
FFR TEKNİĞİ KULLANILAN ÇOK HÜCRELİ LTE-A SİSTEMLERİNDE KAYNAK ATAMA ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

*Ahmet EMİR**
*Hakan KAYA**

Alınma: 23.07.2018 ; düzeltme: 14.05.2019 ; kabul: 21.05.2019

Öz: Gelişmiş Uzun Dönem Evrim (Long Term Evolution Advanced – LTE-A) sistemlerinde kaynak atamadaki amaç mevcut zaman ve frekans kaynağının kullanıcılar tarafından belirli ölçütlere göre etkin şekilde kullanılabilmesidir. Sistem kaynaklarının kullanıcılar arasında etkin bir biçimde paylaşılması amacıyla çizelgeleme algoritmaları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çok hücreli LTE-A sistemlerinde hücreler arası frekans ataması için bir statik Hücreler Arası Girişim Uyumu (Intercell Interference Coordination- ICIC) tekniği olan Kesirsel Frekans Tekrar Kullanımı (Fractional Frequency Reuse-FFR) tekniği, ilk kez Genelleştirilmiş Oransal Adillik (Generalized Proportional Fair-GPF) ve Aritmetik Ortalama Metodu (Arithmetic Mean Method-AMM) çizelgeleyiciler için kullanılmıştır. En İyi Kanal Göstergesi (Best Channel Quality Indicator-BCQI), RR (Round Robin) ve Oransal Adillik (Proportional Fair-PF), AMM ve GPF Çizelgeleyicileri ortalama kullanıcı çıkış hızı, kenar kullanıcı hızı, tepe kullanıcı hızı ve adillik açısından karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar sonucunda, çok hücreli LTE-A sistemlerinde FFR kullanılması koşulunda, GPF çizelgeleyicilerin diğer çizelgeleyicilere göre kenar kullanıcı hızlarını ve sistem adillliğini artırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çıkış Hızı Ortalama Alma Metodları, Adillik, Ortalama Kullanıcı Çıkış Hızı, Kenar Kullanıcı Hızı, Tepe Kullanıcı Hızı, FFR

Comparision of Resource Allocation Algorithms on Multi-cell LTE-A Systems by Using FFR

Abstract: The purpose of resource allocation in LTE-A (Long Term Evolution Advanced) systems is that the time frequency resource can be used effectively by the users according to specific parameters. Scheduling algorithms are used to efficiently allocate system resources among users. In this study, when allocating frequency among cells in multi-cell LTE-A systems, the Fractional Frequency Reuse (FFR) technique, a static ICIC (Intercell Interference Coordination) technique, was first used for GPF (Generalized Proportional Fair) and AMM (Arithmetic Mean Method) schedulers. BCQI (Best Channel Quality Indicator, RR (Round Robin) and PF (Proportional Fair), AMM and GPF schedulers were compared in terms of mean user throughput, edge user throughput, peak user throughput and fairness. As a result of the simulations, it was observed that GPF schedulers increased edge user throughputs and system fairness compared to other schedulers in case of using FFR in multicellular LTE-A systems.

Keywords: Averaging Throughput Methods, Fairness, Mean User Throughput, Edge User Throughput, Peak User Throughput, FFR

* Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İncivez, 67100 Zonguldak.
İletişim Yazarı: Ahmet EMİR (ahmet.emir@beun.edu.tr)

1. GİRİŞ

Gelişmiş Uzun Dönem Evrim (Long Term Evolution Advanced - LTE-A) düşük gecikme süresi, yüksek veri hızı, yüksek kullanıcı mobilitesine uyum ve esnek bant genişliği gibi gelişmiş özellikler ile öne çıkan bir mobil erişim standartıdır (3GPP TR 36.913 v.8.0.0, 2008). LTE-A telsiz radyo ağ mimarisinde kullanıcı ile çekirdek ağ (core network) arasında tüm Telsiz Kaynak Yönetimi (Radio Resource Management-RRM) fonksiyonlarını yöneten eNodeB olarak adlandırılan baz istasyonu birimi vardır (Trivedi ve Patel,2014). RRM fonksiyonlarından bir tanesi olan ve mevcut bant genişliğinin kullanıcılara atanmasından sorumlu olan Çizelgeleme (scheduling), LTE-A'da ağın performansını etkiler (Nardini ve diğ. , 2016). Literatürde en çok kullanılan çizelgeleme algoritmaları En İyi Kanal Kalite Göstergesi (Best Channel Quality Indicator-BCQI), RR (Round Robin) ve Oransal Adillik (Proportional Fair - PF) çizelgeleyicileri olmasına karşın 3GPP standartlarında LTE-A için aşağı yönlü (downlink) ve yukarı yönlü(uplink) iletişim için tek bir çizelgeleme algoritması yoktur. Bu sebeple araştırmacılar için yeni çizelgeleyiciler tasarlamak önemli bir araştırma konusudur. (Sesia ve diğ. , 2009; Ameigeiras ve diğ. ,2016).

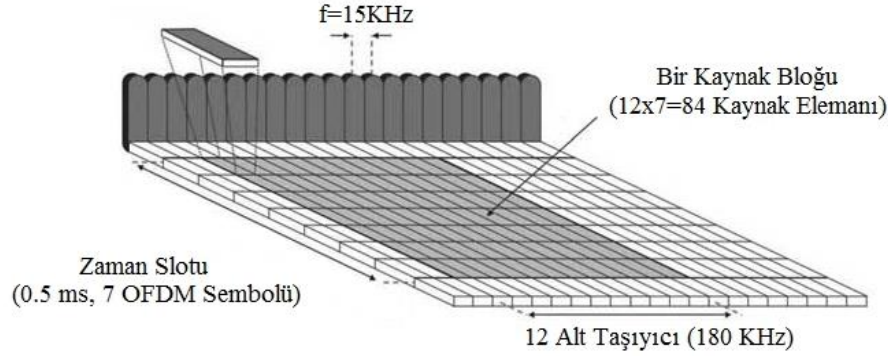
Kaynak atamadaki amaç zaman ve frekans kaynağının kullanıcılar tarafından belirli parametrelere göre etkin şekilde kullanılabilmesidir. Kullanıcıların çıkış hızı, gecikme gibi Servis Kıtası (Quality of Service-QoS) gereksinimlerini dikkate alarak kaynak ataması yapılmaktadır. Bu sebeple mevcut kaynağı kullanıcılar arasında belirli kriterle göre paylaştıran çizelgeleme algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilen çizelgeleme algoritmaları ortalama kullanıcı çıkış hızı, kenar kullanıcı hızı, tepe kullanıcı hızı ve adillik gibi ölçütlere göre değerlendirilmektedir. 4. Nesil LTE-A Haberleşme Sistemlerinde kaynak atama yapabilmek için pek çok çizelgeleme algoritmaları bulunmaktadır (Dardouri S. and Bouallegue R,2014). LTE-A'da çizelgeleme ilkesi, her bir zaman aralığında kullanıcıların İşaretin Girişim ve Gürültüye Oranı (Signal to Intereference Plus Noise Ratio-SINR) değerlerini dikkate alarak en yüksek SINR'a sahip olan kullanıcıyı Kaynak Blok (Resource Block-RB)'lara atama prensibine dayanır. Böylece en yüksek modülasyon seviyesi ve en az kodlama kullanılabilir. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output-MIMO) anten yapılarından yararlanılabilir ve uzaysal çoğullama sağlanabilir. Bu şekilde çizelgeleme yapmak telsiz frekans (Radio Frequency-RF) spektrumunun verimli kullanımını ve adillığı sağlar. Her bir kaynak atamasında çizelgeleme süresi LTE-A'da 1ms olmaktadır. Bu süre LTE-A için Zaman İletim Aralığı (Time Transmission Interval-TTI) olarak isimlendirilmektedir(Yıldız Ö ve Sokullu R, 2017). Bu makalede Trivedi ve Patel(2014)'te kullanılmış BCQI, Akkuzu (2014)'te kullanılmış RR-ve Suliman, Ayoob (2015)'te kullanılmış PF'e ek olarak; kullanıcının verimliliği ve adillliğini geliştirmek için ortalama çıkış hızı hesaplama metodları değiştirilen PF çizelgeleyicilerden olan Büyükoğlu ve diğ.(2017)'de kullanılmış Aritmetik Ortalama Metodu (Arithmetic Mean Method-AMM) ve ilk kez Wengerter ve diğ.(2005) tarafından önerilmiş Genelleştirilmiş Oransal Adillik (Generalized Proportional Fair- GPF) çizelgeleyicileri kullanılmıştır. GPF çizelgeleyicisi, adillik ve çıkış hızı arasındaki doğru dengeyi PF metriğinde belirli değişkenlerin ayarlanması ile bulmaktadır. Bu ayarlama ile kullanıcıların elde edilen geçmiş ortalama çıkış hızları ve ani çıkış hızları modifiye edilmektedir.

Çok hücreli LTE-A sistemlerinde hücreler arası frekans ataması yapılırken hücreler arası girişim uyumunu (intercell interference coordination-ICIC) da dikkate almak gerekir. Bu çalışmada bir statik ICIC tekniği olan FFR (Fractional Frequency Reuse- Kesirsel Frekans Tekrar Kullanımı) kullanılmıştır. Ikuno ve diğ. (2013)'te FFR var olması durumunda çok hücreli LTE-A sistemleri için RR ve PF çizelgeleyiciler için çalışmalar yapılmıştır. Bu çizelgeleyicilere ek olarak bu çalışmada FFR var olması durumunda GPF, AMM ve BCQI çizelgeleyicileri de kullanılarak çok hücreli sistemlerde kullanıcıların Anahtar Performans Göstergesi (Key Performance Indicator- KPI) ve adillik performansını gösteren grafikler elde edilmiştir. Yapılan Simülasyonlar için MATLAB'da çalışan Vienna Sistem Seviye 1.9 Simülatörü kullanılmıştır (Vienna LTE-A Downlink System Level Simulator v1.9 Q2-

2016,2016; (Rupp ve diğ,2016). Bölüm II’de çizelgeleme algoritmalarının yürütüldüğü LTE Izgara Kaynak Modeli verilmiştir. Bölüm III’de FFR tanıtılmıştır. Bölüm IV’te çalışmalarda kullanılan Çizelgeleyici Algoritmaları tanıtılmış ve teorik denklemleri verilmiştir. Bölüm V’te kullanılan simülasyon ortamı tanıtılmıştır. Bölüm VI’da simülasyon sonuçları verilmiştir. Bölüm VII’de ise bulunan sonuçlar hakkında genel değerlendirme yapılmıştır.

2. LTE KAYNAK IZGARA MODELİ

Kaynak blokların LTE-A’da Kaynak Izgaralara (Grid) yerleşimi Şekil-1’de gösterilmiştir. LTE-A kaynak ızgarada yatay eksen frekans, dikey eksen zaman boyutunu göstermektedir. Bir fiziksel kaynak bloğu (physical resource block-PRB) 12 alt taşıyıcı ve 7 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing- Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama) sembolünden oluşmaktadır. Bir kaynak elemanı, bir alttaşıyıcı boyunca bir OFDM sembolünü göstermektedir. Alttaşıyıcılar arasında 15kHz fark bulunmaktadır. Dolayısıyla bir kaynak bloğu $12 \times 15 = 180 \text{ kHz}$ frekans bandındadır. LTE-A kaynak ızgarasında bir zaman slotu 0.5ms yer kaplamaktadır (Ghosh ve diğ, 2010).



Şekil 1:

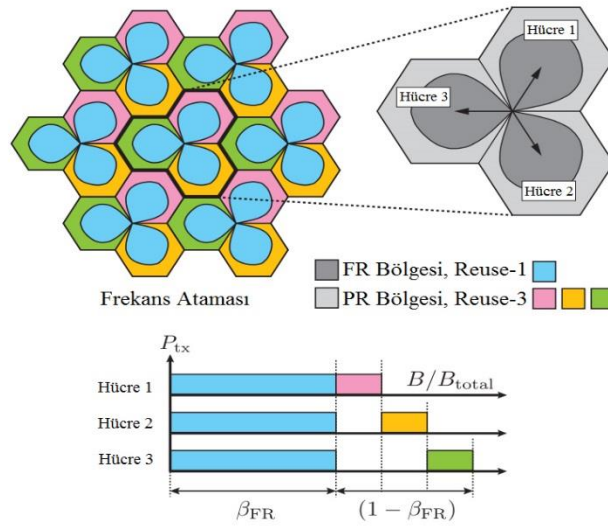
LTE A Kaynak Izgara Gösterimi (Anonim,2018)

LTE-A’da bant genişliği tahsisi esnekliklidir. Bant genişlikleri 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz olarak seçilebilir ve bu bant genişliklerine karşılık gelen RB sayısı sırasıyla 6, 15, 25, 50, 75 ve 100’dir (3GPP TS 36.106 v 8.7.0,2012). Bu çalışmada kullanıcıları çizelgeleme ile RB’lere atayabilmek için 20 MHz bant genişliği belirlenmiş olup bu bant genişliğine karşılık gelen RB sayısı 100’dir.

3. KESİRSSEL FREKANS TEKRAR KULLANIMI (FFR)

LTE-A’da hücreler arasında frekans ataması yaparken ICIC dikkate alınmalıdır. Bunun için bir statik ICIC tekniği olan FFR tekniği kullanılmaktadır. Şekil 1’den görüleceği üzere üç sektörlü altıgen ızgara şeklindeki hücrelerin merkezindeki baz istasyonu, üçlü hücreye frekans ataması yapmaktadır. FFR, her hücreyi merkez hücre ve dış hücre olarak ikiye ayırmaktadır. Hücrelerin merkezinde ve girişimin düşük olduğu yerlerde kullanıcılar frekans bandının çoğunu ve aynı frekans bandını kullanmaktadırlar. Bu frekans kullanımı yeniden kullanım-1 (reuse-1) olarak adlandırılır. Yeniden kullanım-1 bölgesindeki kullanıcılar ise FR (Full Reuse-Tam Yeniden Kullanım) bölgesi kullanıcıları olarak adlandırılırlar. Üç Hücreli yapıda, girişimin fazla olduğu dış hücrelerindeki kullanıcılar ise, hücrelerdeki merkez kullanıcıların kullandığı frekans bandı haricindeki frekansları üç eşit frekans bandında bölüşümlü olarak kullanmaktadır. Bu

frekans kullanımı, yeniden kullanım-3 (reuse-3) olarak adlandırılmaktadır. Yeniden kullanım-3 bölgesindeki kullanıcılar ise PR (Partial Reuse- Kısmi Yeniden Kullanım) bölgesi kullanıcıları olarak adlandırılmaktadır. Kullanıcıların FR ve PR bölgesi kullanıcıları olarak adlandırılmasına kullanıcıların SINR değerlerine göre karar verilir. Seçilen eşik SINR seviyesinden büyük olan kullanıcılar FR kullanıcısı, küçük olan kullanıcılar ise PR kullanıcısı olarak seçilmektedir. Frekans bantlarının ayarlanması ise frekans oran parametresi olan β_{FR} 'ye göre karar verilir. β_{FR} , FR kısmı için kullanılacak bant genişliğinin toplam bant genişliğine oranını göstermektedir. $(1 - \beta_{FR})$ 'lik kısım ise toplam bant genişliğinin PR için ayrılacak bant genişliğine oranını göstermektedir (Ikuno ve diğ. , 2013). FR ve PR bölgesindeki kullanıcılara ise ayrı ayrı olarak Vienna Sistem Seviye simülatöründeki mevcut çizelgeleme algoritmalarına göre kaynak atama yapılabilmektedir.



Şekil 2:

Üç sektörlü Altıgen Izgara Ağda FFR Kullanılarak Frekans Bölümleme (Ikuno ve diğ., 2013)

4. KULLANILAN ÇİZELGELEYİCİ ALGORİTMALARI

4.1 Oransal Adillik (PF)

Kanal Kalite Göstergesi (Channel Quality Indicator-CQI) geri beslemesi ile Mobil Aygıt (User Equipment - UE) ve eNodeB arasındaki kanal kalitesini çizelgeleyici kestirebilir. t . TTI'daki UE ile eNodeB arasındaki kanal İşaretin Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio-SNR) bilgisinin bilinmesi sayesinde m . RB'deki n . kullanıcının beklenen elde edilebilir çıkış hızı, Uyumlu Modülasyon ve Kodlama (Adaptive Modulation and Coding-AMC) tabloları veya Shannon Kanal Kapasitesi yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir (Rupp ve diğ.,2016).

$$d_n^m(t) = \log_2(1 + SNR_n^m(t)) \quad (1)$$

PF çizelgeleyici adilliği ve spektral verimliliği aynı anda sağlar. t . TTI için kaynak atama vektörü aşağıdaki gibi verilmektedir (Suliman ve Ayoob, 2015):

$$\Delta_{PF}(n, m) = \operatorname{argmax}_{i \in N} \left\{ \frac{d_i^m(t)}{R_i(t-1)} \right\} \quad (2)$$

$R_i(t-1)$, i . kullanıcının t . TTI'a kadar ortalama çıkış hızını göstermektedir. $R_i(t-1)$ aşağıdaki gibi verilmektedir (Sun ve Yue,2016):

$$\bar{R}_i(t-1) = (t_c - 1)T_i(t-1) + \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} d_i^m(t) \quad (3)$$

Denklem 3'te çizelgeleyici ortalama alma pencere boyutu (t_c), Vienna SL'de varsayım değeri olan (default) 25 kabul edilmiştir. $T_i(t-1)$, i . kullanıcının geçmiş TTI'daki ortalama çıkış hızını göstermektedir. N , kullanıcı sayısını ifade etmektedir. $\rho_{k,n}$ ise k . kullanıcının n . RB'ye atanıp atanmadığına göre değer alır. Atanmışsa $\rho_{k,n} = 1$, atanmamış ise $\rho_{k,n} = 0$ değerini almaktadır.

4.2 Round Robin (RR)

Round Robin (RR), en basit çizelgeleme algoritmalarından birisidir. Kullanıcılar kuyrukta rasgele sıralanır. Her kullanıcıya aynı sayıda kaynak atanır. Round Robin Kaynak Atama Vektörü aşağıdaki gibidir (Suliman ve Ayoob, 2015):

$$\Delta_{RR}(n, m) = \arg \max_{i \in N} \{Q_i(t)\} \quad (4)$$

$Q_i(t)$, i . kullanıcının kuyruk (queue) boyutunu göstermektedir. m . RB'ye kuyruk uzunluğu en uzun olan n . kullanıcı atanır (Akkuzu,2014).

4.3 En İyi Kanal Göstergesi (BCQI)

BCQI çizelgeleyici, RB'lerin en iyi telsiz link kalitesine sahip kullanıcılara RB'lerin atanmasını sağlamaktadır. En iyi link kalitesine sahip kullanıcılar baz istasyonuna en yüksek CQI değerini döndürür. En yüksek CQI döndüren kullanıcılar en yüksek çıkış hızına sahiptirler (Trivedi ve Patel, 2014). Kullanıcılar arasındaki adillik dikkate alınmamaktadır. t . TTI için kaynak atama vektörü aşağıdaki gibi verilmektedir (Suliman ve Ayoob, 2015):

$$\Delta_{BCQI}(n, m) = \operatorname{argmax}_{i \in N} \{d_i^m(t)\} \quad (5)$$

Denklem 5'te, m . RB'ye en yüksek elde edilebilir çıkış hızını veren n . kullanıcının atanacağını belirtilmektedir.

4.4 Genelleştirilmiş Oransal Adillik (GPF)

GPF çizelgeleyici, PF çizelgeleyicinin metriğinin pay ve paydasının üstlerinin alınmış halidir. GPF için kaynak atama vektörü aşağıdaki gibi verilmiştir (Aramide ve diğ.,2017):

$$\Delta_{GPF}(n, m) = \operatorname{argmax}_{i \in N} \left\{ \frac{(d_i^m(t))^\beta}{(\bar{R}_i(t-1))^\alpha} \right\} \quad (6)$$

$$\Delta_{GPF}(n, m) = \operatorname{argmax}_{i \in N} \frac{(d_i^m(t))^\beta}{((t_c - 1)T_i(t-1) + \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} d_i^m(t))^\alpha}$$

$\beta=1$ ve $\alpha=1$ seçilirse PF metriği elde edilmektedir. Simülasyonlarda $\beta=0$ kabul edildiğinde kullanıcı başına çıkış hızı çok düşeceği ve $\alpha=0$ kabul edildiğinde adillik ortadan kalkacağı için bu değerler yapılan simülasyonlarda ihmal edilmiştir.

4.5 Aritmetik Ortalama Metodu (AMM)

PF formülünde bulunan $R_i(t-1)$ ortalama çıkış hızının açık formülü, Denklem 3'te verilmişti. i . kullanıcının t . TTI'daki ortalama çıkış hızı $T_i(t)$ PF'de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Sun ve Yue,2016):

$$T_i(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) + \frac{1}{t_c} R_i(t) \quad (7)$$

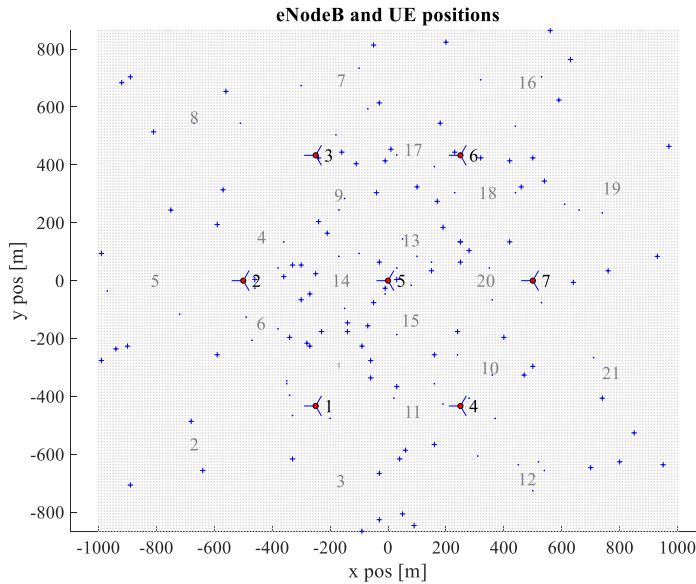
AMM, $t+1$. TTI'daki ortalama çıkış hızını hesaplamak için t . TTI anına kadarki ani çıkış hızlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanan ortalama çıkış hızı hesaplama metodudur. AMM için ortalama çıkış hızı aşağıdaki gibi verilmiştir (Büyükoğlu ve diğ. ,2017):

$$T_k(t+1) = \frac{\sum_{m=1}^M R_k(m)}{t} \quad (8)$$

5. SİMÜLASYON ORTAMI

Yapılan simülasyonlar MATLAB programında çalışan Vienna 1.9 Sistem Seviye Simülatöründe gerçekleştirilmiştir. Vienna Simülatörü AMC geri bildirimlerinin ölçümüne izin verir ve MIMO kazançlarının hesaplanmasını sağlar. Ayrıca bireysel kullanıcıların fiziksel katman bağlantıları için çizelgeleme yapılabilir. Karmaşık yapısı ve hesaplama gücü nedeniyle tüm baz istasyonları ve UE'ler arasında radyo link simülasyonları gerçekleştirmek için gerekli parametreleri içerdiği için bu simülatör bu çalışmada tercih edilmiştir.

Simülasyon ortamında UE'lerin ve baz istasyonlarının konumunun dağılımı, Şekil 3'te gösterilmektedir.



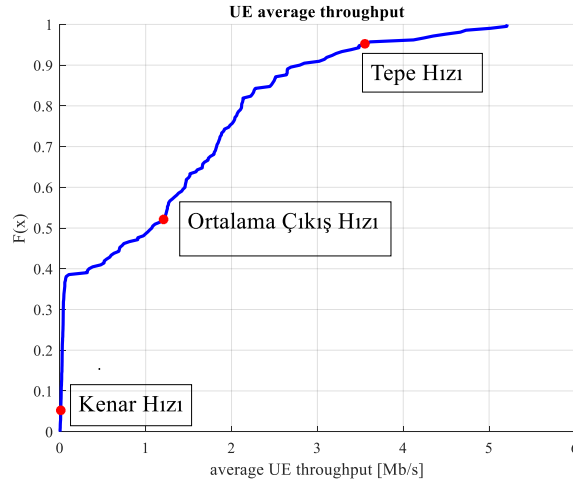
Şekil 3:
UE ve Baz İstasyonlarının Vienna 1.9 Sistem Seviye Simülatöründe Dağılımı

Şekil 3'te kırmızı noktalar 3 sektörlü baz istasyonlarını, diğer mavi noktalar UE'leri göstermektedir.

Sistemde 7 baz istasyonu 21 hücre bulunmaktadır. Her bir baz istasyonu 3 hücreyle iletişim kurmaktadır. Bu 3 hücreli bölgeye alan (site) denilmektedir. Her hücrede 10 kullanıcı

bulunmaktadır. Simülasyonlarda her UE'nin kendi hücresindeki baz istasyonu ile olan mesafeleri genel performansı etkilemektedir. Adil bir karşılaştırma yapmak açısından tüm simülasyonlarda aynı UE pozisyonları kullanılmıştır. UE'ler sabit açısal dağılıma sahiptir.

FFR performansı, genellikle çizelgeleme algoritmalarını dikkate almaksızın literatürde KPI olarak değerlendirilir (Rahman ve Yanikomeroglu,2010; Xie ve Walke, 2010; Chen ve Yuan,2010). KPI'ler Ortalama Kullanıcı Çıkış Hızı, Tepe Kullanıcı Hızı ve Kenar Kullanıcı Hızlarıdır. Tepe Kullanıcı Çıkış Hızı Terimi ve Kenar Kullanıcı Çıkış Hızı terimleri sırasıyla kullanıcıların çıkış hızı Deneysel Toplam Yoğunluk Fonksiyonu(Emprical Density Function-ecdf)'nun %95 ve %5'lik noktalarındaki hızlardır. Aynı zamanda Tepe Kullanıcı Çıkış Hızı, hücre merkezindeki kullanıcının performansı, Kenar Kullanıcı Çıkış Hızı ise hücre kenarındaki kullanıcının performansı olarak yorumlanabilmektedir. Simülasyonlarda tüm sistemin KPI metrikleri ve adilliği hesaplanmıştır. Şekil 4'te FFR için $\beta_{FR} = 0.01$ ve SINR eşik seviyesi 5dB iken sistemdeki 210 UE'nin çıkış hızlarının ecdf'sini göstermektedir. KPI metrik noktaları kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4:

FFR Olması Durumunda Örnek Simülasyon için Sistemdeki UE'lerin Ortalama Çıkış Hızı Grafiği

Aynı zamanda simülasyonlarda adillik (fairness) maksimum yapılması hedeflenmektedir. Sadece hücre çıkışlarını dikkate almak kullanıcıların kaynağı adil olarak paylaşmamasına sebebiyet vermektedir. Ek olarak çizelgeleyici sadece spektral verimliliğe odaklanırsa kötü kanal kalitesindeki (hücre kenar-cell-edge) kullanıcılara daha az kaynak ataması yapılacaktır. Bu yüzden kaynak atama yapılırken adilliği de dikkate almak gerekmektedir. Tasarlanan bir sistemin adilliği Jain adillik indisi (Jain's fairness index) ile hesaplanabilmektedir (Büyüköğlü ve diğ. , 2016). N kullanıcı sayısı, x_i i . kullanıcının çıkış hızını göstermek üzere, adillik indisi aşağıda verilmiştir. $J=1$ olması kullanıcılar arasında mükemmel adilliği göstermektedir.

$$J = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (9)$$

FFR var olması durumunda PF, AMM, BCQI, RR, $\beta=0.6$ ve $\alpha=0.9$ parametreleri seçilmiş GPF çizelgeleyiciler için; sırasıyla $\beta_{FR}=0.01$ iken, β_{FR} 0.1 ile 0.9 arasında 0.1 adımlarla değişirken ve de $\beta_{FR}=0.99$ iken SINR eşik değerinin -2 ile 15 dB arasında değişirken kenar kullanıcı hızı, tepe kullanıcı hızı, ortalama çıkış hızı ve adilliğin değişimini gösteren grafikler

çizilerek simülasyonlar yapılmıştır. Her bir çizelgeme türü için β_{FR} ve SINR değiştiği için simülasyonlar, her bir çizelgeleyici için toplam 198 kere çalıştırılmıştır.

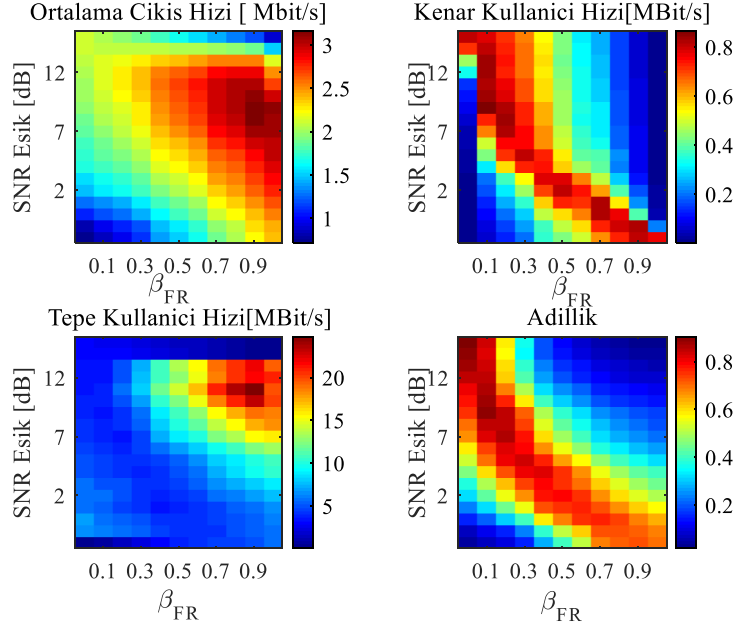
Simülasyon parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Simülasyon Parametreleri

Simülasyon Tipi	tri_sector_titled
Simülasyon Süresi	50 TTI
Sistem Bant Genişliği	20 MHz
Sistem Frekansı	2,14GHz
Gönderici Anten Sayısı	1
Alıcı Anten Sayısı	1
eNodeB Gönderici Anten Gücü	46dBm
Kullanıcı Dağılımı/ Kullanıcı Hızı	Sabit/5m/s
Hücre Sayısı	21
eNodeB Alan Sayısı (Site)	7
Mobil Kullanıcı Sayısı	210 (Her hücrede 10)
Çizelgeleyici	FFR, GPF, PF, BCQI, RR
PF Çizelgeleyici Çıkış Hızı Ortalama Metodları	Orijinal Metod, AMM
Çizelgeleyici Ortalama Alma Pencere Boyutu (t_c)	25
FFR için β_{FR} değeri	0.01, 0.1 ile 0.9 arasında 0.1 adımlarla değişim ve 0.99 için
FFR için SINR eşik değeri	-2 dB ile 15 dB arasında değişecek
Kanal Modeli	Typical Urban (TU)
Yol Kayıp Modeli	3GPP TS 36.942
Ağ Geometrisi	Altıgen Izgara (Hexagonal Grid)

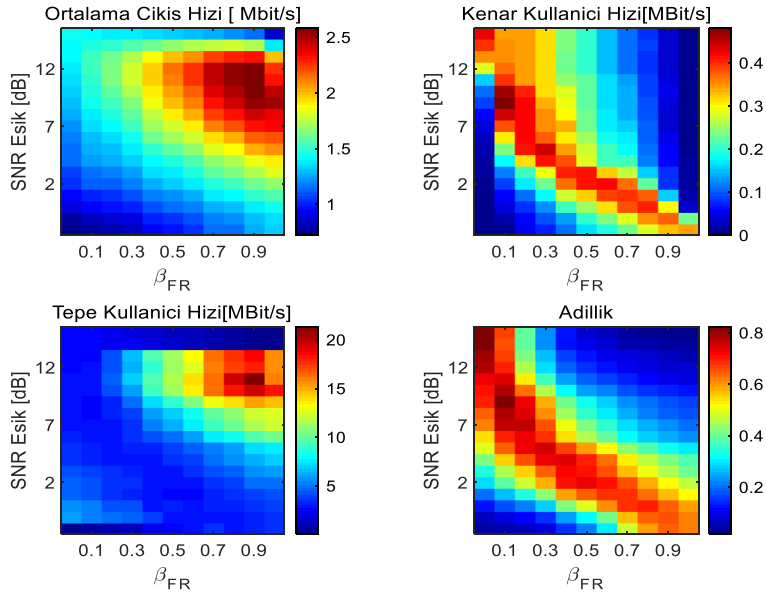
6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Şekil 5’te PF çizelgeleyici için simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde ortalama çıkış hızı β_{FR} yüksek değerlere gittikçe SINR Eşik Seviyesi Yüksek Değerlere çıkmadığı sürece 2.5Mbit/s ile 3 Mbit/s arasında olmaktadır. Kenar kullanıcı hızları ise genelde 0.2 MBit/s hızlarında kalmaktadır. Sadece β_{FR} azalırken SINR eşik seviyeleri yükseldikçe Kenar Kullanıcı Hızları 0.8 MBit/s hızlarına çıkmaktadır. Tepe Kullanıcı hızları ise SINR eşik seviyesi 7-12 dB arasında β_{FR} ise 0.7’den büyük olduğu durumlarda 20 Mbit/s’den büyük olmaktadır. Çoğu durumda ise 5 Mbit/s ‘nin altında olmaktadır. Adillik açısından değerlendirildiğinde ise β_{FR} düştüğü SINR eşik seviyesi arttığı durumda adillik yüksek değerlere çıkma eğilimindedir.



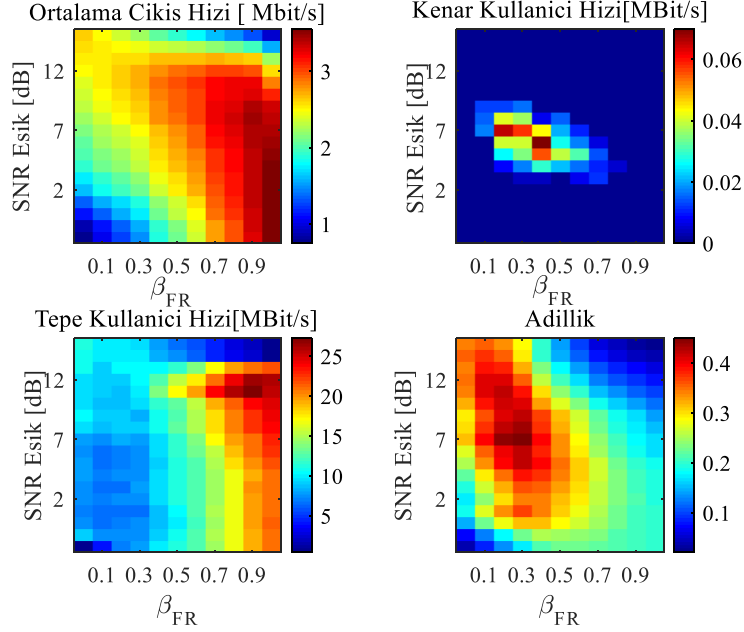
Şekil 5:
 β_{FR} ve SINR değişimine göre PF Çizelgeleyiciyle Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 6’da RR çizelgeleyici için simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde ortalama çıkış hızı β_{FR} yüksek değerlere gittikçe SINR Eşik Seviyesi Yüksek Değerlere çıkmadığı sürece 2 Mbit/s ile 2.5 Mbit/s arasında olmaktadır. Kenar kullanıcı hızları ise genelde 0.1 Mbit/s hızlarında kalmaktadır. Tepe Kullanıcı hızları ise SINR eşik seviyesi 9-12 dB arasında, β_{FR} ise 0.7’den büyük olduğu durumlarda 15 Mbit/s ile 20 Mbit/s arasında olmaktadır. Çoğu durumda ise 5 Mbit/s ‘nin altında olmaktadır. Adillik açısından değerlendirildiğinde ise β_{FR} düştüğü SINR eşik seviyesi arttığı durumda adillik yüksek değerlere çıkma eğilimindedir.

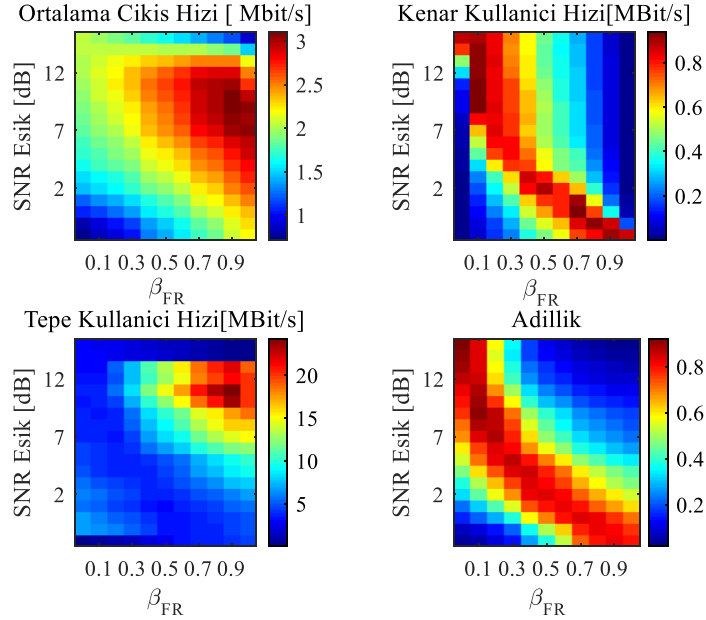


Şekil 6:
 β_{FR} ve SINR değişimine göre RR Çizelgeleyiciyle Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 7’de BCQI çizelgeleyici için simülasyon sonuçları verilmiştir. Ortalama çıkış hızı β_{FR} 0.3’den büyük olduğu durumda SINR Eşik Seviyesi Yüksek Değerlere çıkmadığı sürece 3 Mbit/s civarında olmaktadır. Kenar Kullanıcı hızı çok düşük olup 0 ile 0.06 Mbit/s arasında değişmektedir. Tepe Kullanıcı hızı genelde 5 Mbit/s’den düşük olup β_{FR} 0.8’den büyük olduğu durumda 20 Mbit/s ile 25Mbit/s arasında değişmektedir. Adillik β_{FR} 0.7’den küçükse 0.3 ile 0.4 arasında değişmektedir. β_{FR} 0.7’den büyük olursa 0.2’den daha düşüktür.



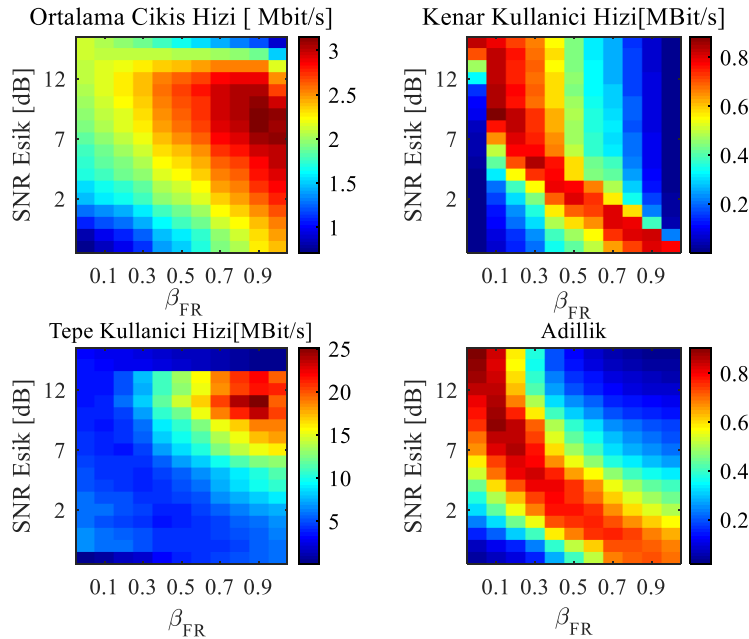
Şekil 7:
 β_{FR} ve SINR değişimine göre BCQI Çizelgeleyiciyle Elde Edilen Sonuçlar



Şekil 8:
 β_{FR} ve SINR değişimine göre $\beta=0.6$ ve $\alpha=0.9$ için GPF Çizelgeleyiciyle Elde Edilen Sonuçlar

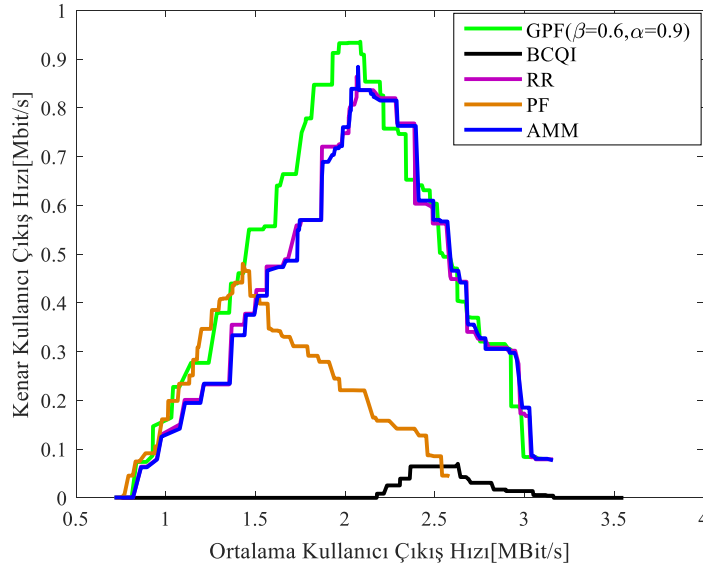
Şekil 8 'de GPF çizelgeleyici için $\beta=0.6$ ve $\alpha=0.9$ seçildiğindeki simülasyon sonuçları verilmiştir. β ve α , GPF metriğinde bulunan ani çıkış hızına bağımlılığı azaltmak, ortalama çıkış hızına bağımlılığı artırmak ve optimum sonuçlar elde edebilmek için bu değerlerde seçilmiştir. Ortalama çıkış hızı β_{FR} 0.5'den sonra SINR Eşik Seviyesi dikkate alınmaksızın 2.5 Mbit/s 'den büyük olmaktadır. Kenar kullanıcı hızları ise genelde 0.2 MBit/s ile 0.6 M bit/s hızları arasında kalmaktadır. Sadece β_{FR} azalırken SINR eşik seviyeleri yükseldikçe Kenar Kullanıcı Hızları 0.8 MBit/s hızlarının üstüne çıkmaktadır. Tepe Kullanıcı Hızı β_{FR} 0.7'den büyük SINR eşik seviyesi 9 ile 12 dB arasında olduğu durumlarda 20 Mbit/s'den büyüktür. Adillik açısından değerlendirildiğinde ise β_{FR} düştüğü SINR eşik seviyesi arttığı durumda adillik yükselme eğilimindedir (Bu eğilim durumunda adillik 0.9'lara çıkmaktadır.).

Şekil 9 'da AMM çizelgeleyiciyle elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Ortalama çıkış hızı β_{FR} 0.3'den sonra arttıkça SINR Eşik Seviyesi dikkate alınmaksızın 2 Mbit/s 'den büyük olmaktadır. Kenar kullanıcı hızları ise genelde 0.2 MBit/s ile 0.4 Mbit/s hızları arasında kalmaktadır. Sadece β_{FR} azalırken SINR eşik seviyeleri yükseldikçe Kenar Kullanıcı Hızları 0.8 MBit/s hızlarının üstüne çıkmaktadır. Tepe Kullanıcı Hızı β_{FR} 0.7'den büyük, SINR eşik seviyesi 9 ile 12 dB arasında olduğu durumlarda 20 Mbit/s'den büyüktür. Adillik açısından değerlendirildiğinde ise β_{FR} düştüğü SINR eşik seviyesi arttığı durumda adillik yükselme eğilimindedir. (Bu eğilim durumunda adillik 0.9'lara çıkmaktadır.)



Şekil 9:
AMM Çizelgeleyiciyle Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 10'da, yapılan simülasyonlardaki tüm durumlara göre sistemdeki kullanıcı ortalama çıkış hızlarının kenar kullanıcı çıkış hızlarına göre değişimleri verilmiştir.

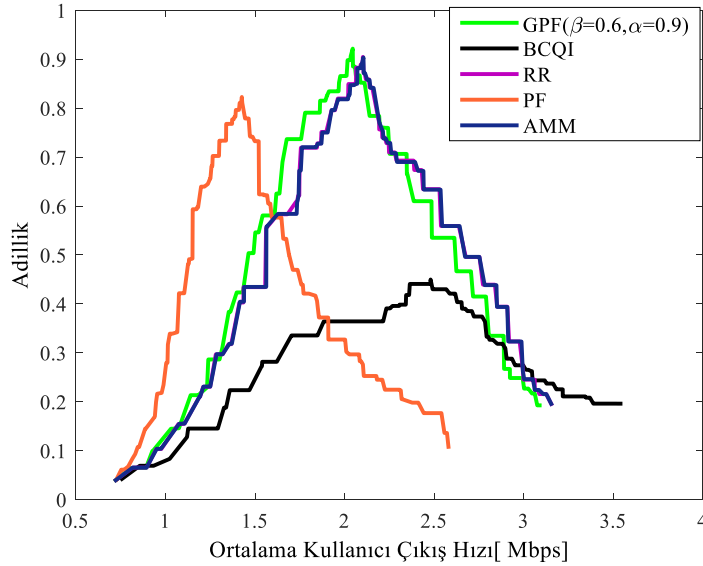


Şekil 10:

Sistemdeki tüm simülasyonlar için Ortalama Kullanıcı Çıkış Hızı- Kenar Kullanıcı Çıkış Hızı Karşılaştırma Grafiği

Şekil 10'da tüm çizelgeleyiciler için yapılan simülasyonlarda sistemin kullanıcının ortalama çıkış hızı 2MBit/s'den artırdıkça kenar kullanıcı çıkış hızlarının azaldığı görülmektedir. 2MBit/s'ye kadar çıkartıldığında ise sistemin kenar kullanıcı hızı da artış eğilimindedir. Görüleceği üzere sistemin ortalama çıkış hızı 2 Mbit/s'de tutulursa en yüksek kenar kullanıcı çıkış hızı GPF ile elde edilebilmektedir.

Şekil 11'de yapılan simülasyonlardaki tüm durumlara göre sistemdeki kullanıcı ortalama çıkış hızlarına göre sistemin adilliklerinin değişimlerini göstermektedir.



Şekil 11:

Sistemdeki tüm simülasyonlar için Ortalama Kullanıcı Çıkış Hızı- Adillik Karşılaştırma Grafiği

Şekil 11'de tüm çizelgeleyiciler için yapılan simülasyonlarla sistemin adillik yüksek ortalama çıkış hızları elde edilmek istendiğinde düşmektedir. Burada dikkat çeken husus PF

çizelgeleyici ile en fazla 2.5 Mbit/s ortalama çıkış hızı elde edilebilmektedir. Yine ortalama kullanıcı çıkış hızına göre kenar kullanıcı hızının en yüksek değere çıktığı gibi en yüksek adillik de GPF çizelgeleyici ile elde edilmektedir.

Ortalama Çıkış Hızları açısından ise simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonucu BCQI çizelgeleyici kullanıldığında elde edilmiştir. β_{FR} 0.7'den sonra SINR'ın tüm eşik seviyelerinde en iyi sonucu vermektedir (3 Mbit/s'nin üzerine çıkılabilmektedir.) Kenar kullanıcı hızı açısından ise $\beta=0.6$, $\alpha=0.9$ seçildiğinde GPF çizelgeleyicide iyi sonuç elde edilmektedir. 0.9 Mbit/s'yi kenar kullanıcı hızı geçmektedir. β_{FR} 0.7'den yüksek tutulduğunda ve SINR eşik seviyesi 9 -12 dB arasında tutulduğunda BCQI çizelgeleyicide tepe kullanıcı hızı 25 Mbit/s'yi aşmaktadır. Adillik açısından ise en iyi sonuç yine $\beta=0.6$, $\alpha=0.9$ seçildiğindeki GPF çizelgeleyici ile elde edilmektedir.

Tüm ortalama çıkış hızı, tepe kullanıcı hızı, kenar kullanıcı hızı ve adillik kriterleri beraber düşünüldüğünde ise en iyi yöntem $\beta=0.6$, $\alpha=0.9$ seçilen GPF çizelgeleyicidir. En yüksek ortalama çıkış hızı açısından BCQI çizelgeleyiciden kötüdür, fakat β_{FR} 0.5'den sonra SINR Eşik Seviyesi dikkate alınmaksızın 3 Mbit/s hızlarına çıkmaktadır. Tepe kullanıcı hızı ise BCQI çizelgeleyici kullanılarak bulunan sonuçlardan kötüdür. Fakat yine de 20Mbit/s'nin üzerindedir. Adillik ve kenar kullanıcı hızı açısından ise en iyi kriterler yine bu çizelgeleyiciyle elde edilir. Bunun sebebi GPF formülündeki ani çıkış hızı üstel parametresi β 'nin biraz düşürülmesi ortalama çıkış hızı üstel parametresi α 'nın ise β 'dan daha az düşürülmesidir. Böylelikle GPF metriğinin ortalama çıkış hızına bağımlılığı biraz artırılmış olup, hücre içindeki kenar kullanıcıların hızı artırılmıştır. Böylelikle sistemin adilliği yükseltilmiştir.

Sonuç olarak sistemdeki tüm simülasyonlar değerlendirildiğinde kenar kullanıcı çıkış hızının ve adillik ortalama çıkış hızına göre değişim grafiklerine göre de en iyi sonuç veren çizelgeleyici yöntemi $\beta=0.6$, $\alpha=0.9$ seçilen GPF çizelgeleyicidir.

7. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

LTE-A Hücreli Sistemlerinde, var olan zaman ve frekans kaynağının kullanıcılar arasında etkin şekilde paylaşılması gerekmektedir. Bu işlem çizelgeleme algoritmaları ile yapılabilmektedir. Bu çalışmada literatürde sıkça kullanılan BCQI, PF ve RR çizelgeleyicilere ek olarak PF çizelgeleyicilerin parametrelerinin değiştirildiği GPF ve AMM çizelgeleyiciler kullanılmıştır. Çok hücreli LTE-A sistemlerinde hücreler arası frekans ataması yaparken ICIC'ı da dikkate almak gerekmektedir. Bu çalışmada, bir statik ICIC tekniği olan FFR tekniği, ilk kez çok hücreli LTE-A sistemlerinde GPF ve AMM çizelgeleyiciler için kullanılmıştır. GPF çizelgeleyiciler biraz daha üstün olmak üzere GPF ve AMM çizelgeleyiciler ile sistem kenar kullanıcı hızlarında ve sistem adilliğinde artış sağlanmıştır.

Bu çalışma LTE-A Hücreli Sistem Simülatörlerinde, gezgin kullanıcıların sabit dağılımlı ve 5m/s hızlarında hareket ettiği ve hücreler arasında statik bir ICIC 'in var olduğu kullanıcılara kaynak atama araştırmalarına temel teşkil etmektedir. Gelecek çalışmalarda LTE-A sistemlerinde hücreler arasında dinamik ICIC teknikleri olan JP(Joint Processing- Birleşik İşleme) ve CSCB(Coordinated Scheduling and Coordinated Beamforming- Uyumlu Çizelgeleme ve Uyumlu Hüzmeleme) var olduğu durumlarda kullanıcılar arasında kaynak atama algoritmaları geliştirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. 3GPP TR 36.913 v.8.0.0 (2008). Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) (Release 8), Erişim Adresi: <http://www.3gpp.org/Specs/36913-800.pdf>. (Erişim Tarihi: 03.04.2017)
2. 3GPP TS 36.106 v 8.7.0 (2012), LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD repeater radio transmission and reception (Release 8), Erişim Adresi:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136106/08.07.00_60/ts_136106v08070Op.pdf (Erişim Tarihi: 25.12.2017)

3. Akkuzu B. (2014) Qos-Aware Scheduler For Self-Organizing Lte Networks, *MSc Thesis*, İstanbul Technical University, İstanbul.
4. Ameigeiras P. , Navarro-Ortiz J. , Andres-Maldonado P. , Lopez-Soler J. M. , Lorca J. ,Perez-Tarrero Q. and Garcia-Perez R.(2016), 3GPP QoS-based scheduling framework for LTE, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 1-14. doi: 10.1186/s13638-016-0565-9
5. Anonim (2018) LTE OFDM Technology, Erişim Adresi: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_ofdm_technology.htm (Erişim Tarihi 18:03.2018)
6. Aramide S.O. , Barakat B. , Wang Y. , Keates S. and Arshad K. (2017), Generalized Proportional Fair (GPF) Scheduler for LTE-A, 9th Computer Science and Electronic Engineering (CEEC), Colchester, UK, 12-132. doi: 10.1109/CEEC.2017.8101612
7. Büyükoğlu A. , Sağlam M. İ., Kavas A. and Kartal M.(2016), An Efficient Throughput Averaging Method for Proportional Fair Algorithm Used in Mobile Networks, *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, Riga, Latvia,161-166. doi: 10.1109/RTUWO.2016.7821876
8. Chen L. and Yuan D. (2010), Generalized frequency reuse schemes for OFDMA networks: Optimization and comparison, in *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC2010-Spring)*, Taipei, Taiwan. doi: 10.1109 /VETECS.2010.5493830
9. Dardouri S. and Bouallegue R. (2014) Comparative Study of Scheduling Algorithms for LTE Networks, *International Journal of Electronics and Communication Engineering* , 8(3), 467-472. doi: 10.1016/j.phycom.2013.11.009
10. Ghosh A. , Ratasuk R. , B. Mondal, Mangalvedhe N. and Thomas T.(2010) , LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology[Invited Paper], *IEEE Wirel. Commun.*, 17(3) ,10-22. doi: 10.1109/MWC.2010.5490974
11. Ikuno J. C. , Tarantetz M. and Rupp M. (2013) , A Fairness-based Performance Evaluation of Fractional Frequency Reuse in LTE, 17th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), Stuttgart,Germany,
12. Nardini G. , Stea G. ,Virdis A.,Sabella D., and Caretti M. (2016), . Practical large-scale coordinated scheduling in LTEAdvanced network, *Wireless Networks*, 22, 11-31. doi: 10.1007 /s11276-015-0948-6
13. Rahman M. and Yanikomeroglu H.(2010) , Enhancing cell-edge performance: a downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination, *IEEE Transactions of Wireless Communications*, 9(4), 1414–1425. doi: 10.1109 /TWC.2010.04.090256
14. Rupp M. , Schwarz S. and Tarantetz M. (2016), *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink,Link and System Level Simulation*, Springer. , Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-0617-3
15. Sesia S. , Toufik I and Baker M.(2009), *LTE: The UMTS Long Term Evolution:From Theort to Practice*, Wiley Online Library. doi: 10.1002/9780470742891
16. Stoykov V. R. and Volkova-Jarvis Z. V.(2017), Performance Evaluation of Throughput Averaging Methods for the Proportional Fair Algorithm in Indoor Mobile Networks, 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS), Nis, Serbia 232-235. doi: 10.1109 /TELSKS.2017.8246270

17. Suliman M.A. and Ayoob D.S.A.(2015) , A Comparison Study Between the Downlink Packet Scheduling, *Al-Rafidain Engineering*, 23(3),27-40.
18. Sun Z. , Yin C. and Yue G.(2006) , Reduced-Complexity Proportional Fair Sceduling for OFDMA Systems, International Conference on Communications, Circuits and Systems, Guilin,China , 1221-1225. doi: 10.1109/ICCCAS.2006.284866
19. Trivedi R.D. ve Patel M. (2014) , Comparison of Different Scheduling Algorithm for LTE, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(5), 334-339.
20. Vienna LTE-A Downlink System Level Simulator v1.9 Q2-2016 (2016), Erişim Adresi:<https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/lte-a-downlink-system-level-simulator/> (Erişim Tarihi: 10 Ocak 2017)
21. Wengert C. , Ohlhorst J. , and. Edler. von Elbwart A. G.(2005), Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency cheduling in OFDMA, IEEE 61st Veh. Technol. Conf. , 3(2), 0-4. doi: 10.1109/VETECS.2005.1543653.
22. Xie Z. and Walke B.(2010), Frequency reuse techniques for attaining both coverage and high spectral efficiency in ofdma cellular systems, in IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2010),Sydney, Australia. doi: 10. 1109 /WCNC.2010. 5506110
23. Yıldız Ö and Sokullu R. (2017), A novel mobility aware downlink scheduling algorithm for LTE-A networks, International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Milan, Italy, 300-305. doi: 10. 1109 /ICUFN.2017. 7993798

