

3GPP 5G Numeroloji Gruplamalarının Çok Boyutlu Performans Analizi

Multidimensional Performance Analysis of 3GPP 5G Numerology Groupings

Yusuf İslam Demir¹, Ahmet Yazar², Hüseyin Arslan¹

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Medipol Üniversitesi, İstanbul, 34810, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 26040, Türkiye

yusuf.demir@medipol.edu.tr, ahmtzyr@gmail.com, arslan.usf@gmail.com

Özetçe—5. Nesil (5G) kablosuz iletişim sistemleriyle kullanılmaya başlanan çoklu numeroloji yapıları, uygulama çeşitliliğine cevap verebilme açısından önemli bir esneklik kabiliyeti getirmiştir. Bununla beraber çoklu numeroloji yapılarının kullanımı yeni bir durum olan numerolojiler arası girişim (INI) problemini ortaya çıkarmıştır. Literatürde INI konusu farklı kaynaklarda analiz edilmiş ve çoklu numeroloji yapılarına yönelik farklı tasarımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada ise 3GPP 5G numeroloji yapılarının gruplamalarına yönelik çok boyutlu bir performans analizi gerçekleştirilerek çoklu numeroloji yapılarının kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar ortaya konmuştur. Farklı spektrum frekans aralıkları için analizler sunularak spektral verimlilik değişimine göre sinyal-girişim oranının (SIR) numeroloji gruplamaları için nasıl değiştiği gösterilmiştir. Uygun numeroloji gruplaması seçimlerinin performans üzerinde olan etkisi verilerek, literatürdeki kullanıcı-numeroloji ilişkilendirmesi çalışmalarının zayıf yönlerine değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler—3GPP, 5G, 6G, çoklu numeroloji, dalga şekli, numerolojiler arası girişim, performans analizi.

Abstract—The utilization of multiple numerology structures introduced with the advent of 5th Generation (5G) wireless communications systems has brought a significant flexibility to meet the application diversity. However, the use of multiple numerology structures has given rise to a new problem known as inter-numerology interference (INI). The literature has examined the INI subject in various sources, leading to the development of different designs tailored to multiple numerology structures. In this study, a multidimensional performance analysis is conducted on the groupings of 3GPP 5G numerology structures. Important considerations during the utilization of multiple numerology structures are highlighted. Analyses are presented for different spectrum frequency ranges, illustrating how the signal-to-interference ratio (SIR) for numerology groupings can vary based on changes in spectral efficiency. The impact of appropriate numerology grouping selections on performance is discussed, addressing weaknesses in the user-numerology association studies found in the literature.

Keywords—3GPP, 5G, 6G, multi-numerology, waveform, inter-numerology interference, performance analysis.

I. GİRİŞ

5. Nesil (5G) sistemlerinin gelişim sürecinde farklı esneklik kabiliyetleri ile uygulama ve kullanıcı ihtiyaçlarının daha iyi karşılanabilmesine yönelik teknikler geliştirilmiştir [1]. Bu teknikler arasında en öne çıkanlardan birisi de dikgen frekans bölmeli çoklama (OFDM) dalga formu için kullanılan çoklu numeroloji yapılarıdır [3]. Farklı ihtiyaçlara yönelik farklı numerolojilerin kullanılmasıyla 5G esnek şekilde kullanıcılara daha yüksek performans ile hizmet verebilmektedir [4].

Her ne kadar çoklu numeroloji yapıları önemli bir esneklik kabiliyeti getirmiş olsa da, bu yeni durumda numerolojiler arası girişim (INI) olarak bilinen yeni bir girişim çeşidi ortaya çıkmıştır [5]. Literatürde çoklu numeroloji yapılarına yönelik yapılan çalışmaların birçoğu INI kaynaklı problemlerin giderilmesi üzerine olmakla birlikte, kullanıcılara en uygun numerolojilerin atanmasına yönelik de INI tabanlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [6]–[15].

Literatürdeki kullanıcı-numeroloji ilişkilendirmesi çalışmalarına bakıldığında, tercih edilecek numerolojiler arasındaki uyuma bakılmadığı, diğer bir deyişle numeroloji gruplandırılmasının performans analizinin ön plana çıkmadığı görülmektedir. Oysa ki, aynı çerçeve yapısı altında daha uyumlu çalışacak numerolojilerin kullanılması INI açısından önemli farklılıklar oluşturabilmektedir. Bu noktada, numeroloji gruplamalarının çok boyutlu performans analizinin yapılması önem kazanmaktadır. Ne tür numerolojilerin aynı çerçeve yapısında mümkünse birlikte kullanılmaması gerektiği bilgisi ortaya çıkarılmalıdır.

Tablo I üzerinde 3GPP standartları Sürüm 18 kapsamındaki numerolojilerin alt taşıyıcı boşluğu değerleri sunulmaktadır [3]. Bu tablodan görülebileceği üzere toplamda yedi farklı alt taşıyıcı boşluğu değeri numerolojilerde kullanılmaktadır. Bununla beraber, her alt taşıyıcı boşluğu her frekans aralığı (FR) için uygulanabilir değildir. 3GPP standartlarında 6 GHz altı frekans bantları için FR1, milimetre dalga frekans bantları için ise FR2-1 ve FR2-2 kısaltmaları kullanılmaktadır [16]. Frekans yükseldikçe daha geniş alt taşıyıcı boşlukları daha geniş bant genişlikleri ile birlikte tercih edilir olmaktadır. Tablo II üzerinde ise, 3GPP 5G numeroloji yapıları kullanılarak oluşturulabilecek çeşitli numeroloji gruplamaları sunulmaktadır. Bu tabloda çoklu numeroloji kullanılmayan durumlar tek bir grup

TABLO I: 3GPP standartları Sürüm 18 kapsamındaki numerolojilerin alt taşıyıcı boşluğu değerleri.

Frekans Aralığı (FR)	FR Kısaltması	Alt Taşıyıcı Boşluğu (kHz)	Veri İletimi	Senkronizasyon
410 MHz - 7125 MHz	FR1	15	Evet	Evet
		30	Evet	Evet
		60	Evet	Hayır
24250 MHz - 52600 MHz	FR2-1	60	Evet	Hayır
		120	Evet	Evet
52600 MHz - 71000 MHz	FR2-2	120	Evet	Evet
		240	Hayır	Evet
		480	Evet	Evet
		960	Evet	Evet

TABLO II: 5G için oluşturulabilecek numeroloji gruplamaları.

Frekans Aralığı (FR)	Grup No	Numeroloji Gruplaması
Tüm aralıklarda	1	Tek numeroloji kullanımı
FR1	2	15 kHz – 30 kHz
	3	30 kHz – 60 kHz
	4	15 kHz – 60 kHz
	5	15 kHz – 30 kHz – 60 kHz
FR2-1	6	60 kHz – 120 kHz
FR2-2	7	480 kHz – 960 kHz
	8	120 kHz – 480 kHz
	9	120 kHz – 480 kHz – 960 kHz
	10	120 kHz – 960 kHz

altında gösterilmiştir. Diğer gruplarda ise aynı çerçeve yapısı altında birlikte kullanılabilir olan ikili ya da üçlü numeroloji gruplandırmaları bulunmaktadır.

Bu çalışmada literatüre katkı olarak, 3GPP 5G numeroloji yapılarının Tablo II üzerinde verilen gruplamalarına yönelik çok boyutlu bir performans analizi gerçekleştirilerek çoklu numeroloji yapılarının kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar ortaya konmuştur. FR1, FR2-1 ve FR2-2 olmak üzere farklı spektrum frekans aralıkları için analizler sunulularak spektral verimlilik değişimine göre sinyal-girişim oranının (SIR) numeroloji gruplamaları için nasıl değiştiği gösterilmiştir. Uygun numeroloji gruplaması seçiminin performans üzerinde olan etkisi verilerek, literatürde yer alan farklı kullanıcı-numeroloji ilişkilendirmesi çalışmalarının zayıf yönlerine değinilmiştir. Bu yapılan performans analizi ile literatüre kullanıcı-numeroloji ilişkilendirmesi açısından yeni bir bakış açısı kazandırılmaya çalışılmıştır.

Bildirinin kalan kısımlarında incelenen konular şu şekildedir: 2. Bölüm kapsamında, gerçekleştirilen performans analizlerinde temel alınan INI modeline ait denklemler verilmiştir. Çok boyutlu performans analizleri 3. Bölüm içerisinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar 4. Bölüm kapsamında açıklanmıştır. Son olarak 5. Bölüm ile çıkarımlar verilerek gelecek çalışmalar tartışılmıştır.

II. NUMEROLOJİLER ARASI GİRİŞİM (INI)

Literatürde INI analizi için geliştirilmiş çeşitli teorik modeller bulunmaktadır. Bu çalışmada INI modeli olarak [17] çalışmasından yararlanılmıştır. Frekans uzayında ardışık olarak yer alan iki farklı numeroloji kullanan alt bloklardan daha dar alt taşıyıcı boşluğu olan numeroloji için oluşan INI miktarı Denklem 1 ile verilmiştir. Bu denklem ile hesaplanan INI miktarı, diğer numerolojiyi (geniş alt taşıyıcı boşluklu) kullanan alt bloğun sebep olduğu girişimdir. Tam tersi şekilde, geniş alt taşıyıcı boşluklu numerolojiye sahip alt blok üzerinde oluşan INI miktarı da Denklem 2 ile verilmiştir.

$$P_u^{(1)}(k) \approx \frac{|\rho^{(2)} H^{(2)}(u)|^2}{N^{(2)} N^{(1)}} \left[\left| \frac{\sin\left[\frac{\pi}{N^{(1)}} \Delta k^{(1)} \alpha N_T^{(2)}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N^{(1)}} \Delta k^{(1)}\right]} \right|^2 + (\alpha - 1) \left| \frac{\sin\left[\frac{\pi}{N^{(1)}} \Delta k^{(1)} N_T^{(2)}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N^{(1)}} \Delta k^{(1)}\right]} \right|^2 \right] \quad (1)$$

$$P_u^{(2)}(k) \approx \frac{|\rho^{(1)} H^{(1)}(u)|^2}{N^{(2)} N^{(1)}} \left| \frac{\sin\left[\frac{\pi}{N^{(1)}} \Delta k^{(2)} N^{(2)}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N^{(1)}} \Delta k^{(2)}\right]} \right|^2 \quad (2)$$

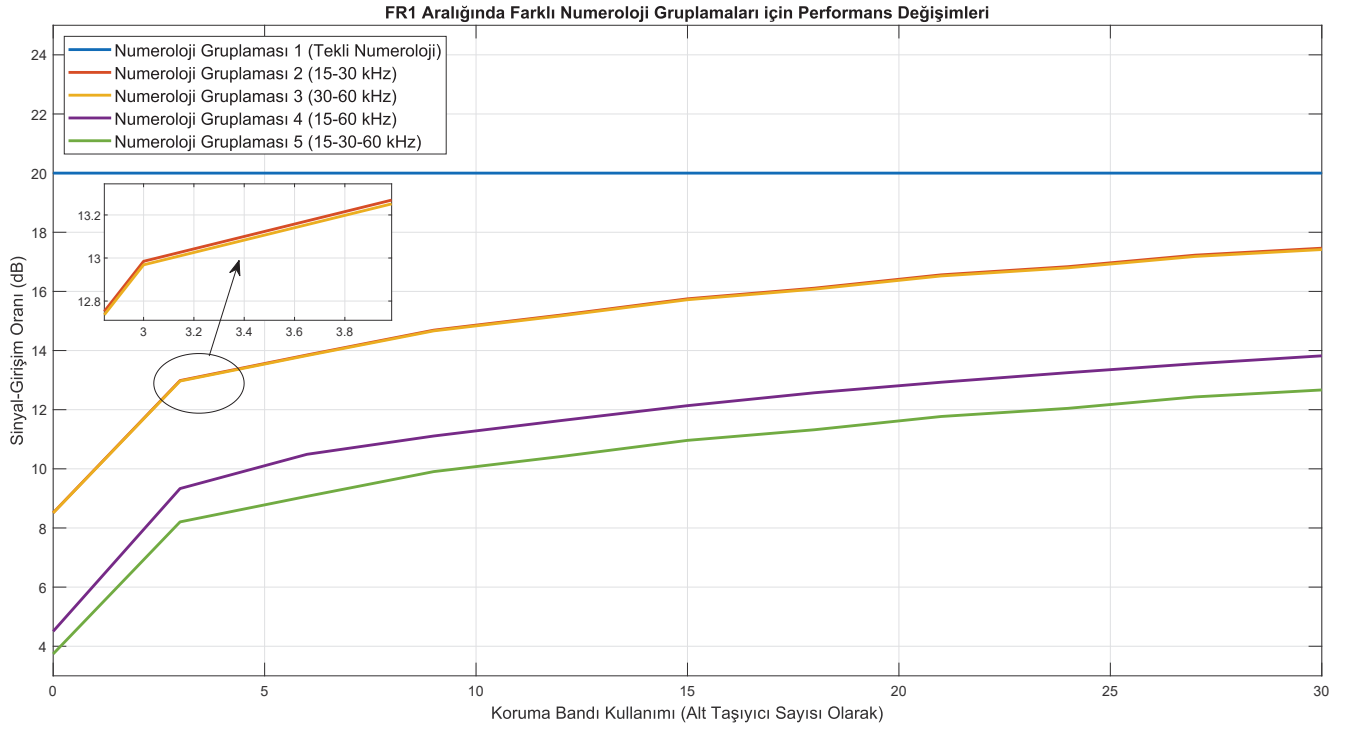
Verilen denklemlerde, i numaralı numeroloji için k alt taşıyıcısında diğer alt bloktaki u alt taşıyıcısından kaynaklı oluşan INI miktarının gücü $P_u^{(i)}(k)$ ile gösterilmektedir. $\rho^{(i)}$ ise, i numaralı numeroloji kullanan alt blok için güç ayarlama etkenidir. Kanal frekans tepkisi $H^{(i)}(u)$, i numaralı numeroloji kullanan alt blok u alt taşıyıcısı üzerinde oluşmaktadır. $N^{(i)}$ ayrık Fourier dönüşümü uzunluğu ve $N_T^{(i)}$ OFDM sembol uzunluğudur. $\Delta k^{(i)}$ iki alt blok arasındaki etkileşimde olan alt taşıyıcılar arasındaki spektral uzaklık olarak tanımlanmıştır. Son olarak α , örtüşen dikdörtgen pencere sayısını vermektedir.

Farklı numerolojilere ait alt taşıyıcıların arasındaki spektral uzaklığı arttırmak INI etkilerini azaltmaktadır. Bu kapsamda koruma bantlarının numerolojiler arasına yerleştirilmesi INI etkileri açısından fayda getirmekte fakat spektral verimliliğin düşmesine sebep olmaktadır. Bir sonraki bölümde INI ve spektral verimlilik boyutları arasındaki ödünleşim durumlarına bağlı olarak çok boyutlu performans analizleri sunulmuştur. Yapılan performans analizlerinde Denklem 1 ve Denklem 2 ile verilen INI modelinden yararlanılmıştır.

III. PERFORMANS ANALİZLERİ

Tablo I üzerinde gösterildiği üzere, 3GPP standartlarının en güncel sürümlerinde FR1 için 15 kHz, 30 kHz ve 60 kHz alt taşıyıcı boşluğuna sahip numerolojiler yer almaktadır. FR2-1 frekansları için ise 60 kHz ve 120 kHz alt taşıyıcı boşluklu numerolojiler karşımıza çıkmaktadır. 5G standartlarının ilk sürümlerinde yer almayıp sonradan standartlara dahil edilen FR2-2 frekanslarına (52 GHz üzeri) yönelik de 120 kHz, 240 kHz, 480 kHz ve 960 kHz alt taşıyıcı boşluklu numerolojiler tanımlanmıştır. 5G'nin sonraki sürümlerinde ya da 6. Nesil (6G) haberleşmesi ile spektrumun daha yüksek frekanslı bölgeleri kullanılmaya başlandıkça, 960 kHz'den daha geniş alt taşıyıcı boşluklu numerolojiler söz konusu olabilecektir.

Bu çalışmada yer alan numeroloji gruplamaları FR1, FR2-1 ve FR2-2 frekans bölgeleri için Tablo II üzerinde gösterildiği



Şekil 1: FR1 aralığında farklı numeroloji gruplamaları için performans değişimleri.

gibi ayrı ayrı oluşturulmuştur. Numeroloji sayısından daha fazla sayıda gruplama olduğu, dolayısıyla aslında numerolojilerin sayısı haricinde gruplama sayısının da önemli olduğu görülmektedir. Grup No 1 olarak verilen tek numeroloji kullanımı durumunda, tüm numerolojiler gerektiğinde tek başına tercih edilebilmektedir. Diğer grupların sıralamasında ise, aynı frekans aralığı altında daha az INI oluşan durumlar önce yazılmıştır. Örneğin FR1 bölgesi için çoklu numerolojide en düşük INI miktarı aynı çerçeve yapısı altında 15 kHz ve 30 kHz numerolojilerinin kullanılmasıyla oluşmaktadır. En yüksek INI miktarı ise aynı frekans bölgesi için 15 kHz, 30 kHz ve 60 kHz numerolojilerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşmaktadır.

Hangi numeroloji gruplamasında ne kadar INI oluştuğu ve buna bağlı elde edilen SIR değerleri FR1 ve FR2-2 frekans bölgeleri için sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2 üzerinde gösterilmektedir. Bu şekillerde, yatay eksenle koruma bandı kullanımı giderek artırılarak dikey eksenle verilen SIR haricinde spektral verimlilik boyutu da çoklu performans analizi kapsamında dikkate alınmıştır. Farklı numerolojiler arasında bırakılacak boş alt taşıyıcılar koruma bandı olarak INI miktarını düşürebilmekte, fakat spektral verimlilik koruma bandı arttıkça azalmaktadır. Dolayısıyla güvenilirlik (düşük hata oranı) ve spektral verimlilik arasında bir ödünleşim durumu oluşmaktadır.

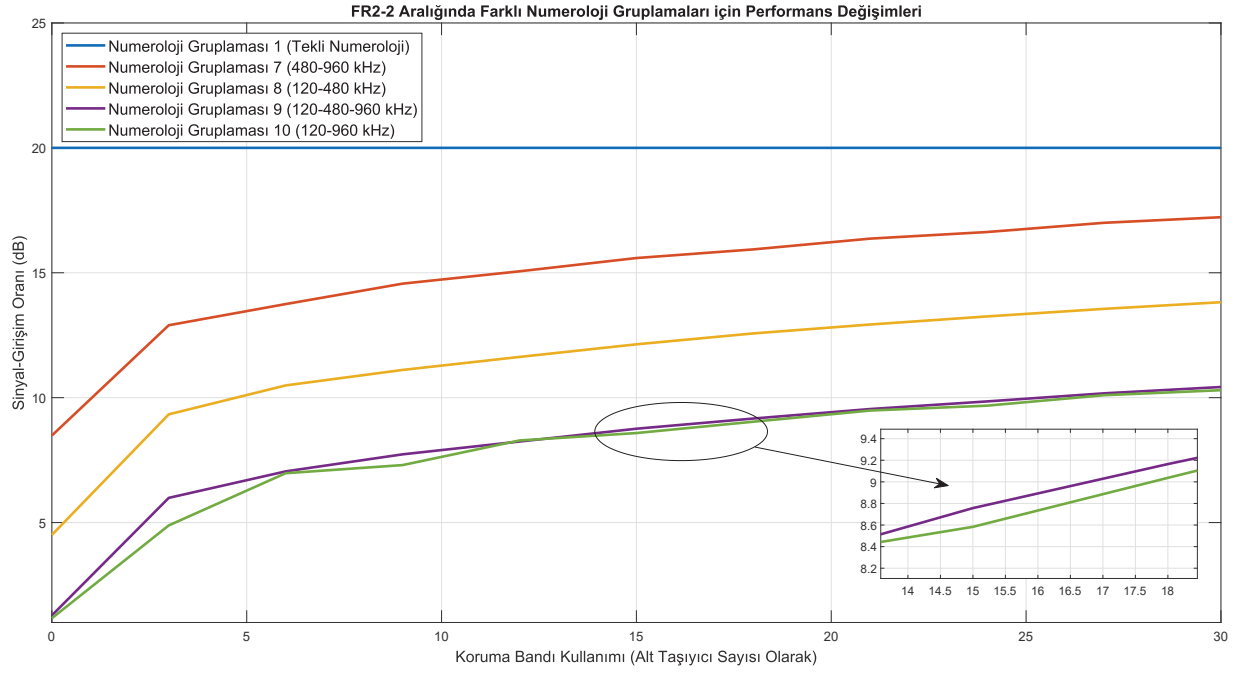
IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Üç numeroloji kullanılabilecek bir frekans aralığında kullanıcı ve uygulamaların farklı ihtiyaçlarına yönelik farklı numeroloji tercihlerinin olduğu bir senaryo temel alınarak ve kullanıcı-numeroloji ilişkilendirmesinin literatürdeki herhangi bir yöntemle yapıldığı varsayımıyla basit bir test yapılmıştır. 100 kullanıcının olduğu bu test 10.000 kez farklı kanal etkileri ve farklı numeroloji seçimleri altında tekrarlanmıştır. INI

tabanlı girişime bağlı olarak SIR değerinin tüm kullanıcılar ve tüm testler için ortalaması FR1 bölgesi için 9.01 dB ve FR2-2 bölgesi için 7.05 dB olarak hesaplanmıştır.

Bu verilen test düzeneğine basit bir algoritma ilave edilerek, birbirine karşı spektral uzaklığı yüksek olan numerolojilerin tercih edildiği durumlarda, çoğunluğun tercih ettiği numerolojiler dikkate alınarak en az tercih edilen en dar ya da en geniş alt taşıyıcı boşluklu numeroloji yerine ortalarındaki numerolojiye geçiş yaptırılmıştır. Örneğin, FR1 bölgesi için üç numeroloji de tercih edilmiş olsun, fakat 15 kHz numerolojisi az tercih edildiyse, bu tercih yerine 30 kHz kullanılmış, dolayısıyla 30 kHz - 60 kHz gruplamasına geçilmiştir. Hem numeroloji çeşitliliği muhafaza edilmiş, hem de INI miktarı önemli ölçüde azaltılmıştır. Şöyle ki, ortalama SIR değerleri yeni algoritma kullanıldığında FR1 bölgesi için 13.84 dB ve FR2-2 bölgesi için 12.05 dB olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla ortalama 5 dB kadar bir kazanç sağlanabilmektedir.

Performans analizleri ve alınan sonuçlara bakıldığında, numeroloji gruplamalarının oluşturulmasında bazı gruplamalarının yüksek INI seviyesi açısından özel olarak problemli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, literatürde farklı örnekleri bulunan kullanıcı-numeroloji ilişkilendirmesi çalışmalarından ziyade kullanıcı ve numeroloji gruplaması çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Zorunlu olmadıkça tüm numerolojileri aynı çerçeve yapısında bir arada kullanmamak ya da birbirine spektral uzaklığı fazla olan numerolojileri yine bir arada kullanmamak gerekmektedir. Her ne kadar koruma bandı miktarı arttıkça bahsedilen kısıt esneyebilse de, spektral verimlilik düşüşünden dolayı sadece koruma bandına bağlı kalınmamalıdır. Birden fazla performans ölçütü boyutunu bir arada ele alacak şekilde bir planlama yönetimi gerekliliği bulunmaktadır.



Şekil 2: FR2-2 aralığında farklı numeroloji gruplamaları için performans değişimleri.

V. ÇIKARIMLAR

Performans analizlerine bakıldığında, 5G standartlarında yer alan farklı numerolojilerin kullanıcılar ile ilişkilendirilmesi sırasında, numerolojilerin tek başlarına değerlendirilmesinden ziyade bütüncül olarak numeroloji gruplamalarına bakılması gerektiğinin önemi anlaşılmaktadır. Bu bütüncül bakış sırasında çok boyutlu olacak şekilde farklı performans ölçütleri açısından bir inceleme yapmak gerekmektedir. INI kaynaklı problemlerin olumsuz etkilerini, kullanılacak numeroloji gruplamalarını kontrol ederek daha aza indirmek mümkündür.

6G sistemlerinin standartlaştırma sürecinde 5G'ye kıyasla daha fazla numeroloji yapısı kullanılarak esneklik kabiliyetinin daha da artırılacağı öngörülmektedir. Sadece OFDM dalga formu için değil, farklı dalga formu teknikleri için de numeroloji gibi farklı parametrelerin aynı çerçeveye yapısı içerisinde uygulanabilmesi mümkün olabilecektir. Esneklik kabiliyetinin bu şekilde artması ile birlikte yeni oluşacak girişim problemlerinin etkilerine yönelik çok boyutlu performans analizlerinin bütüncül olarak yapılması daha önemli hale gelecektir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma 122E400 no'lu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Yazar, S. Dogan-Tusha, H. Arslan, "6G Vision: An Ultra-Flexible Perspective," *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, 1(1), 121–140, 2020.
- [2] A. Yazar, "Requirement Analysis and Clustering Study for Possible Service Types in 6G Communications," *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1–4, 2021.
- [3] 3GPP, "NR; Physical Channels and Modulation," TS 38.211 18.1.0, 2024.

- [4] A. Yazar, H. Arslan, "A Flexibility Metric and Optimization Methods for Mixed Numerologies in 5G and Beyond," *IEEE Access*, 6(1), 3755–3764, 2018.
- [5] A. Yazar, H. Arslan, "Flexible Multi-Numerology Systems for 5G New Radio," *Journal of Mobile Multimedia*, 14(4), 367–394, 2018.
- [6] A. Yazar, H. Arslan, "Reliability enhancement in multi-numerology-based 5G new radio using INI-aware scheduling," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 110, 1–14, 2019.
- [7] S. Lagen, vd., "Subband Configuration Optimization for Multiplexing of Numerologies in 5G TDD New Radio," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018.
- [8] T. Soni, A. R. Ali, K. Ganesan, M. Schellmann, "Adaptive Numerology - A solution to Address the Demanding QoS in 5G-V2X," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1–6, 2018.
- [9] L. Marijanovic, S. Schwarz, M. Rupp, "Multiplexing Services in 5G and Beyond: Optimal Resource Allocation Based on Mixed Numerology and Mini-Slots," *IEEE Access* 8(1), 209537–209555, 2020.
- [10] N. Correia, vd., "Optimization of Mixed Numerology Profiles for 5G Wireless Communication Scenarios," *Sensors*, 21(4), 1494, 1–22, 2021.
- [11] A. Yazar, H. Arslan, "Selection of Waveform Parameters Using Machine Learning for 5G and Beyond," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1–6, 2019.
- [12] A. Yazar, H. Arslan, "A Waveform Parameter Assignment Framework for 6G with the Role of Machine Learning," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 1(1), 156–172, 2020.
- [13] X. Liu, J. Zhang, J. Wei, "Numerology Selection for OFDM Systems Based on Deep Neural Networks," *arXiv:2011.04247*, 2020.
- [14] H. Sazak, A. Yazar, "Ambient Aware User-Numerology Association for 5G and Beyond," *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Türkiye, 1–4, 2023.
- [15] H. Sazak, A. Yazar, "Environment-Aware Intelligent Numerology Control Approach for 5G and Beyond Systems," *International Journal of Communication Systems*, 2024.
- [16] 3GPP, "NR; Base Station (BS) radio transmission and reception," TS 38.104 18.4.0, 2024.
- [17] X. Zhang, vd., "Mixed Numerologies Interference Analysis and Inter-Numerology Interference Cancellation for Windowed OFDM Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8), 7047–7061, 2018.