



## 5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

Yasin KABALCI<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

### ÖZET

Bu çalışma beşinci nesil (5G) iletişim sistemleri için aday olan iletim tekniklerinin bit hata oranı (BHO) başarımlarını araştırmaktadır. Performans analizleri 5G araştırmaları için önerilmiş kanal modellerinden birisi olan A tipi Dalli Gecikme Hattı kanal modeli göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Analizler gerçekleştirilirken detaylı incelemelerin gerçekleştirilebilmesi için hem sabit alıcı/verici birimler hem de hareketli alıcı/verici birimlerin olduğu durumlar dikkate alınmıştır. Ayrıca kanal gecikme yayılımının farklı profilleri de değerlendirilerek analiz senaryoları genişletilmiştir. Elde edilen performans sonuçları hareketli ve yüksek gecikme yayılımına sahip kanal durumunda Filtre Bankası Çoklu Taşıyıcı (Filtered Bank Multiple Carrier, FBMC) iletim tekniğini kullanan iletişim sistemlerinin daha iyi bir performansa sahip olduğunu ve bu sistemin diğer sistemlere göre daha kararlı davrandığını göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Mobil iletişim sistemleri, 5G, TDL kanal modeli, BHO analizi

## BIT ERROR RATE PERFORMANCE INVESTIGATION OF CANDIDATE TRANSMISSION TECHNIQUES FOR 5G COMMUNICATION SYSTEMS

### ABSTRACT

This paper examines bit error rate (BER) performances of transmission techniques that are candidates for fifth-generation (5G) communication systems. Performance analyses are performed by considering Tapped Delay Line (TDL-A) which is a channel model proposed for the 5G studies. In order to provide comprehensive analysis, both stationary transmitter/receiver units and active receiver/transmitter units are taken into account while performing the analyses. In addition, analysis scenarios are expanded by evaluating different delay spread profiles. The obtained results show that the communications systems utilizing Filtered Bank Multiple Carrier (FBMC) transmission technique provides better performance and it operates more reliable than that of other candidates in case of active units and channel conditions with high delay spread.

**Keywords:** Mobile communication systems, 5G, TDL channel model, BER analysis

## 1. GİRİŞ

Gelecek nesil iletişim sistemlerinde ağı bağlı cihazların sayısında beklenen büyük artışın yüksek veri hızı ve daha fazla kapasite gereksinimlerini de beraberinde getirmesi beklenmektedir [1]. İletişim sistemleri için çoklu erişim tekniklerinin seçimi, servis kalitesi (quality-of-service, QoS), kararlılık ve spektral verimlilik gibi önemli performans ölçütlerini belirlemek için önemli bir parametre olmuştur. Zaman bölümlü çoklu erişim (time division multiple access, TDMA), frekans bölümlü çoklu erişim (frequency division multiple access FDMA) ve kod bölümlü çoklu erişim (code division multiple access, CDMA) gibi önceki nesil teknikler, çok sayıda bağlı cihazın bulunduğu iletişim ağlarında kaynakları yeterli derecede yönetemediklerinden dolayı çeşitli sorunlarla karşı karşıya kalmışlardır [2]. Ayrıca, veri hızı gereksinimleri, iletişim sistemlerinde kullanılan cihazların farklılıklarından dolayı cihazdan cihaza değişmektedir. TDMA, FDMA ve CDMA gibi dikgen çoklu erişim (orthogonal multiple access, OMA) yöntemlerinin aksine, dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA) yöntemleri daha fazla sayıda mobil cihazı destekleyebilmektedir. Bununla birlikte NOMA sistemler, farklı cihazların aynı bant genişliğini paylaşmasına izin vererek (cihazların verilerini güç ekseninde çoğullayarak) kapasite kazancını artırabilmektedir [3]–[6].

Kablosuz iletişim ağlarına bağlı cihazların sayısı, önemli oranda artış göstermeye devam etmekte ve buna bağlı olarak yüksek veri trafiği talebi yoğun oranda artmaktadır. Beşinci nesil (Fifth Generation, 5G) iletişim ağlarında yüksek veri hızı

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yasinkabalcı@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 02.12.2019 Kabul / Accepted: 07.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.654386

Y. Kabalcı

gerektiren masif sayıda cihazın entegrasyonu beklenmektedir [1], [7]–[9]. Bu yüzden, kablosuz iletişim endüstrisi gelecek nesil iletişim sistemleri daha fazla cihaza hizmet sunabilsin diye, veri trafiğini mevcut sistemlere göre yaklaşık 1000 kat daha geliştirmek zorunda kalmıştır [10], [11]. Spektrumun optimum kullanımı hedeflenen amaçlara ulaşmak için kaçınılmaz bir gereksinimdir ve bu işaret işleme, lisanslı ve lisansız frekans bantlarının uygun adaptasyonu ve baz istasyonlarının yoğunlaştırılması ile gerçekleştirilebilir [12]. Ayrıca, 5G iletişim sistemleri ile gigabit veri hızlarına ulaşmak için en iyi iletim tekniğinin (i.e., Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM), Filtered OFDM (F-OFDM), Filtered Bank Multiple Carrier (FBMC) gibi) ve kanal kodlama şemalarının (i.e., Turbo, Polar, Low-Density Parity-Check (LDPC) gibi) bulunması gerekmektedir [13]. OFDM, modern kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın kullanımdan dolayı önemli bir yere sahiptir ancak bu tekniğin spektral verimliliğini geliştirmek için bant dışı (Out-of-Band, OOB) emisyon ve tepe güç-ortalama güç oranı (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir [14]. OOB emisyonu, modülasyon işleminden kaynaklanan gerekli bant genişliğinin hemen dışındaki bir frekans veya frekanslardaki emisyonudur. OOB emisyon seviyesi, ilgili bilgi iletimini etkilemeden azaltılamaz. Diğer taraftan, filtrelenmiş OFDM (Filtered OFDM, F-OFDM) ve Filtre Bankası Çoklu Taşıyıcı (Filtered Bank Multiple Carrier, FBMC) sistemler bahsedilen bu problemlerin üstesinden gelebilmek için iyi birer aday olarak değerlendirilmektedir [15], [16]. F-OFDM, OFDM tekniğindeki spektral sızıntıların üstesinden gelmek için alçak geçiren filtreler kullanılmaktadır. OFDM tekniğinin modern formu olarak değerlendirilen FBMC ise döngüsel ön ek kullanılmamakta ve spektral verimliliği artırmak için ofset dördün genlik modülasyonu (Offset QAM, OQAM) kullanılmaktadır [15]. NOMA teknikleri yüksek kapasite kazancı, spektrumun etkin kullanımını sağlama ve aynı frekans kaynaklarını kullanarak çok sayıda cihaza hizmet verme potansiyeline sahip olduklarından dolayı artan bir ilgiye sahiptir [17].

Bu çalışma, 5G iletişim sistemlerinde kullanılacak farklı iletim tekniklerinin performanslarını araştırmaktadır. Performans incelemeleri gelecek nesil iletişim sistemlerinin potansiyel dalga şekli adaylarından olan OFDM, F-OFDM, WOLA, FBMC ve UPMC sistemleri için gerçekleştirilmiştir. İncelemeler gerçekleştirilirken A tipi Dalli Gecikme Hattı (Tapped Delay Line, TDL-A) kanal modeli göz önünde bulundurulmuştur. Bu kanal modelinin değerlendirilmesinin temel nedeni ise bu modelin Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) tarafından 5G araştırmalarında 0.5-100 GHz frekans aralığı için önerilmiş kanal modellerinden birisi olmasıdır [18]. Performans analizleri gerçekleştirilirken farklı kanal gecikme yayılım profilleri, alıcı birimin sabit olduğu durumlar, alıcı birimin düşük hızla hareketli olduğu durumlar ve alıcı birimin yüksek hızla hareketli olduğu durumlar gibi değişik senaryolar göz önünde bulundurulmuştur.

## 2. İLETİM TEKNİKLERİ VE KANAL MODELİ

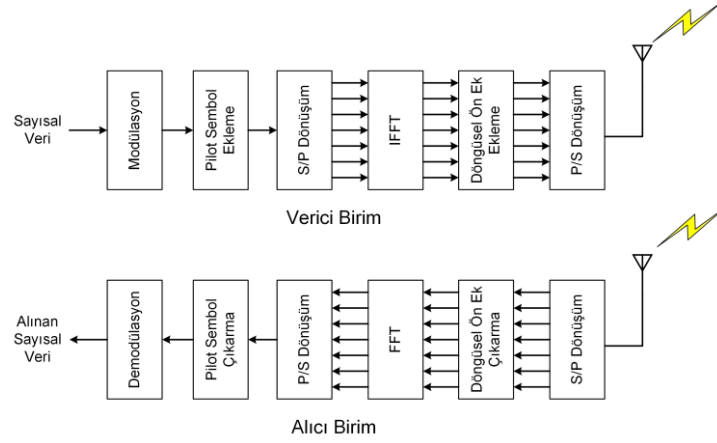
### 2.1. OFDM

Bant sınırlı işaretlerin dikgen alt kanallar üzerinden paralel olarak ilemesine dayanan OFDM tekniği, ilk kez 1966 yılında Chang [19] tarafından önerilmiştir. Bu ilk öneride, semboller arası girişim (Intersymbol interference, ISI) ve kanallar arası girişim (inter-channel interference, ICI) problemleri göz ardı edilmiştir. Ardından, örnekleme zaman hatası, taşıyıcı faz kayması gibi pratik sorunlar da göz önünde bulundurularak OFDM tekniğinin detaylı performans analizleri gerçekleştirilmiş ve 1970 yılında bu teknik patentlenmiştir [20], [21]. Ancak paralel modülasyon ve demodülasyon işlemlerini gerçekleştirmek için gerekli olan çok sayıda alt taşıyıcı osilatör ve maliyet kriterleri bu sistemin ana problemi olarak gündeme gelmiştir. İlerleyen yıllarda alt taşıyıcı osilatör gereksinimi ortadan kaldıran yeni bir yaklaşım olan ayrık Fourier dönüşümü (discrete Fourier transform, DFT) kullanımı önerilmiştir [22]. Bu yeni tekniğin hesaplama karmaşıklığının yüksek olması nedeniyle bu teknik yerini daha etkili bir yöntem olan hızlı Fourier dönüşümü (fast Fourier transform, FFT) tekniğine bırakmıştır. ISI ve ICI problemlerinin üstesinden gelebilmek için ise zaman ekseninde güvenlik bandı ve yükseltilmiş kosinüs pencereleme kullanılmış olmasına rağmen, çoklu yol yayılım ortamında alt taşıyıcılar arasında iyi dikgenlik sağlanamamıştır. Bu problemi çözmek için ise döngüsel ön ek (cyclic prefix, CP) kullanımı önerilmiştir [23]. OOB emisyonu, PAPR ve alıcı birimde gerekli olan katı eş zamanlama bu tekniğin en önemli problemleri olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzün en popüler iletim tekniklerinden birisi olan OFDM, geniş bantlı iletişim sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda çok girişli çok çıkışlı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) iletişim sistemlerinde de yoğun olarak kullanılan bu tekniğin geliştirilmiş blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir. Blok diyagramın üst kısmı verici birimi modellerken, alt kısım alıcı birimi modellemektedir. Tasarlanan iletişim sisteminde iletilmesi hedeflenen mesaj bilgisi için rastgele üretilmiş sayısal veri dizileri kullanılmaktadır. Mesaj bilgisini oluşturan sayısal veri dizilerine modülasyon işlemi uygulandıktan sonra pilot sembollerin eklenmesi için devam eden bloğa uygulanmaktadır. Pilot sembol ekleme işleminin gerçekleştirilmesinin ardından sayısal veri dizilerine seri/paralel dönüşüm işlemi gerçekleştirilmektedir. Ters hızlı Fourier dönüşüm bloğu (IFFT), OFDM işaretlerinin zaman ekseninde üretilmesini sağlamaktadır. Zaman eksenine aktarılan OFDM işaretlerine sonraki işlem adımında döngüsel önek bilgisi eklenerek semboller arası girişimin önlenmesi amaçlanmaktadır. Bu aşamadan sonra mesaj işareti, paralel/seri dönüşüm işlemi ile iletme uygunlaştırılarak iletim kanalına aktarılır. Mesaj işareti

## 5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

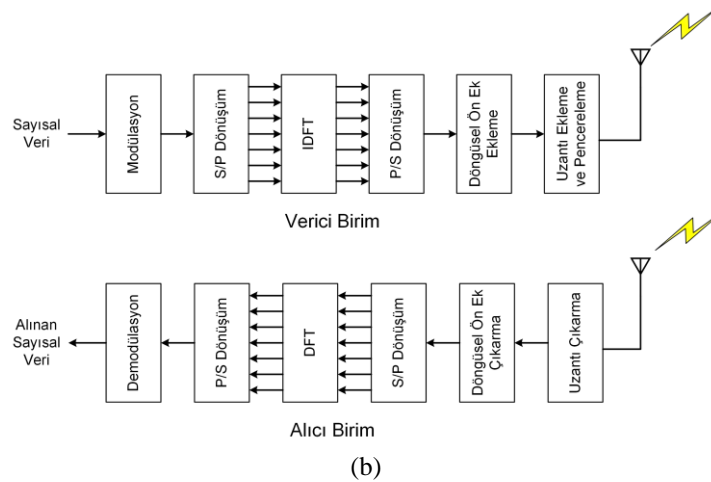
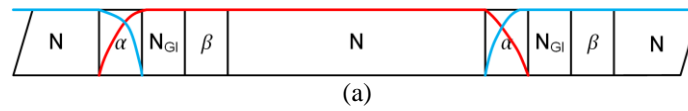
iletim kanalından geçerek alıcı birime ulaşmaktadır. Alıcı birime ulaşan mesaj işaretinden döngüsel önek bilgisinin çıkarılabilmesi için öncelikli olarak seri/paralel dönüşüm işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemlerin devamında mesaj işareti zaman ekseninden frekans eksenine FFT bloğu ile aktarılmaktadır. Bu işlemin devamında işaret paralel/seri dönüşümü yapılarak pilot sembol çıkarılması gerçekleştirilmektedir. Alıcı birimde gerçekleştirilen son işlemler demodülasyon işlemleridir. Bu işlemlerden sonra iletilen mesaj bilgileri karşılaştırılarak sistem başarımı bit hata oranı (BHO) cinsinden belirlenmektedir.



Şekil 1. OFDM iletişim sistemine ait blok diyagram

## 2.2. WOLA

Pencerelenmiş OFDM [24] olarak da adlandırılan WOLA, geleneksel döngüsel ön ekli OFDM sistemine benzer bir yapıdadır ancak OFDM çerçevesinde ilave sol ve sağ uzantılara sahiptir.  $N$  alt taşıyıcılı geleneksel OFDM sistemindeki son CP örnekleri  $N$  örneğin önüne eklenerek CP uyumluluğu sağlanır. Eklenen  $N$  örnek parçası üç farklı grubun birleşiminden oluşur. Ön tarafa eklenen sol uzantı  $\alpha + \beta$  örneklerinden ve güvenlik aralığından (guard interval, GI) oluşurken, sağ çerçeve uzantısı  $\alpha + \beta$  örneklerinden oluşur. Ön ve arka uzantıdaki  $\alpha$  örnekleri, vericide dikkörtgen olmayan pencereler kullanılarak elde edilir. WOLA çerçevesinin grafiksel gösterimi Şekil 2(a)'da, WOLA sistemin genel blok şeması ise Şekil 2(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) WOLA sembollerinin yapısı, (b) WOLA iletişim sistemine ait blok diyagram

Y. Kabalcı

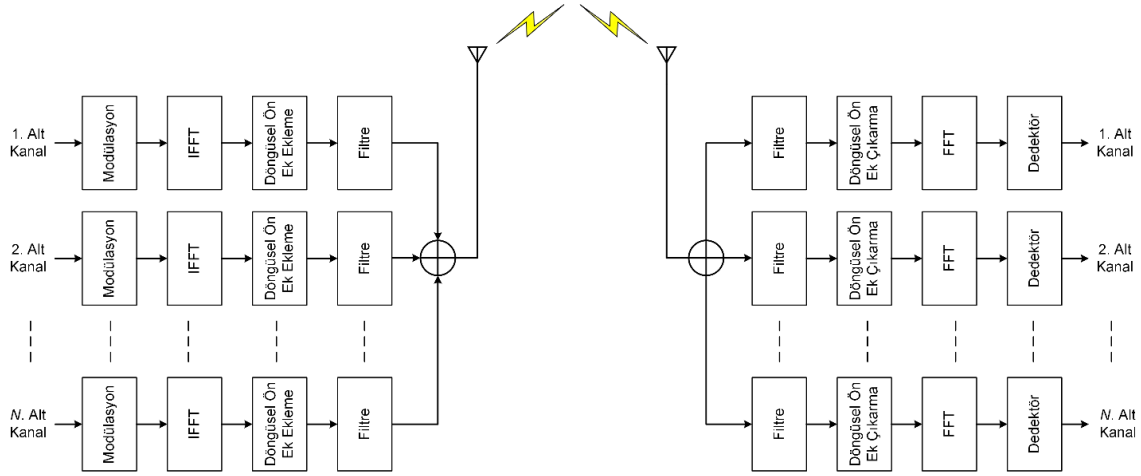
Alıcı birimde sembolün başlangıcındaki ve sonundaki  $\alpha$  örnekleri silinir. GI örnekleri, ISI ve ICI girişimlerinin giderilmesi için kullanılmaktadır. Her bir taşıyıcıda iletilen kompleks değerler, elde edilen işarete  $N$ -noktalı FFT uygulanarak elde edilir. İletilen WOLA sembollerinin ayrık zamanlı ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S(k) = \sum_{m=0}^{L_{FFT}-1} \sum_{n=0}^{N_{OFDM}-1} c_{m,n} g[k-n(L_{FFT} + L_{GI})] e^{j2\pi kn/L_{FFT}} \quad (1)$$

burada  $L_{FFT}$  FFT boyutunu,  $L_{GI}$  GI uzunluğunu,  $g$  sembol penceresini,  $c_{m,n}$ ,  $n$ . OFDM sembolünün  $m$ . alt taşıyıcısındaki modülasyonlu veri sembolünü,  $N_{OFDM}$  ise iletilen sembol sayısını göstermektedir. Pencereleme işlemi temelde iki uzantıda gerçekleştirilerek OOB emisyonunun düşürülmesi amaçlanmaktadır. Ancak, bu genişletme nedeniyle ortaya çıkan iki tür sorun vardır. Birincisi fazlardan zaman kaynaklarının kullanılması iken, ikincisi ise veri çarpışmasından dolayı eklentinin sol kısmının önceki OFDM çerçevesinin sağ eklentisine karışma ihtimalidir.

### 2.3. F-OFDM

Bu teknikte alçak geçiren filtreler kullanılarak OOB emisyonu düşürülmeye çalışılır [16], [25]–[27]. F-OFDM tekniği, ISI, ICI ve komşu kanal girişimi (adjacent-channel interference, ACI) için hem kapalı bir form sunar hem de iyi bir spektrum kullanımı sağlar. Bu yüzden F-OFDM, 5G iletişim teknolojileri için iyi bir aday olarak önerilmektedir. Ayrıca bu teknik ile PAPR değerinin azaltılabileceği de gösterilmiştir [28]. F-OFDM tekniğinde, tüm sistem bant genişliği istenilen sayıda alt bant kanallara bölünür ve her alt kanal için farklı dalga şekilleri uygulanabilir [29]. Filtreler ise alt kanal dalga şekillerinin ayrıştırılmasında kullanılmaktadır. Tüm alt kanallar örtüşmez olduğundan dolayı, OOB emisyonu çok düşük değerdedir ve böylelikle spektrum verimliliği sağlanır [30]. Tipik bir F-OFDM iletişim sisteminin blok diyagramı Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. F-OFDM iletişim sistemine ait blok diyagram

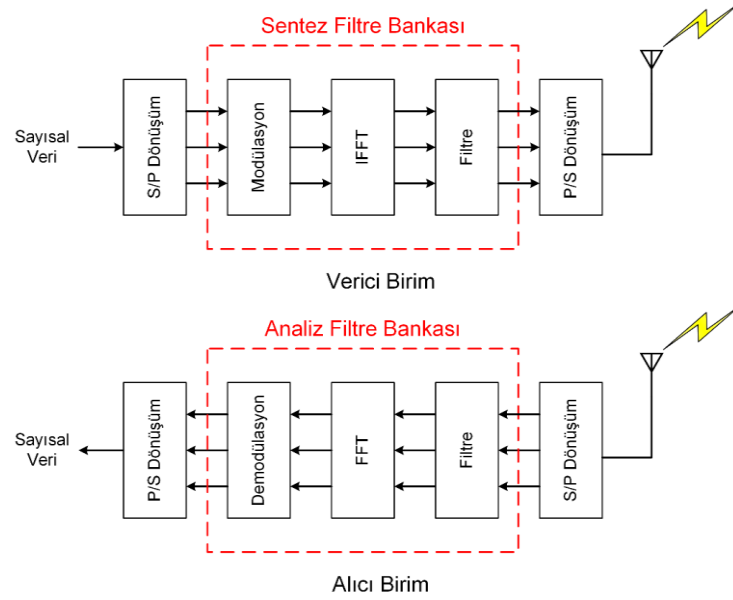
Blok diyagram incelendiğinde, F-OFDM sisteminin (OFDM sistemine ek olarak) CP bloğundan sonra ve OOB emisyonunu düşürmek için gerçekleştirilen frekans kaydırma işleminden önce (alçak geçiren) filtre içerdiği görülmektedir. F-OFDM tekniğinde iletilecek işaret farklı alt bantlara bölüldüğünden dolayı, alt bantlarda farklı uygulamaların gereksinimlerini karşılamak için değişik modülasyonlar ve uzunluklar kullanılabilir. Diğer bir ifadeyle, her alt bantın IFFT boyutu farklı olabilmektedir. Bu yüzden, her alt kanalın CP uzunluğu farklı olabilir. Alıcı birimde ise vericide gerçekleştirilen işlemlerin tersi yapılarak iletilen verinin elde edilmesi sağlanmaktadır.

### 2.4. FBMC

FBMC tekniğinin temel prensibi, iletim oranını  $M$  alt taşıyıcı kullanarak  $M$  bağımsız veri akışına bölmektir. Alıcı birime ISI ve ICI problemi olmadan sembol iletimi gerçekleştirilebilmek için alt taşıyıcılar arasında dikgenlik şartının sağlanması gerekmektedir. Bu teknikte dikgenliğin sağlanabilmesi için sembollerin faz içi ve faz dışı bileşenleri yarım sembol süresi kaydırılarak iletilmektedir. FBMC tekniğinde, işaretin yan loplarının bastırılması için alt taşıyıcılar filtre bankasından geçirilir. Verici birimde sentez filtre bankası, alıcı birimde ise analiz filtre bankası kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan filtreler

## 5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

çok fazlı filtrelerle gerçekleştirilebileceği gibi FFT/IFFT blokları ile de gerçekleştirilebilir. Elde edilen dalga şekli asenkron işaretlere karşı daha fazla sağlamlığa sahiptir. Bu nedenle eş zamanlama karmaşıklığı daha azdır ve kablosuz ağlarda hem aşağı yönlü hem de yukarı yönlü bağlantı için kullanılabilir. Aynı zamanda, bu teknikte CP kullanılmadığından dolayı daha yüksek veri hızı oranı elde edilebilmektedir. Genelleştirilmiş bir FBMC iletişim sisteminin blok diyagramı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. FBMC iletişim sisteminin blok diyagramı

Blok diyagramdan görüleceği üzere, öncelikli olarak üretilen veri dizileri sisteme giriş mesaj bilgisi olarak uygulanır ve ardından üretilen işaret seri/paralel dönüştürücü bloğuna aktarılır. Paralel verilere modülasyon işlemi uygulandıktan sonra işaret IFFT bloğuna beslenir. IFFT yaklaşımı, tasarımı ve uygulaması basit bir filtre bankası yaklaşımına dönüşebilir. IFFT bloğunun çıkışı, çok fazlı ağ FFT bloğuna uygulanır. Bu yaklaşım daha az hesaplama karmaşıklığı sağlamakla birlikte, FFT blok uzunluğunu da korur. Alıcı birime ulaşan işaretten veri dizisinin elde edilmesi için vericide gerçekleştirilen işlemlerin tersi gerçekleştirilir. İletilen FBMC işaretinin analitik ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S(n) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} X_n(l) g(t-lT) e^{j2\pi n t/T_0} e^{j\phi_n(l)} \quad (2)$$

burada  $X_n(l)$  kompleks formda iletilen sembollerini,  $g(t)$  şekillendirme dalga formunu,  $\phi_n(l)$  alıcı birimde sembollerin ayrıştırılmasını kolaylaştırmak için kullanılan ek faz terimini göstermektedir.

## 2.5. UFMC

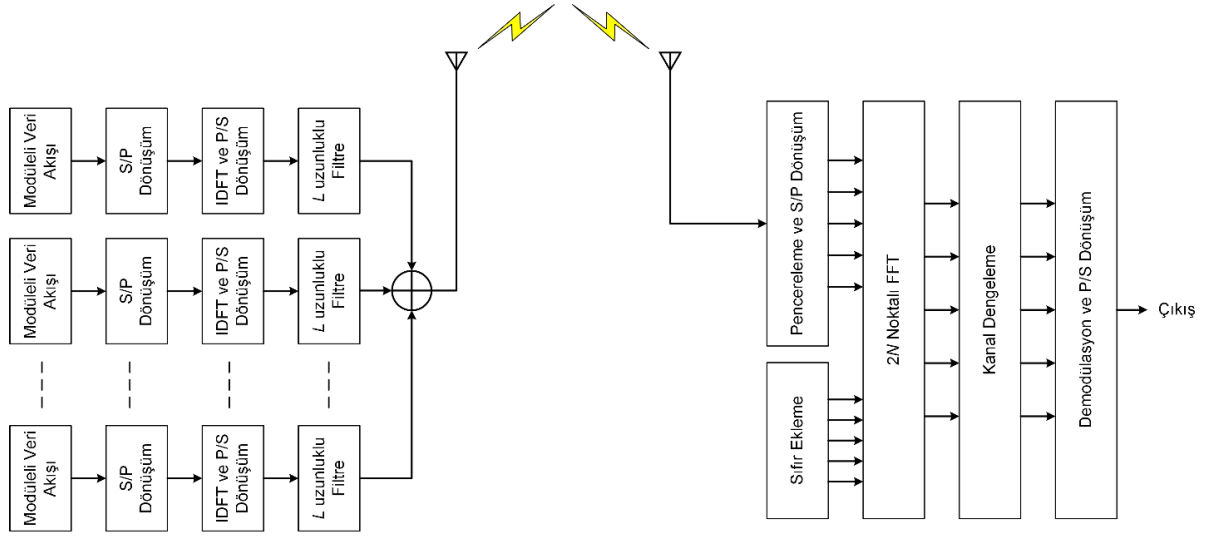
UFMC, F-OFDM ve FBMC tekniklerinin kombinasyonunun özel bir durumudur. Bu yöntem asenkron verilerin varlığında hataya karşı daha dayanıklıdır. UFMC, OFDM ve FBMC tekniklerinin sınırlamalarının üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem alt taşıyıcıları ayrı ayrı filtrelemek yerine, alt taşıyıcı frekanslarını içeren her grup birlikte filtrelenir. Bu yaklaşım OOB emisyonunun düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Genelleştirilmiş bir UFMC iletişim sisteminin blok diyagramı Şekil 5'te görülmektedir.

Bu sistemde öncelikli olarak modüle edilmiş veri dizisi  $x_{ik}$  seri/paralel dönüştürücü bloğuna uygulanır ve elde edilen paralel işaretler  $L_{DFT}$  uzunluğundaki ters ayrık Fourier (IDFT) bloğuna beslenir. Ardından,  $L$  uzunluklu filtre bloğu ile işaretlerin filtrelenmesi gerçekleştirilir. Burada verici birimin  $B$  bant genişliklerinden oluşan alt bantların birleşiminden oluştuğunu ve CP kullanılmadığını hatırlatmak faydalıdır. İletilen işaretin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır:

Y. Kabalcı

$$y_k = \sum_{i=1}^B y_{ik} = \sum_{i=1}^B F_{ik} V_{ik} x_{ik} \quad (3)$$

burada  $y_{ik}$   $i$ . alt kanaldaki iletilen işareti,  $B$  toplam alt bant sayısını,  $V_{ik}$   $i$ . alt kanaldaki IDFT matrisini,  $F_{ik}$  ise  $i$ . alt kanaldaki darbe şekillendirme matrisini,  $x_{ik}$   $i$ . alt kanaldaki modülasyonlu işareti göstermektedir.



Şekil 5. UFMC iletişim sistemine ait blok diyagram

## 2.6. TDL Kanal Modeli

3GPP teknik raporunda [18], 500 MHz - 100 GHz aralığında bağlantı seviyesi değerlendirmeleri için tanımlanmış kanal modellerinden birisi TDL kanal modelidir. Bu raporda görüş yollu olmayan yayılım şartları için üç farklı kanal profili (TDL-A, TDL-B ve TDL-C) ve görüş yollu yayılım şartları için ise iki farklı kanal profili (TDL-D ve TDL-E) tanımlanmaktadır. Önceki Uzun Dönem Evrim (Long Term Evolution, LTE) kanal modellerinden farklı olarak, TDL-A kanal modelinde istenilen gecikme yayılım değerinin elde edilebilmesi için gecikme yayımları lineer olarak ölçeklenebilmektedir. 3GPP teknik raporunda [18] beş farklı gecikme yayılım tanımı yapılmış olup bu tanımlar Tablo 1’de listelenmiştir.

**Tablo 1.** TDL kanal modelleri için tanımlanmış örnek ölçekleme parametreleri [18]

Model	Gecikme Yayımları
Çok kısa gecikme yayılımı	10 ns
Kısa gecikme yayılımı	30 ns
Normal gecikme yayılımı	100 ns
Uzun gecikme yayılımı	300 ns
Çok uzun gecikme yayılımı	1000 ns

$N$  sayıda dal sayısına sahip çok yollu TDL modelin kanal dürtü yanıtı matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^N a_k(t) \delta(\tau - \tau_k) \quad (4)$$

burada  $a_k(t)$   $k$ . daldaki  $\tau_k$  gecikme bileşenindeki toplam genliği ifade etmektedir. Her bir daldaki Doppler gecikmesi ( $f_D$ ) Jake modeline bağlı olarak ifade edilebilir:

## 5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

$$f_D = \frac{|\bar{v}|}{\lambda_0} \quad (5)$$

burada  $\bar{v}$  hareket hızını,  $\lambda_0$  ise dalga boyunu göstermektedir.

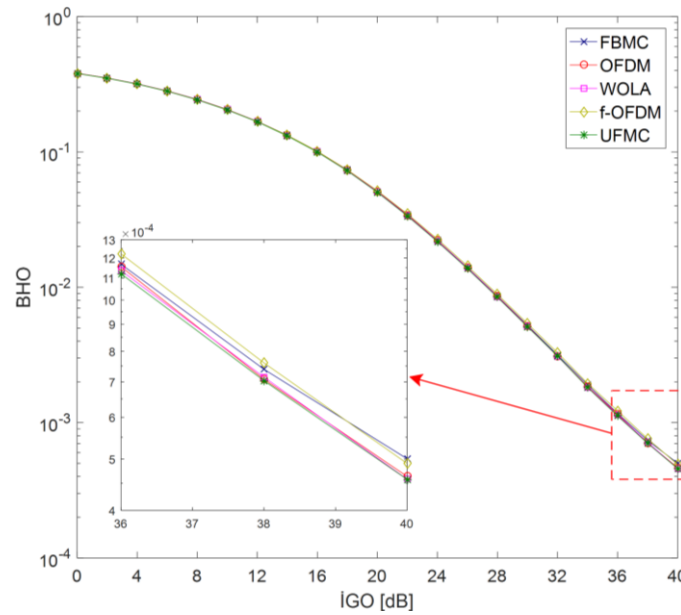
### 3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

5G iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinin Tablo 2’de verilen parametrelere göre gerçekleştirilen tasarımlarının performans analizleri bu bölümde kapsamlı olarak sunulmaktadır. Gerçekleştirilen performans analizlerinde BHO’ya karşılık İşaret-Gürültü Oranı (İGO) cinsinden incelemeler yapılmaktadır.

**Tablo 2.** Performans değerlendirmesinde kullanılan sistem parametreleri

Parametre	Değer
Taşıyıcı Frekansı	28 GHz
Alt Taşıyıcı Sayısı	24
Alt Taşıyıcı Bant Genişliği	15 kHz
Kanal Bant Genişliği	0.54 MHz
Modülasyon	64QAM
Kanal Modeli	TDL-A
Gecikme Yayılımı	10, 100, 1000 ns
Hareket Hızı	0, 50, 150 km/saat

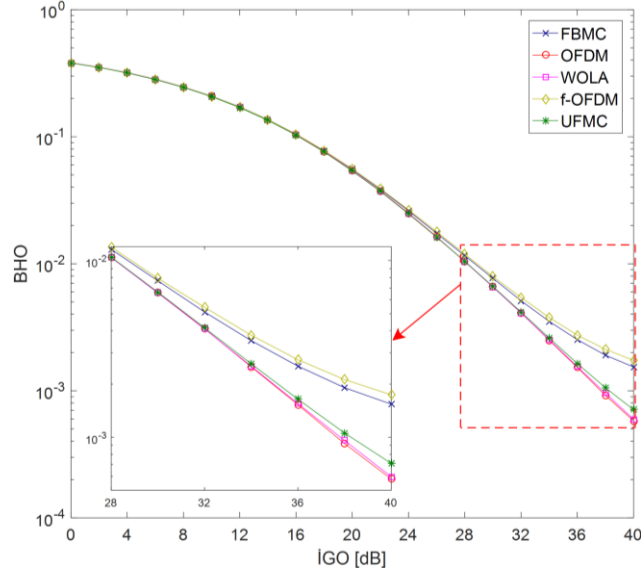
İlk analiz hareketsiz (sabit) verici alıcı birim arasında ve 10 ns gecikme yayılımına sahip kanal şartları için gerçekleştirilmiş olup, elde edilen BHO performansları Şekil 6’da sunulmuştur. Performans eğrileri incelendiğinde iletim tekniklerinin bu kanal şartlarında birbirlerine çok yakın sonuçlar sunduğu görülmektedir.  $10^{-3}$  seviyelerinde bir BHO elde edebilmek için iletişim sistemlerinin yaklaşık olarak 36 dB İGO seviyelerine ihtiyaçlarının olduğu değerlendirilmiştir. Yüksek İGO değerleri için daha yakın bir inceleme gerçekleştirildiğinde ise, OFDM, WOLA ve UFMC iletim tekniklerini kullanan iletişim sistemlerinin diğer teknikleri kullanan sistemlere göre hafif bir oranda daha iyi başarımlar sundukları Şekil 6’dan görülmektedir.



**Şekil 6.** Çok kısa gecikme yayılımına sahip kanal şartlarında elde edilen performans sonuçları

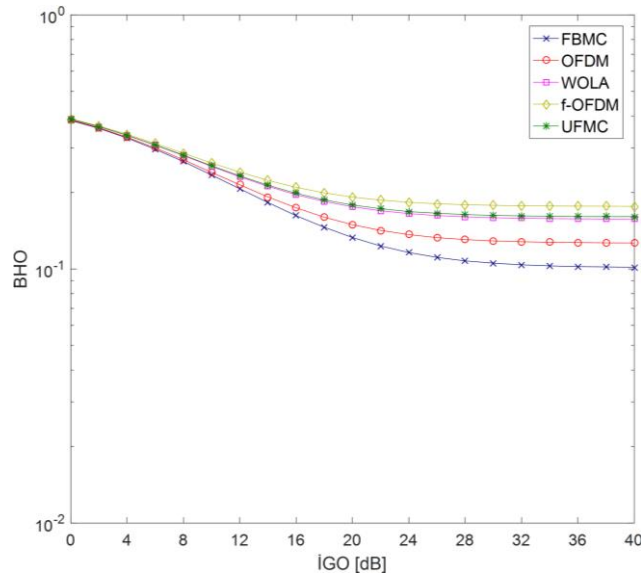
Y. Kabalcı

Aynı iletişim sistemlerinin 100 ns gecikme yayılımına sahip TDL-A kanal şartlarındaki başarımları Şekil 7’de verilmektedir. Bu test değerlendirmesinde de verici ve alıcı birimlerin sabit konumlu oldukları varsayılmıştır. Sunulan grafik değerlendirildiğinde, bu şartlar altında iletişim sistemleri arasındaki performans farkı daha net görülebilmektedir. Özellikle 22 dB İGO seviyesinden itibaren iletişim sistemleri arasındaki performans farklılığı artan İGO ile birlikte artmaktadır. Yüksek İGO değerleri göz önünde bulundurulduğunda; en iyi performansın OFDM ve WOLA iletim tekniklerini kullanan iletişim sistemleri tarafından, ardından ise UFMC iletim tekniğini kullanan iletişim sistemi tarafından sunulduğu görülmektedir.



Şekil 7. Normal gecikme yayılımına sahip kanal şartları için elde edilen sistem performansları

Sabit verici alıcı durumları için gerçekleştirilmiş olan son performans analizi Şekil 8’de verilmektedir. Bu analiz gerçekleştirilirken kanal gecikme yayılım değeri 1000 ns olan, çok uzun gecikme yayılım değerine ayarlanmıştır. Performans sonuçları değerlendirildiğinde artan gecikme yayılım değerinin iletişim sistemleri üzerinde önemli oranda performans düşüşüne sebep olduğu açık olarak görülmektedir. Bu şartlar altında en iyi başarımlar sırasıyla FBMC, OFDM ve WOLA iletim teknikleri ile elde edilmiştir. FBMC iletim tekniğinde kullanılan filtre bankaları yüksek gecikme yayılımı şartları altında ISI ve ICI etkilerine karşı iletişim sistemini daha kararlı hale getirerek yüksek İGO değerlerinde daha iyi performans elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, performansı araştırılan iletim sistemlerinin hata katı değeri  $10^{-1}$  seviyesinin altına inememiştir.

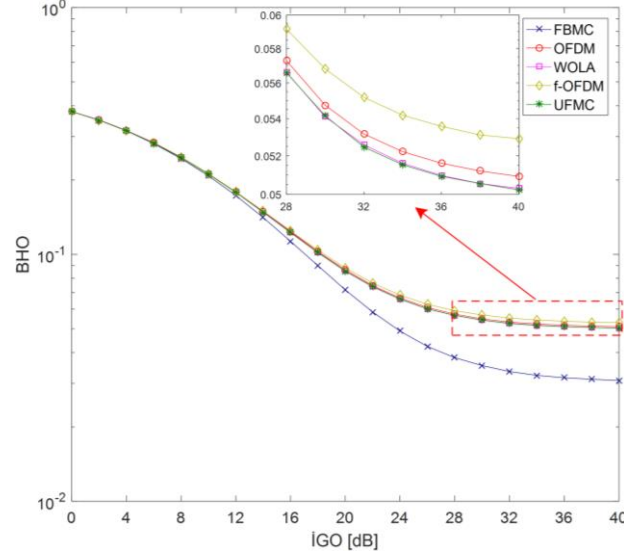


Şekil 8. Çok uzun gecikme yayılımına sahip kanal şartlarında elde edilen performans sonuçları



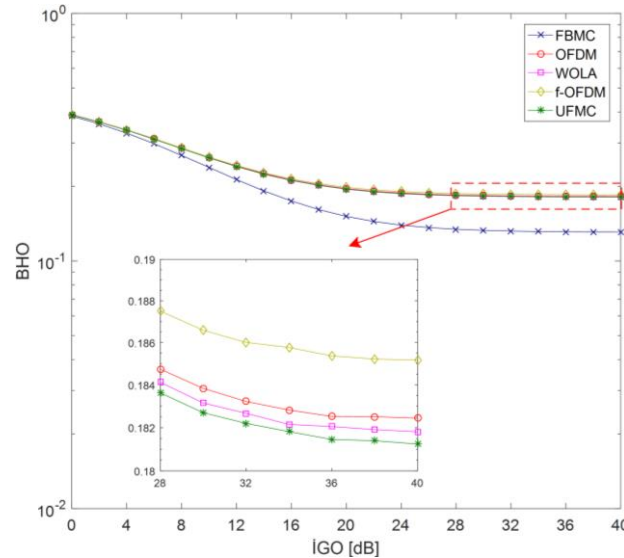
## 5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

Sabit verici alıcı birim durumları için gerçekleştirilen analizlerden sonra alıcı birimin hareket halinde olduğu farklı durumlar da değerlendirilmiştir. Alıcı birimin 50 km/saat hız ile hareket halinde olduğu ve kanalın normal gecikme yayılımına sahip olduğu varsayılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 9'da verilmektedir. Eğrilerden açık şekilde görülebileceği gibi, bu şartlar altında hareketli alıcı birim için en iyi iletim performansı FBMC sistemi ile sağlanmıştır. Diğer iletim tekniklerinin performansları birbirlerine çok yakın görünse de, bu teknikler arasında UFMC ve WOLA diğerlerine göre kısmi olarak daha iyi performans sağlamaktadır. Ancak FBMC iletim tekniğine sahip iletişim sisteminin yüksek İGO değerlerinde önemli oranda performans kazancı sunduğu dikkat çekmektedir. Bu performans değeri her ne kadar yüksek olarak değerlendirilmiş olsa da, genel olarak sistemlerin hata oranı düzeyinin  $10^{-1}$  seviyesinde olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 9. Normal gecikme yayımlı kanal ve 50 km/saat hıza sahip alıcı birim için elde edilen sistem performansları

Aynı kanal gecikme yayılım şartları altında, alıcı birimin hareket hızı 150 km/saat değerine çıkarılarak elde edilen eğriler Şekil 10'da verilmektedir. Alıcı birimin hızındaki artışın beklendiği gibi Doppler gecikmesinde önemli bir artışa sebep olduğu ve performansların oldukça düştüğü görülmektedir. Ancak bu durumda da FBMC iletim tekniğinin diğer iletim tekniklerine göre daha iyi performans sunduğu ve kararlılığını koruduğu dikkat çekmektedir. FBMC iletim tekniğini kullanan iletişim sistemi haricindeki diğer sistemler arasındaki durum ise önceki performans sonuçlarına benzerdir. UFMC, WOLA ve OFDM sistemler yine yakın sonuçlar verirken, tüm senaryolarda en kötü performans f-OFDM ile elde edilmiştir.



Şekil 10. Normal gecikme yayımlı kanal ve 150 km/saat hıza sahip alıcı birim için elde edilen sistem performansları

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 5G iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinden olan OFDM, f-OFDM, WOLA, FBMC ve UFMC sistemlerin performansları araştırılmıştır. Performans analizleri gerçekleştirilirken ETSI tarafından 5G araştırmaları için önerilmiş bir kanal modeli olan TDL-A kanal modeli kullanılmıştır. Bahsedilen iletim tekniklerinin TDL-A kanal modeli üzerindeki performans analizleri ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin kapsamlı ve adil olmasını sağlayabilmek için farklı senaryolar göz önünde bulundurulmuş olup, bu senaryolarda alıcı ve verici birimlerin hem sabit hem de hareketli olduğu durumlar değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yine ETSI tarafından tanımlanan farklı kanal gecikme yayılım değerleri dikkate alınmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları kanal şartlarının aşırı yıkıcı olduğu durumlarda FBMC iletim tekniğinin diğer aday iletim tekniklerinden daha iyi performans sunduğunu ve kararlı olduğunu göstermiştir. FBMC haricindeki sistemler değerlendirildiğinde ise, OFDM, WOLA ve UFMC tekniklerini kullanan iletişim sistemlerinin performanslarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu üç teknik kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, OFDM sistemlerdeki OOB emisyon değerinin yüksek olması bu tekniği diğer teknikler arasında geri plana itmektedir. WOLA tekniğinin OOB emisyonunu düşürerek OFDM kadar iyi performans sunması, sistem karmaşıklığının FBMC ve UFMC sistemlerinden daha düşük olması bu tekniğin enerji verimliliğinin önemli olmadığı aşağı yönlü bağlantılar için iyi bir aday olabileceğini göstermiştir. FBMC ve UFMC sistemler kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, OOB emisyonunu düşürerek iyi performans sunma avantajlarına karşın dezavantajları sistem karmaşıklığının artması olarak değerlendirilmiştir. Bu noktada önemli bir bulgu ise performansı değerlendirilen iletişim sistemlerinde daha düşük BHO elde edebilmek için mutlaka kanal kodlama tekniklerinin kullanılması gerektiğidir. Bu durumun gelecekteki çalışmalar için iyi bir araştırma konusu olacağı değerlendirilmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Y. Kabalci, "5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies", içinde *Smart Grids and Their Communication Systems*, E. Kabalci ve Y. Kabalci, Ed. Singapore: Springer Singapore, 2019, ss. 329-359.
- [2] J. G. Andrews vd., "What Will 5G Be?", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 32, sy 6, ss. 1065-1082, Haz. 2014.
- [3] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, ve K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", içinde 2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring), 2013, ss. 1-5.
- [4] A. Li, Y. Lan, X. Chen, ve H. Jiang, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G", *China Communications*, c. 12, sy Supplement, ss. 28-37, 2015.
- [5] Z. Ding, P. Fan, ve H. V. Poor, "Random Beamforming in Millimeter-Wave NOMA Networks", *IEEE Access*, c. 5, ss. 7667-7681, 2017.
- [6] B. Wang, L. Dai, X. Gao, ve L. Hanzo, "Beamspace MIMO-NOMA for millimeter-wave communications using lens antenna arrays", içinde 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2017, ss. 1-5.
- [7] X. Liu, P. Wang, Z. Lan, ve B. Shao, "Biological characteristic online identification technique over 5G network", *IEEE Wireless Communications*, c. 22, sy 6, ss. 84-90, 2015.
- [8] D. Jiang ve G. Liu, "An overview of 5G requirements", içinde *5G Mobile Communications*, Springer, 2017, ss. 3-26.
- [9] A. Osseiran vd., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project", *IEEE Communications Magazine*, c. 52, sy 5, ss. 26-35, May. 2014.
- [10] P. Cerwall, A. Lundvall, P. Jonsson, ve others, "Ericsson mobility report: On the pulse of the networked society", içinde *Mobile World Congress Edition*, 2015.
- [11] T. O. Olwal, K. Djouani, ve A. M. Kurien, "A Survey of Resource Management Toward 5G Radio Access Networks", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, c. 18, sy 3, ss. 1656-1686, thirdquarter 2016.
- [12] A. de la Fuente, R. P. Leal, ve A. G. Armada, "New technologies and trends for next generation mobile broadcasting services", *IEEE Communications Magazine*, c. 54, sy 11, ss. 217-223, 2016.
- [13] A. Al Amin, D. Basak, T. Khadem, M. D. Hossen, ve M. S. Islam, "Analysis of modulation and coding scheme for 5th generation wireless communication system", içinde 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2016, ss. 1545-1549.
- [14] M. Kim ve D. Y. Kwak, "Generalized OFDM for 5th Generation Mobile Communications", içinde 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2017, ss. 1-5.
- [15] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. ten Brink, ve J.-F. Frigon, "Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE", içinde 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013, ss. 223-228.

## 5G İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN ADAY İLETİM TEKNİKLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIMLARININ ARAŞTIRILMASI

- [16] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, M. M. Molu, ve R. Tafazolli, “Filtered OFDM systems, algorithms, and performance analysis for 5G and beyond”, *IEEE Transactions on Communications*, c. 66, sy 3, ss. 1205–1218, 2017.
- [17] J. Zeng vd., “Investigation on evolving single-carrier NOMA into multi-carrier NOMA in 5G”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 48268–48288, 2018.
- [18] 3GPP Radio Access Network Working Group ve others, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15)”, 3GPP TR 38.901, 3GPP TR 38.901 version 15.0.0 Release 15, 2018.
- [19] R. W. Chang, “Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission”, *Bell System Technical Journal*, c. 45, sy 10, ss. 1775–1796, 1966.
- [20] R. Chang ve R. Gibby, “A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme”, *IEEE transactions on Communication Technology*, c. 16, sy 4, ss. 529–540, 1968.
- [21] R. W. Chang, “Orthogonal frequency multiplex data transmission system”, U.S. Patent No. 3,488,445., Oca-1970.
- [22] S. Weinstein ve P. Ebert, “Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform”, *IEEE transactions on Communication Technology*, c. 19, sy 5, ss. 628–634, 1971.
- [23] A. Peled ve A. Ruiz, “Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms”, içinde ICASSP’80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980, c. 5, ss. 964–967.
- [24] C. Balint ve G. Budura, “OFDM-Based Multi-Carrier Waveforms Performances in 5G”, içinde 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), 2018, ss. 1–4.
- [25] X. Zhang, M. Jia, L. Chen, J. Ma, ve J. Qiu, “Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks”, içinde 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015, ss. 1–6.
- [26] J. Abdoli, M. Jia, ve J. Ma, “Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems”, içinde 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2015, ss. 66–70.
- [27] A. D. Dominguez-Garcia, C. N. Hadjicostis, ve N. H. Vaidya, “Resilient networked control of distributed energy resources”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, c. 30, sy 6, ss. 1137–1148, 2012.
- [28] M. B. Mabrouk, M. Chafii, Y. Louet, ve F. Bader, “A precoding-based PAPR reduction technique for UF-OFDM and filtered-OFDM modulations in 5G systems”, içinde European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference, 2017, ss. 1–6.
- [29] W. Yang vd., “Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective”, *IEEE Wireless Communications*, c. 24, sy 3, ss. 138-145, 2017.
- [30] D. Wu vd., “A field trial of f-OFDM toward 5G”, içinde 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016, ss. 1-6.

