDM-IM sisteminin Rayleigh sönümlü kanalı üzerinden benzetim sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmektedir [39]. Aynı SNR değeri için modülasyon seviyesi arttıkça ABER değerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca Rayleigh sönümlü kanalı üzerinden modülasyon seviyesi arttıkça ABER değerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 5.7 Rayleigh sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması

Rician sönümlü kanal üzerinden 16, 64, 128 ve 256 QAM tabanlı OFDM-IM sisteminin performansı araştırılmıştır. Şekil 5.8'de düşük seviyeli modülasyonda (16QAM gibi) daha düşük bir ABER değeri olduğu için sistemin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir [39]. Böylece, Rayleigh ve Rician sönümlü kanalları üzerinden 16

QAM modülasyonu kullanmanın en iyi ABER performansını verdiği sonucuna varılabilir.

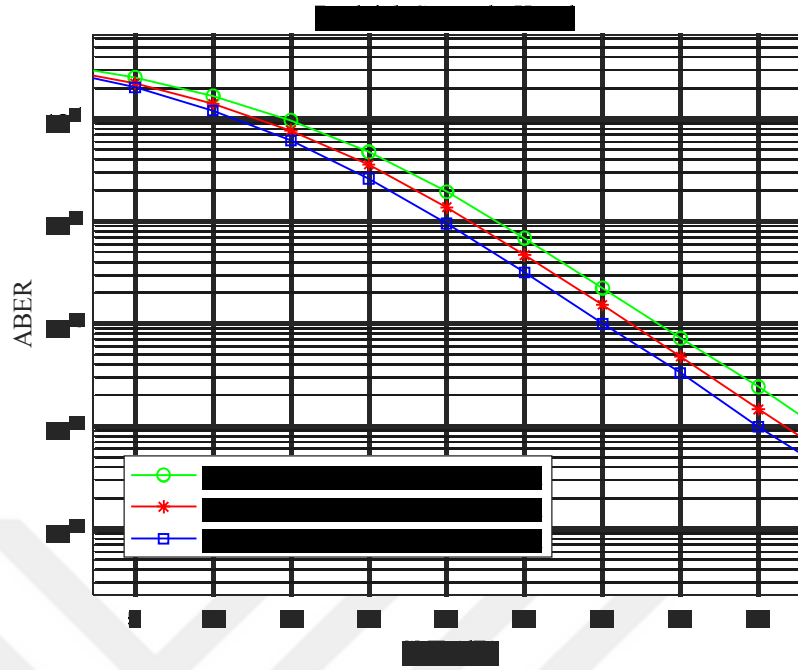


Şekil 5.8 Rician sönümlü kanal üzerinden farklı seviyede M-QAM kullanan OFDM-IM sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması

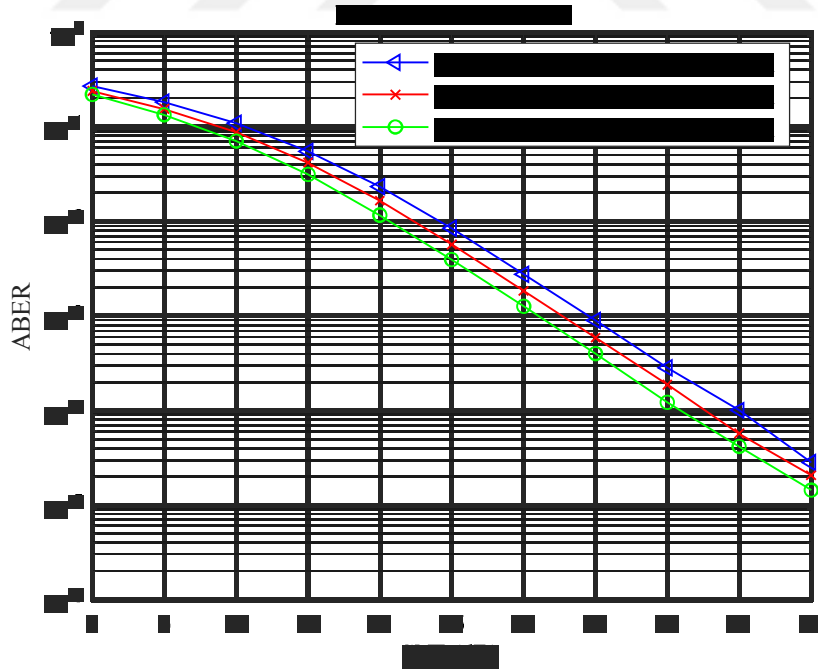
### 5.5 Rayleigh ve Rician Sönümlü Kanallarında Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları

Şekil 5.9'da Rayleigh sönümlü kanalı üzerinden 64 QAM tabanlı OFDM sistemi için ABER-SNR değerinin taşıyıcı sayısına bağlı olduğu görülebilir [39]. Aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$ , 1'e ( $K=1$ ) eşit olduğunda alt taşıyıcı sayısı  $N$  değeri arttıkça ABER değerinin düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlara göre alt taşıyıcı sayısı ne kadar az ise sistem performansı o kadar iyidir.

Benzer şekilde, 64QAM tabanlı OFDM-IM sistem performansı için ABER-SNR değeri, Rician sönümlü kanal üzerinden farklı sayıda alt taşıyıcı için araştırılmıştır. Aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$ , 1'e ( $K=1$ ) eşit olduğunda alt taşıyıcı sayısı  $N$  değeri arttıkça ABER değerinin düştüğü Şekil 5.10'daki benzetim sonucundan görülmüştür [39]. Böylece Rician sönümlü kanal üzerinden OFDM-IM sistemlerindeki alt taşıyıcı sayısının artması sistem performansını arttırmaktadır.



Şekil 5.9 Rayleigh sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

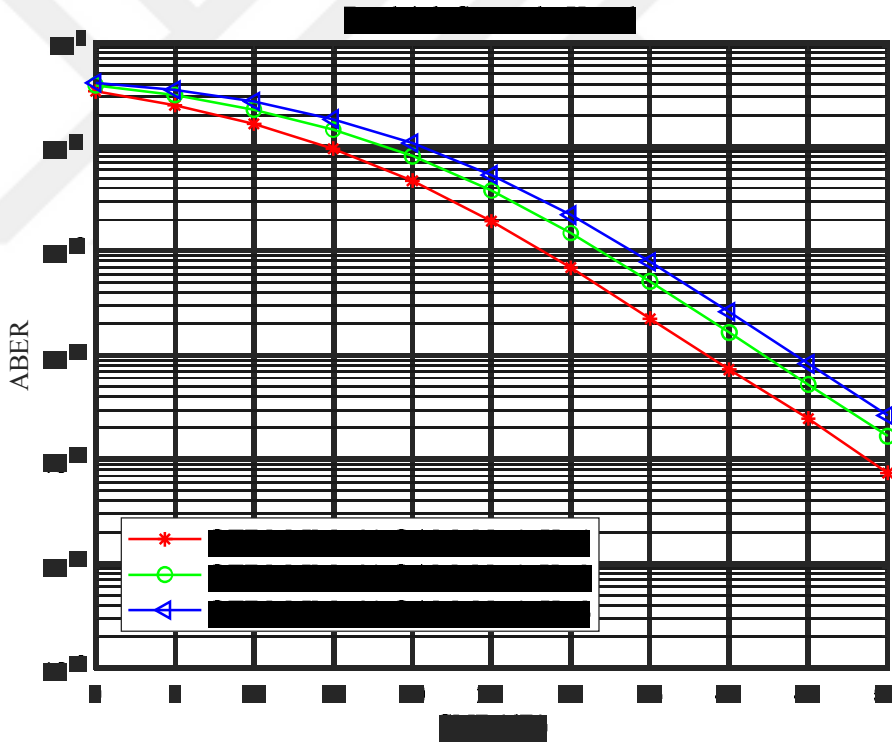


Şekil 5.10 Rician sönümlü kanal üzerinden toplam alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

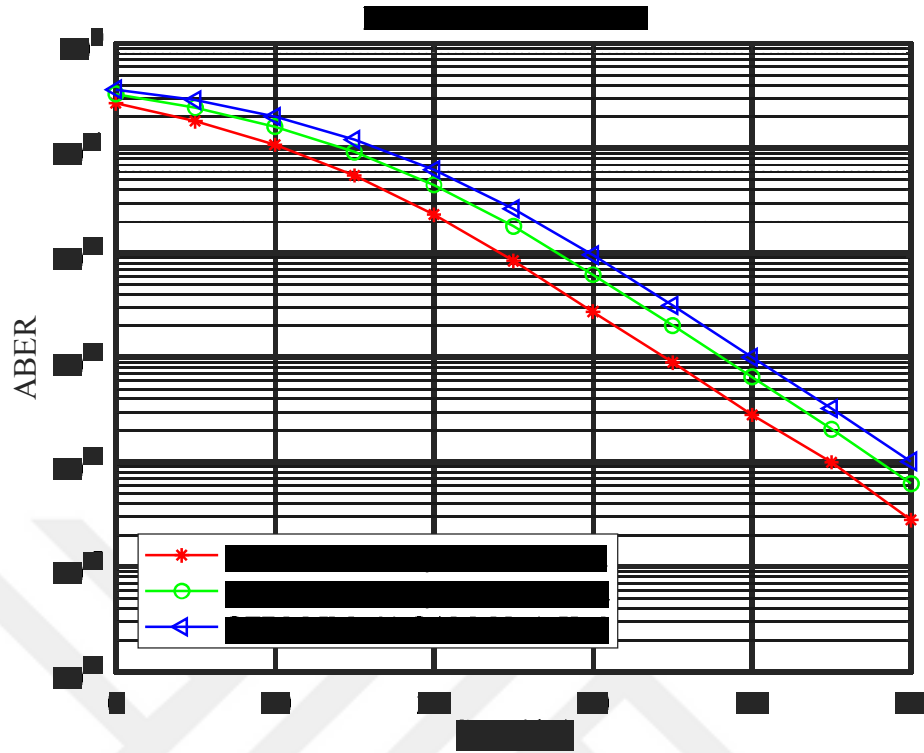
### 5.6 Rayleigh ve Rician Sönümlü Kanallarında Toplam Aktif Alt Taşıyıcı Sayısı Değişimine Ait ABER Bilgisayar Benzetim Sonuçları

Rayleigh sönümlü kanalı üzerinden 64 QAM tabanlı OFDM-IM sistemi için ABER-SNR değerinin, aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olduğu Şekil 5.11'deki benzetim sonucundan görülmektedir [39]. Alt taşıyıcı sayısı  $N$ , 4'e ( $N=4$ ) eşit olduğunda aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$  değeri arttıkça ABER değerinin arttığı açıktır.

Şekil 5.12'den görülebileceği gibi, Rician sönümlü kanalı üzerinden 64 QAM tabanlı OFDM-IM sistemi için ABER-SNR değeri, aktif alt taşıyıcıların sayısına bağlı olduğu Şekil 5.12'deki benzetim sonucundan görülmektedir [39]. Benzetim sonuçları, aktif alt taşıyıcı  $K$  değeri arttıkça ABER değerinin arttığını göstermektedir.



Şekil 5.11 Rayleigh sönümlü kanalı üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması



Şekil 5.12 Rician sönümlü kanal üzerinden toplam aktif alt taşıyıcı sayısına bağlı olarak OFDM-IM sistem performansının karşılaştırılması

## 6. BÖLÜM

### SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı; Weibull, Nakagami- $m$ , Rayleigh ve Rician sönümlü kanallar üzerinden yüksek seviyeli M-QAM kullanımının (16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM gibi) OFDM-IM sistemlerinin performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Literatürde OFDM-IM sistemlerinin Weibull, Nakagami- $m$ , Rayleigh ve Rician gibi farklı sönümlü kanallarda üst düzey M-QAM (16QAM, 64QAM, 128QAM ve 256QAM gibi) kullanılarak hata performans analizinin yapılması konusuna değinilmediği yapılan literatür değerlendirilmesi sonucunda görülmüştür. OFDM-IM sistem performansı, bilgisayar benzetimleri kullanılarak ve ortalama bit hata oranı (ABER) dikkate alınarak analiz edilmiştir. M'li karesel genlik modülasyonu (M-QAM) seviyesinin artırılarak bant genişliği verimliliğini arttırmak amaçlanmıştır. Her bir sönümlü kanal için incelediğimizde modülasyon seviyesinin artması ile ABER değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Sayısal modülasyon teorisinden beklendiği gibi 16 QAM, diğer modülasyon şemaları ile karşılaştırıldığında en düşük ABER değerini verdiği görülmüştür. Sonuçlar, yüksek seviyeli modülasyonun bant genişliği verimliliğini sağladığını ancak ABER değerinde artışa neden olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışmasında araştırılan bir diğer konu ise toplam alt taşıyıcı sayısı  $N$  değerinin OFDM-IM sisteminin performansını Weibull, Nakagami- $m$ , Rayleigh ve Rician gibi farklı sönümlü kanallarda nasıl etkilediğidir. Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde toplam alt taşıyıcı sayısının artmasıyla birlikte ABER değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca aktif alt taşıyıcı sayısı  $K$  değerinin OFDM-IM sisteminin ABER değerini Weibull, Nakagami- $m$ , Rayleigh ve Rician gibi farklı sönümlü kanallarda nasıl etkilediği yapılan benzetim sonuçlarından görülmüştür. Artan aktif alt taşıyıcı sayısının OFDM-IM sisteminin ABER değerini arttırdığı elde edilen benzetim sonuçlarından çıkarılmıştır.

Bu çalışma, üst düzey M-QAM (16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM gibi) kullanılan OFDM-IM sistemlerinin Weibull, Nakagami- $m$ , Rayleigh ve Rician gibi farklı sönümlenmeli kanallar üzerindeki performansını inceleyerek literatüre katkı sağlamıştır.



## KAYNAKÇA

1. Acar, Y., Çolak, S. A., Başar, E., 2019. Channel estimation for OFDM-IM systems. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, **27**(3):1908-1921.
2. Alhaydari, J., 2010. PSAM-Tabanlı LMMSE Kanal Tahmini ile Ricean Sönümlenme Ortamında MRC/EGC Anten Çeşitlemesinin M-QAM Sistemleri İçin Performans Analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s.73.
3. Basar, E., Wen, M., Mesleh, R., Di Renzo, M., Xiao, Y., Haas, H., 2017. Index modulation techniques for next-generation wireless networks. **IEEE Access**, **5**: 16693-16746.
4. Wen, M., Cheng, X., Yang, L., 2017. Index modulation for 5G wireless communications. **Springer International Publishing**, **52**(3):65-72.
5. Mrkic, J., Kocan, E., 2017. BER Performance of OFDM-IM System in Fading Channels. **ETF Journal of Electrical Engineering**, **23**(1): 15-25.
6. Pamukcu, H., 2018. Channel Estimation in Orthogonal Channel Modulation. Institute of Science, Master thesis, Istanbul, s.95.
7. Memisoglu, E., OFDM with Index Modulation for 5G and Beyond. 2018. Graduate School of Science Engineering and Technology, Master thesis, İstanbul, s.102.
8. Mesleh, R. Y., Haas, H., Sinanovic, S., Ahn, C. W., Yun, S., 2008. Spatial modulation. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, **57**(4): 2228-2241.
9. Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E., Poor, H. V., 2013. Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation. **IEEE Transactions on Signal Processing**, **61**(22): 5536-5549.
10. Khare, A., Trivedi, K., Dixit, S., 2014. Effect of Doppler frequency and ber in FFT based OFDM system with Rayleigh fading channel, 1-6. *In 2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, 1-2 March 2014, IEEE, 866.
11. Priya, B. K., Samundiswary, P., 2017. Spectral Efficiency and BER Analysis of OFDM-IM with M-Ary QAM Under Rayleigh Fading Channel, 1-4. *In 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, December 2017, IEEE, 1405.

12. Li, Q., Wen, M., Dang, S., Basar, E., Poor, H. V., Chen, F., 2019. Opportunistic spectrum sharing based on OFDM with index modulation. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, **19**(1): 192-204.
13. Vajjiravelu, S., & Punitha, A., 2013. Survey on wireless technologies and security procedures, 352-355. *In 2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems*, February 2013, IEEE, 1204 pp.
14. Calle-Sánchez, J., Molina-García, M., Alonso, J. I., Fernández-Durán, A., 2013. Long term evolution in high speed railway environments: Feasibility and challenges. **Bell Labs Technical Journal**, **18**(2): 237-253.
15. Wang, C. X., Haider, F., Gao, X., You, X. H., Yang, Y., Yuan, D., Hepsaydir, E., 2014. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. **IEEE Communications Magazine**, **52**(2): 122-130.
16. Andrews, J. G., 2014. What will 5G be? **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, **32**(6):1065–1082.
17. Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., Popovski, P., 2014. Five disruptive technology directions for 5G. **IEEE Communications Magazine**, **52**(2): 74-80.
18. Haider, F., Wang, C. X., Haas, H., Yuan, D., Wang, H., Gao, X., Hepsaydir, E. 2011. Spectral efficiency analysis of mobile femtocell based cellular systems, 347-351. *In 2011 IEEE 13th international conference on communication technology*, September 2011, IEEE, 1387.
19. Albreem, M. A. 2015. 5G wireless communication systems: Vision and challenges, 493-497. *In 2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology*, April 2015, IEEE, 1564.
20. Renzo, M., Haas, H., Ghrayeb, A., Sugiura, S., Hanzo, L., 2013. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation. **Proceedings of the IEEE**, **102**(1): 56-103.
21. Basar, E., 2016. Index modulation techniques for 5G wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, **54**(7): 168-175.
22. Xiao, Y., Wang, S., Dan, L., Lei, X., Yang, P., Xiang, W., 2014. OFDM with interleaved subcarrier-index modulation. **IEEE Communications Magazine**, **18**(8): 1447–1450.

23. Cheng, C. C., Sari, H., Sezginer, S., Su, Y. T., 2015. Enhanced spatial modulation with multiple signal constellations. **IEEE Transactions on Communications**, **63**(6): 2237-2248.
24. Wang, C. X., Haider, F., Gao, X., You, X. H., Yang, Y., Yuan, D., Hepsaydir, E., 2014. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. **IEEE Communications Magazine**, **52**(2): 122-130.
25. Jeganathan, J., Ghayeb, A., Szczecinski, L., 2008. Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis. **IEEE Communications Letters**, **12**(8): 545-547.
26. Naidoo, N. R., Xu, H. J., Quazi, T. A. M., 2011. Spatial modulation: optimal detector asymptotic performance and multiple-stage detection. **IET Communications**, **5**(10): 1368-1376.
27. Siddiq, A. I., 2016. Low complexity OFDM-IM detector by encoding all possible subcarrier activation patterns. **IEEE Communications Letters**, **20**(3): 446-449.
28. Tsonev, D., Sinanovic, S., Haas, H., 2011. (). Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM, 728-732. *In 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, December 2011, IEEE, 1678.
29. Kuo, P. H., Kung, H. T., 2014. Subcarrier index coordinate expression (SICE): An ultra-low-power OFDM-compatible wireless communications scheme tailored for internet of things, 97-102. *In 2014 International Conference on the Internet of Things*, October 2014, Cambridge, IEEE, 1356.
30. Basar, E., 2015. Multiple-Input-Multiple-Output OFDM with Index Modulation. **IEEE Signal Processing Letters**, **(22)**:12 2259 – 2263
31. Can, M., Altunbaş, İ., Başar, E., 2019. Media-based modulation assisted non-orthogonal multiple access, 1-4. *In 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference*, April 2019, Sivas, IEEE, 1265.
32. Yıldırım, İ., 2019. Ortam Tabanlı Modülasyonlu Özgün Sistem Tasarımları. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 93.
33. Hongbo, L., 2003. Analysis and simulation of Nakagami fading channel with MATLAB,490-494. *Asia Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, November 4-7,2003, Hangzhou, China CEEM'03, 1546.

34. Cheng, J., Tellambura, C., and Beaulieu, N. C., 2004. Performance of digital linear modulations on weibull slow-fading channels, **IEEE Transaction on Communications**, **52**(8): 1265–1268.
35. Keerthana, R., Rajaram, S., 2019. FPGA implementation of FBMC baseband modular for 5G wireless communication, 718-723. *In 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies*, July 2019, Kannur, India, IEEE, 1789.
36. Yu, L., Wang, M., Feng, J., Jiang, X., Li, Y., 2013. The high-speed optical OFDM transmitter based on FPGA, 415-418. *In IET International Conference on Smart and Sustainable City*, August 2013, Shanghai, IET, 2087.
37. Cönger, S., Ceniklioğlu, B., Develi İ., 2022. FPGA implementation of OFDM-IM systems over Weibull fading channels, 1686-1692. *3. International Cappadocia Scientific Research Congress*, 11-12 December 2022, Cappadocia-Nevşehir, İKSAD, 2134.
38. Cönger, S., Ceniklioğlu, B., Develi İ., 2022. Investigation of the effect of high level modulations on the performance of OFDM-IM systems over Weibull and Nakagami- $m$  fading channels, 1396-1401. *3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 20-23 July 2022, Konya, ICEANS, 2447.
39. Cönger, S., Ceniklioğlu, B., Develi İ., 2022. Performance analysis of different high-level modulation techniques for OFDM-IM system, 1515-1524. *2. International Cappadocia Scientific Research Congress*, 17-19 June 2022, Cappadocia-Nevşehir, İKSAD, 2127.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Senem Cönger  
**Uyruğu:** Türkiye (T.C)

### EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği	2023
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği	2019
Lise	Mustafa Yelkenoğlu Anadolu Lisesi, Kayseri	2014

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-Halen	Kapadokya Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### YABANCI DİL

İngilizce

### YAYINLAR

1. Cönger, S., Ceniklioğlu, B., Develi İ., 2022. Performance analysis of different high-level modulation techniques for OFDM-IM system, 1515-1524. 2. *International Cappadocia Scientific Research Congress*, 17-19 June 2022, Cappadocia-Nevşehir, İKSAD, 2127.

2. Cönger, S., Ceniklioğlu, B., Develi İ., 2022. Investigation of the effect of high level modulations on the performance of OFDM-IM systems over Weibull and Nakagami- $m$  fading channels, 1396-1401. *3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 20-23 July 2022, Konya, ICEANS, 2447.

3. Cönger, S., Ceniklioğlu, B., Develi İ., 2022. FPGA implementation of OFDM-IM systems over Weibull fading channels, 1686-1692. 3. *International Cappadocia Scientific Research Congress*, 11-12 December 2022, Cappadocia-Nevşehir, İKSAD, 2134.

