

5G Sonrası için Farklı Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Dalga Şekli Tasarım Öncelikleri

Waveform Design Priorities in Different Wireless Communications Systems for 5G Beyond

Ahmet YAZAR¹, Hüseyin ARSLAN^{1,2}

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

²Department of Electrical Engineering, University of South Florida, Tampa, FL, USA

{ayazar,huseyinarslan}@medipol.edu.tr, arslan@usf.edu

Özetçe —5G ve sonrası hücresele ağların geliştirilmesi sürecinde birçok farklı kablosuz haberleşme sistemini kapsayacak şekilde çok büyük bir çatı sisteme ulaşılacağı öngörülmektedir. Bu çatı altında, farklı gereksinim ihtiyaçlarına göre sınıflandırılacak farklı haberleşme sistemleri genel ama esnek bir sisteme yakınsama karakteristiği gösterme eğilimindedirler. Bu çalışmada, 5G ve sonrası çatı sistemi altında yer alabilecek hava aracı haberleşmesi, milimetrik dalga haberleşmesi, bilişsel radyo, makineler arası iletişim, cihazdan cihaza iletişim ve araçtan araca iletişim gibi farklı alt sistemler için dalga şekli tasarım parametrelerinin öncelikleri incelenmiştir. Ayrıca, 5G sonrasıdaki çatı sistemlerde, tüm alt sistemlerin esnek olarak bir arada çalıştığı, kullanıcıların uyarlanabilir şekilde hizmet aldığı hibrit yapıların kullanılacağı düşünülerek, bu yöndeki güncel dalga şekli tasarımlarına dair değerlendirmeler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler—5G ötesi, dalga şekli tasarımı, esnek dalga şekilleri, hibrit çözümler.

Abstract—It is thought that a huge inclusive system will be achieved which includes many different wireless communications systems while 5G and beyond networks are being developed. These communications systems which can be classified according to different system requirements show a characteristic converging to a generic but flexible structure. In this study, waveform design priorities of various wireless communications systems are analyzed which include aeronautical communications, millimeter wave communications, cognitive radio, machine-to-machine communications, device-to-device communications, and vehicle-to-vehicle communications under the inclusive structures of 5G and beyond. Besides, some considerations are presented about the current waveform designs which allow flexible operations and have hybrid structures with adaptive properties for the inclusive structures of 5G beyond.

Keywords—5G beyond, waveform design, flexible waveforms, hybrid solutions.

I. GİRİŞ

Uzun Süreli Gelişim (LTE) öncesi hücresele haberleşme sistemlerinin aksine, 5G ve sonrasına çatı bir haberleşme sistemi olarak bakılabileceği düşünülmektedir. LTE ağlarının kullanılmasıyla başlayan süreçte bu çatı sistem oluşturulmaya başlanmıştır ve 5G'nin tamamlanması sürecinde birçok farklı

haberleşme sistemini kapsayacak şekilde çok büyük bir çatı sisteme ulaşılacağı öngörülmektedir. Böylece, hücresele haberleşme 5G ve sonrası ile beraber tek bir sistemden ziyade diğer haberleşme sistemlerini de içinde barındıran büyük bir yapıya dönüşmektedir. 5G sistemlerinin aynı zamanda heterojen ağlar olarak gösterilmesinin temelinde de çatı sistemin farklı haberleşme sistemleri, kanalları ve uygulamaları için aynı anda hizmet verebilmesi yatmaktadır. Geçmişte, bu sistemler genelde birbirinden neredeyse tamamen ayrı gibi düşünülmüştür. Günümüzde ise, farklı haberleşme sistemleri Nesnelerin İnterneti (IoT) şemsiyesinin de etkisiyle genel ama esnek bir sisteme yakınsama karakteristiği gösterme eğilimindedir.

Her bir uygulama yeni bir gereksinimler kümesi, her bir gereksinimler kümesi de yeni bir sistem anlamına gelmektedir. Bu sistemlerin ise ayrı hedefleri ve ayrı beklenen çıktıları olabilmektedir. Farklı sistem gereksinimlerinin temel alındığı farklı haberleşme sistemleri için, farklı yaklaşımlarla ve farklı sistem seviyelerinde çözümler geliştirilebilmektedir. Sistem gereksinimlerinin tüm haberleşme sisteminin farklı katmanları tarafından iş birliği içerisinde karşılanabileceği düşünüldüğünde, aynı sistemin farklı haberleşme katmanlarında çözüm üretmeye çalışmak dolaylı olarak ya da doğrudan diğer bir katmanda değişiklikler yapmayı gerektirebilmektedir. Haberleşme katmanlarının birinde geliştirilen çözüm ile sistem gereksinimlerinin hangi oranda karşılanıp karşılanmadığı, bu gereksinimlerin karşılanması sırasında başka bir gereksinimin karşılanması konusunda bir olumsuzluğa sebebiyet verilip verilmediği gibi durumların bir bütün içerisinde incelenmesi gerekmektedir. Aynı katman içerisindeki farklı yapıların tasarımları da birbirleriyle etkileşim içindedir ve bu yapılar birbirlerini etkilemektedir. Ayrıca, farklı sistem senaryoları için haberleşme kanalı etkilerinin değişen olumsuz sonuçları ile başa çıkabilme yöntemleri de farklılık gösterebilmektedir. Uygulamaya özel durumlar ve istenilen sistem gereksinimleri, kanal yapısını ve etkilerini değiştirebilmektedir. Bununla beraber, farklı katmanlarda geliştirilen çözüm yöntemleri ile kanal yapısı karşılıklı olarak birbirlerine etki edebilmektedir.

Haberleşme sisteminde yer alan çeşitli kaynakların nasıl kullanılması gerektiğine karar verildiği dalga şekli tasarımı, haberleşme sistemlerinin tasarlanmasındaki en önemli aşamalardan birisidir. Yeni nesil haberleşme sistemleri geliştirildikçe, kaynakların daha verimli tahsisini sağlayabilmek ve berabe-

rinde kablosuz haberleşme kanalının değişen olumsuz etkileri ile başa çıkabilmek için farklı dalga şekli tasarımlarından yararlanılmaktadır. Ayrıca, farklı gereksinimlere ihtiyaç duyan haberleşme sistemleri için tasarlanan dalga şekillerinin tasarım parametrelerine verilen öncelikler değiştiğinden dolayı tüm haberleşme sistemlerinde ve kanallarında kullanılabilecek ortak tek bir dalga şeklinin geliştirilmesi oldukça zor gözükmektedir.

Haberleşme sistemlerine ait hedeflerin gerçekleşip gerçekleşmediğini ölçmeye yarayan çeşitli araçlar olarak tanımlanabilecek dalga şekli tasarım parametreleri aynı zamanda dalga şekli yöntemlerinin başarımlarını ölçütlerini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, sistem gereksinimlerinin daha çok fiziksel katman seviyesinde ve çerçeve tasarımıyla karşılanmaya çalışıldığı varsayımı ile yola çıkılarak, gereksinimler kümesinin tasarım parametreleri kümesine genel olarak haberleşme kanalı üzerinden yansıtılmaya çalışılmasıyla farklı sistemler için çeşitli tasarım parametrelerinin önceliklendirilmeleri üzerinde durulmuştur. Örnek olarak hava aracı haberleşmesi, milimetrik dalga haberleşmesi, bilişsel radyo (CR) haberleşmesi, makineler arası (M2M) iletişim, cihazdan cihaza (D2D) iletişim ve araçtan araca (V2V) iletişim sistemleri için dalga şekli tasarım parametrelerinin öncelikleri, söz konusu parametrelerin kablosuz haberleşme kanalı ile olan ilişkileri göz önüne alınarak incelenmiştir. Bu sayede, ilgili sistemlerin her biri için geliştirilecek olan dalga şekillerinin tasarım aşamalarındaki farklar temel olarak görülebilecektir ve dalga şekli yapılarının geliştirilmesi tasarımcı için bir ölçüde kolaylaşmış olacaktır.

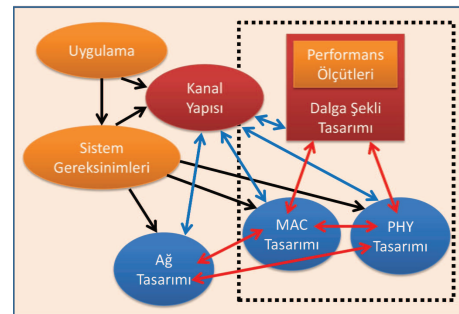
Mevcut dalga şekli yöntemleri incelendiğinde, bu tasarımların çeşitli tasarım parametreleri açısından birbirlerine karşı çeşitli güçlü ve güçsüz yanlarının olduğu görülmektedir. Farklı haberleşme sistemleri ve kanalları için öne çıkan farklı dalga şekli teknikleri bulunmaktadır. Fakat, çatı bir sistem olan 5G ağları düşünüldüğünde açık ve net üstünlüğü olan, başarımlar ölçütlerinin geneli açısından en iyi sayılabilecek bir dalga şekli tasarımı henüz geliştirilememiştir [1]. Bu dalga şekli tekniklerinin her birinin çeşitli olumlu ve olumsuz yanları bulunmaktadır. Tasarım parametrelerinin birinin iyileştirilmesi sırasında diğer bir parametreden ödün verilmesi gerekebilmektedir. Bu ödünleşim sırasında optimizasyon çalışmaları yapılarak en uygun tasarıma ulaşılmaya çalışılmaktadır. 5G çatı sistemi altındaki her bir haberleşme sisteminin ve kanalının en optimum şekilde çalışması ise şu anki mevcut dalga şekli yöntemlerinden tek bir tanesinin kullanılmasıyla pek mümkün gözükmemektedir. Bu noktada en ideal çözümlerin esnek ve uyarlanabilir yöntemlerden geçtiği öngörülmektedir. 2016 yılına ait 3GPP standartlaştırma toplantılarında önerilen dokümanlar incelendiğinde giderek daha fazla esnek yapılara ihtiyaç duyulacağı anlaşılmaktadır [2]–[4]. 5G sonrasındaki çatı sistemlerde, tüm alt sistemlerin esnek olarak bir arada çalıştığı, kullanıcıların uyarlanabilir şekilde hizmet aldığı hibrit yapıların kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmanın son kısmında, esnek ve uyarlanabilir dalga şekilleri ile ilgili güncel değerlendirmelere yer verilmiştir.

Bildirinin ikinci kısmında yeni nesil haberleşme sistemleri için genel gereksinimler ve dalga şekli tasarım parametreleri anlatılmaktadır. Üçüncü kısımda, farklı kablosuz haberleşme sistemleri ve kanalları için geliştirilecek dalga şekli tasarım parametrelerinin öncelikleri incelenmiştir. Esnek ve uyarlanabilir dalga şekilleri ile ilgili değerlendirmeler dördüncü kısımda sunulmuş ve yapılan çıkarımlar beşinci kısımda verilmiştir.

II. GEREKSİNİMLER VE TASARIM PARAMETRELERİ

Teknolojik imkanların gelişmesi ve bu imkanların ucuz şekilde sunulabilmesi sayesinde hücresel veri trafiğinde yüksek artışlar yaşanmış ve hücresel haberleşme kullanıcılarının alışkanlıklarında değişimler oluşmuştur. Artan veri trafiğinin ve değişen alışkanlıkların gerekliliklerini sağlayabilmek için kablosuz haberleşme teknolojileri için dikkate alınabilecek gereksinimler şu şekilde sıralanabilir: 1) daha yüksek veri hacmi, 2) daha yüksek sabit veri hızları, 3) daha düşük gecikme süreleri, 4) daha fazla sayıda uçbirim, 5) daha yoğun spektrum kullanımı, 6) daha fazla sayıda antenli sistemler, 7) daha düşük enerji tüketimi, 8) daha yüksek frekans bantları, 9) daha yüksek haberleşme güvenliği, 10) daha esnek spektrum kullanımı, 11) daha fazla ve hızlı hareketlilik. Bu gereksinimlerin sağlanabilmesi daha fazla problemi de beraberinde getirmektedir. Sistem gereksinimlerinin yerine getirilmesi ya da ilgili problemlerin giderilerek hedeflenen çıktılara ulaşılabilmesi farklı haberleşme katmanlarında geliştirilecek çözümlerle sağlanabilmektedir. Uygulama, sistem gereksinimleri, kanal yapısı, farklı haberleşme katmanları ve dalga şekli tasarımı birbirleriyle doğrudan ya da dolaylı olarak Şekil 1’de görülebileceği üzere etkileşim içindedirler. Bu çalışmada, daha çok fiziksel katman seviyesinde ve çerçeve tasarımıyla geliştirilen çözümler dikkate alınmış ve kablosuz haberleşme sistemlerinin en temel iki sorunu olan dağılıma ve girişime bağlı haberleşme kanalı ile ilgili problemler üzerinde durulmuştur.

Kablosuz haberleşme sistemleri için geliştirilen dalga şekillerinin tasarım parametreleri farklı sistemler ve kanallar için değişiklik gösterebilmektedir. Sistem gereksinimlerinin daha çok fiziksel katman seviyesinde ve çerçeve tasarımıyla karşılanmaya çalışıldığı varsayımı ele alındığında, farklı haberleşme sistemlerinin dalga şekli başarımlar ölçütleri açısından değerlendirilmesi daha da önem kazanmaktadır. Kablosuz haberleşme sistemleri için dalga şekli tasarımlarının incelenmesinde kullanılabilecek başarımlar ölçütleri ya da tasarım parametreleri şu şekilde sıralanabilir: 1) spektral verimlilik, 2) bant dışı yayılım (OOBE) miktarı, 3) tepe güç ve ortalama güç oranı (PAPR), 4) hesaplama karmaşıklığı, 5) eş zamansız erişim olanakları, 6) MIMO uyumluluğu, 7) fiziksel katman güvenliği, 8) dikgenlik, 9) esneklik ve uyarlanabilirlik, 10) gecikme süresi, 11) frekans seçmeli kanal dayanıklılığı, 12) zaman seçmeli kanal dayanıklılığı. Bu tasarım parametreleri arasında birçok ödünleşim durumu olduğundan dolayı, farklı kablosuz haberleşme sistemleri ve kanalları için birbirinden farklı optimizasyon problemleri



Şekil 1: Farklı yapılar arasındaki ilişkilerin gösterimi (MAC: Ortam erişim denetimi katmanı; PHY: Fiziksel katman).

oluşturularak tasarım parametrelerinin önceliklendirilmesi her bir sistem için ayrıca yapılmalıdır. Bunun yapılabilmesi için de, başlangıç olarak kablosuz haberleşme kanalının değişen etkileri ile dalga şekli tasarım parametreleri arasındaki ilişkinin iyi şekilde kurulabilmesinin gerektiği düşünülmüştür.

III. DALGA ŞEKLİ TASARIM ÖNCELİKLERİ

Farklı kablosuz haberleşme sistemleri için geliştirilen dalga şekli tekniklerine ait tasarım parametrelerinin, sistem gereksinimlerinin daha çok fiziksel katman seviyesinde ve çerçeve tasarımıyla karşılaşmaya çalışıldığı varsayımı altında önceliklendirilmesi ve bu tasarım parametrelerinin haberleşme kanallarının etkileri ile ilişkilendirilmesi hedefe yönelik tasarımların yapılabilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu optimizasyon probleminin çözümü, hava aracı haberleşmesi, milimetrik dalga haberleşmesi, CR haberleşmesi, M2M iletişim, D2D iletişim ve V2V iletişim haberleşme sistemleri için incelenmiştir.

A. Hava Aracı Haberleşmesi için Dalga Şekli Tasarımı

Günümüzde, sivil, askeri ve endüstriyel amaçlarla birçok alanda farklı uygulamalara hizmet eden hava aracı kablosuz haberleşme sistemleri, hava-yer ve hava-hava olmak üzere iki alt başlık altında incelenebilmektedir. Hava-yer haberleşmesi sırasında, hava-hava haberleşmesine kıyasla daha fazla engelleme rastlanmaktadır ve hava-hava haberleşmesinde çoklu yol etkileri çok daha düşük seviyelerdedir. Gecikme yayılımının az olmasından dolayı hava aracı haberleşmesinde karmaşık bir denkleştirici kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca, çoklu yol etkilerinin olmadığı yüksek irtifalarda Doppler yayılımı yerine Doppler kayması etkili olmaktadır. Yüksek hızlardaki hava araçlarının haberleşmesi sırasında Doppler kayması yüksek seviyelerde olacaktır. Gecikme yayılımı ve Doppler yayılımı haricinde, irtifa değerleri ve hava araçları arasındaki mesafeler yüksek olabileceğinden dolayı, haberleşme kanalındaki yol kaybı da dikkate alınmalıdır.

Hava aracı haberleşmesi uygulamalarında menzil mesafeleri yüksek olabileceğinden ve bu sebeple haberleşme sırasında güç yükselticilerinin kullanılması gerekebileceğinden dolayı PAPR değerlerinin düşük tutulması önemlidir. PAPR değerleri düşük olduğunda, sinyalde bozulmaya sebebiyet vermeden güç verimliliğinin yüksek tutulması sağlanabilecektir. PAPR düşürülmezse, uzun menzillerde daha fazla anten gücü kullanıldığında sinyal bozulması artmaktadır. Doppler kayması etkilerine ve yüksek PAPR değerlerine çözüm olarak, çoklu taşıyıcı dalga formu tasarımında daha geniş alt taşıyıcı boşluklarının seçilmesi ve aynı bant içerisinde daha az sayıda alt taşıyıcı kullanılması tercih edilebilir. Ayrıca, farklı dalga şekillerinde kullanılan çevrimsel önekin (CP) temel kullanım amacının, daha kolay bir denkleştirme yapılarak gecikme yayılımından kaynaklanan semboller arası girişim (ISI) probleminin çözülmesi olduğu düşünüldüğünde, hava aracı haberleşmesinde uzun bir CP ihtiyacının olmadığı anlaşılmaktadır.

B. Milimetrik Dalga Haberleşmesi için Dalga Şekli Tasarımı

Frekans spektrumunun kıt bir kaynak olmasından dolayı, bu kıtlığa çözüm arayışları içerisinde frekans spektrumunun farklı kısımları en verimli şekilde değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda, kablosuz haberleşme sistemlerinin tasarımında çok yüksek bant genişlikleri elde edebilmek için

milimetrik dalga olarak isimlendirilen yüksek frekanslar kullanılmaktadır ve bu durumda bazı değişen kanal etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu etkiler arasında, frekans yükseldikçe yol kaybının ve faz gürültüsünün artması önemli farklar olarak gösterilebilir. Frekansın artmasıyla atmosferik etkilerin de artması yol kaybının daha da artmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca, frekans arttıkça sinyallerin daha kolay sönmülmesinden dolayı gecikme yayılımı da azalmaktadır.

Milimetrik dalga haberleşmesinde, kullanılacak frekans bandı genişliği açısından esnek olunabildiğinden dolayı, yüksek spektral verimlilik bir başarımlı ölçütü olmaktan çıkmaktadır. Benzer şekilde, bant dışı yayılımın düşük tutulmasının önemi de azalmaktadır. Ayrıca, koruyucu frekans bantlarının daha rahat kullanılması mümkün hale gelmektedir. Fakat, yol kaybı miktarının yüksek olması sebebiyle güç yükselticilerinin kullanılması gerekebileceğinden dolayı PAPR değerlerinin düşük tutulması önemlidir. Yüksek PAPR değerlerine ve yüksek faz gürültüsüne çözüm olarak hava aracı haberleşmesindeki çözümlere benzer şekilde, daha geniş alt taşıyıcı boşlukları seçilebilir ve aynı bant genişliği içinde daha az sayıda alt taşıyıcı kullanılabilir. Milimetrik dalga haberleşmesi için spektral verimlilik öncelikli bir tasarım parametresi olmamasına rağmen, çok geniş bir frekans bandı üzerinde çok sayıda geniş alt taşıyıcı boşluğunun tercih edilmesinin PAPR miktarlarına olumsuz yönde etki edeceği göz ardı edilmemelidir.

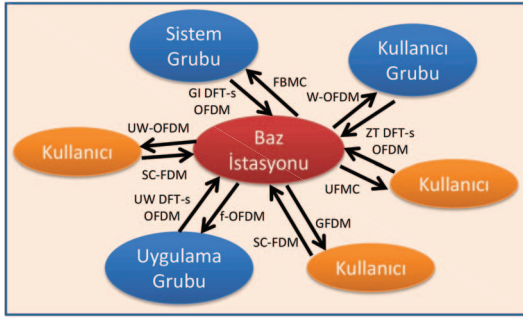
C. Bilişsel Radyo için Dalga Şekli Tasarımı

Yazılım tanımlı telsiz sistemlerinin yaygın hale gelmesiyle beraber, frekans spektrumunun daha verimli kullanılabilmesi için çeşitli bilişsel radyo uygulamaları geliştirilmiştir. Bilişsel radyo sistemlerinin, hedeflenen spektral verimliliği sağlayabilmesi için esnek ve uyarlabilir yapılarla ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Birincil kullanıcılar tarafından yeterince kullanılmayan bantların bilişsel radyo uygulamaları ile boşta kaldığında ikincil kullanıcılar tarafından değerlendirilmesi aşamasında mümkün olduğunca fazla sayıda alt taşıyıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece frekans spektrumu, bilişsel radyo ve dinamik spektrum erişimi uygulamaları tarafından en verimli şekilde kullanılabilir. Her bir alt taşıyıcının gerektiğinde ikincil kullanıcı için aktif ya da pasif hale getirilebilmesi gerekmektedir. Bu durumdan dolayı, tek taşıyıcı dalga şekli yöntemleri bilişsel radyo uygulamaları için uygun değildir.

Alt taşıyıcıların her an aktif ya da pasif hale getirilebilmesi için FFT/IFFT gibi hesaplama karmaşıklığı düşük algoritmaların kullanılmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca, bu işlemler sırasında alt taşıyıcılar arasında bant dışı sızıntılar olabilmektedir. Bu tür sızıntılar, birincil kullanıcıların aleyhinde frekans girişimine sebebiyet vermektedir. Bu sebeple, bilişsel radyolar için OOB miktarlarının başarımlı ölçütü olarak kullanılması çok önemlidir. Ek olarak, bilişsel radyo sistemleri için gerekli olan spektrum algılama işlemleri sırasında tüm haberleşme sistemi düşük gecikme süreleriyle çalışabilmelidir.

D. M2M, D2D ve V2V Haberleşmesi için Dalga Şekli Tasarımı

Tüm elektronik haberleşme sistemlerinin IP tabanlı olarak birbirine bağlandığı IoT şemsiyesi altında gösterilebilecek olan M2M, D2D ve V2V türevi haberleşme sistemlerinde düşük gecikme sürelerine ihtiyaç duyulmasından dolayı çerçeve yapısının ihtiyaca uygun olarak tasarlanması önem kazanmaktadır.



Şekil 2: Farklı dalga şekilleri ile hibrit sistem gösterimi.

Gecikme sürelerinin azaltılabilmesi için kısa uzunlukta çerçeve yapılarının kullanılması durumunda gecikme yayılımı miktarına bağlı olarak ISI önemli bir probleme dönüşebilmektedir. Mevcut farklı dalga şekillerinde kullanılan CP uzunluğunun, ISI miktarının düşürülmesi amacıyla çerçeve yapısının önemli bir kısmını kaplaması halinde spektral verimlilik olumsuz yönde etkilenmektedir.

Gecikme süresi ile spektral verimlilik arasındaki ödünleşim durumu haricinde, M2M, D2D ve V2V sistemleri için hesaplama karmaşıklığı dikkate alınması gereken önemli bir unsurdur. Örneğin, 5G çatı sistemi için geliştirilen dalga şekli yaklaşımlarının çoğunda hesaplama karmaşıklığı açısından tam bir yarar sağlanamaması sebebiyle 5G çatı sisteminin istenilen sistem gereksinimlerini karşılaması zorlaşmaktadır. Bunlara ek olarak, V2V haberleşmesinde yüksek hareketlilik ile birlikte Doppler yayılımı artmaktadır.

IV. ESNEK VE UYARLANABİLİR DALGA ŞEKİLLERİ

5G ve sonrasındaki çatı sistemlerde, bu çalışmada anlaşıldığı gibi farklı haberleşme sistemlerinin bir arada ve aynı çatı altında kullanılması istenmektedir. Dalga şekilleri için tasarım parametrelerinin birinin iyileştirilmesi sırasında diğer bir parametreden ödün verilmesi gerektiğinden dolayı 5G sonrası çatı sistemlere uygun optimum dalga şekillerinin geliştirilmesi için farklı bir bakış açısına ihtiyaç vardır. Bu noktada, tüm alt sistemlerin esnek olarak bir arada çalıştığı, kullanıcıların uyarlanabilir şekilde hizmet aldığı hibrit yapıların kullanılacağı düşünülmektedir. 5G kablosuz sistemleri için yeni paradigmalardan anlatıldığı [5]'de, farklı senaryo ve servisler için dalga şeklinin, alt bantlara ait bant genişliklerinin, alt taşıyıcı boşluklarının, filtre uzunluklarının ve CP uzunluklarının esnek şekilde değiştirilebilmesi gerektiği söylenmiştir.

Çoklu taşıyıcılı dalga formları ve tek taşıyıcılı dalga formlarının karışımı sayılabilecek olan DFT yayımlı dalga formlarında, alt taşıyıcı grupları oluşturularak, mevcut bant genişliği içerisinde bu alt taşıyıcı grupları farklı kullanıcılara atanabilmektedir ve alt taşıyıcı grupları küçük ya da büyük olabilmektedir. Bu esneklikten faydalanılarak yeni nesil sistemler için geliştirilen çeşitli dalga şekilleri [6]'de incelenmiştir.

Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA) yönteminin uyarlanabilir bir çerçeve yapısıyla kullanıldığı [7]'de, CP uzunluğu ve alt taşıyıcı boşluğunun genişliği anlık olarak değiştirilebilmektedir. Böylece spektral verimlilik artırılabilir ve hareketliliğe bağlı frekans yayılımının daha etkili

şekilde yönetilebilmesi sağlanmaktadır. Kullanıcıların baz istasyonuna olan yakınlığı ve kullanıcıların hızı temel alınarak kullanıcılar arasında gruplandırmanın yapılabildiği bu yöntemde, link optimizasyonunun uyarlanabilir şekilde yapılması durumunda spektral verimliliğin anlık mümkün olan en iyi seviyede tutulması hedeflenmektedir.

Farklı kullanıcılar, uçbirim türleri ve uygulamalar farklı sistemler ve kanallar altında dinamik olarak anlık değişikliğe gidebilmektedir. Mevcut çoğu sistemde olduğu gibi en kötü durum senaryosunun temel alınması yerine, dalga şekli parametrelerinin anlık sistem gereksinimleri temel alınarak en uygun şekilde otomatik seçilebildiği sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yapılar hücre tabanlı, kullanıcı tabanlı ya da kullanıcı grubu tabanlı olabilecektir [8]. Mevcut esnek dalga şekillerinin ötesinde, farklı dalga şekillerinin haberleşmeyi bozmadan bir arada kullanılacağı hibrit sistemlerin tasarlanması Şekil 2'deki gösterime benzer şekilde düşünülebilir.

V. ÇIKARIMLAR

Bu çalışmada, sistem gereksinimlerinin ve haberleşme kanalı problemlerinin daha çok fiziksel katman seviyesinde ve çerçeve tasarımıyla karşılaşmaya çalışıldığı varsayımı ile yola çıkılarak, farklı haberleşme sistemleri için dalga şekillerinin tasarımında kullanılan başarımların önceliklendirilmesi sunulmuş ve dalga şekli tasarımı konularında yapılacak gelecek araştırmaların daha hızlı ilerleyebilmesi hedeflenmiştir. Sonraki çalışmalarda, sadece fiziksel katmanın ve çerçeve tasarımının temel alınması varsayımı olmadan, Şekil 1'de de gösterilen farklı haberleşme sistemi katmanlarındaki tasarımların katmanlar arası iş birliği ve aynı katman içerisindeki yapıların birbirleriyle etkileşimleri temel alınarak dalga şekli tasarım parametrelerinin nasıl değiştiği araştırılarak daha gerçekçi senaryolar üzerinde durulacaktır.

5G sonrası çatı sistemler için dalga şekli tasarlanmasının giderek daha da zorlaştığı görülmekte ve bu kapsamda tüm sistemler için tek bir dalga şekli yaklaşımı yerine esnek bir yapıya oturtulmuş uyarlanabilir hibrit çözümlerin umut vadeci olduğu öngörülmektedir. Bu sayede, birçok farklı haberleşme sistemini birlikte barındıran çatı sistemlerin tüm gereksinimlerinin daha yüksek seviyede karşılanması sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Yazar, F. A. Onat, H. Arslan, "New generation waveform approaches for 5G and beyond," IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 961-964, 2016.
- [2] 3GPP, "R1-166056: Final Report of the Meeting," 3GPP TSG RAN WG1 #85, Nanjing, Çin, 23-27 Mayıs 2016.
- [3] 3GPP, "R1-1608562: Final Report of the Meeting," 3GPP TSG RAN WG1 #86, Gothenburg, İsveç, 22-26 Ağustos 2016.
- [4] 3GPP, "R1-1611081: Final Report of the Meeting," 3GPP TSG RAN WG1 #86bis, Lizbon, Portekiz, 10-14 Ekim 2016.
- [5] C.-L. I, S. Han, Z. Xu, S. Wang, Q. Sun, Y. Chen, "New paradigm of 5G wireless Internet," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 34(3), 474-482, 2016.
- [6] A. Sahin, R. Yang, E. Bala, C. M. Beluri, R. L. Olesen, "Flexible DFT-S-OFDM: solutions and challenges," IEEE Communications Magazine, 54(11), 106-112, 2016.
- [7] A. Sahin, H. Arslan, "Multi-user aware frame structure for OFDMA based system," IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 1-5, 2012.
- [8] U. Kumar, C. Ibars, A. Bhorkar, H. Jung, "A waveform for 5G: guard interval DFT-s-OFDM," IEEE GLOBECOM Workshops, 1-6, 2015.