

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**5G VE ÖTESİ ÇOKLU NUMEROLOJİ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE
NUMEROLOJİLER ARASI GİRİŞİMİ KALDIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buğra Alp ÇEVİKGİBİ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

TEMMUZ 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Buğra Alp ÇEVİKGİBİ

İMZA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

5G VE ÖTESİ ÇOKLU NUMEROLOJİ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE

NUMEROLOJİLER ARASI GİRİŞİMİ KALDIRMA

Buğra Alp ÇEVİKGİBİ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Tarih: Temmuz 2021

Beşinci Nesil Yeni Radyo (5G NR) ve Ötesi kablosuz haberleşme sistemlerinin, çeşitli haberleşme gereksinimlerini desteklemesi gerekmektedir. Bu çeşitli gereksinimler şu şekilde özetlenebilir; geliştirilmiş mobil geniş bant (eMBB), yoğun makine tipi iletişim (mMTC) ve ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (URLLC). Farklı gereksimleri desteklemek için farklı alt taşıyıcı aralıklı (subcarrier spacing) dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) sinyallerinin kullanılması gerekmektedir. Bu farklı taşıyıcı aralıklı OFDM sinyalleri numerolojiler olarak adlandırılır. Fakat aynı frekans bandında birden fazla numeroloji kullanımı, farklı numerolojilerin birbirlerine girişim yapmasını neden olmaktadır, bu girişim, numerolojiler arası girişim (INI) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, numerolojiler arası girişimin vericide (BS) tamamen ortadan kaldırılmasını sağlayan bir çözüm önerilmiştir. Bu sayede, kullanıcılara (UE), INI kaldırılmış çoklu numerolojili OFDM sinyalleri gönderilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: 5G Yeni Radyo, Çoklu Numeroloji, Numerolojiler Arası Girişim, Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama

ABSTRACT

Master of Science

INTER-NUMEROLOGY INTERFERENCE REMOVAL FOR 5G AND BEYOND

MIXED-NUMEROLOGY COMMUNICATIONS

Buğra Alp ÇEVİKGİBİ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Electric and Electronic Engineering Science Programme

Supervisor: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Date: July 2021

Fifth Generation New Radio (5G NR) and Beyond wireless communication systems are required to support various communication requirements. These variety of communication requirements can be summarized as follows; enhanced mobile broadband (eMBB), massive machine type communication (mMTC) and ultra-reliable and low latency communication (URLLC). To support different requirements, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals with variable subcarrier spacing must be used. These variable carrier spacing OFDM signals are called as numerologies. However, using more than one numerology in the same frequency band causes interference among the numerologies, this interference is called as inter-Numerology interference (INI). In this study, a solution is proposed that completely removes the inter-Numerology interference on the transmitter side (BS). Therefore, multiple numerology OFDM signals without any INI can be transmitted to User Equipments (UE).

Keywords: 5G New Radio, Mixed Numerology, Inter-Numerology Interference, Orthogonal Frequency Division Multiplexing



TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli danıőmanlarım Ali Murat **DEMİRTAŐ**'a, ve Tolga **GİRİCİ**'ye kıymetli tecrübeleri için teşekkür ederim. Bu süreçte bana destek veren ailem Figen Çevikgibi ve Süleyman Çevikgibi'ye ve arkadaşlarım Barıő Çelik, Çelik Boęa, Murat Güngen'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	15
1.1 Motivasyon	16
1.2 Tezin Katkısı.....	17
1.3 Tezin Organizasyonu	18
1.4 Literatür Araştırması	18
1.5 5G'nin Kullanım Alanları.....	20
1.5.1 Gelişmiş Mobil Geniş Bant (eMBB).....	20
1.5.2 Büyük Makine Tipli İletişim (mMTC).....	20
1.5.3 Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC).....	20
1.5.4 5G Hizmetlerinin Birlikte Kullanılması (Multiplexing Services).....	21
1.6 5G'de Desteklenen Numerolojiler	22
1.7 5G Downlink Sistemleri için Dalga Formu Adaylarına Genel Bakış.....	23
1.7.1 5G Ortogonal Dalga Formu Adayları.....	23
1.7.2 5G Ortogonal Olmayan Dalga Formu Adayları.....	24
2. SİSTEM MODELİ	25
2.1 Numerolojiler Arası Girişimin DFT ve IDFT Matrisleri ile Analizi	29
2.1.1 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 için DFT ve IDFT Matrisleri	29
2.1.2 Numeroloji 0'ın Numeroloji 1'e oluşturduğu İNİ'nin İncelenmesi	30
2.1.3 Numeroloji 1'in Numeroloji 0'e oluşturduğu İNİ'nin İncelenmesi	33
2.2 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 Ortak İNİ Matrisinin Oluşturulması	35
3. SİMULASYON SONUÇLARI	37
3.1 Koruyucu Bant Kullanılarak İNİ Azaltma	38
3.2 Hiçbir İNİ Azaltma Metodunun Kullanılmaması	39
3.3 İNİ Kaldırma Çözümünün BER Performansı.....	39
3.3.1 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 Aynı Dereceli Modülasyonu Kullanma Durumu	39
3.3.2 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 Farklı Dereceli Modülasyonu Kullanma Durumu	41
3.3.3 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 için Kusurlu Kanal Tahmini Durumu.....	44
3.4 İNİ Kaldırma Çözümü ve Koruyucu Bant Tekniğinin Karşılaştırılması ...	47
3.5 İNİ Kaldırma Çözümü PAPR Analizi.....	51
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Farklı numerolojilerin birbirlerine yaptıkları girişim.....	22
Şekil 2.1 : Frekans boyutunda numerolojilerin yerleştirimi.....	27
Şekil 2.2 : Çoklu numeroloji OFDM alıcı vericisi (Transceiver).....	28
Şekil 2.3 : Frekans-Zaman boyutunda çoklu numerolojilerin yerleştirimi	28
Şekil 2.4 : Zaman Boyutunda numeroloji 0'ın numeroloji 1'e yaptığı girişimlerin gösterimi	31
Şekil 2.5 : Zaman Boyutunda numeroloji 1'in numeroloji 0'a yaptığı girişimlerin gösterimi	33
Şekil 3.1 : Numeroloji 0 ve numeroloji 1'in, Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 16 QAM modülasyonu için BER performansları	39
Şekil 3.2 : Numeroloji 0 ve numeroloji 1'in, Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 64 QAM modülasyonu için BER performansları	40
Şekil 3.3 : Numeroloji 0 ve numeroloji 1'in, Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 256 QAM modülasyonu için BER performansları	41
Şekil 3.4 : Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 256 QAM numeroloji 0 ve 16 QAM numeroloji 1'in BER performansları.....	42
Şekil 3.5 : Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 64 QAM numeroloji 0 ve 16 QAM numeroloji 1'in BER performansları.....	43
Şekil 3.6 : Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 256 QAM numeroloji 0 ve 64 QAM numeroloji 1'in BER performansları.....	44
Şekil 3.7 : Kusurlu Kanal Tahmini durumlarında, normal bir 16-QAM CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji 16-QAM OFDM sinyali BER performansları	45
Şekil 3.8 : Kusurlu Kanal Tahmini durumlarında, normal bir 64-QAM CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji 64-QAM OFDM sinyali BER performansları	46
Şekil 3.9 : Kusurlu Kanal Tahmini durumlarında, normal bir 256-QAM CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji 256-QAM OFDM sinyali BER performansları	47
Şekil 3.10 : Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, numeroloji 0'ın 6 alt taşıyıcı koruyucu bandı ile INI kaldırma çözümünün 16 QAM modülasyonu için BER performansları.....	48
Şekil 3.11 : Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, numeroloji 0'ın 12 alt taşıyıcı koruyucu bandı ile INI kaldırma çözümünün 64 QAM modülasyonu için BER performansları.....	49
Şekil 3.12 : Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, numeroloji 0'ın 12 alt taşıyıcı koruyucu bandı ile INI kaldırma çözümünün 256 QAM modülasyonu için BER performansları.....	50

Şekil 3.13 : 512-1024 DFT'li INI kaldırma yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 16-QAM modülasyon için PAPR CCDF analizleri.....	52
Şekil 3.14 : 512-1024 DFT'li INI kaldırma yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 64-QAM modülasyon için PAPR CCDF analizleri.....	53
Şekil 3.15 : 512-1024 DFT'li INI kaldırma yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 256-QAM modülasyon için PAPR CCDF analizleri.....	54



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : 5G Numerolojileri.....	21
Çizelge 3.2 : Simülasyon Parametreleri.....	37



KISALTMALAR

OFDM	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Divison Multipexing)
5G-NR	: 5. Nesil Yeni Radyo (Fifth Generation New Radio)
4G	: 4. Nesil Haberleşme (Fourth Generation Communication)
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
INI	: Numerolojiler Arası Girişim (Inter Numerology Interference)
eMBB	: Geliştirilmiş Mobil Geniş Bant (Enhanced Mobile Broadband)
mMTC	: Yoğun Makine Tipi İletişim (Massive Machine Type Communication)
URRLC	: Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra-Reliable and Low Latency Communication)
IoT	: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
OOBE	: Bant Dışı Emisyon (Out of Band Emission)
SCS	: Alt Taşıyıcı Aralığı (Subcarrier Spacing)
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü (Inverse Discrete Fourier Transform)
IDFT	: Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform)
QAM	: Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
FR	: Frekans Aralığı (Frequency Range)
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
E_b/N_0	: Bit Başına Enerji/Gürültü Gücü Oranı (Energy Per Bit to Noise Power Ratio)
BS	: Baz İstasyonu (Base Station)
UE	: Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment)
SISO	: Tek Girişli Tek Çıkışlı (Single Input Single Output)
FIR	: Sonlu Dürtü Yanıtı (Finite Impulse Response)
NOMA	: Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access)
PAPR	: Tepe-Ortalama Güç Oranı (Peak-to-Average Power Ratio)
CCDF	: Tamamlayıcı Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (Complementary Cumulative Distribution Function)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
μ	Numeroloji indeksi
Δf^μ	Numeroloji alt taşıyıcı aralığı
$\delta(\cdot)$	Delta fonksiyonu
k	Alt taşıyıcı aralığı küçük olan numerolojinin frekans indeksi
l	Alt taşıyıcı aralığı büyük olan numerolojinin frekans indeksi
q	Alt taşıyıcı aralığı büyük olan numerolojinin OFDM sembol indeksi
Q	Büyük numeroloji alt taşıyıcı ve küçük numeroloji alt taşıyıcı oranı
$X_0(k)$	Numeroloji 0'ın k indeksindeki karmaşık sembolü
$X_{1,q}(l)$	Numeroloji 1'in q OFDM sembolündeki l indeksindeki karmaşık sembolü
N	Numeroloji 0'm ayrık Fourier dönüşüm boyutu
M	Numeroloji 1'in ayrık Fourier dönüşüm boyutu
N_{cp}	Numeroloji 0'in çevrimsel önek (Cyclic Prefix) uzunluğu.
M_{cp}	Numeroloji 1'in çevrimsel önek (Cyclic Prefix) uzunluğu.
$\overline{\omega_0^{kn}}$	Numeroloji 0'm ters ayrık Fourier dönüşüm matrisinin elementi
ω_0^{kn}	Numeroloji 0'm ayrık Fourier dönüşüm matrisinin

$\overline{\omega_1^{lm}}$	elementi Numeroloji 1'in ayrık Fourier dönüşüm matrisinin elementi
ω_1^{lm}	Numeroloji 1'in ayrık Fourier dönüşüm matrisinin elementi
P	INI kaldırmak için her iki Numerolojiden alınan komşu alt taşıyıcı sayısı
I_P	Birim Matris
O_P	Sıfır Matrisi
$W_{0,0}^{INI}$	Numeroloji 1'in $q = 0$ sembolünün numeroloji 0'a INI yaratan matrisi
$W_{0,1}^{INI}$	Numeroloji 1'in $q = 1$ sembolünün numeroloji 0'a INI yaratan matrisi
$W_{1,0}^{INI}$	Numeroloji 0'in numeroloji 1'in $q = 0$ sembolüne INI yaratan matrisi
$W_{1,1}^{INI}$	Numeroloji 0'in numeroloji 1'in $q = 1$ sembolüne INI yaratan matrisi
W^{INI}	Her iki numerolojinin P alt taşıyıcısına INI yaratan matris

1. GİRİŞ

Beşinci nesil (5G) kablosuz iletişim ağları, çeşitli iletişim gereksinimlerini desteklemek için daha esnek kaynak dağıtımını gerektirecektir. 5G Ağlarının kullanım durumları üç hizmet grubuna ayrılmıştır: geliştirilmiş mobil geniş bant (eMBB), yoğun makine tipi iletişim (mMTC) ve ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (URLLC). eMBB, hücresel kullanıcılara istikrarlı ve yüksek veri akışı sağlar, mMTC düşük hız ve karmaşıklıkla çok sayıda nesnelerin interneti (IoT) cihazlarını destekler ve URLLC çok yüksek güvenilirlikle küçük paketlerin düşük gecikmeli iletimlerini destekler [1]. 5G fiziksel katmanında, esnek numeroloji, çeşitli kullanım durumlarını desteklemenin önemli bir etkinleştiricisidir. Esnek numeroloji, dikgen frekans bölmeli çoğullamasında (OFDM) alt taşıyıcı aralığı (SCS) ile doğrudan ilişkilidir. Bu farklı alt taşıyıcı aralıklı OFDM sinyalleri numerolojiler olarak adlandırılır. OFDM sembol süresi ve alt taşıyıcı aralığı, frekans seçiciliği, sönmülenmesi ve kanal tutarlılık süresi ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, farklı frekans bantları ve kullanım durumları için farklı numerolojilerin kullanılması uygun olabilir. Dördüncü nesil (4G) kablosuz iletişim ağlarında, 15 kHz'lik SCS ile yalnız tek tip numeroloji desteklenirken, 5G, çeşitli gereksinimleri sağlamak için çoklu ve esnek numerolojileri destekler [2]. OFDM'de ortogonallığı korumak için, sembol süresi, her bir alt taşıyıcı aralığının (SCS) tersi olmalıdır. Bununla birlikte, ortak frekans bandında farklı numerolojilerin (yani farklı alt taşıyıcı aralıklı OFDM sinyallerinin) çoğullanması ortogonallığı bozar. OFDM sinyalleri, kendi bantlarının dışına bir bant dışı emisyon (OOBE) yayar ve iki farklı numeroloji yan yana getirildiğinde, her bir numeroloji diğer numerolojiye bir girişimde bulunur. Ortak frekans bandı içinde çoklu numeroloji kullanımında bu OOBE girişimi, numerolojiler arası girişim (inter-Numerology interference ya da INI) olarak adlandırılır. Farklı numerolojilerin oluşturduğu bu girişim, ortak OFDM sinyalinin üretiminde, yani vericide iletimden önce oluşmaktadır ve haberleşme kalitesini düşürmektedir. 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinin kalitesinin artırılması için, bu numerolojiler arası girişimin matematiksel bir şekilde incelenmesi ve yok edilmesi gerekmektedir.

1.1 Motivasyon

Farklı numerolojiler arasına koruma bandı konulması, numerolojiler arasındaki girişimin (inter-Numerology interference ya da INI) etkisini azaltmak için kullanılan genel bir yöntemdir. Bu koruma bandı, kullanılan numerolojilerden bir tanesinin, diğer numerolojiye komşu alt taşıyıcılarının bazılarının boş bırakılması (zero-padding guard band) ile sağlanır. Fakat, koruma bandının eklenmesi spektral verimliliği azaltmaktadır. INI üstündeki yapılan incelemeler ve analizler, INI'ın bir gürültü gibi davranmadığı, iletilen numerolojilerin güçleri ve alt taşıyıcı aralıklarına bağlı olan spesifik bir karakterinin olduğunu göstermektedir [3], [4], [5]. Bu araştırmalar sonucunda, INI frekans ve zaman aralığında matematiksel olarak incelenebilir ve INI'nın nasıl oluşturulduğu matematiksel olarak modellenabilir. Bu sayede, farklı numerolojilerin birbirlerine yaptığı girişim, iletimden hemen önce vericide tamamen ortadan kaldırılabilir.

1.2 Tezin Katkısı

Bu tezde, numerolojiler arası girişim (INI), zaman ve frekans boyutunda matematiksel olarak incelenmiş olup ters ayrık Fourier dönüşümü (IDFT) matrisi ve ayrık Fourier dönüşümü (DFT) matrisi yardımı ile modellenmiştir. Bu modelleme ile INI'yı yaratan bir ağırlık matrisi elde edilmiştir. Bu sayede, bir numerolojinin alt taşıyıcılarının (gönderilmek istenen semboller) maruz kaldığı INI, diğer numerolojinin alt taşıyıcıları ile INI matrisinin çarpımı olarak gösterilebilir. Bahsi geçen INI matrisinin tersinin kullanılması ile, INI tamamen ortadan kaldırılabilir ve INI olmayan iki bağımsız numeroloji, vericiden gönderilebilir. Gönderilecek olan farklı numerolojilerin komşu alt taşıyıcılarındaki kompleks semboller bir vektör haline getirilir ve elde edilen INI matrisinin tersi ile çarpılır. Çıkan sonuç vektörü, gönderilecek olan semboller yerine alt taşıyıcılara yerleştirilir. Ardından farklı numerolojilerin zaman boyutunda toplanması ile bileşik numerolojili OFDM sinyali (composite numerology OFDM) oluşturulduğunda artık vericide INI tamamen ortadan kaldırılmış olup, gönderime hazır bir hale gelir.

Bu şekilde, bütün iş yükü vericide olup, alıcı tarafında herhangi bir işlem gerekmeyecektir. Bütün işlem, vericide (baz istasyonu) bir matris çarpımı olacağı için kompleksite minimum seviyede olacaktır. Çünkü INI matrisi çevrim dışı (off-line) olarak hesaplanır ve bütün modülasyon çeşitleri için çevrim içi (on-line) olarak kullanılabilir. Bütün işlemler vericide olup, alıcıda hiçbir işlem olmayacağı için kullanıcılarda (UE) herhangi bir değişiklik ya da girişim kaldırıcı (interference cancellation) işlemler olmayacaktır. Bulunan INI matrisi ve bu matrisin tersi sayesinde, farklı numerolojiler arasına koruyucu bant (guard band) kullanımına gerek kalmamıştır ve spektral verimlilik maksimum seviyeye çıkartılmıştır.

Birden fazla numerolojinin oluşturduğu bileşik OFDM (composite OFDM) sinyali artık birbirinden bağımsız normal OFDM sinyalleri gibi davranacağı için, normal OFDM sinyallerinde geçerli olan sinyal işleme ve haberleşme teknikleri (kanal kestirimi, kanal eşitlenmesi, taşıyıcı frekans düzeltme ve benzeri gibi) farklı numerolojilerin oluşturduğu bileşik OFDM sinyali için de geçerliliğini koruyacaktır.

1.3 Tezin Organizasyonu

Tez şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 1.4'te numerolojiler arası girişimin azaltılması ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 1.5'te 5G'nin kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 1.6'da, 5G'de kabul görmüş olan numerolojilerden bahsedilmiştir. Bölüm 2'de çoklu numeroloji sistemi için tek girişli tek çıkışlı (SISO) vericiden alıcıya (down-link) bir sistem için modellenmiştir. Bölüm 2.1'de numerolojiler arası girişim IDFT ve DFT matrisleriyle modellenmiştir. Bölüm 2.2'de numerolojiler arası girişimi modelleyen bir ortak INI matrisi türetilmiştir. Bölüm 3'te ise Rayleigh sönümlenmeli kanallarda ve toplamsal beyaz Gaus gürültüsü (AWGN) durumlarında, Bölüm 2.2'de üretilen INI matrisinin INI kaldırılmasıyla kullanımının bit hata oranı (BER) performansı Monte Carlo simülasyonlarıyla ölçülmüştür. Son bölümde ise sonuç ve önerilerden bahsedilmiştir.

1.4 Literatür Araştırması

Numerolojiler arası girişimin (INI) incelenmesi [3], [4], [5] ile verilen çalışmalarda kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmalarda, INI'nın bir gürültü gibi davranmadığı, INI'nın gönderilen numerolojilerin alt taşıyıcı aralıklarına ve alt taşıyıcı güçlerine (subcarrier power) bağlı olduğu gösterilmiştir. Literatüde genel olarak, koruyucu bantların nasıl yerleştirilmesi gerektiği, alıcıda nasıl girişim yok edici algoritmaların (interference cancellation) kullanılacağı, çoklu girişli çoklu çıkışlı (multi input multi output ya da MIMO) sistemlerde kullanılan ön kodlama (pre-coding) metotlarının INI için kullanımı veya numerolojiler için ne tür filtrelerin tasarlanması gerektiği önerilmiştir. Çalışma [1]'de, INI yok edilmeye veya azaltılmaya çalışmamış ancak INI göz önünde bulundurularak numerolojilerin zaman-frekans boyutuna nasıl yerleştirilmesi gerektiği hakkında bir optimizasyon problemi çözümü önerilmiştir. Burada, INI'a bağlı olarak farklı kullanıcılara ve farklı ihtiyaçlara zaman-frekans boyutunda nasıl kaynak tahisisi (resource allocation) yapılacağı araştırılmıştır. Bu şekilde hem spectral verimlilik eniyileştirilmek istenmiş hem de farklı ihtiyaçlara ve kullanıcılara kaynak dağıtımını gerçekleştirmişlerdir. Ancak bu çalışmada da koruyucu bantlar göz önünde bulundurulmuş olup ve alıcıda gerçekleştirilecek fiziksel katman sinyal işleme ve haberleşme teknikleri göz önünde bulundurulmamıştır. Çalışma [3]'te, MIMO haberleşme sistemleri için INI'yı azaltan bir ön kodlama önerilmiştir, ancak bu öneri tek girişli tek çıkışlı (SISO) sistemleri

için geçerli değildir. Bu ön kodlama, alt taşıyıcı aralığı geniş olan numeroloji için uygulanmış olup, alt taşıyıcı aralığı küçük olan numeroloji için INI büyük oranda azaltılmış olup tamamen yok edilmemiştir. Çünkü alt taşıyıcı aralığı geniş olan numerolojiler, alt taşıyıcı aralığı görece daha küçük olan numerolojilere daha fazla girişimde bulunmaktadır. Ayrıca, alıcıda INI ve kanal ölçümü gibi bir takım işlemlerin olması gerekmektedir, bu ölçümler sayesinde ön kodlar oluşturulmaktadır. Çalışma [4]'te, INI'nin etkisini azaltmak için alıcıda gerçekleşen ardışık yinmeli girişim kaldırma (successive iterative interference cancellation) algoritması önerilmiştir. Bu algoritmada, gelen iki numerolojiden (bileşik OFDM sinyali) INI'ya en fazla maruz kalan (bir diğer deyişle alt taşıyıcı aralığı küçük olan) numeroloji gürültü olarak kabul edilir ve INI'ya daha az maruz kalan (alt taşıyıcı aralığı büyük olan) buna göre çözülür. Yani alıcıda gelen bileşik OFDM sinyali, ilk olarak alt taşıyıcı aralığı büyük olan numerolojiye göre çözülür ve tekrardan oluşturularak gelen bileşik OFDM sinyalinden çıkartılır. Kalan sinyal ise alt taşıyıcı aralığı küçük olan numerolojiye göre çözülür. Alıcıda numerolojilerin çözülmesinin yanında tekrardan oluşturulması da söz konusu olacağından bir DFT ve IDFT boyutlarına göre bir kompleksite sorunu mevcuttur. Kullanılan ayrık Fourier dönüşümü (DFT) ve ters ayrık Fourier dönüşümü (IDFT) uzunluğuna bağlı olarak kompleksite artacaktır. Ayrıca, ardışık yinmeli girişim kaldırma metotlarında hata birikimi (error accumulation) sorunu olmaktadır. Yani ilk çözülen sinyalde oluşacak hatalar, bir sonraki yinelemede farklı hataların oluşuma sebep olacaktır. Özellikle, kanalın tam olarak kestirilemediği ve eşitlenemediği durumlarda hata birikimi her bir yinelemede artış gösterecektir. Çalışma [5]'te, aynı frekans bandında yer alan farklı numerolojiler için uyarlanabilir bant geçiren filtre (adaptive band-pass filter) tasarlanmıştır, bu şekilde belirli oranda bir INI'ya izin verilerek koruyucu bantın küçültülmesi hedeflenmiştir. Ancak, gerçek-zamanlı uygulamalarda ideal filtre yaratmak neredeyse imkansız olacağı için, iletimde kullanılacak olan filtreler iletilecek olan modülasyonlu karmaşık sembollerde (modulated complex symbols) bir miktar faz bozulmalarına sebep olabilmektedir. Çalışma [6], INI'nin karakteristik özelliğinden yararlanılarak koruyucu bantların belirli yerlerine alt taşıyıcı aralığı küçük olan numerolojinin bazı alt taşıyıcıları yerleştirilmiştir. Bu şekilde koruyucu bantların belirli yerleri de haberleşme için kullanıma açılmıştır ancak koruyucu bant tamamen ortadan kaldırılamamıştır. Bu çalışmanın bir diğer dezavantajı da kanal kestirimi için gerekli olan pilot alt taşıyıcıların (pilot tone) bu koruma bandında nasıl

yerleştirileceği konusudur. Çalışma [7], alıcı ve verici için uyarlanabilir pencereler (window) dizaynları araştırılmıştır. OFDM’de çevrimsel öneğin (cyclic prefix)’in belirli bir pencere ile çarpımı OOB’e etkisinin bir miktar azalmasında fayda sağlamaktadır, bu pencere kök yükselmiş kosinüs (root raised cosine) ile elde edilmektedir. İNİ olan durumlarda, uyarlanabilir filtrelerin çevrimsel önek için kullanımı belli bir oranda İNİ etkisini ortadan kaldırır ancak tamamen ortadan kaldırmaz.

1.5 5G’nin Kullanım Alanları

5G ya da 5G Yeni Radyo (5G New Radio) erişim teknolojisi (access technology) 1 GHz’den 100 GHz’e kadar çalışacak şekilde tasarlanması amaçlanmıştır ve bu frekans bandında çeşitli haberleşme gereksinimlerini karşılaması hedeflenmiştir. Bu gereksinimler 3 ana alt gruba ayrılmıştır, geliştirilmiş mobil geniş bant (eMBB), yoğun makine tipi iletişim (mMTC) ve ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (URLLC) [8].

1.5.1 Gelişmiş Mobil Geniş Bant (eMBB)

Gelişmiş mobil geniş bant (eMBB) için odak noktası, mevcut mobil bandın iyileştirilmesi, verim ve kapasitesinin artırılmasıdır [9]. Hücreli haberleşmede, baz istasyonunun kullanıcılarla daha verimli haberleşmesi amaçlanmıştır.

1.5.2 Büyük Makine Tipli İletişim (mMTC)

Büyük makine tipli iletişim, çok sayıda cihazın birbirleriyle ve kullanıcılarla düşük maliyetli ve düşük gecikmeyle haberleşmesini desteklemek için düşünülmüştür. İnsan ve nesnelerin interneti (internet of things) arasındaki bir haberleşmenin desteklenmesinin, otomotiv, finans, kamu güvenliği, sağlık hizmetleri ve daha bir çok sektörde endüstriyel verimi artıracığına inanılmaktadır. Gün geçtikçe, nesnelerin internetinin kullanım alanlarının artması güvenilir ve düşük maliyetli bir alanın ihtiyacını ortaya çıkartmıştır [9].

1.5.3 Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC)

Ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (URLLC) sistemleri, cihazlar ve makineler arasında ultra güvenilir ve düşük gecikmeye sahip bir iletişimi destekler. Bu iletişimin ultra güvenilir ve düşük gecikmeli olması ile, örneğin araçlar arası

iletişim, endüstriyel kontrol, fabrika otomasyonu, uzaktan ameliyat ve kamu güvenliği gibi bir çok alanda kullanılabilir olması amaçlanmıştır [9].

1.5.4 5G Hizmetlerinin Birlikte Kullanılması (Multiplexing Services)

Aynı frekans bandında farklı hizmetlerin (eMBB, mMTC, URRLC) birlikte sunulması için farklı OFDM numerolojilerinin beraber kullanılması gerekmektedir. Örnek olarak, bir URRL hizmeti desteklenmek isteniyorsa, küçük OFDM paketlerinin kullanılması gerekir, bir diğer deyişle daha geniş alt taşıyıcı aralıklı numerolojilerin kullanılmasıdır. Geniş alt taşıyıcılı numerolojiler ve görece dar alt taşıyıcılı numerolojiler aynı frekans bandına beraber yerleştirilirse, bu frekans bandı hem URRLC hizmetlerini hem de eMBB veya mMTC gibi farklı hizmetleri destekler hale getirilebilir. Ortak frekans bandında farklı hizmetlerin beraber karşılanması için, farklı numerolojilerin aynı frekans bandında kullanılması elzemdir [10], [11], [12].

1.6 5G’de Desteklenen Numerolojiler

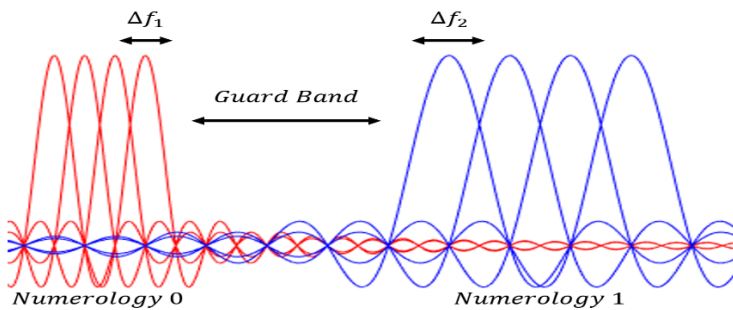
5G’nin, yüksek veri indirme hızlarından sürücüsüz otomobillere ve IoT cihazlarının izlenmesine kadar bir çok haberleşme ihtiyacını desteklemesi beklenmektedir. Bu ihtiyaçların desteklenmesindeki en büyük rol, ayarlanabilir numerolojilere (flexible numerology) düşmektedir. LTE’in aksine 5G’de alt taşıyıcı aralığı sadece 15 kHz olmayıp, 15 kHz’in katları da kullanılabilir. 15, 30 ve 60 kHz alt taşıyıcı aralıkları düşük frekans bantları [FR 1] için, 60, 120 ve 240 kHz alt taşıyıcı aralıkları yüksek frekans bantları [FR 2] için kullanılması planlanmıştır [13], [14].

LTE’de her çerçeve (frame) 10 ms ve her alt çerçeve 1ms olarak tanımlanmıştır. Her bir çerçeve 10 tane alt çerçeveye sahiptir ve her bir alt çerçeve bir zaman dilimi olarak kabul görmüştür. Fakat, 5G’de numeroloji indeksi, μ , arttıkça alt çerçevedeki zaman dilimi sayısı da 2^μ oranında artmaktadır. 5G’de kabul görmüş numerolojiler ve bu numerolojilere karşılık gelen alt taşıyıcı aralıkları, zaman dilimi sayıları ve uzunlukları Çizelge 1.1’de verilmiştir [13], [14], [15].

Çizelge 1.1 : 5G Numerolojileri

Numeroloji	Alt Taşıyıcı Aralığı	Zaman Dilimi Sayısı	Uzunluğu
0	15 kHz	1	1 milisaniye
1	30 kHz	2	500 mikrosaniye
2	60 kHz	4	250 mikrosaniye
3	120 kHz	8	125 mikrosaniye
4	240 kHz	16	62.5 mikrosaniye

Ancak birden fazla numerolojinin ortak frekans bandında yan yana kullanılması Şekil 1.1’deki gösterildiği gibi birbirlerine girişim yapmalarına sebep olmaktadır [16].



Şekil 1.1 : Farklı numerolojilerin birbirlerine yaptıkları girişim.

1.7 5G Downlink Sistemleri için Dalga Formu Adaylarına Genel Bakış

1.7.1 5G Ortogonal Dalga Formu Adayları

4G ve LTE sistemlerinde, çevrimsel önekli OFDM sinyalleri (CP-OFDM) oldukça başarılı bir dalga biçimidir. Yalnızca spektral verimliliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda semboller arası girişimi de (inter-symbol interference) azaltan bir çözümdür. Ancak CP-OFDM sinyallerinin bazı sınırları vardır, bu yüzden araştırmacılar 5G ve ötesi için kullanılabilecek yeni dalga formları araştırmaktadırlar [17]. 3GPP, 5G-NR dalga formlarının filtrelenmiş ya da pencerelenmiş (windowing) OFDM sinyalleri olması gerektiğini kabul etmiştir. Her iki sinyal formu da kolay uygulanabilir ve ileri-geri uyumlulukları ile (uplink ve downlink) temel gereksinimleri gidermektedir [18]. OFDM tabanlı bu aday dalga formları şu şekilde sıralanmıştır, filtered OFDM (f-OFDM) [19], weighted-overlap-and-add OFDM (WOLA-OFDM) [20] ve flexibly-configured OFDM (FC-OFDM) [21]. F-OFDM sistemleri farklı ve bağımsız numerolojilerin oluşturduğu entegre bir sistemdir. Bu sistem, bant ayırma ve filtrelemeye dayanmaktadır. Düzgün bir şekilde tasarlanmış temel bant sonlu dürtü yanıtı (finite impulse response, FIR) filtreleri, her bir CP-OFDM bant dışı emisyonlarını (OOBE) batırmak için kullanılabilir. Bu şekilde aynı frekans bandında farklı numerolojiler bir arada kullanılabilir. Ancak, F-OFDM dalga formunun, FIR filtrelerinden dolayı bir takım dezavantajları vardır. Büyük bant genişlikli CP-OFDM sinyalleri için, büyük bant geçişli FIR filtreler kullanmak gerekir, bu da filtrelerde depolama sorunlarına sebep olmaktadır. OOBE'yi düzgün bastırmak için yüksek dereceli FIR filtreleri üretilmesi gerekmektedir. Yüksek dereceli FIR filtrelerin uygulanması daha fazla zaman almaktadır ve sistemin zaman alıcı sürecini (time-consuming process) artırmaktadır. WOLA-OFDM dalga formu sistemleri, OOBE'nin belli bir seviyeye indirilmesine yardım etmektedir. Zaman boyutunda farklı pencerleme metotlarının (time-domain windowing method) kullanımı ile CP-OFDM dalga formunda, çevrimsel öneklerin OFDM sembolleri arasında daha yumuşak geçişlere sahip olması sağlanır. Bu şekilde, zaman boyutunda filtreleme işlemlerine göre daha düşük bir kompleksite sağlanmış olur [20]. Araştırmacılar, farklı numerolojilerin ortak kullanımı için FC-OFDM dalga formlarını önermişlerdir, ancak bu dalga formu için offset quadrature amplitude modulation (OQAM) gereklidir [22], [23].

1.7.2 5G Ortogonal Olmayan Dalga Formu Adayları

OFDM tabanlı ortogonal dalga formu adayları dışında, 5G ve ötesi sistemler için ortogonal olmayan OFDM tabanlı dalga formu adayları da düşünülmektedir. Bu dalga formları, ortogonal olmayan çoklu erişim (NOMA) olarak adlandırılmaktadır. NOMA benzeri dalga formları, farklı OFDM sinyalleri aynı frekans bandında üst üste (superposition) bindirilerek oluşturulur. Bu tarz sistemlerde, OFDM sinyallerinin OOBE problemleri çözülmüş olur, ancak başka problemler açığa çıkar. Burada farklı güç seviyesinde OFDM sinyallerinin birbirlerinden ayrıştırılması için çeşitli çalışmalar düşünülmektedir. Bu konuda araştırmacılar, genelleştirilmiş frekans bölmeli çoğullama (generalized frequency-division multiplexing, GFDM) dalga formunu düşünülmektedir. Burada zaman-frekans boyutu alt semboller ve alt taşıyıcılar için bloklara ayrılır. Burada OOBE problemi, spesifik darbe şekillendirme filtreleri kullanılarak azaltılması hedeflenir. GFDM’de OOBE sorununu gidermek için, zaman boyutunda pencereleme ve koruyucu bantların kullanılması gerekmektedir [24], [25].

2. SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada bir baz istasyonundan kullanıcılara doğru olan, aşağı bağlantılı (down-link), tek girişli tek çıkışlı (SISO) çoklu numeroloji OFDM sistemi varsayılmıştır. 5G Yeni Radyo (5G New Radio) sisteminde standartlaştırılmış numerolojiler [26]' de verilmiştir. Kabul gören numerolojiler ve alt taşıyıcı aralıkları şu şekilde gösterilmiştir

$$\Delta f^\mu = 2^\mu \times 15 \text{kHz}, \quad \mu = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

Parametre Δf^μ , μ indeksli numerolojinin alt taşıyıcı aralığı olarak tanımlanır. Bu numerolojilerden, μ değeri 0, 1 ve 2 olanlar Frequency Range 1'de (6 GHz altı) ve μ değeri 2, 3 ve 4 olanlar Frequency Range 2'de (6 GHz üstü) için kullanılır ve FR 2'nin milimetrik dalga habeleşmesi (millimeter wave communication) için kullanılması planlanmaktadır [26]. Bu çalışmada, 6 GHz altı, FR 1, bir haberleşme göz önünde bulundurulmuş ve μ değeri 0 ve 1 olarak alınmıştır. Bu durumda iki farklı numeroloji, numeroloji 0 (15 kHz) ve numeroloji 1 (30 kHz) olarak adlandırılabilir. Bu iki farklı numeroloji, ortak bir frekans bandına, her biri bandın bir yarısını kullanacak şekilde yan yana yerleştirilmiştir. Frekans alanında her iki numeroloji için alt taşıyıcı yerleştirilmesi şu şekilde gerçekleştirilmiştir,

$$X_0(k) = \sum_{k'=0}^{N-1} X_0(k')\delta(k-k'), \quad X_0(k) = 0 \text{ for } \frac{N}{2} \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

$$X_{1,q}(k) = \sum_{l'=0}^{N-1} X_{1,q}(l')\delta(l-l'), \quad X_{1,q}(l) = 0 \text{ for } 0 \leq l \leq \frac{M}{2} - 1 \quad (3)$$

Burada N ve M , numeroloji 0 ve numeroloji 1'in DFT ve IDFT uzunluklarıdır. Denklem (1)'den görüleceği şekilde N ve M arasında $N = QxM$ ve Q 'nun 2 olduğu bir ilişki vardır ve $q = 0$ ve 1'dir. Buradaki alt indeks q , numeroloji 1 için zaman çoğullamalı OFDM sembol indeksini göstermektedir. X_0 ve X_1 ise karmaşık genlik kareleme modülasyonudur (QAM) ve δ delta dürtü fonksiyonudur. Denklem (2)'de görülebileceği gibi, kullanılacak olan frekans bandı N tane 15 kHz'lik alt bölümlere ayrılmıştır, bu bölümlerin ilk yarısına numeroloji 0'ın gönderilmek istenen alt taşıyıcıları (sembolleri) yerleştirilirken ikinci yarısına sıfır (zero padding)

yerleştirilmiştir. Bu şekilde, numeroloji 1'in gönderilmek istenen sembolleri buraya yerleştirilebilmektedir. Aynı şekilde denklem (3)'te de aynı frekans bandı M tane 30 kHz'lik bölümlere ayrılmıştır ve ilk yarısı numeroloji 0'a verilirken, ikinci yarısına numeroloji 1'in alt taşıyıcıları (sembolleri) yerleştirilmiştir. Denklem (2) ve (3)'teki alt taşıyıcı yerleştirme işlemleri ortak frekans bandında gerçekleştirilmiştir.

Frekans boyutunda, numeroloji 0 ve numeroloji 1 için alt taşıyıcı işlemlerinin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra ters ayrık Fourier dönüşümü (IDFT) işlemi ile zaman boyutuna geçilir ve çevrimsel önek (cyclic prefix ya da CP) eklenmiş numeroloji OFDM sinyalleri denklem (4) ve (5) kullanılarak oluşturulur.

$$y_0(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_0(k) e^{\frac{j2\pi k(n-N_{cp})}{N}}, \quad 0 \leq n \leq N + N_{cp} - 1 \quad (4)$$

$$y_{1,q}(m) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} X_{1,q}(l) e^{\frac{j2\pi l(m-M_{cp})}{M}}, \quad 0 \leq m \leq M + M_{cp} - 1 \quad (5)$$

Burada N_{cp} ve M_{cp} , numeroloji 0 ve 1'in çevrimsel önek uzunlukları olup, $\langle . \rangle$ modulo- N ve modulo- M operasyonlarını temsil etmektedir. Bu şekilde zaman boyutunda CP eklenmiş numeroloji OFDM sinyalleri y_0 ve $y_{1,q}$ olarak elde edilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir unsur vardır, o da N sayısının M sayısının Q katı olmasıdır, ki denklem (1)'den görüldüğü üzere Q değeri 2 olarak alınmıştır.

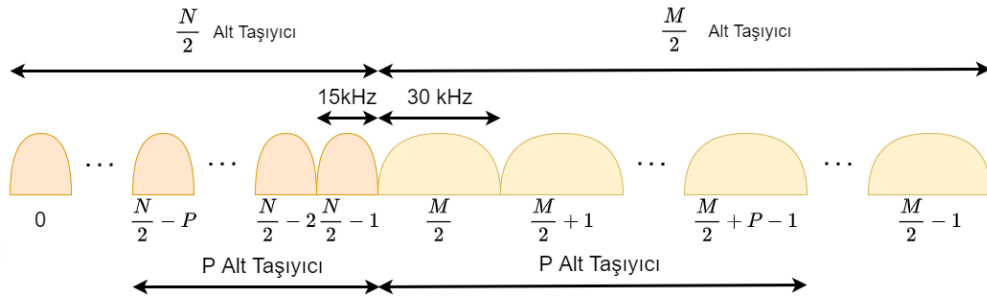
Bileşik OFDM (composite OFDM) sinyalinin oluşturulması için bu iki farklı numeroloji OFDM sinyallerinin zaman boyutunda toplanması gerekmektedir ancak y_0 ve $y_{1,q}$ 'in uzunlukları birbirlerinden farklıdır. Bu yüzden Q tane $y_{1,q}$ sinyali uç uca eklenerek numeroloji 0'ın uzunluğunda bir numeroloji 1 sinyali denklem (6)'daki gibi elde edilebilir.

$$y_1(n) = \sum_{m=0}^{M+M_{cp}-1} \sum_{q=0}^{Q-1} y_{1,q}(m) \delta(n - m - q(M + M_{cp})) \quad (6)$$

Denklem (6)'daki işlemin ardından y_0 ve y_1 sinyalleri aynı uzunlukta olup, toplanarak bileşik OFDM (composite OFDM) sinyali oluşturulur.

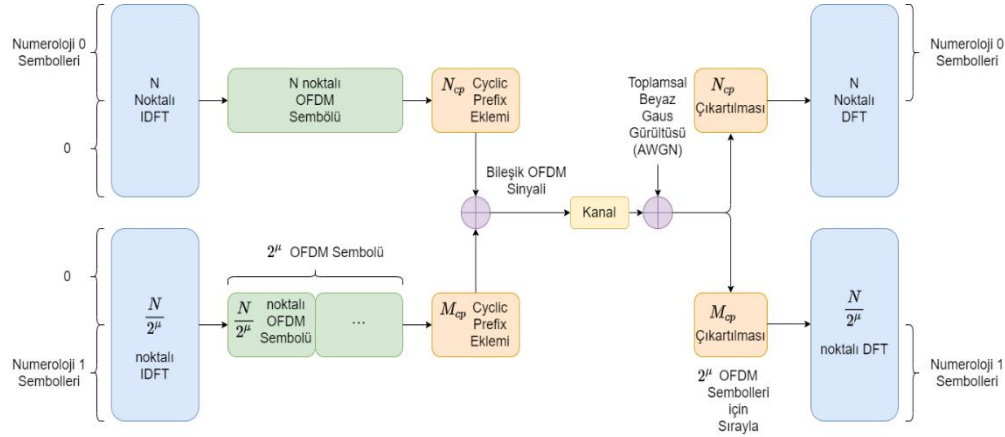
$$y_{\text{bileşik}}(n) = y_0(n) + y_1(n) \quad (7)$$

Denklem (7)'den sonra 2 farklı numerolojiye sahip bileşik OFDM sinyali oluşturulmuş olur. Ancak bu çevrimsel önek eklenmiş OFDM numerolojileri (7)'deki gibi toplandığında, bu iki bağımsız numerolojinin OFDM sinyallerinin bant dışı emisyonları (OOBE) da toplanmış olurlar. Frekans boyutunda, numeroloji 0'ın OOBE'si numeroloji 1 ile, numeroloji 1'in OOBE'si ise numeroloji 0 ile toplanmış olur. Bu birbirine yapılan girişim numerolojiler arası girişim (inter-Numerology interference ya da INI) olarak adlandırılır. Bu bileşik sinyalin frekans boyutundaki ilk yarısı numeroloji 0'a ve ikinci yarısı numeroloji 1'e aittir. Numeroloji 0 ve 1'in alt taşıyıcıları frekans boyutunda Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Frekans boyutunda numerolojilerin yerleştirimi

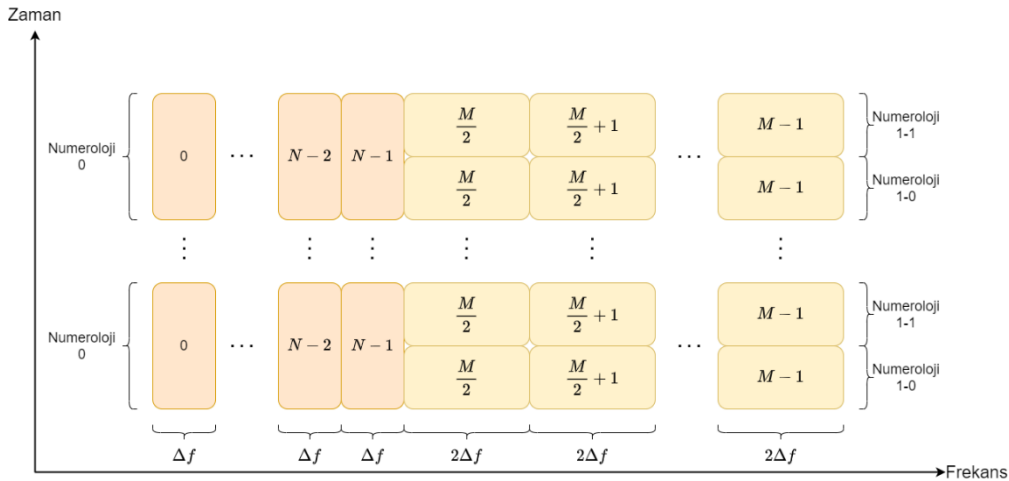
Bileşik OFDM sinyali denklem (7)'deki gibi hazırlandıktan sonra artık baz istasyonundan kullanıcılara iletme hazır hale gelmektedir. Bileşik OFDM verici ve alıcısı (transceiver) Şekil 2.2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Çoklu numeroloji OFDM alıcı vericisi (Transceiver)

Şekil 2.2’de de görüleceği gibi hem vericide hem alıcıda N ve M uzunlukta IDFT ve DFT operasyonları gerçekleştirilmiştir. Alıcıda numeroloji 0’ı çözmek için N_{cp} uzunluğundaki CP çıkartılır ve ardından N noktalı DFT’si alınır ve numeroloji 0’in sembolleri elde edilir. Numeroloji 1’i çözmek içinse ilk gönderilen sembol, $q = 0$, alınır M_{cp} uzunluğundaki CP çıkartılır ve ardından M noktalı DFT’si alınır ve numeroloji 1’in sembolleri elde edilir. Aynı işlem $q = 1$, için de tekrarlanır. Bu şekilde bileşik OFDM sinyali numeroloji 0 ve 1 için alıcıda çözülmüş olur.

Şekil 2.2’de bileşik OFDM sinyali oluşturulduktan sonra, frekans-zaman boyutunda numeroloji 0 ve numeroloji 1 için alt taşıyıcıların yerleştirilmesi Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Frekans-Zaman boyutunda çoklu numerolojilerin yerleştirimi

Şekil 2.3’te de görüldüğü gibi, frekans bandının ilk yarısı Δf , 15 kHz, alt taşıyıcı aralıklı olan numeroloji 0’a, ikinci yarısı ise $2\Delta f$, 30 kHz, alt taşıyıcı aralıklı olan

numeroloji 1'e verilmiştir. Ayrıca numeroloji 0'in zaman boyutundaki uzunluğu, numeroloji 1'in zaman boyutundaki uzunluğunun iki katı olduğu açıktır.

2.1 Numerolojiler Arası Girişimin DFT ve IDFT Matrisleri ile Analizi

2.1.1 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 için DFT ve IDFT Matrisleri

Numeroloji 0 için N noktalı DFT operasyonu matris olarak gösterimi aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$\begin{bmatrix} X_0(0) \\ X_0(1) \\ \vdots \\ X_0(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_0^1 & \dots & \omega_0^{(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_0^{(N-1)} & \dots & \omega_0^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0(0) \\ y_0(1) \\ \vdots \\ y_0(N-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Burada $\omega_0^{kn} = (e^{-j2\pi/N})^{kn}$ olarak tanımlanmıştır. İndeks k frekans boyutunu temsil ederken, index n zaman boyutunu temsil etmektedir.

Numeroloji 1 için M noktalı DFT operasyonu matris olarak gösterimi aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$\begin{bmatrix} X_1(0) \\ X_1(1) \\ \vdots \\ X_1(M-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_1^1 & \dots & \omega_1^{(M-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_1^{(M-1)} & \dots & \omega_1^{(M-1)(M-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(0) \\ y_1(1) \\ \vdots \\ y_1(M-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Burada $\omega_1^{lm} = (e^{-j2\pi/M})^{lm}$ olarak tanımlanmıştır. İndeks l frekans boyutunu temsil ederken, index m zaman boyutunu temsil etmektedir.

Denklem (4)'teki N_{cp} uzunluktaki CP eklemeli N noktalı IDFT operasyonu matris olarak gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} y_0(0) \\ y_0(1) \\ \vdots \\ y_0(N_{cp}-1) \\ y_0(N_{cp}) \\ y_0(N_{cp}+1) \\ \vdots \\ y_0(N+N_{cp}-1) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & \bar{\omega}_0^{(N-N_{cp})} & \dots & \bar{\omega}_0^{(N-1)(N-N_{cp})} \\ 1 & \bar{\omega}_0^{(N-N_{cp}+1)} & \dots & \bar{\omega}_0^{(N-1)(N-N_{cp}+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \bar{\omega}_0^{(N-1)} & \dots & \bar{\omega}_0^{(N-1)(N-1)} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \bar{\omega}_0 & \dots & \bar{\omega}_0^{(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \bar{\omega}_0^{(N-1)} & \dots & \bar{\omega}_0^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0(0) \\ X_0(1) \\ \vdots \\ X_0(N-1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Burada $\bar{\omega}_0^{kn} = (e^{j2\pi/N})^{kn}$ olarak tanımlanmıştır, bir diğer deyişle ω_0^{kn} 'in karmaşık eşleniğidir. İndeks k frekans boyutunu temsil ederken, index n zaman boyutunu temsil etmektedir. Denklem (10)'daki y_0 'ın ilk N_{cp} uzunluğu, numeroloji 0 OFDM sinyalinin CP kısmını göstermektedir.

Denklem (5)'teki M_{cp} uzunluktaki CP eklemeli M noktalı IDFT operasyonu matris olarak gösterimi aşağıdaki gibidir.

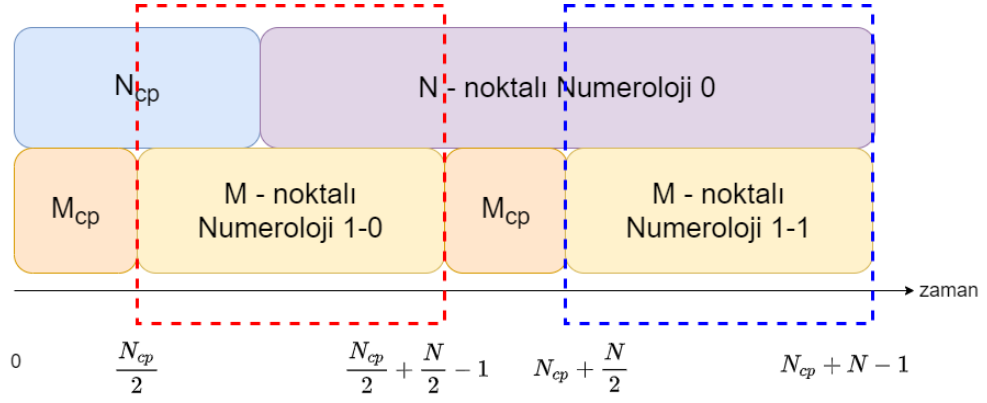
$$\begin{bmatrix} y_1(0) \\ y_1(1) \\ \vdots \\ y_1(M_{cp} - 1) \\ y_1(M_{cp}) \\ y_1(M_{cp} + 1) \\ \vdots \\ y_1(M + M_{cp} - 1) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & \bar{\omega}_1^{(M-M_{cp})} & \dots & \bar{\omega}_1^{(M-1)(M-M_{cp})} \\ 1 & \bar{\omega}_1^{(M-M_{cp}+1)} & \dots & \bar{\omega}_1^{(M-1)(M-M_{cp}+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \bar{\omega}_1^{(M-1)} & \dots & \bar{\omega}_1^{(M-1)(M-1)} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \bar{\omega}_1 & \dots & \bar{\omega}_1^{(M-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \bar{\omega}_1^{(M-1)} & \dots & \bar{\omega}_1^{(M-1)(M-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(0) \\ X_1(1) \\ \vdots \\ X_1(M-1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Burada $\bar{\omega}_1^{lm} = (e^{j2\pi/M})^{lm}$ olarak tanımlanmıştır, bir diğer deyişle ω_1^{lm} 'in karmaşık eşleniğidir. İndeks l frekans boyutunu temsil ederken, index n zaman boyutunu temsil etmektedir. Denklem (11)'daki y_1 'ın ilk M_{cp} uzunluğu, numeroloji 1'in Q OFDM sembollerinden herhangi birinin CP kısmını göstermektedir.

Burdan sonraki kısımlarda, numerolojilerin birbirlerine yaptığı girişimler (INI) matematiksel olarak incelenecektir. Bu incelemeyi yapmak için, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi her iki numerolojiden birbirlerine komşu olan P adet alt taşıyıcısı ele alınmıştır. Çünkü numerolojilerdeki alt taşıyıcılar birbirlerinden uzaklaştıkça, alt taşıyıcıların maruz kaldığı INI azalmaktadır.

2.1.2 Numeroloji 0'ın Numeroloji 1'e oluşturduğu INI'ın İncelenmesi

Bu kısımda numeroloji 0'ın, numeroloji 1'e yaptığı girişim (INI) matematiksel olarak gösterilecektir. Burada numeroloji 1'in ardışık iki OFDM sembolü numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.4 : Zaman Boyutunda numeroloji 0'ın numeroloji 1'e yaptığı girişimlerin gösterimi

Şekil 2.4'de, numeroloji 0'ın kırmızı kesikli çizgili bölgesi, numeroloji 1-0 sembolüne, numeroloji 0'ın mavi kesikli çizgili bölgesi ise numeroloji 1-1 sembolüne İNI yaratmaktadır. Numeroloji 0'ın, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, $\frac{N}{2} - P$ 'den başlayan ve $\frac{N}{2} - 1$ 'de biten P tane alt taşıyıcısı, numeroloji 1'in her iki sembolünün $\frac{M}{2}$ 'den başlayan ve $\frac{M}{2} + P - 1$ 'de biten P tane alt taşıyıcısına İNI yaratmaktadır.

Numeroloji 1-0'a olan İNI'yı basit haliyle şu şekilde tanımlayabiliriz; numeroloji 0'ın zaman boyutunda kırmızı kesikli çizgili bölgesinin, $\frac{N_{cp}}{2}$ 'den $\frac{N_{cp}}{2} + \frac{N}{2} - 1$ 'e kadar olan kısmı, M noktalı DFT operasyonun $\frac{M}{2}$ ve $\frac{M}{2} + P - 1$ alt taşıyıcıları üstündeki etkisidir. Burada, numeroloji 0'ın kırmızı kesikli çizgili bölgesi denklem (10)'daki matrisin spesifik bir kısmını kullanarak yaratılabilir. Aynı işlemler, numeroloji 1-1'e olan İNI için de söylenebilir. Numeroloji 0'ın zaman boyutunda mavi kesikli çizgili bölgesinin, $N_{cp} + \frac{N}{2}$ 'den $N_{cp} + N - 1$ 'e kadar olan kısmı, M noktalı DFT operasyonun $\frac{M}{2}$ ve $\frac{M}{2} + P - 1$ alt taşıyıcıları üstündeki etkisidir. Aynı şekilde, numeroloji 0'ın mavi kesikli çizgili bölgesi denklem (10)'daki matrisin spesifik bir bölgesinin kullanılmasıyla oluşturulabilir. Sonuç olarak, numeroloji 1-0'ın ve numeroloji 1-1'in ilk P tane alt taşıyıcısındaki İNI, numeroloji 0'ın son P tane taşıyıcısındaki sembollerin DFT ve IDFT matrisleri çarpımıyla aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \text{INI}_{1,0} \binom{M}{2} \\ \text{INI}_{1,0} \binom{M}{2} + 1 \\ \vdots \\ \text{INI}_{1,0} \binom{M}{2} + P - 1 \end{bmatrix}}_{\text{INI}_{1,0}} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \omega_1^{\binom{M}{2}(M-1)} \\ 1 & \dots & \omega_1^{\binom{M}{2}+1(M-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \omega_1^{\binom{M}{2}+P-1(M-1)} \end{bmatrix} \frac{1}{N} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}}{2}} & \dots & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}}{2}} & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}}{2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N-1}{2}} & \dots & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N-1}{2}} & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N-1}{2}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{W}_{1,0}^{\text{INI}}} \underbrace{\begin{bmatrix} X_0 \binom{N}{2} - P \\ \vdots \\ X_0 \binom{N}{2} - 2 \\ \vdots \\ X_0 \binom{N}{2} - 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}_0} \quad (12)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \text{INI}_{1,1} \binom{M}{2} \\ \text{INI}_{1,1} \binom{M}{2} + 1 \\ \vdots \\ \text{INI}_{1,1} \binom{M}{2} + P - 1 \end{bmatrix}}_{\text{INI}_{1,1}} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \omega_1^{\binom{M}{2}(M-1)} \\ 1 & \dots & \omega_1^{\binom{M}{2}+1(M-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \omega_1^{\binom{M}{2}+P-1(M-1)} \end{bmatrix} \frac{1}{N} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N}{2}} & \dots & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N}{2}} & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N}{2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N-1}{2}} & \dots & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N-1}{2}} & \omega_0^{-\binom{N}{2} \binom{N_{cp}+N-1}{2}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{W}_{1,1}^{\text{INI}}} \underbrace{\begin{bmatrix} X_0 \binom{N}{2} - P \\ \vdots \\ X_0 \binom{N}{2} - 2 \\ \vdots \\ X_0 \binom{N}{2} - 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}_0} \quad (13)$$

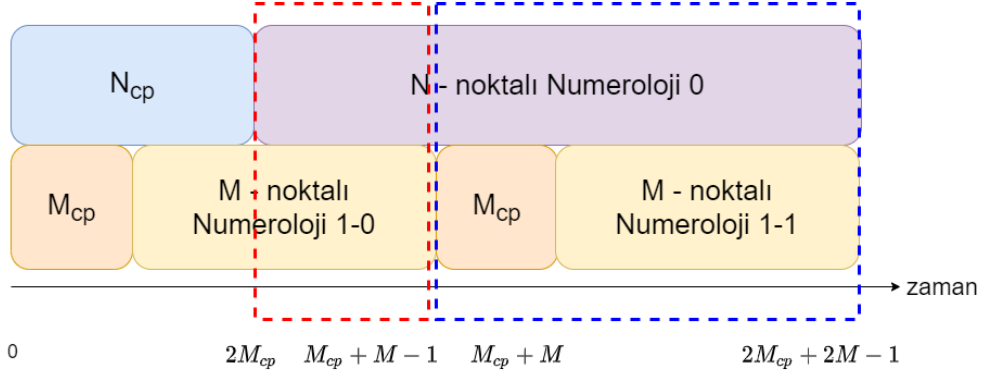
Denklem (12) ve (13)'te, numeroloji 0'in son P tayıyıcısından, numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1'in ilk P alt taşıyıcısına nasıl INI yaratıldığı gösterilmiştir. Her iki denklemde de \mathbf{X}_0 , $\text{INI}_{1,0}$ ve $\text{INI}_{1,1}$, P boyutunda satır vektörleridir ve $\mathbf{W}_{1,0}^{\text{INI}}$ ve $\mathbf{W}_{1,1}^{\text{INI}}$ ise $P \times P$ 'lik INI kare matrisleridir. Denklem (12) ve (13)'teki matris işlemleri aşağıdaki denklemlerdeki gibi gösterilebilir.

$$\text{INI}_{1,0} = \mathbf{W}_{1,0}^{\text{INI}} \mathbf{X}_0 \quad (14)$$

$$\text{INI}_{1,1} = \mathbf{W}_{1,1}^{\text{INI}} \mathbf{X}_0 \quad (15)$$

2.1.3 Numeroloji 1'in Numeroloji 0'e oluşturduğu INI'nin İncelenmesi

Bu kısımda numeroloji 1'in, numeroloji 0'a yaptığı girişim (INI) matematiksel olarak gösterilecektir. Burada numeroloji 1'in ardışık iki OFDM sembolü önceki bölümdeki gibi numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.5 : Zaman Boyutunda numeroloji 1'in numeroloji 0'a yaptığı girişimlerin gösterimi

Şekil 2.5'te numeroloji 1-0'ın kırmızı çizgili bölgesi ve numeroloji 1-1'in mavi çizgili bölgesi numeroloji 0 sembolüne INI yaratmaktadır. Numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1'in, Şekil 2.1'te de gösterildiği gibi, $\frac{M}{2}$ 'den başlayan ve $\frac{M}{2} + P - 1$ 'de biten P alt taşıyıcısı, numeroloji 0'ın $\frac{N}{2} - P$ 'den başlayan ve $\frac{N}{2} - 1$ 'de biten P tane alt taşıyıcısına INI yaratmaktadır. Numeroloji 0'a olan INI'yi önceki bölümde tanımladığımız gibi tanımlayabiliriz; numeroloji 1-0'ın zaman boyutunda kırmızı kesikli çizgili bölgesinin, $2M_{cp}$ 'den $M_{cp} + M - 1$ 'e kadar olan kısmı, N noktalı DFT operasyonunun $\frac{N}{2} - P$ 'den başlayan ve $\frac{N}{2} - 1$ 'de biten P tane alt taşıyıcısı üzerindeki etkisi ile numeroloji 1-1'in zaman boyutundaki mavi çizgili bölgesinin, $M_{cp} + M$ 'den $2M_{cp} + 2M - 1$ 'e kadar olan kısmı, N noktalı DFT operasyonunun $\frac{N}{2} - P$ 'den başlayan ve $\frac{N}{2} - 1$ 'de biten P tane alt taşıyıcısı üzerindeki etkisi ile toplamı olarak tanımlayabiliriz. Sonuç olarak numeroloji 0'ın son P tane alt taşıyıcısındaki INI, numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1'in ilk P tane taşıyıcısındaki sembollerin DFT ve IDFT matrisleri çarpımıyla aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} INI_{0,0}(\frac{N}{2}-P) \\ \vdots \\ INI_{0,0}(\frac{N}{2}-2) \\ \vdots \\ INI_{0,0}(\frac{N}{2}-1) \end{bmatrix}}_{INI_{0,0}} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \omega_0^{\binom{N-P}{2}(\frac{N_{cp}}{2}+\frac{N}{2}-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \omega_0^{\binom{N-2}{2}(\frac{N_{cp}}{2}+\frac{N}{2}-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \omega_0^{\binom{N-1}{2}(\frac{N_{cp}}{2}+\frac{N}{2}-1)} \end{bmatrix} \frac{1}{M} \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{\omega}_1^{\binom{M}{2}(2M_{cp})} & \dots & \bar{\omega}_1^{\binom{M+1}{2}(2M_{cp})} & \dots & \bar{\omega}_1^{\binom{M+P-1}{2}(2M_{cp})} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\omega}_1^{\binom{M}{2}(M+2M_{cp}-1)} & \dots & \bar{\omega}_1^{\binom{M+1}{2}(M+2M_{cp}-1)} & \dots & \bar{\omega}_1^{\binom{M+P-1}{2}(M+2M_{cp}-1)} \end{bmatrix}}_{W_{0,0}^{INI}} \underbrace{\begin{bmatrix} X_{1,0}(\frac{M}{2}) \\ \vdots \\ X_{1,0}(\frac{M}{2}+1) \\ \vdots \\ X_{1,0}(\frac{M}{2}+P-1) \end{bmatrix}}_{X_{1,0}} \quad (16)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} INI_{0,1}(\frac{N}{2}-P) \\ \vdots \\ INI_{0,1}(\frac{N}{2}-2) \\ \vdots \\ INI_{0,1}(\frac{N}{2}-1) \end{bmatrix}}_{INI_{0,1}} = \begin{bmatrix} \omega_0^{\binom{N-P}{2}(\frac{N}{2}+\frac{N_{cp}}{2})} & \dots & \omega_0^{\binom{N-P}{2}(N-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_0^{\binom{N-2}{2}(\frac{N}{2}+\frac{N_{cp}}{2})} & \dots & \omega_0^{\binom{N-2}{2}(N-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_0^{\binom{N-1}{2}(\frac{N}{2}+\frac{N_{cp}}{2})} & \dots & \omega_0^{\binom{N-1}{2}(N-1)} \end{bmatrix} \frac{1}{M} \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{\omega}_1^{\binom{M}{2}(M-M_{cp})} & \dots & \bar{\omega}_1^{\binom{M+P-1}{2}(M-M_{cp})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\omega}_1^{\binom{M}{2}(M-1)} & \dots & \bar{\omega}_1^{\binom{M+P-1}{2}(M-1)} \end{bmatrix}}_{W_{0,1}^{INI}} \underbrace{\begin{bmatrix} X_{1,1}(\frac{M}{2}) \\ \vdots \\ X_{1,1}(\frac{M}{2}+1) \\ \vdots \\ X_{1,1}(\frac{M}{2}+P-1) \end{bmatrix}}_{X_{1,1}} \quad (17)$$

Denklem (16) ve (17)'te numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1'in ilk P tane taşıyıcısından, numeroloji 0'ın son P tane taşıyıcısına nasıl INI oluşturduğu gösterilmiştir. Her iki denklemde de $X_{1,1}$, $X_{1,1}$, $INI_{0,0}$ ve $INI_{0,1}$, P boyutunda satır vektörleridir ve $W_{0,0}^{INI}$ ve $W_{0,1}^{INI}$ ise $P \times P$ 'lik INI kare matrisleridir. Denklem (12) ve (13)'teki matris işlemleri aşağıdaki denklemlerdeki gibi gösterilebilir.

$$INI_{0,0} = W_{0,0}^{INI} X_{1,0} \quad (18)$$

$$INI_{0,1} = W_{0,1}^{INI} X_{1,1} \quad (19)$$

Denklem (18) ve (19)'da, numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1'in $P \times P$ 'lik INI matrisleri kullanılarak numeroloji 0'a yarattığı INI gösterilmiştir. Numeroloji 0'a gelen toplam INI aşağıdaki denklemdeki gibi gösterilebilir.

$$INI_0 = W_{0,0}^{INI} X_{1,0} + W_{0,1}^{INI} X_{1,1} \quad (20)$$

Çünkü hem numeroloji 1-0'ın ilk P tane alt taşıyıcısı hem de numeroloji 1-1'in ilk P tane alt taşıyıcısı, numeroloji 0'ın son P adet taşıyıcısına INI oluşturmaktadır numeroloji 1'in iki sembolünün yarattığı INI toplanarak, numeroloji 0 üstündeki toplam INI elde edilebilir.

2.2 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 Ortak INI Matrisinin Oluşturulması

Denklem (14), (15), (18) ve (19) bir araya getirilerek ortak bir INI matrisi elde edilebilir. Bu denklemlerdeki $W_{1,0}^{INI}$, $W_{1,1}^{INI}$, $W_{0,0}^{INI}$ ve $W_{0,1}^{INI}$, INI matrisleri $P \times P$ boyutundadır ve $X_{1,0}$, $X_{1,1}$ ve X_0 , iletilmek istenen semboller $P \times 1$ 'lik satır vektörleridir. Bunları kullanarak aşağıdaki gibi bir ortak INI matrisi yazılabilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X_0^{INI} \\ X_{1,0}^{INI} \\ X_{1,1}^{INI} \end{bmatrix}}_{X^{INI}} = \underbrace{\begin{bmatrix} I_p & W_{0,0}^{INI} & W_{0,1}^{INI} \\ W_{1,0}^{INI} & I_p & 0_p \\ W_{1,1}^{INI} & 0_p & I_p \end{bmatrix}}_{W^{INI}} \underbrace{\begin{bmatrix} X_0 \\ X_{1,0} \\ X_{1,1} \end{bmatrix}}_X \quad (21)$$

Burada, I_p , $P \times P$ 'lik birim matrisi, 0_p , $P \times P$ 'lik sıfır matrisini temsil etmektedir. X , $3P \times 1$ boyutunda INI'ya maruz kalmayan sembollerin satır vektörünü, X^{INI} , $3P \times 1$ boyutunda INI'ya maruz kalan sembollerin satır vektörünü göstermektedir. W^{INI} , $3P \times 3P$ 'lik ortak INI matrisini göstermektedir. Denklem (21), basitleştirilerek denklem (22) şeklinde yazılabilir.

$$X^{INI} = W^{INI} X \quad (22)$$

Vericide, numeroloji 0 ve numeroloji 1'deki INI'yı tamamen ortadan kaldırmak için W^{INI} matrisinin tersi denklem (22)'deki gibi kullanılır.

$$X^b = (W^{INI})^{-1} X \quad (23)$$

Her iki numerolojinin alt taşıyıcılarına X yerine X^b sembolleri yerleştirilirse, denklem (7)'de gösterildiği gibi numeroloji 0 OFDM sinyali ve numeroloji 1 OFDM sinyali bileşik OFDM sinyalini yaratmak için toplandığında birbirlerine yaptığı INI tamamen ortadan kaldırılmış olur.

$$X = (W^{INI}) X^b \quad (24)$$

$$X = (W^{INI})(W^{INI})^{-1} X \quad (24)$$

Denklem (24) ve (25)'te de görüleceği gibi, vericide her iki numerolojinin alt taşıyıcılarına X yerine X^b yerleştirilirse, bileşik OFDM sinyali oluşturulduğunda, W^{INI} etkisi tamamen ortadan kaldırılır. Bu şekilde INI'dan bağımsız bir çoklu numeroloji OFDM sinyali oluşturulur.

Bir sonraki bölümde, çok yönlü sönümlenme (Rayleigh fading) kanallarında ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsünde (AWGN) yapılan Monte Carlo simülasyonlarda

INI kaldırma çözümünün bit hata oranı (BER) performansları incelenmiştir. INI kaldırma çözümünün BER performansı, koruyucu bantlarla ve hiçbir INI kaldırma işlemi olmayan haliyle karşılaştırılmıştır. Ek olarak, INI kaldırma işlemi kanalın hatalı hesaplandığı durumlar için de test edilmiş olup, hiçbir INI kaldırma işlemi kullanılmayan durumu ile PAPR karşılaştırması yapılmıştır.



3. SİMULASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, önerilen INI kaldırma çözümünün performansı, toplamalı beyaz Gaus gürültüsü (additive white Gaussian noise, ya da AWGN) olan Rayleigh sönümlenme (Rayleigh fading) kanallarında Monte Carlo simülasyonları ile bit hata oranı (BER) değerlendirilerek yapılmıştır. LTE (Long Term Evaluation) sistemleri gibi, 5G NR sistemleri de tüm numerolojiler için 12 alt taşıyıcıya sahip aynı fiziksel kaynak bloğu (physical resource block, ya da PRB) kullanılmaktadır [26]. Herhangi bir numerolojideki bir alt taşıyıcı, komşu numerolojiden uzaklaştıkça bu alt taşıyıcının maruz kaldığı INI azalmaktadır. Bu nedenle, INI daha çok farklı iki farklı numerolojinin komşu alt taşıyıcılarına etki etmektedir, bu da her iki farklı numerolojinin komşu alt taşıyıcılarındaki INI'nın ortadan kaldırılması gerektiğini göstermektedir. Simülasyonlarda, INI'nın kaldırılması için, her bir numerolojiden $P = 24$ alt taşıyıcı (yani 2 PRB) dikkate alınmıştır. Çünkü her bir numerolojiden gelen 2 PRB blokları en yüksek INI'a maruz kalan alt taşıyıcıları içermektedir. Şekil 2.3'te gösterilen zaman-frekans boyutunda, numeroloji 0, numeroloji 1-0 ve numeroloji 1-1'den komşu 24 alt taşıyıcı INI'nın kaldırılması için alınmıştır. Toplamda numeroloji 0'dan 24 ve numeroloji 1'den 48 alt taşıyıcı ele alınmıştır.

Toplam frekans bant genişliği 15.36 MHz olarak alınmıştır ve bu bant hiçbir koruyucu bant (Guard Band) kullanılmadan numeroloji 0 ve numeroloji 1 için eşit olarak bölünmüştür. Bu senaryo için, numeroloji 0 ve numeroloji 1 için sırayla 1024 ve 512 noktalı IDFT/DFT operasyonları kullanılmıştır, bu nedenle numeroloji 0 ve numeroloji 1 sırayla 15 kHz ve 30 kHz alt taşıyıcı aralığına sahiptir. [27]'de tanımlandığı gibi, numeroloji 0 ve numeroloji 1 için, 1024 noktalı IDFT/DFT için 72, 512 noktalı IDFT/DFT için 36 olarak tanımlanmıştır.

QPSK, 16 QAM, 64 QAM ve 256 QAM (LTE'deki ile aynı takımyıldız eşlemesi ya da constellation) 5G NR'da desteklenmektedir [27]. Simülasyonlarda, 16 QAM, 64 QAM ve 256 QAM yüksek dereceli modülasyonlar dikkate alınmaktadır, çünkü INI yüksek dereceli birim güçteki modülasyonları daha çok etkilemektedir.

INI kaldırma çözümü, Monte Carlo Simülasyonları ile, teorik BER, koruyucu bant ve hiçbir INI kaldırma işlemi olmayan BER performansları ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1'de bütün Monte Carlo simülasyonunda kullanılan numeroloji 0, numeroloji 1 ve koruyucu parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Simülasyon Parametreleri

Değişken	Değeri
N , Numeroloji 0 DFT/IDFT uzunluğu	1024
M , Numeroloji 1 DFT/IDFT uzunluğu	512
N_{cp} , Numeroloji 0'ın Çevrimsel Önek Uzunluğu	72
M_{cp} , Numeroloji 1'in Çevrimsel Önek Uzunluğu	36
P , Her iki numerolojiden INI kaldırılacak alt taşıyıcı sayısı	24
Kullanılacak alt taşıyıcılı koruma bandı sayıları	6, 12
Kullanılacak QAM modülasyonu dereceleri	16, 64, 256
Alıcıda kullanılacak gürültü tipi	AWGN
Kullanılacak kanal tipi	Rayleigh Fading

INI kaldırma işleminin BER performansı incelendikten sonra, tepe-ortalama güç oranı (peak-to-average power ratio, PAPR) analizi de yapılmıştır.

3.1 Koruyucu Bant Kullanılarak INI Azaltma

Koruyucu bant (Guard band) koyma, genellikle OFDM sinyallerinde uygulanan bir yöntemdir. Genelde OFDM sinyallerinin ilk ve son alt taşıyıcılarına herhangi bir haberleşme sembolü konulmaz ve boş bırakılır. Bu metot hem LTE ve WI-FI 802 OFDM sistemlerinde kullanılmaktadır [28], [29]. Bu şekilde OFDM sinyallerinin bant dışı emisyonun (OOBE), yan bantlarda kullanılan haberleşme kanallarına olan etkisi minimize edilmiş olur. Ancak bu koruyucu bant metodu, spektrum kullanımında verimsizlik yaratmaktadır. Simülasyonlarda, 16 QAM modülasyonlu numerolojiler için, numeroloji 0'ın son 6 alt yüklenicisi boş bırakılmıştır. Bu da 90 kHzlik bir frekans bandının kullanılmaması anlamına gelmektedir. 64 QAM ve 256 QAM modülasyonlu numerolojiler için de numeroloji 0'ın son 12 alt yüklenicisi boş bırakılmıştır, 180 kHz'lik bir frekans bandı boş bırakılmış bu da LTE ve 5G NR sistemleri için 1 PRB'a karşılık gelmektedir.

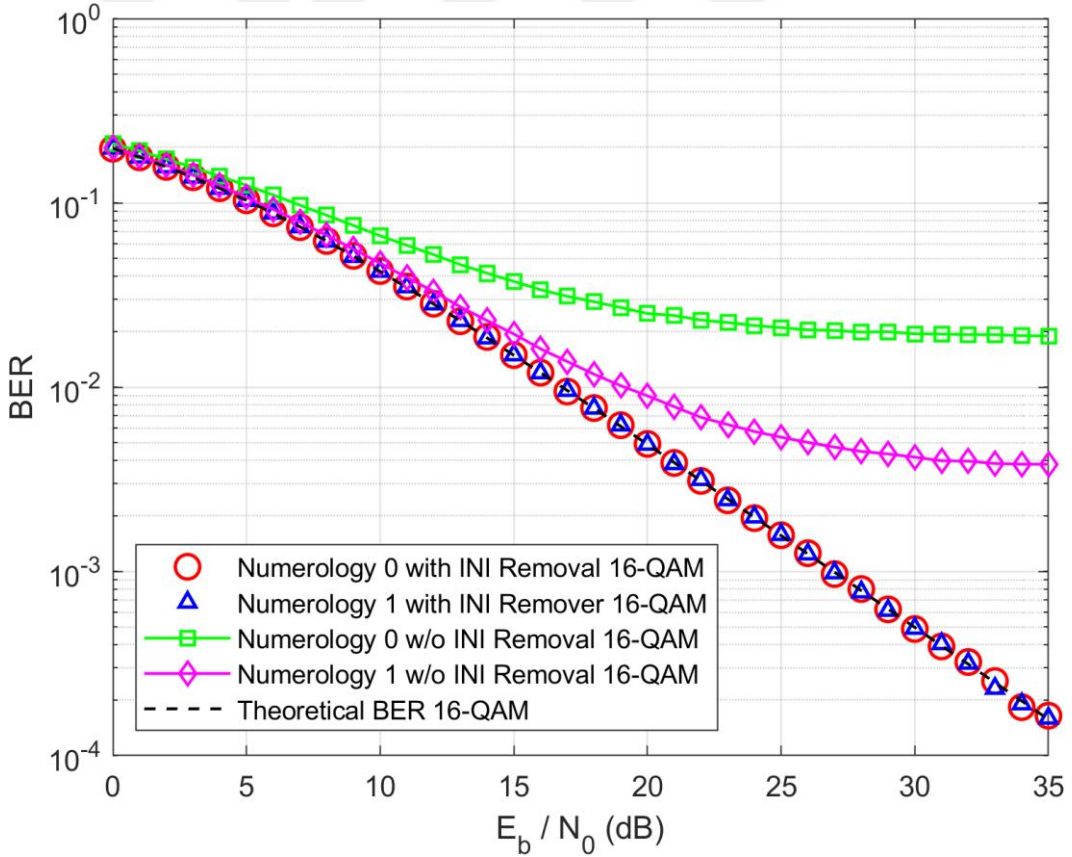
3.2 Hiçbir INI Azaltma Metodunun Kullanılmaması

Burada hiçbir INI azaltma metodu kullanılmamıştır ve numerolojiler arasına herhangi bir koruyucu bant konulmamıştır. Bu şekilde, numerolojilerin AWGN eklenmiş Rayleigh sönümlü kanallardaki BER performansları elde edilerek en kötü senaryolar 16 QAM, 64 QAM ve 256 QAM modülasyonları için elde edilmiştir.

3.3 INI Kaldırma Çözümünün BER Performansı

3.3.1 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 Aynı Dereceli Modülasyonu Kullanma Durumu

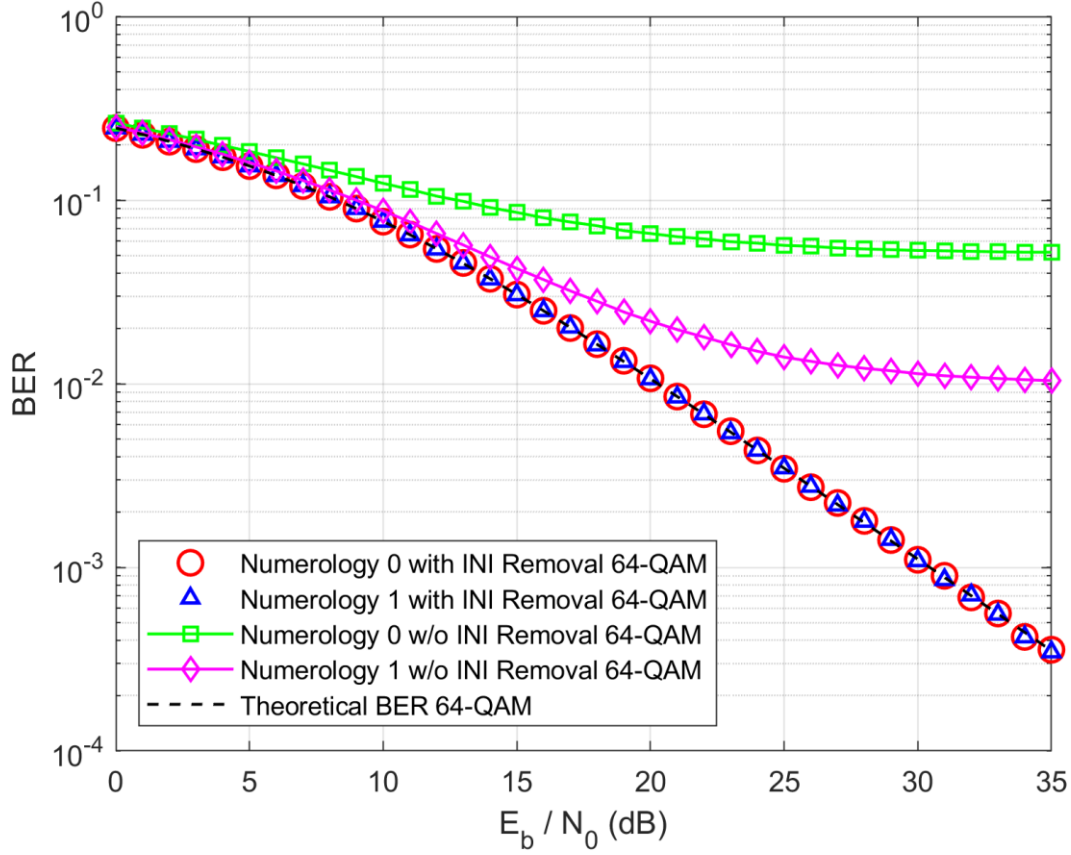
Burada numeroloji 0 ve numeroloji 1 aynı modülasyonları kullanmıştır. Şekil 3.1’de 16 QAM için, Şekil 3.2’de 64 QAM için ve Şekil 3.3’de 256 QAM için INI kaldırma çözümünün BER performansı verilmiştir.



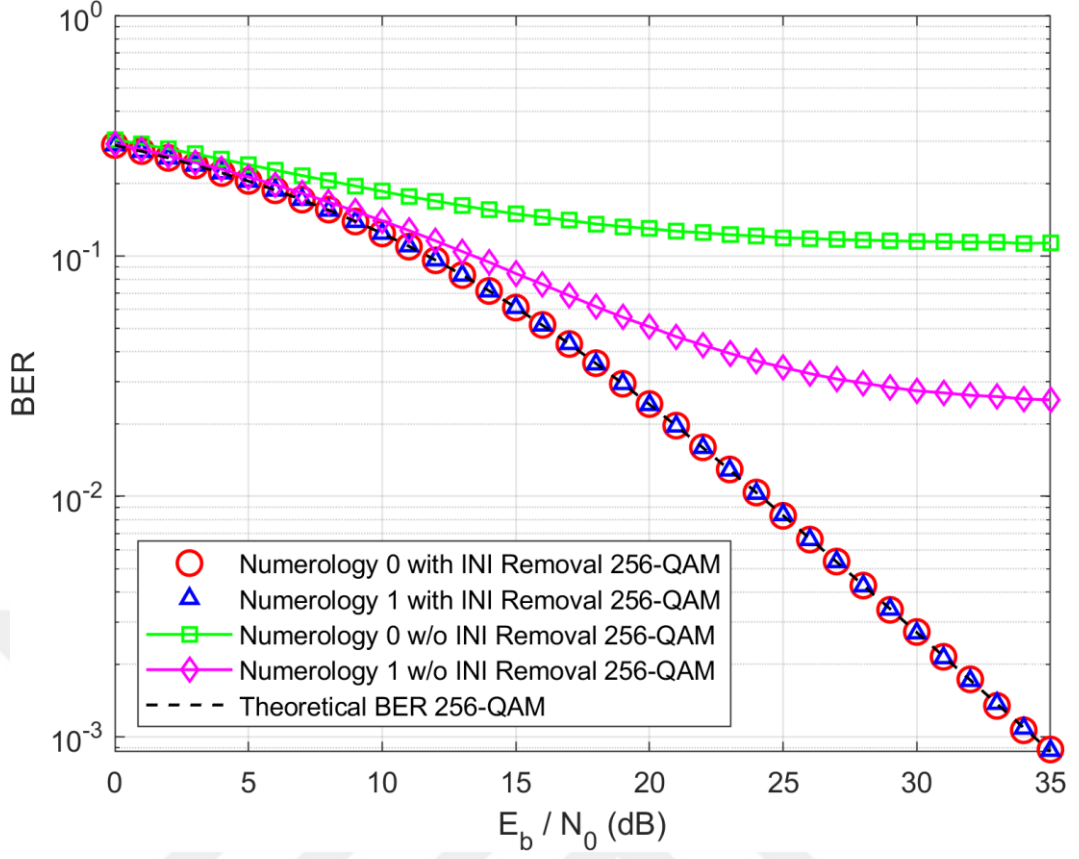
Şekil 3.1 : Numeroloji 0 ve numeroloji 1'in, Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 16 QAM modülasyonu için BER performansları

INI kaldırma çözümünün performansının, Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, 16 QAM teorik BER'ine ulaştığı görülmektedir. Herhangi bir INI kaldırma veya

azaltma metodu uygulanmadığında numeroloji 0'ın en kötü BER performansını verdiği gözlemlenmiştir. Çünkü, alt taşıyıcı aralığı küçük olan numeroloji (numeroloji 0), alt taşıyıcı aralığı büyük olan numerolojiye (numeroloji 1) göre daha fazla INI'ya maruz kalmıştır.



Şekil 3.2 : Numeroloji 0 ve numeroloji 1'in, Rayleigh sönümlmeli kanallarda, 64 QAM modülasyonu için BER performansları



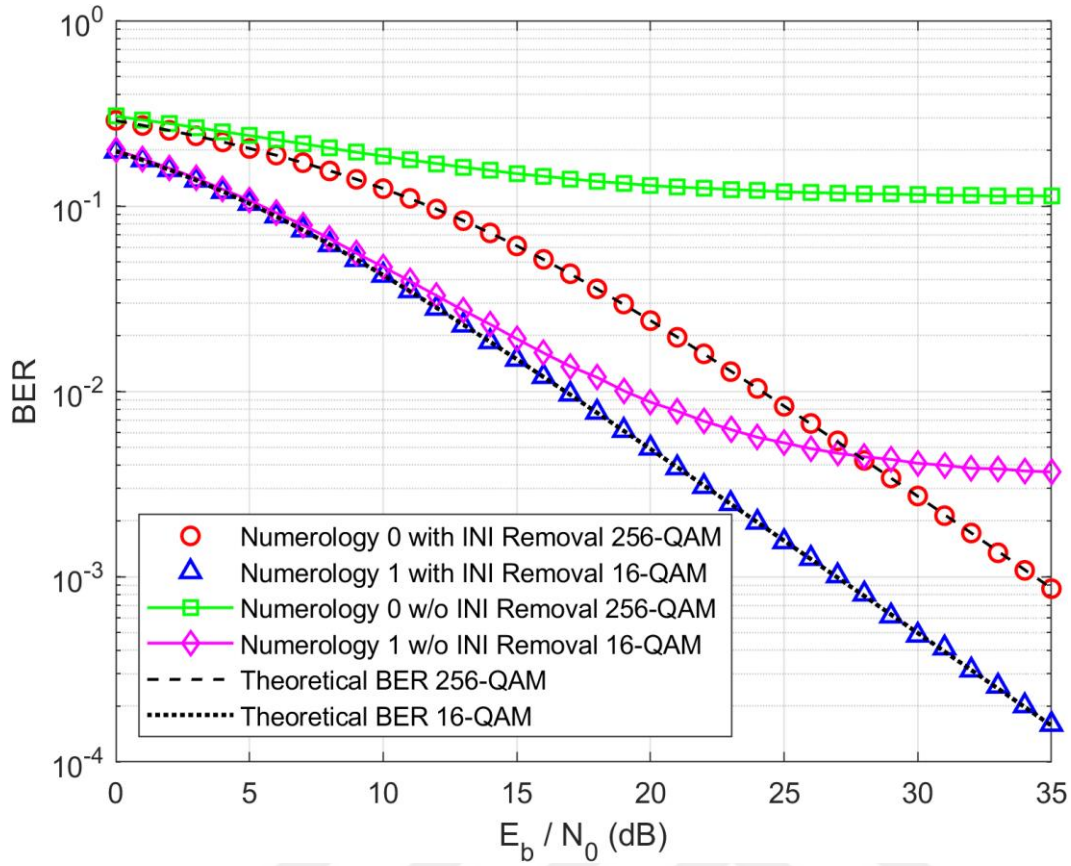
Şekil 3.3 : Numeroloji 0 ve numeroloji 1'in, Rayleigh sönümlmeli kanallarda, 256 QAM modülasyonu için BER performansları

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te de, INI kaldırma çözümümün, Rayleigh sönümlmeli kanallarda, 64 QAM ve 256 QAM teorik BER'lerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Hiç bir INI kaldırma veya azaltma işlemi uygulanmadığında, numeroloji 0 ve numeroloji 1'in BER performanslarının oldukça kötü olduğu Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'te görülmektedir. BER performansları belli bir SNR değerinden sonra sabit kalmakta ve iyileşmediği de görülmektedir.

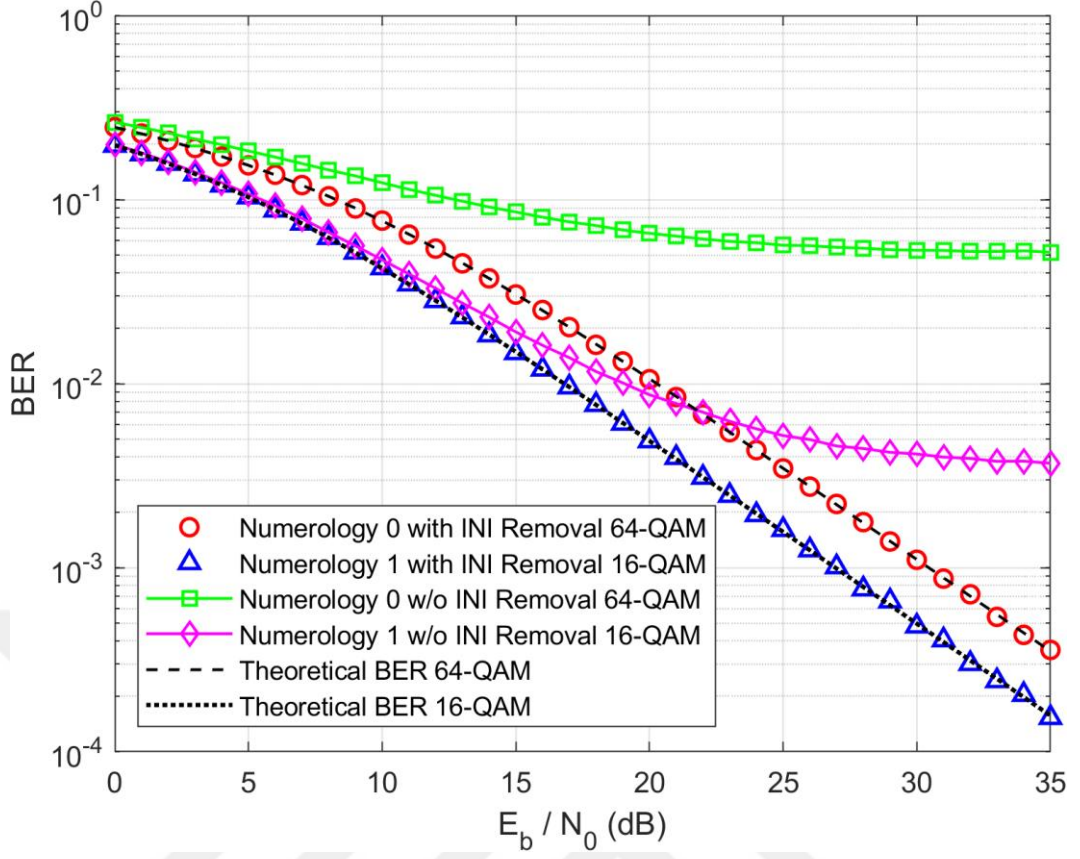
3.3.2 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 Farklı Dereceli Modülasyonu Kullanma Durumu

Bu bölümde, INI kaldırma çözümümde kullanılan INI matrisinin, W^{INI} , farklı numerolojilerin farklı dereceli modülasyonları kullandığında da aynı başarıyı elde ettiği gösterilmiştir.



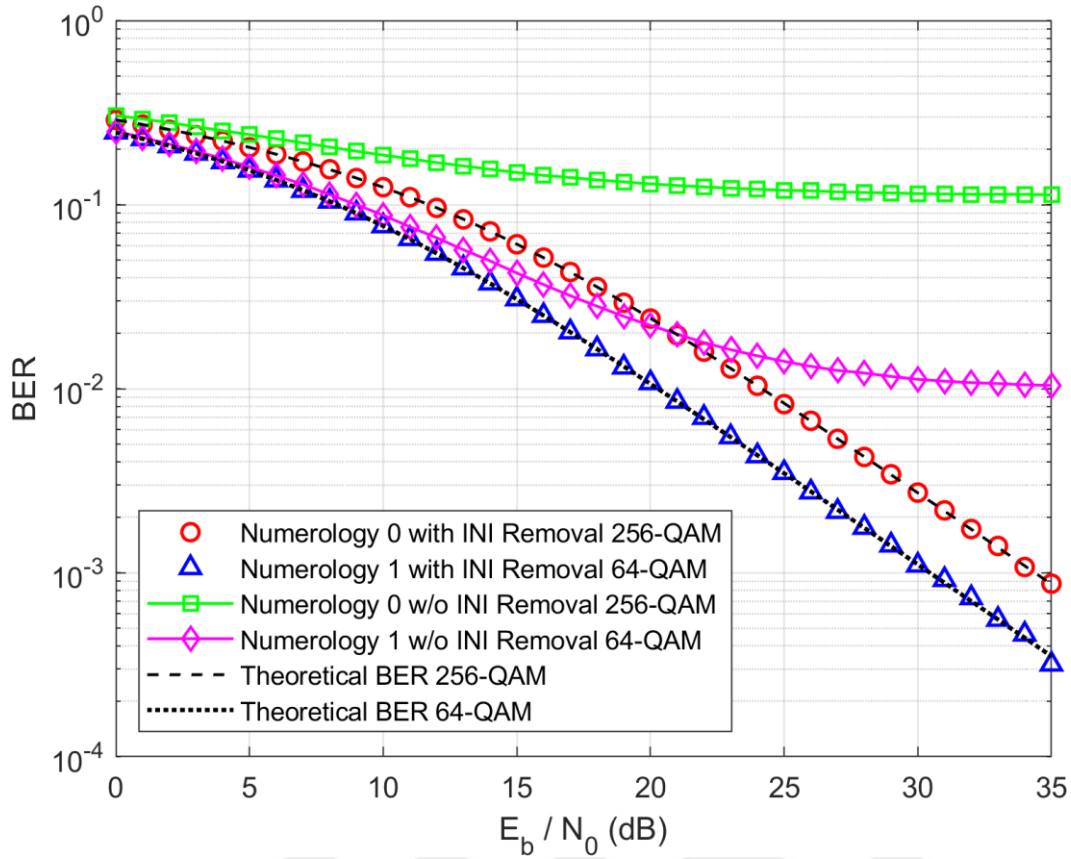
Şekil 3.4 : Rayleigh sönümlemlı kanallarda, 256 QAM numeroloji 0 ve 16 QAM numeroloji 1'in BER performansları

Şekil 3.4'te, numeroloji 0 256 QAM ve numeroloji 1 16 QAM modülasyonlarını kullanmışlardır. Bu en kötü senaryodur, burada hem numeroloji 0' daha çok INI'ya maruz kalmaktadır, hem de 256 QAM, INI'dan 16 QAM'e göre daha çok etkilenmektedir. Ancak Şekil 3.4'te de görüldüğü gibi, INI'ı ortadan kaldırmak için kullanılan INI yaratma matrisi, \mathbf{W}^{INI} (ya da bu matrisin tersi de denilebilir $(\mathbf{W}^{INI})^{-1}$), farklı dereceli modülasyonlar beraber kullanıldığında da INI'yı tamamen ortadan kaldırarak Rayleigh sönümlü kanallardaki teorik BER performansını sergilemektedir.



Şekil 3.5 : Rayleigh sönümlenmiş kanallarda, 64 QAM numeroloji 0 ve 16 QAM numeroloji 1'in BER performansları

Şekil 3.5'te, numeroloji 0 64 QAM'i, numeroloji 1 ise 16 QAM'I kullanmıştır. INI kaldırma çözümünün INI'yi tamamen ortadan kaldırdığı ve 16 QAM ve 64 QAM için teorik BER performansını gösterdiği gözlemlenmiştir.

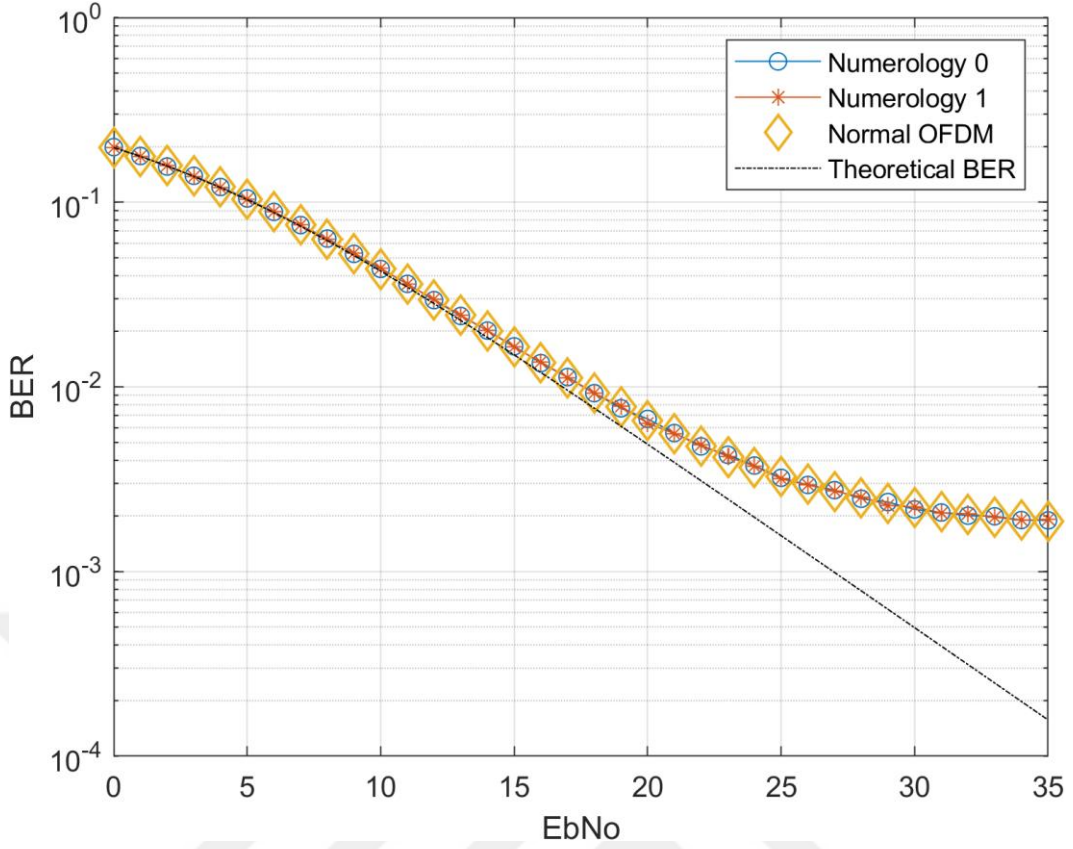


Şekil 3.6 : Rayleigh sönümlenli kanallarda, 256 QAM numeroloji 0 ve 64 QAM numeroloji 1'in BER performansları

Şekil 3.6'te, numeroloji 0 256 QAM'i, numeroloji 1 ise 64 QAM'I kullanmıştır. INI kaldırma çözümünün INI'yi tamamen ortadan kaldırdığı ve 256 QAM ve 64 QAM için teorik BER performansını gösterdiği gözlemlenmiştir.

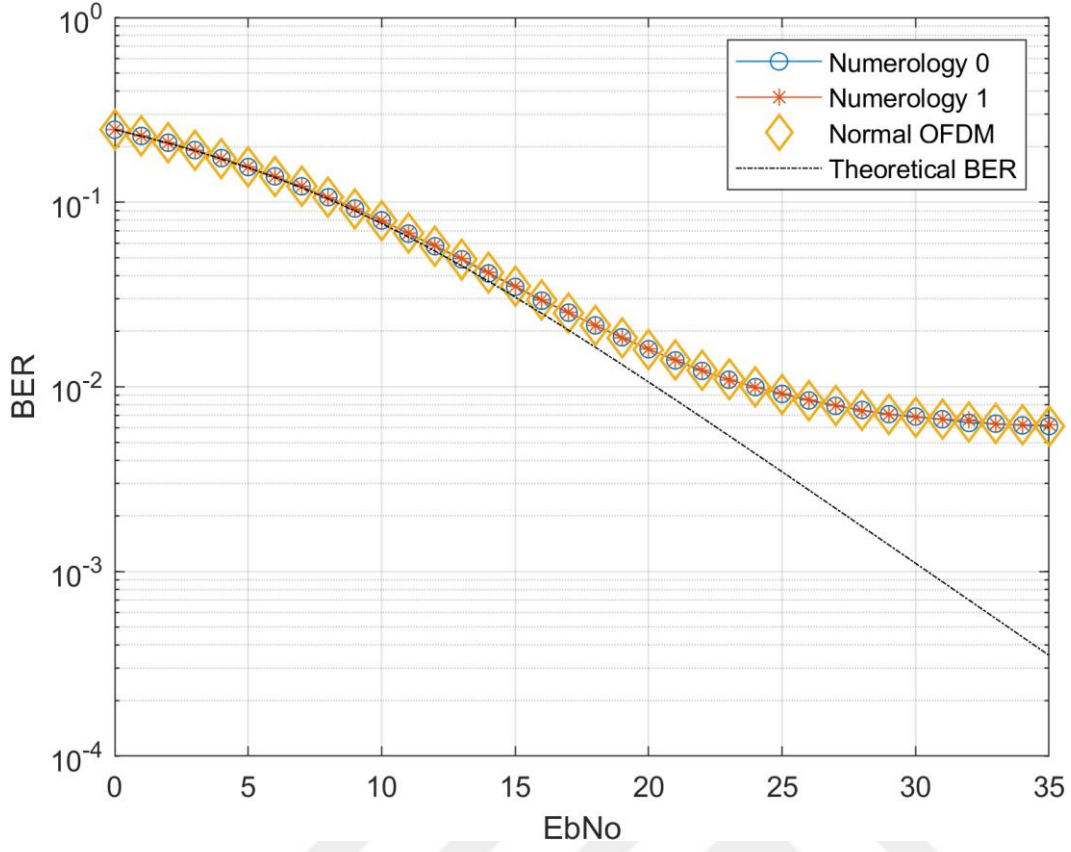
3.3.3 Numeroloji 0 ve Numeroloji 1 için Kusurlu Kanal Tahmini Durumu

Bu bölümde, numeroloji kaldırma çözümünün, kusurlu kanal tahmin durumlarında (imperfect channel state information) nasıl bir performans sergilediği incelenmiştir. Kusurlu bir kanal yaratmak için, bilinen kanala 0.001 varyanslı bir Gauss gürültüsü eklenmiştir, bu şekilde alıcıda zero-forcing kanal eşitlemesi yapılmıştır. 16, 64 ve 256-QAM modülasyonları ile Monte Carlo simülasyonları yapılmıştır.

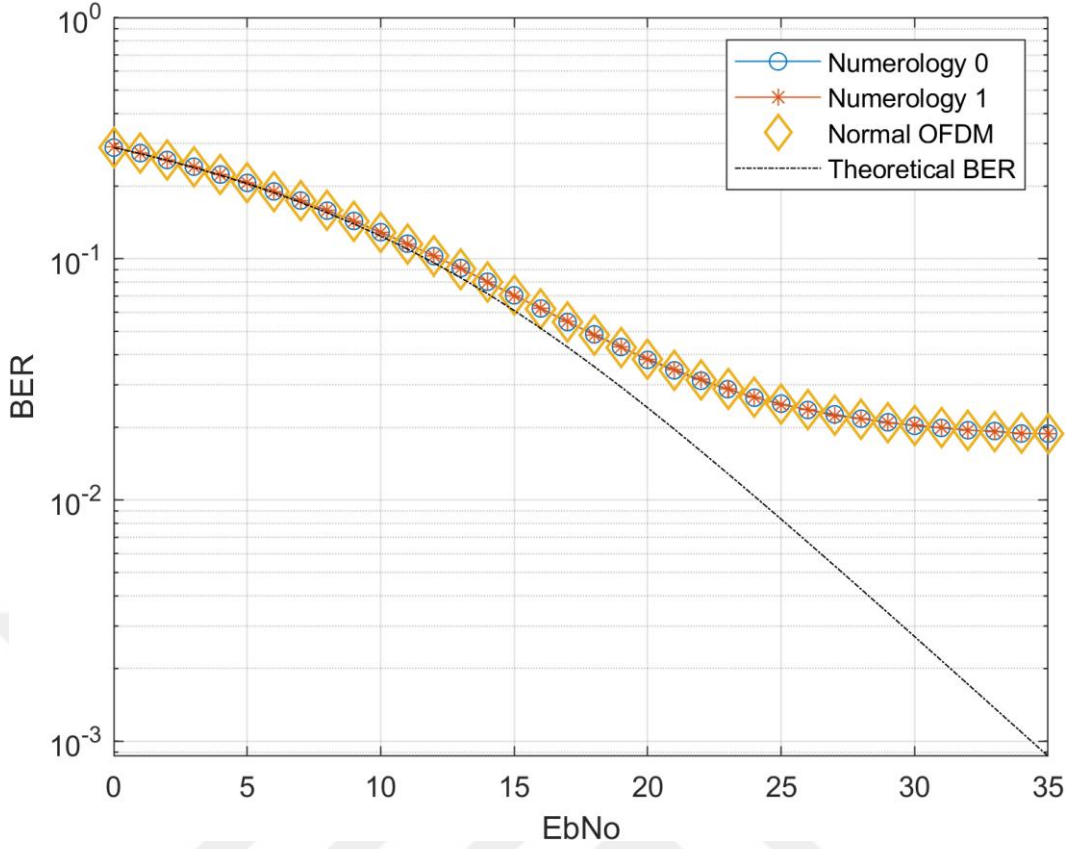


Şekil 3.7 : Kusurlu Kanal Tahmini durumlarında, normal bir 16-QAM CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji 16-QAM OFDM sinyali BER performansları

Şekil 3.7’de de görüldüğü gibi, 16-QAM modülasyonu için, normal CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji OFDM sinyali aynı BER performansını sergilemiştir.



Şekil 3.8 : Kusurlu Kanal Tahmini durumlarında, normal bir 64-QAM CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji 64-QAM OFDM sinyali BER performansları



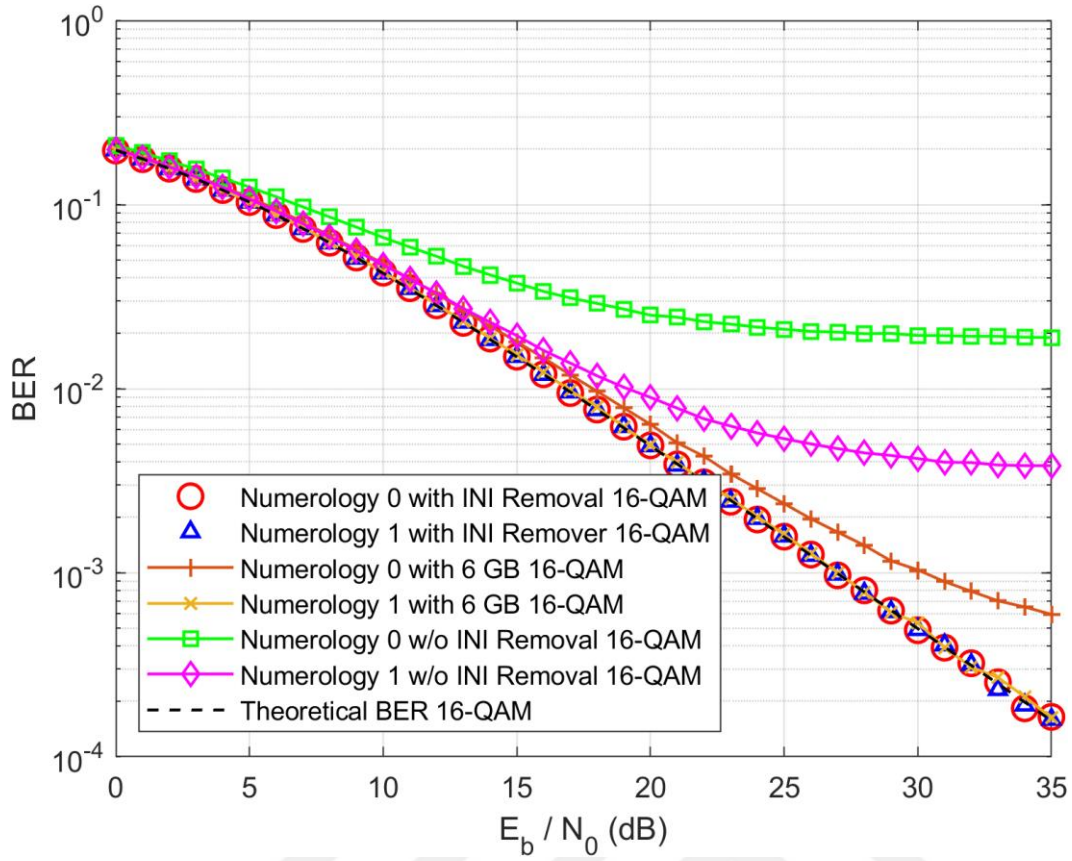
Şekil 3.9 : Kusurlu Kanal Tahmini durumlarında, normal bir 256-QAM CP-OFDM sinyali ile INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji 256-QAM OFDM sinyali BER performansları

Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9’da da görüldüğü gibi, hatalı kanal tahmin durumlarında da, 5G’de kullanılan modülayon çeşitleri için, INI kaldırma yönteminin uygulandığı kompozit çoklu numeroloji OFDM sinyalleri, normal CP-OFDM sinyalleri ile aynı performansları sergilemektedir.

Bu bölümdeki simülasyonlar gösteriyor ki, INI kaldırma yöntemi kanal hesaplanması ve eşitlenmesi durumlarından bağımsız olarak, vericilerde, alt taşıyıcılar üstündeki numerolojiler arası girişimi tamamen ortadan kaldırabilmektedir.

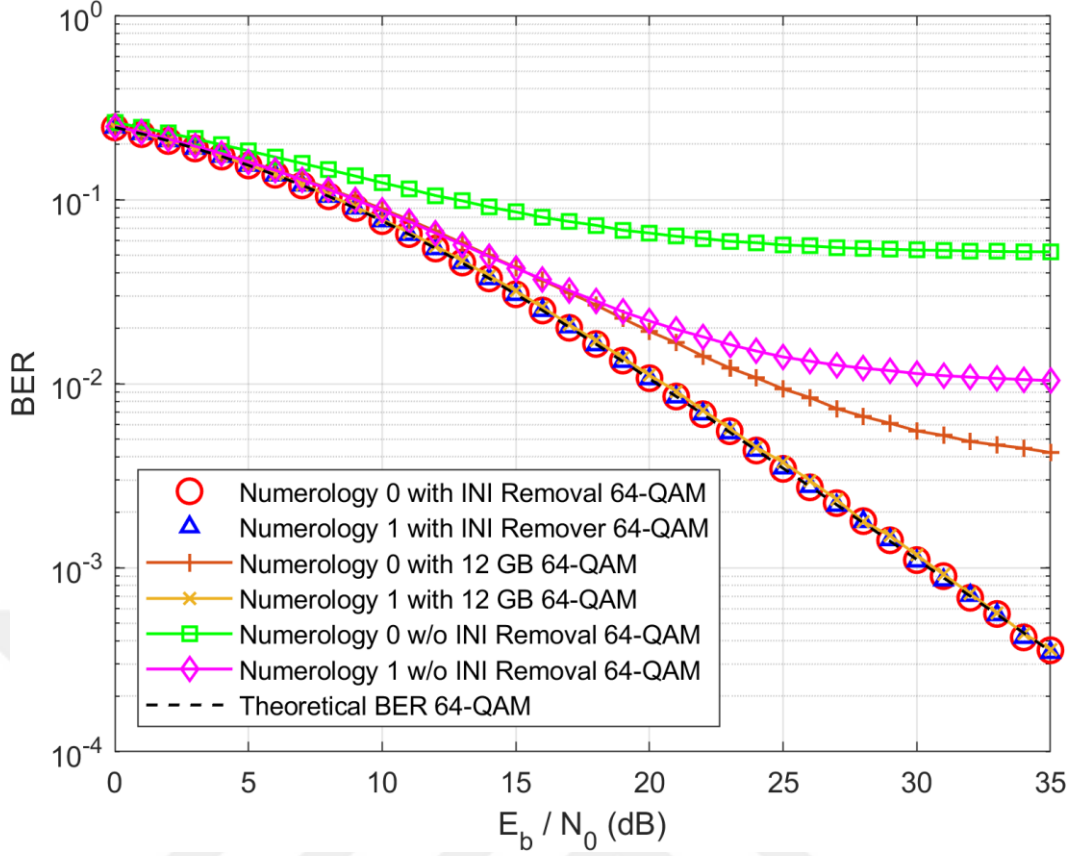
3.4 INI Kaldırma Çözümü ve Koruyucu Bant Tekniğinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, INI kaldırma çözümü ile koruyucu bant (guard band) tekniklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapmak için, her iki numerolojide de aynı dereceli QAM modülasyonları kullanılmıştır.



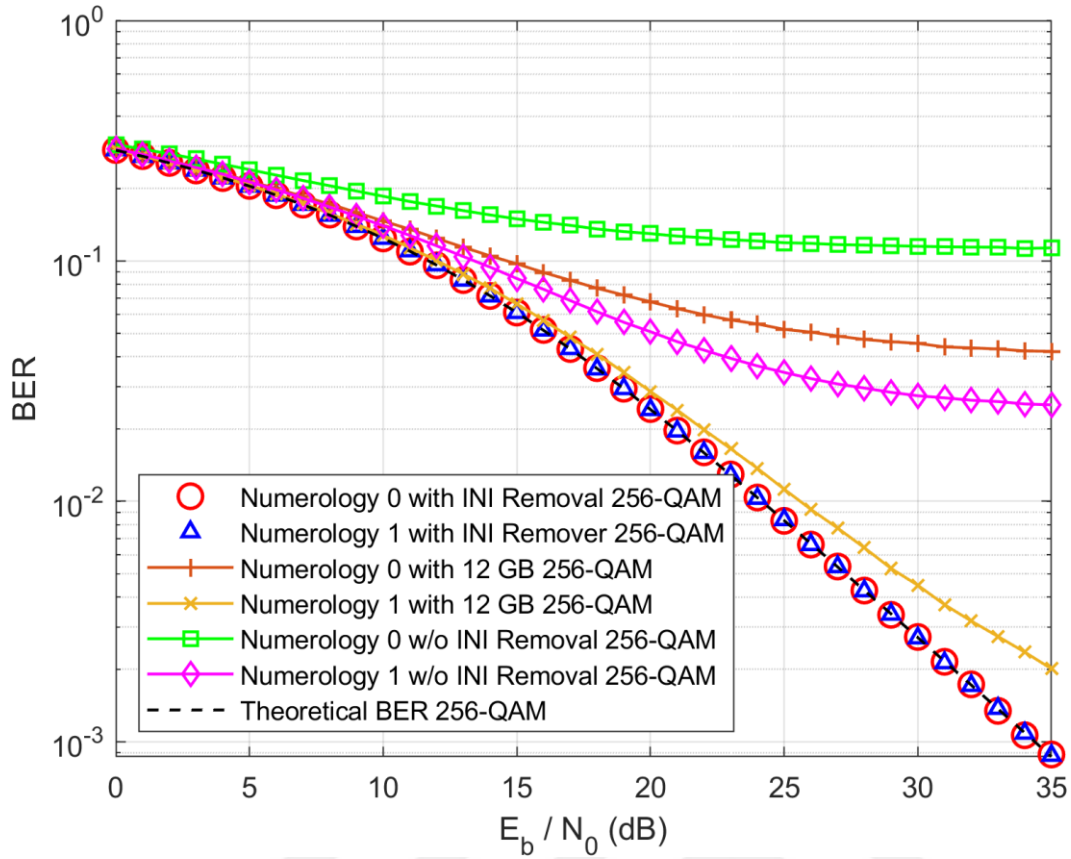
Şekil 3.10 : Rayleigh sönümlenmiş kanallarda, numeroloji 0'ın 6 alt taşıyıcılı koruyucu bandı ile INI kaldırma çözümünün 16 QAM modülasyonu için BER performansları

Şekil 3.10'de, 16 QAM modülasyonu için INI kaldırma çözümü ve 6 koruyucu bant tekniğinin BER performansları karşılaştırılmıştır. 16 QAM, 64 QAM ve 256 QAM'e göre INI'dan daha az etkilenmektedir. Numerolojiler arasında 6 alt taşıyıcılık koruma bandı konulduğunda, numeroloji 1'in teorik BER ile aynı performansı gösterdiği gözlemlenmiştir, ancak numeroloji 0 hala INI'dan etkilenmeye devam etmektedir. Burada, INI kaldırma çözümü, 6 alt taşıyıcılık ya da 90 kHz'lik bir kazanç sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.11 : Rayleigh sönümlenmiş kanallarda, numeroloji 0'ın 12 alt taşıyıcı koruyucu bant ile INI kaldırma çözümünün 64 QAM modülasyonu için BER performansları

Şekil 3.11'de, 64 QAM modülasyonu için INI kaldırma çözümü ve 12 koruyucu bant tekniğinin BER performansları karşılaştırılmıştır. Numerolojiler arasında 12 alt taşıyıcılık bir koruma bantı konulduğunda, numeroloji 1'in teorik BER ile aynı performansı gösterdiği, ancak numeroloji 0'da hala INI'nin etkisinin ciddi bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir. Burada, INI kaldırma çözümü, 12 alt taşıyıcılık (1 PRB) ya da 180 kHz'lik bir kazanç sağlamıştır. Şekilde de görüldüğü gibi, numeroloji 0'ın BER performansını artırmak için daha büyük bir koruyucu bant gerekmektedir.



Şekil 3.12 : Rayleigh sönümlenmiş kanallarda, numeroloji 0'ın 12 alt taşıyıcı koruyucu bant ile INI kaldırma çözümünün 256 QAM modülasyonu için BER performansları

Şekil 3.12'de 256 QAM modülasyonu için INI kaldırma çözümü ve 12 alt taşıyıcı koruyucu bant tekniğinin BER performansları karşılaştırılmıştır. Numerolojiler arasında 12 alt taşıyıcılık bir koruma bantı konulduğunda, numeroloji 1'in artık teorik BER'den saptığı ve numeroloji 0'ın performansının oldukça kötüleştiği gözlemlenmiştir. Burada INI kaldırma çözümü, 12 alt taşıyıcılık (1 PRB) ya da 180 kHz'lik bir kazanç sağlamıştır. Şekilde de görüldüğü gibi, hem numeroloji 0 hem de numeroloji 1'in BER performansını artırmak için daha büyük bir koruyucu bant kullanımı gerekmektedir.

Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12'de de görüldüğü gibi, önerilen INI kaldırma çözümü, hiçbir koruyucu bant kullanılmasına gerek kalmadan, tüm QAM modülasyonları için Rayleigh Sönümlenmiş kanallarda teorik BER'e ulaşmış olup geleneksel koruyucu bant tekniğinden çok daha iyi bir performans vermiştir.

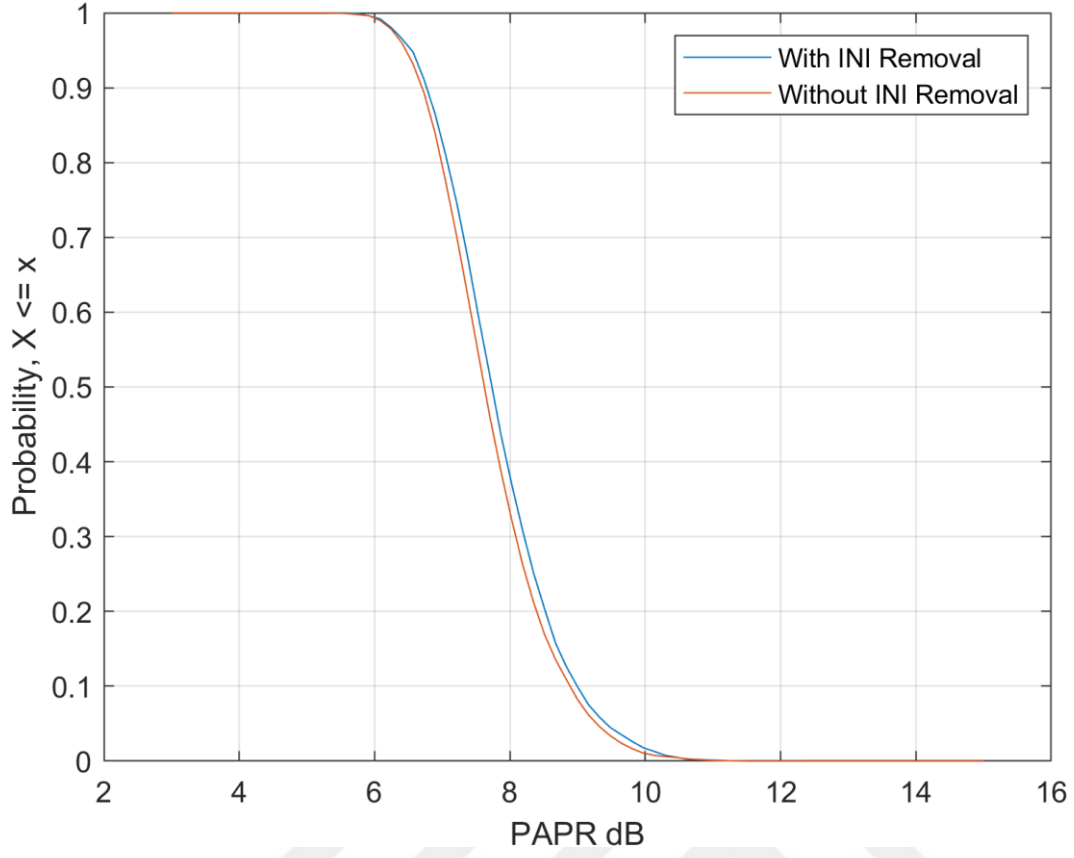
Toplamsal beyaz Gaus gürültüsü eklenmiş Rayleigh sönümlü kanallarda yapılan Monte Carlo simülasyonları ile INI kaldırma çözümünün, farklı tipte modülasyonlar

için teorik BER performansına ulaştığı gözlenmiştir. Bu şekilde hiçbir koruyucu bant kullanıma gerek kalmamıştır. Bu çözüm sayesinde, bileşik numeroloji OFDM sinyali, normal bir OFDM sinyali gibi davranmaya başlamıştır. Bu şekilde, numerolojiler arası girişim kaldırma çözümü, 5G ve ötesi sistemlerin yanında, farklı alt taşıyıcı aralıklı OFDM sistemleri için de kullanılabilir. IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) sistemlerinde 312.5 kHz'lik 64 nokta DFT'li OFDM sinyalleri kullanılırken, IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) yeni Wi-Fi sistemlerinde 78.125 kHz'lik 256 nokta DFT'li OFDM sinyallerinin kullanılması planlanmıştır [30]. Bu farklı Wi-Fi sistemleri, aynı hücresel bölgede ortak frekans bandında ortak olarak kullanılması durumunda [31], [32], [33], numerolojiler arası girişim kaldırma çözümü bu hibrit sistemlerde de kullanılabilir.

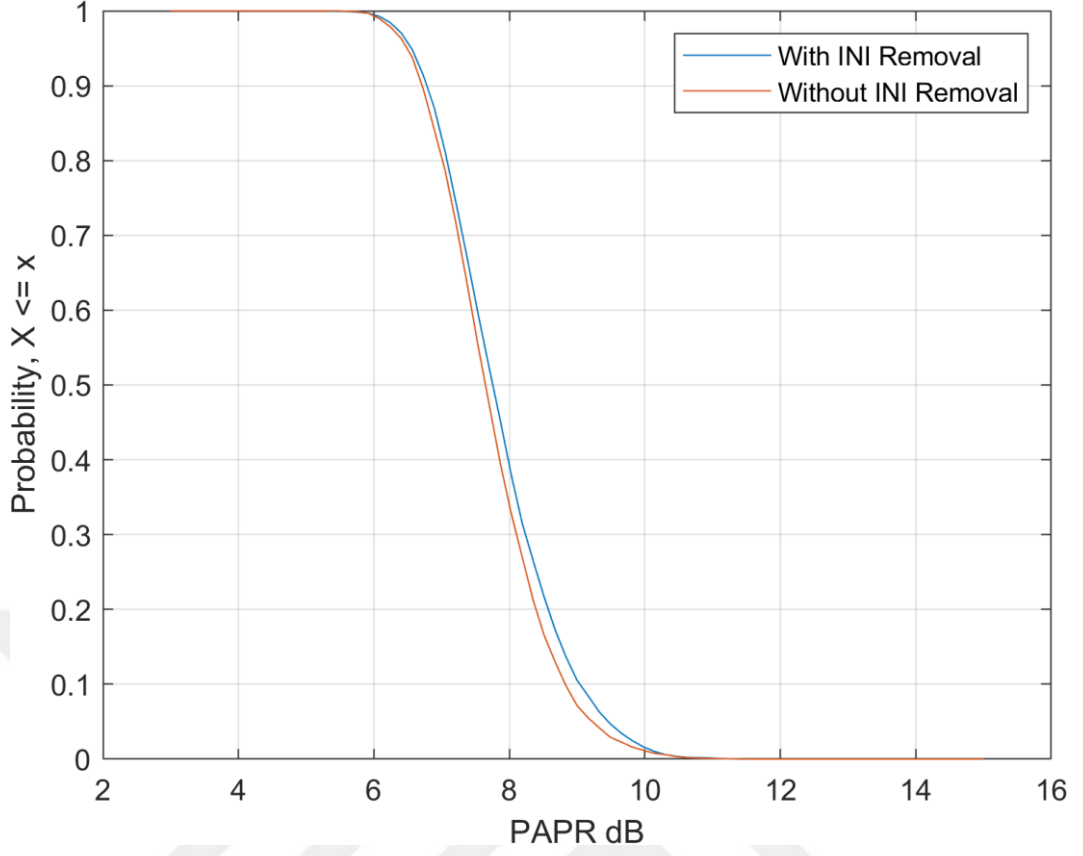
3.5 INI Kaldırma Çözümü PAPR Analizi

Bu bölümde, INI kaldırma çözümünün, PAPR analizi yapılmıştır. OFDM dalga formları, zaman boyutunda anlık voltaj zıplamalarına maruz kalmaktadır. Bu anlık zıplamalar, ideal olmayan yükselteçler için sorunlar yaratabilmektedir. Bu durum, tepe-ortalama güç oranı yani PAPR ile analiz edilmektedir.

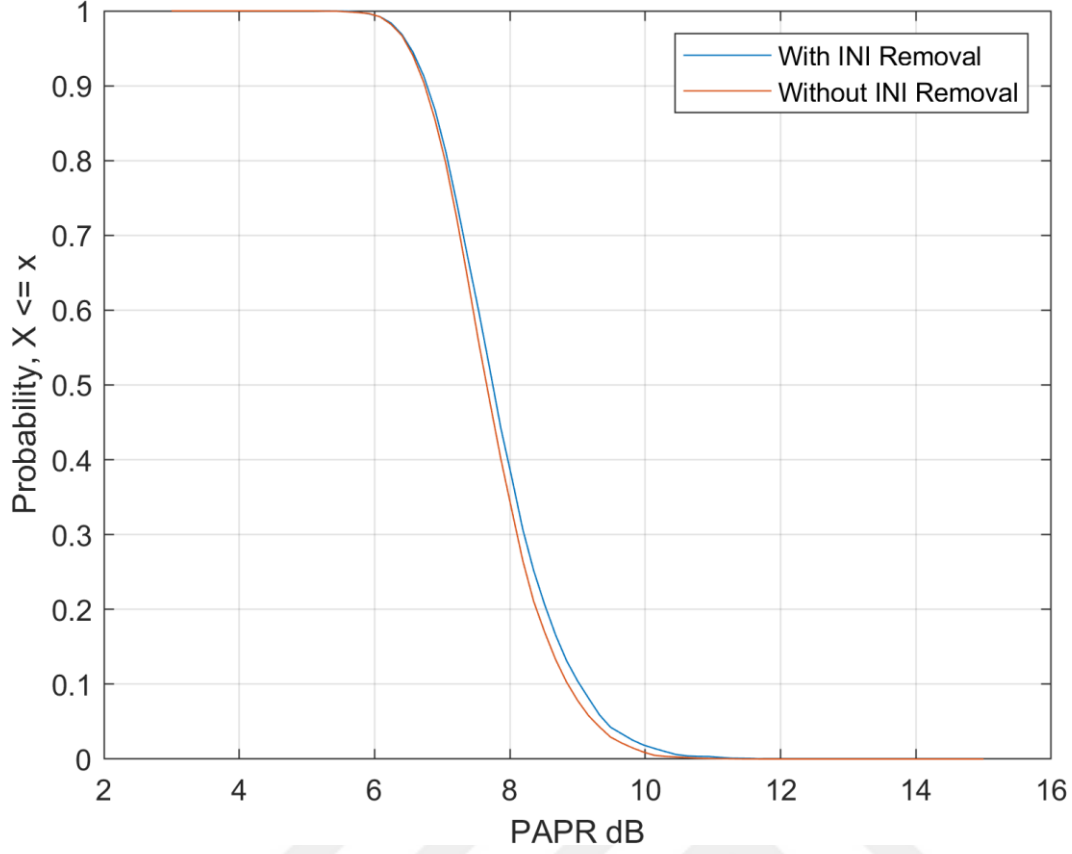
Burada, INI kaldırma çözümü ve hiçbir INI kaldırma işleminin olmadığı durumların PAPR analizleri 16, 64 ve 256 QAM durumları için yapılmıştır.



Şekil 3.13 : 512-1024 DFT’li INI kaldırma yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 16-QAM modülasyon için PAPR CCDF analizleri



Şekil 3.14 : 512-1024 DFT'li INI kaldırma yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 64-QAM modülasyon için PAPR CCDF analizleri



Şekil 3.15 : 512-1024 DFT’li INI kaldırma yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 256-QAM modülasyon için PAPR CCDF analizleri

Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15’te de görüldüğü gibi INI kaldırma işleminin uygulandığı ve uygulanmadığı 512-1024 DFT’li çoklu numeroloji OFDM sinyallerinin, 16, 64 ve 256-QAM modülasyonları için PAPR analizleri CCDF (complementary cumulative distribution function) ile yapılmıştır. Buradaki sonuçlara göre, INI kaldırma yöntemi eklendiğinde, CCDF grafikleri 0.15 dB oranında sağ tarafa kaymaktadırlar.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, 5G ve ötesi kablosuz iletişim ağları için, çeşitli iletişim gereksinimlerini desteklemesi için kullanılması amaçlanan farklı numerolojilerin birbirlerine yarattığı girişim (inter-Numerology interference) incelenmiş ve bir çözüm önerilmiştir. Bu önerilen çözümün, hiçbir koruyucu bant kullanmadan vericide (base station) yan yana yerleştirilen numerolojilerin birbirlerine yarattığı INI'ı tamamen ortadan kaldırdığı Monte Carlo simülasyonları ile gözlemlenmiştir. Bu sayede çoklu numerolojiden oluşan bileşik OFDM (composite numerology OFDM) sinyalleri, birbirinden bağımsız OFDM sinyalleri gibi davranmıştır. Bu sayede alıcılarda (User Equipment), literatüde var olan OFDM sinyal işleme tekniklerinin hepsi kullanılabilir. INI tamamen ortadan kaldırıldığı için, artık komşu kaynak blokları (resource block) için de yüksek dereceli QAM sembolleri verilebilmektedir. Vericide olan, bütün INI kaldırma işlemi basit bir matris çarpımı olarak tanımlanmıştır, bu yüzden vericide bir iş yükü yaratmamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, bu çalışmanın farklı numeroloji kullanan kullanıcılardan baz istasyonuna (up-link) yapılan haberleşmeler için uyarlanmasının incelenmesi elzemdir, çünkü kullanıcılar diğer kullanıcıların hangi haberleşme sembollerini gönderdiğini bilmeyecektir bu durum, INI'nın kaldırılmasını zorlaştıracaktır. Bu çalışma sadece 5G NR ve ötesi sistemler için değil, farklı alt taşıyıcı aralığına sahip farklı sistemler için de kullanılabilirliği öngörülmektedir. Bu sayede, sadece 5G NR için değil aynı zamanda 802.11 ax WI-FI 6 (78.125 kHz alt taşıyıcı aralığı) sistemleri, 802.11 ac WI-FI 5 (312.5 kHz alt taşıyıcı aralığı) sistemleri de bir arada, koruyucu bant kullanılmadan ya da herhangi bir filtre işlemi uygulanmadan aynı bant içinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Nguyen, T. T., Ha, V. N., & Le, L. B.** (2020). Wireless Scheduling for Heterogeneous Services With Mixed Numerology in 5G Wireless Networks. *IEEE Communications Letters*, 24(2), 410–413. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2019.2951375>
- [2] **Zaidi, A. A., Baldemair, R., Tullberg, H., Bjorkegren, H., Sundstrom, L., Medbo, J., Kilinc, C., & Da Silva, I.** (2016). Waveform and Numerology to Support 5G Services and Requirements. *IEEE Communications Magazine*, 54(11), 90–98. <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.1600336cm>
- [3] **Cheng, X., Zayani, R., Shaiek, H., & Roviras, D.** (2020). Analysis and Cancellation of Mixed-Numerologies Interference for Massive MIMO-OFDM UL. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(4), 470–474. <https://doi.org/10.1109/lwc.2019.2959526>
- [4] **Zhang, X., Zhang, L., Xiao, P., Ma, D., Wei, J., & Xin, Y.** (2018). Mixed Numerologies Interference Analysis and Inter-Numerology Interference Cancellation for Windowed OFDM Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8), 7047–7061. <https://doi.org/10.1109/tvt.2018.2826047>
- [5] **Mao, J., Zhang, L., Xiao, P., & Nikitopoulos, K.** (2020). Interference Analysis and Power Allocation in the Presence of Mixed Numerologies. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(8), 5188–5203. <https://doi.org/10.1109/twc.2020.2990717>
- [6] **Memisoglu, E., Kihero, A. B., Basar, E., & Arslan, H.** (2020). Guard Band Reduction for 5G and Beyond Multiple Numerologies. *IEEE Communications Letters*, 24(3), 644–647. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2019.2963311>
- [7] **Pekoz, B., Ankarali, Z. E., Kose, S., & Arslan, H.** (2020). Non-Redundant OFDM Receiver Windowing for 5G Frames and Beyond. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 676–684. <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2953233>
- [8] **Popovski, P., Trillingsgaard, K. F., Simeone, O., & Durisi, G.** (2018). 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. *IEEE Access*, 6, 55765–55779. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2872781>

- [9] **Zaidi, A. A., Baldemair, R., Moles-Cases, V., He, N., Werner, K., & Cedergren, A.** (2018). OFDM Numerology Design for 5G New Radio to Support IoT, eMBB, and MBSFN. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(2), 78–83. <https://doi.org/10.1109/mcomstd.2018.1700021>
- [10] **Marijanovic, L., Schwarz, S., & Rupp, M.** (2020). Multiplexing Services in 5G and Beyond: Optimal Resource Allocation Based on Mixed Numerology and Mini-Slots. *IEEE Access*, 8, 209537–209555. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3039352>
- [11] **5G Flexible Numerology – What is it? Why should you care? 5G Flexible Numerology – What is it? Why should you care? - Technical Support Knowledge Center Open.** (n.d.). <https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/5g-flexible-numerology-what-is-it-why-should-you-care-598781627.html>.
- [12] **You, L., Liao, Q., Pappas, N., & Yuan, D.** (2018). Resource Optimization With Flexible Numerology and Frame Structure for Heterogeneous Services. *IEEE Communications Letters*, 22(12), 2579–2582. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2018.2865314>
- [13] **5G. ShareTechnote.** (n.d.). https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure_Candidate.html.
- [14] **Kihero, A. B., Solaija, M. S., & Arslan, H.** (2019). Inter-Numerology Interference for Beyond 5G. *IEEE Access*, 7, 146512–146523. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2946084>
- [15] **Lien, S.-Y., Shieh, S.-L., Huang, Y., Su, B., Hsu, Y.-L., & Wei, H.-Y.** (2017). 5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access. *IEEE Communications Magazine*, 55(6), 64–71. <https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1601107>
- [16] **Zaidi, A. A., Baldemair, R., Tullberg, H., Bjorkegren, H., Sundstrom, L., Medbo, J., Kilinc, C., & Da Silva, I.** (2016). Waveform and Numerology to Support 5G Services and Requirements. *IEEE Communications Magazine*, 54(11), 90–98. <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.1600336cm>
- [17] **Wunder, G., Jung, P., Kasparick, M., Wild, T., Schaich, F., Chen, Y., Brink, S. T., Gaspar, I., Michailow, N., Festag, A., Mendes, L., Cassiau, N., Ktenas, D., Dryjanski, M., Pietrzyk, S., Eged, B., Vago, P., & Wiedmann, F.** (2014). 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 97–105. <https://doi.org/10.1109/mcom.2014.6736749>
- [18] **Lim, Y.-G., Jung, T., Kim, K. S., Chae, C.-B., & Valenzuela, R. A.** (2018). Waveform Multiplexing for New Radio: Numerology Management and 3D Evaluation. *IEEE Wireless Communications*, 25(5), 86–94. <https://doi.org/10.1109/mwc.2018.1700351>

- [19] **Huawei, HiSilicon.** (2016, May). *f-OFDM scheme and filter design*. 3GPP TDocs (written contributions) at meeting. <https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-85--31662.htm>.
- [20] **Qualcomm Incorporated.** (2016, April). *Waveform Candidates*. 3GPP TDocs (written contributions) at meeting. <https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-84b--31661.htm>.
- [21] **Lin, H.** (2015). Flexible Configured OFDM for 5G Air Interface. *IEEE Access*, 3, 1861–1870. <https://doi.org/10.1109/access.2015.2480749>
- [22] **Demmer, D., Zakaria, R., Gerzaguet, R., Dore, J.-B., & Le Ruyet, D.** (2019). Study of OFDM Precoded Filter-Bank Waveforms. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(6), 2889–2902. <https://doi.org/10.1109/twc.2018.2886886>
- [23] **Abdel-Atty, H. M., Raslan, W. A., & Khalil, A. T.** (2020). Evaluation and Analysis of FBMC/OQAM Systems Based on Pulse Shaping Filters. *IEEE Access*, 8, 55750–55772. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2981744>
- [24] **Michailow, N., Matthe, M., Gaspar, I. S., Caldevilla, A. N., Mendes, L. L., Festag, A., & Fettweis, G.** (2014). Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 62(9), 3045–3061. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2014.2345566>
- [25] **Li, F., Zheng, K., Zhao, L., Zhao, H., & Li, Y.** (2019). Design and Performance of a Novel Interference-Free GFDM Transceiver With Dual Filter. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 4695–4706. <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2902561>
- [26] **Dahlman, E., & Parkvall, S.** (2018). NR - The New 5G Radio-Access Technology. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2018.8417851>
- [27] **TR 138 912 - V15.0.0 - 5G; Study on New Radio (NR) access ...** (n.d.). https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138912/15.00.00_60/tr_138912v150000p.pdf.
- [28] **Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J.** (2021). LTE—An Overview. *5G NR*, 39–56. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822320-8.00004-0>
- [29] **Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and ...** (n.d.). https://www.cnrood.com/en/media/solutions/Wi-Fi_Overview_of_the_802.11_Physical_Layer.pdf.
- [30] **Milos, J., Polak, L., & Slanina, M.** (2017). Performance analysis of IEEE 802.11ac/ax WLAN technologies under the presence of CFO. *2017 27th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. <https://doi.org/10.1109/radioelek.2017.7937579>

- [31] **Yoshida, N., Lanante, L., Nagao, Y., Kurosaki, M., & Ochi, H.** (2017). A hybrid HW/SW 802.11ac/ax system design platform with ASIP implementation. *2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*. <https://doi.org/10.1109/ispacs.2017.8266590>
- [32] **Lanante, L., Ghosh, C., & Roy, S.** (2020). Hybrid OFDMA Random Access with Resource Unit Sensing for Next-gen 802.11ax WLANs. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tmc.2020.3000503>
- [33] **Dolinska, I., Jakubowski, M., & Masiukiewicz, A.** (2019). New IEEE 802.11 HEW Standard Throughput per User Analysis. *2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. <https://doi.org/10.1109/dt.2019.8813700>



TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Cevikgibi, B. A., Gungen, M. A., & Girici, T.** (2020). The Evaluation of Telecommunication Signal Processing Techniques for EMG Disease Classification. *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. <https://doi.org/10.1109/siu49456.2020.9302330>

