



LTE TEKNOLOJİLERİNDE GERÇEK ZAMANLI VE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ VIDEO AKTARIMLARININ PERFORMANS ANALİZLERİ

Mevlüt ERSOY*, Tuncay YİĞİT

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

LTE Teknolojisi,
Video Aktarımı
Kaynak Tahsisi,
Çizelgeleme Algoritmaları.

Özet

İnsanların, yer ve zamana bağlı kalmadan bilgiye erişim ihtiyacı kablosuz teknolojilerin gelişmesindeki en önemli faktördür. Özellikle kullanıcı sayılarının artış göstermesi ve video uygulamalarının kullanım oranının artması ile hücresel ağlarda yeni yapıların geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda Uzun Dönemli Evrim (LTE – Long Term Evolution) teknolojileri tamamen paket anahtarlama yapısı ile geliştirilmiştir. LTE' nin ilk hedefi daha fazla kullanıcıya hizmet verebilmek ve daha hızlı veri aktarımı sağlayabilmektedir. Bu kapsamda, LTE ağındaki MAC katmanında kaynak tahsislerini sağlayan mevcut algoritmaların yüksek çözünürlüklü video aktarımlarındaki ve farklı kullanıcı sayılarındaki durumları incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, kayıp paketlerin sayıları, aktarılan bit miktarları, paket gecikmeleri analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, LTE ağında yüksek çözünürlüklü ve gerçek zamanlı video aktarım uygulamalarında kullanıcı sayılarının artış göstermesi ile ağdaki tıkanıklık oranlarının artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

PERFORMANCE ANALYSIS OF REAL-TIME AND HIGH DEFINITION VIDEO STREAMING IN LTE TECHNOLOGIES

Keywords

LTE Technology,
Video Streaming,
Resource Allocation,
Scheduling Algorithms.

Abstract

The most important factor in the development of wireless technologies is the need for people to access information without depending on location and time. In particular, the increasing number of users and the increased use of video applications have required the development of new structures in cellular networks. In this context, Long Term Evolution (LTE) technologies have been completely developed with packet switching structure. The aim of LTE development is to provide service to more users and faster data transfer. In this context, the current algorithms for allocating resources at the MAC layer in the LTE network have been examined for high definition video transmissions and for different user numbers. In this study, the numbers of lost packets, transmitted bit amounts, packet delays were analyzed. As a result of the analysis, it is observed that the congestion rates of the network are increasing with the increase of the number of users in the high resolution and real time video transmission applications in the LTE network.

Alıntı / Cite

Ersoy, M., Yiğit, T. (2017). Performance Analysis Of Real-Time And High Definition Video Streaming In LTE Technologies, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5(1), 351-363.

1. Giriş

LTE, bir hücresel ağdaki mobil aygıtların veri ağlarına erişimlerini sağlayan dördüncü nesil hücresel ağ teknolojisidir. LTE üzerindeki çalışmalar sadece paket anahtarlama bir ağ yapısı kullanarak yeni bir radyo erişim teknolojisi geliştirmeyi hedeflemiştir (Dalhman

vd., 2013). Bu radyo erişim teknolojisi, IPv4 ve IPv6 adres yapısını kullanmakta olup, tamamen IP tabanlıdır. LTE, kullanmış olduğu Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ve üst düzey modülasyon teknikleri sayesinde veri aktarımında yüksek veri hızı,

* İletişim Yazarı/Corresponding author: mevlutersoy@sdu.edu.tr, +902462114913

düşük girişim, daha çok kullanıcı desteği ve düşük gecikme oranları sağlamaktadır (Ersoy,2017).

Günümüzde mobil telefonlarda kullanılmakta olan görüntülü konuşma, video izleme, video konferans gibi birçok video aktarım uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda kamera çözünürlüklerinin artması ile aktarılan video paket kapasitelerinde artışlar meydana gelmiştir. Aynı zamanda hücresel ağlar üzerinden video uygulamalarının kullanım oranları da giderek artış göstermiştir. Hücresel ağlardan aktarılan video paketleri dünya çapında, 2015 yılında 51 Eksabayt olmuş iken, 2020 yılında 159 Eksabayt'a kadar artması beklenmektedir. Bu artış, özellikle yüksek çözünürlüklü (HD - High Definition) videolarda olması beklenmektedir (Cisco, 2016). Kullanıcı sayılarının ve aktarılan paketlerin kapasitelerinin artması ile hücresel ağlarda indirme yönünde gönderilebilecek HD video çerçevesi boyutlarında mobil kullanıcılara yeterli kaynak ataması yapılarak en iyi kanal koşulları sağlanması gerekmektedir. Gerçek zamanlı yüksek çözünürlükteki video aktarım uygulamalarında bu durum daha önemli hale gelmektedir.

LTE'de kaynak ataması, baz istasyonu olarak bilinen eNodeB'lerde OFDM tekniği ile oluşturulmuş 180KHz bant genişliğine sahip kaynak bloklarının oluşturulması ile gerçekleştirilir. Sistemin bant genişliğine bağlı olarak 1 ms zaman diliminde farklı sayılarda olabilen kaynak bloklarının, eNodeB tarafından mobil kullanıcılara frekans ve zaman düzleminde atamaları yapılmaktadır. Baz istasyonları bu atamaları, belirli ölçütlere göre oluşturulan ve Ortam Erişim Kontrol (MAC - Medium Access Control) katmanında bulunan çizelgeleme algoritmaları ile gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, LTE ağında mevcut çizelgeleme algoritmalarının yüksek çözünürlüklü ve gerçek zamanlı (YÇGZ) video aktarımlarında performansları incelenmiştir. Bu incelemelerde kullanıcı sayılarının durumlarına göre ağdaki kayıp paket sayıları (KPS), ortalama gecikme süreleri (OGS), toplam aktarılan bit miktarları (TABM) ve alıcıdaki donma kaliteleri (DK) tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kullanıcı sayılarının artması ile YÇGZ video aktarımlarında LTE ağında KPS, OGS değerlerinde artış ve TABM değerlerinde ise azalmalar gözlenmiştir.

Bu çalışmanın, ikinci bölümünde konu kapsamında literatürde gerçekleştirilmiş çizelgeleme algoritmaları ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde LTE ağının mimarisi, LTE kaynak yapısı ve kaynakları kullanıcılara tahsislerini gerçekleştiren mevcut çizelgeleme algoritmalarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde mevcut çizelgeleme algoritmalarının yüksek çözünürlüklü ve gerçek zamanlı video aktarım uygulamalarındaki performansları incelenmiş ve son bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Tamimi vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada, WiMAX ağları üzerinden gerçekleştirilen MPEG4 - Part2 ve Part10 formatındaki videolar için indirme yönünde kaynak ataması sağlayan üç farklı çizelgeleme algoritması geliştirmişlerdir: (1) Genellikle gerçek zamanlı trafik için paketlerin geliş sırasına göre çizelgeleyen ve paketleri kesebilen Erken Tarihli Önce, (2) Gerçek zamanlı olmayan trafikler için paketlerin parçalanmasını engelleyen ve sadece tam paket çizelgeleyen Açık Döngülü Planlama ve (3) 1. ve 2. algoritmaların özelliklerini kapsayan birleşimsel Erken Tarihli Önce. Üç algoritma paket kayıp ve adillik yönünden karşılaştırılmıştır. Video paketlerini üretmek için benzetim programında gerçek zamanlı trafik üretici kullanarak sabit çerçeve tabanlı kaynak atama kullanılmıştır. Simülasyon süresince Modülasyon ve Kodlama Şeması indeks değeri sabit tutulmuştur. Sonuç olarak paket kayıp oranı ve gecikme süresi en iyi olan algoritma Açık Döngülü Planlama olmuştur.

Kim vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, LTE ağı üzerinden gerçekleştirilen video akışları için çapraz katman tasarımı ile paket çizelgeleme, çağrı yönetim kontrolü ve hücreler arası geçiş sistemi kontrolü gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde kullanıcı deneyimleri kalitesinin durumları, tampona alınan video çerçevelerinin hızlarına ve video kodlama veri hızına göre belirlenmiş ve kablosuz bağlantı durumları da dikkate alınarak kaynak çizelgeleme algoritması tasarlanmıştır. Paket çizelgeleme, LTE standardında belirlenen 1 ms zaman aralıkları ile yapılmaktadır. Ancak gerçek zamanlı işlemlerde işlem yükünü azaltmak için iletilecek olan paketlerin hangileri olduğunu tanımlayarak çizelgeleme aralıklarını optimum seviyede belirlemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda sahne donma süreleri en az seviyeye indirilmiş ve tek bir hücreden aktarılan bit miktarı artırılmıştır.

Alreshoodi vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, kablosuz ağlar üzerinden aktarılan H.265 standardı ile sıkıştırılmış 1920 x 1080 çözünürlükten 4 kat daha fazla piksele sahip çok yüksek çözünürlüklü (UHD - Ultra High Definition) videoların alıcı tarafında tahmini için Bulanık Mantık Sonuç Çıkarma aracı kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde gerçek zamanlı videolarda referans video olmadığı için kullanıcı deneyim kalitesinin tahminini referansı olmayan model ile geliştirmişlerdir. Kullanıcı deneyimlerinin kalitesini ortalama seçme puanına dönüştürmek için Matlab'da resim kalitelerini ölçmek için kullanılan Yapısal Benzerlik Göstergesi fonksiyonun kullanmışlardır. Aynı zamanda paket kayıp oranı, paket yeniden düzenleme oranı ve paket yenileme oranları gibi QoS parametreleri ile SSIM fonksiyonundan elde edilen veriler ile Rastgele Yapay Sinir ağı kullanarak eğitim

kümesi oluşturulmuş ve video kalite tahminleri gerçekleştirilmiştir.

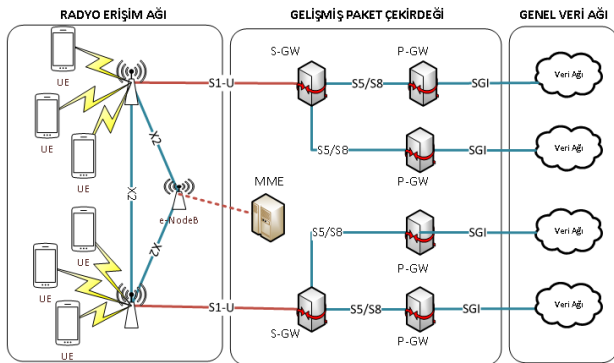
Castanho (2015) yapmış olduğu tez çalışmasında, LTE ağında özellikle gelişmiş Çoklu Ortam Yayın Çoklu Yayın Hizmetleri (eMBMS - evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) üzerinden video iletimlerinin optimizasyonunu ve analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada kapalı alanda, kentsel açık alanda ve kırsal açık alanda senaryolar geliştirilmiştir. Giriş parametreleri olarak video dizisinin karakteristik özelliklerinden faydalanılmış ve parametreler simülasyon programı üzerinde elde edilmiştir. Ayrıca simülasyon programı video kalitelerinin tahminin elde etmek için de kullanılmıştır. Video kalitelerini artırmak için Modülasyon Kodlama Şeması indeks değerini artırarak kullanıcı deneyimlerine göre optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP-Third Generation Partnership Project), Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistem (UMTS-Universal Mobile Telecommunications System) ağları üzerinde 2004 yılından itibaren LTE çalışmalarına başlamıştır. Uzun süren çalışmaların sonunda 3GPP Sürüm 8'de UMTS üzerinden geliştirilen Şekil 2'de gösterilen ve amacı yüksek spektral etki, en yüksek veri hızı, kısa çizelgeleme süresi, frekans ve bant genişliği esnekliği olan LTE mimarisi oluşturulmuştur.

3.1. LTE mimarisi

LTE mimarisi 2 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar Ağ çekirdeği olarak adlandırılan Gelişmiş Paket Çekirdeği (EPC - Evolved Packet Core) ve Radyo Erişim Ağı (RAN - Radio Access Network)' dir.

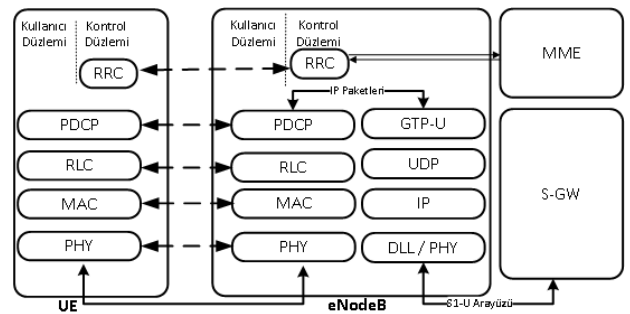


Şekil 2. LTE ağ mimarisi

Şekil 2'de gösterilen LTE mimarisinin ağ çekirdeğinde, paket anahtarlama yapısı kullanılarak EPC oluşturulmuştur. EPC, tamamen Internet Protokol (IP) yapısını kullanarak IP sürüm 4 ve sürüm 6 yapılarını destekleyen Paket Veri Ağı Geçidi (P-GW - Packet Data Network Gateway) ve Servis Ağ Geçidi (S-GW - Serving Gateway) adı verilen cihazlar ile paket yönlendirme

işlemi gerçekleştirmektedir. P-GW, SGI arayüzü (Stefania vd., 2009) üzerinden operatör bağlantılarını, internet erişimlerini, dış aygıtlar ile veri alışverişini, QoS yönetimini ve IP adres atamalarını sağlayan birimdir. S-GW, S5/S8 ara yüzünü (Stefania vd., 2009) kullanarak yurt içi ve yurt dışındaki baz istasyonları ile P-GW arasında veriyi ileriye doğru gönderen yönlendirici cihazlardır. S-GW aynı zamanda kullanıcı düzleminde LTE ağları arasında hareketliliği ve gelişmiş NodeB (eNodeB - evolved NodeB)'ler arasındaki geçişleri kontrol etmektedir. EPC'de bulunan bir başka birim ise Hareketlilik Yönetim Varlıkları (MME - Mobility Management Entity)'dir. MME, EPC'nin kontrol düzleminde bulunan ve dolaşım, oturma durumları, kimlik doğrulama ve diğer taşıyıcı yönetim fonksiyonlarını yöneten birimdir.

Şekil 2'de gösterilen RAN'da bulunan eNodeB'ler, S1/U arayüzü üzerinden kullanıcı ekipmanları (UE - User Equipment) adı verilen mobil cihazlar ile S-GW arasındaki veri aktarım işlemlerini yerine getiren, bir veya daha fazla hücrede radyo fonksiyonlarından sorumlu ve çok sayıda UE bağlantısı olması durumunda yük paylaşımı yapabilme özelliğine sahip akıllı baz istasyonlarıdır (Cox, 2012). Bu işlemler için RAN'da Şekil 3'te gösterilen protokol mimarisi ile sağlanmaktadır. RAN protokol mimarisi kontrol ve kullanıcı düzlemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Kontrol düzleminde, hareketlilik, güvenlik ve bağlantı kurulumu ile ilgili yönetim ve kontrol fonksiyonlarını içeren mesajlar gönderilir. Radyo Kaynak Kontrol (RRC - Radio Resource Control) katmanı üzerinden kontrol kanalları kullanılarak gelen mesajlar kullanıcı düzlemi ile aynı katmanları kullanarak MME ile iletişimi gerçekleştirmektedir (Dahlman, vd., 2011).



Şekil 3. Radyo erişim ağı mimarisi

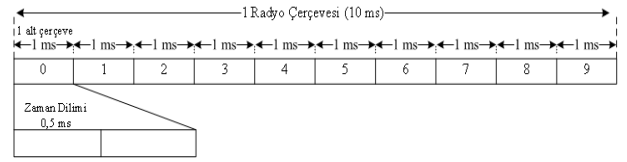
Paket Veri Yakınsama Protokol Katmanı, UE ve eNodeB katmanlarının kullanıcı düzleminde bulunan Paket Veri Yakınsama Protokolü (PDCP - Packet Data Convergence Protocol), IP paketlerinin iletilmesini sağlamaktadır. Bu katmanda bulunan tampon belleğe yerleştirilen IP paketlerine gerekli iletim yönüne göre gerekli başlık bilgileri eklenmektedir. Bu katmanda radyo arayüzü üzerinden gönderilecek bitlerin sayılarını azaltmak için Dayanıklı Başlık Sıkıştırma (ROHC - Robust Header Compression) algoritmasını kullanarak IP paketlerinin başlık bilgileri sıkıştırılır (Vergados vd., 2012). PDCP Protokol Veri Birimi (PDCP PDU - PDCP Protocol Data Unit) olarak

adlandırılan bu paketler Radyo Bağlantı Kontrol (RLC - Radio Link Control) katmanına geçirilir ve paketler bu katmanda RLC SDU olarak adlandırılır.

Radyo Bağlantı Kontrol Katmanı (RLC) veri aktarımını gerçekleştirmek için üç farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlar; Saydam Yöntem (TM - Transparent Mode), Onaylanmayan Yöntem (UM - Unacknowledged Mode) ve Onaylanan Yöntem (AM - Acknowledged Mode)'dir. TM'de RLC SDU paketleri iletim tampon belleğine alınarak RLC katmanına ait herhangi bir başlık bilgisi eklenmeden doğrudan bir alt katmana gönderilir. UM'de RLC SDU paketleri iletim tampon belleğine yerleştirilip, bölümlenme/birleştirme işlemleri yapılarak RLC katmanına ait başlık bilgileri eklenerek sonraki katmana iletilir. AM'de ise TM yapısına ek olarak herhangi bir nedenle gönderilemeyen veya hatalı gönderilen paketlerin yeniden iletim, yenileme tahmini gibi işlemleri gerçekleştirilir (3GPP, 2015).

Ortam Erişim Kontrol Katmanı, MAC katmanında, mantıksal kanalların çoklama işlemleri, kullanıcı verileri için indirme ve yükleme yönünde çizelgeleme, hibrit ARQ protokolü (Virdis vd., 2014) kullanarak hatalı verileri düzeltmek için yeniden gönderim, taşıyıcı birleştirme (Abdelhadi ve Clancy, 2015) kullanıldığı zaman çoklama ve ayırıştırma işlemleri gerçekleştirilir. Çizelgeleme işlemi MAC katmanında sadece eNodeB tarafında gerçekleşir (Vergados vd., 2012). Çizelgelemenin amacı, indirme (downlink) ve yükleme (uplink) yönünde RLC katmanında oluşturulan paketlerin terminaller arasında akışını sağlamak için OFDM kaynaklarının UE'ler arasında paylaşımını ve paylaşılan kaynakların özelliklerinin belirlenmesini sağlamaktır (Deniz, 2015).

Fiziksel katmanda eNodeB'de indirme yönünde Dikgen Frekans Bölümlü Çoklu Erişim (OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ile yüksek düzeyli modülasyon teknikleri (Abdelhadi ve Clancy, 2015) kullanılmaktadır. LTE, yükleme yönünde Tek Taşıyıcı Frekans Bölümlü Çoklu Erişim (SC - FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access) tekniğini kullanarak veri iletişimini gerçekleştirmektedir. Fiziksel Katman (PHY), 3GPP tarafından geliştirilen LTE fiziksel katmanında, yüksek katmanlarda oluşturulan çerçevelerin belli zaman dilimlerinde gruplandırılmasıyla kaynak bloğu adı verilen (RB - Resource Block) alt çerçeveler oluşturulmuştur. Bir radyo çerçevesi 1 ms aralıklarla oluşturulmuş 10 alt çerçeveden, bir alt çerçeve 0.5 ms uzunluğunda iki zaman diliminden meydana gelmektedir. Bu radyo çerçevelerinin iki türü tanımlanmıştır. Bunlar; FDD'de kullanılan Tip 1 çerçeve yapısı ve Zaman Bölümlü Dupleks (TDD - Time Division Duplex)'de kullanılan Tip 2 çerçeve yapısıdır. Şekil4' te Tip 1 çerçeve yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4. Tip 1 çerçeve yapısının yapısı

LTE'de taşıyıcı frekansın bant genişliği 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz olarak esnek bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu değerlere göre oluşturulacak RB sayısı ve alt taşıyıcı sayısı Tablo1'de gösterilmiştir. Üç farklı türde grup haline getirilen RB'lerin, baz istasyonları tarafından mobil kullanıcılara frekans ve zaman düzleminde çizelgeleme algoritmalarına göre atamaları yapılmaktadır.

Tablo 1. Taşıyıcı frekans bant genişliğine göre RB sayıları ve alt taşıyıcı sayısı (3GPP, 2015)

Taşıyıcı Frekans Bant Genişliği	RB Sayısı (N_{RB}^{DL})	Alt Taşıyıcı Sayısı
1,4 MHz	6	72
3 MHz	15	180
5 MHz	25	300
10 MHz	50	600
15MHz	75	900
20 MHz	100	1200

Kaynak Atama Tür 0'da, kaynak bloğu atama bilgisi çizelgeleme sonucunda UE'ye atanan Kaynak Blok Gruplarını (RBG - Resource Block Groups) gösteren bir bit haritası içerir. RBG boyutu (P) sistemde kullanılan taşıyıcı frekans bant genişliğine göre belirlenen kaynak blok sayılarına (N_{RB}^{DL}) (Tablo 2) göre belirlenmektedir.

Tablo 2. Kaynak Atama Tür 0 kaynak blok sayısına göre RBG boyutları (3GPP,2010)

Kaynak Blok Sayısı N_{RB}^{DL}	RBG Boyutu P
≤ 10	1
11-26	2
27-63	3
64-110	4

3.2. Mevcut Çizelgeleme Algoritmaları

Çizelgeleme algoritmalarının amacı, kullanıcılar arasında her 1 ms'lik zaman dilimlerinde OFDMA kaynaklarının dinamik bir şekilde paylaşılmasını sağlamaktır. LTE'de çizelgeleme algoritmaları ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle paket gecikmelerini en aza indirmek, kullanıcıların sistem üzerinden daha fazla veri aktarımlarını gerçekleştirmek ve kaynakların kullanıcılar arasında adil bir şekilde paylaşılmasını hedeflemiştir. Çalışmalarda, Sinyal Entereferans Gürültü Oranı (SINR) (Kela vd., 2008), aktarılan bit miktarı (Monghal vd.,2008), ortamın paket

gecikmeleri (Assaad, 2008), hedef gecikmeler (Luo vd., 2010), hedef paket kayıpları (Qian vd., 2009), kuyruk uzunlukları (Park vd., 2007), UE tampon bellek durumları (Lin ve Yue, 2008) gibi birçok farklı parametre (Piro, Grieco, vd., 2011) göz önünde bulundurularak paylaşım işlemi gerçekleştirilmektedir. Temel olarak 3GPP tarafından önerilen 3 farklı çizelgeleme algoritması mevcuttur. Bunlar; Maksimum Veri Çıktısı (MT - Maximum Throughput -), Döngüsel Planlama (RR - Round Robin) ve Orantısız Adillik (PF - Proportional Fair) çizelgeleme algoritmalarıdır.

Maksimum Veri Çıktısı algoritması, LTE sisteminin bant genişliğine bağlı olarak belirlenen OFDM kaynakları, her İletim Zaman Aralığında (TTI - Transmission Time Interval) CQI değeri en iyi olan UE'ye atanmaktadır. Bu nedenle bu algoritma En İyi CQI (Best CQI) algoritması olarak da adlandırılmaktadır. MT Çizelgeleyici algoritmasının sözde kodu aşağıda sunulmuştur.

```

UEsch ∈ (UE1, UE2, ..., UEN)
while (∀TTI)
{
  CQIUE,t ← referans sinyallere göre kaynak isteğinde bulunan UE'lerden CQI getir
  rt ∈ (RBG1, RBG2, ..., RBGN)
  maksimum_ulaşılabilir_Hız ← 0,
  For j < NUEsch
    ulaşılabilir_Hız ← 0
    P ← NRBG
    iletim_Blok_Boyutu
    ← getirTBS (getir ITBS (getirMCS(CQIj)), P)
    ulaşılabilir_Hız ← iletim_Blok_Boyutu/0,001
    if ulaşılabilir_Hız > maksimum_ulaşılabilir_Hız ise
      maksimum_ulaşılabilir_Hız ← ulaşılabilir_Hız
      eniyi_UEsch ← UEj
  End if
  End For
  eniyi_UEsch ← rt
}

```

MT algoritması istekte bulunan UE'lerden (UE_{sch}) referans sinyaller aracılığıyla elde edilen CQI değerlerine (CQI_{UE,t}) göre işlem yapmaktadır. Elde edilen CQI değerlerine göre her UE'nin veri aktarımında ulaşabileceği saniyedeki bit hızı (bps) elde edilmektedir. MT algoritmasına göre çizelgelenen UE'ye her TTI süresinde toplam RBG sayısını tümü atanmaktadır. Ulaşılabilir bit hızı değeri, CQI ve tüm RBG sayısına göre bulunmaktadır. Her UE için elde edilen ulaşılabilir hız diğer UE'lerin hızlarından büyük ise ilgili UE'ye kaynak tahsisleri gerçekleştirilmektedir.

Döngüsel Planlama algoritması, MT çizelgeleme algoritmasına alternatif olarak geliştirilmiş çizelgeleyici algoritmadır. Mevcut kaynakları herhangi bir kanal durum bilgisine bakmadan adil bir şekilde paylaşmayı hedeflemektedir. RR algoritması, LTE sisteminde kaynak oluşturma türüne göre gruplandırılan RBG'leri her TTI süresi içerisinde kaynak isteğinde bulunan UE'lere sıra ile atamasını

gerçekleştirmektedir. RR algoritmasının sözde kodu aşağıda sunulmuştur.

```

UEsch ∈ (UE1, UE2, ..., UEN)
while (∀TTI)
{
  rt ∈ (RBG1, RBG2, ..., RBGN)
  sch ← 1
  For i < NRBG
    UEsch ← ri
    sch ← sch + 1
    if sch > NUE
      sch ← 1
  End if
  End For
}

```

RR algoritmasına göre, kaynak isteğinde bulunan UE'lere (UE_{sch}) toplam RBG'ler (r_{N_{RBG}}) arasından her döngüde 1 RBG verecek şekilde kaynak tahsis yapılmaktadır. RR algoritmasında istekte bulunan UE'lerin sayısı RBG sayılarından küçük ise tekrar istekte bulunan ilk UE'ye sonraki kaynak atamaları gerçekleştirilmektedir. Bu duruma göre TTI süresi içerisinde bir UE'ye birden fazla RBG ataması yapılabilmektedir.

PF çizelgeleyici, en iyi throughput değerini ve adillik oranını hedefleyen bir algoritmadır. Çizelgelenen UE, her TTI zamanında kendi kanal kalitesine (CQI_{UE,t}) bağlı olarak anlık aktarılan veri miktarının (TBS(r_{j,z})), kendi ortalama aktarılan veri miktarına (avg_t(UE_j)) oranına göre belirlenmektedir. En yüksek orana sahip olan UE seçilerek (UE_{sch}) kaynak ataması yapılmaktadır. Seçilen UE'ye aktarılan veri miktarı CQI değerine göre belirlenmektedir. Kaynak atama işlemi sonrasında, bir sonraki çizelgelemede kullanılmak üzere her UE için ortalama aktarılan veri miktarı güncellenerek sonraki çizelgeleme sürecine geçilmektedir. PF çizelgeleme algoritmasının sözde kodu aşağıda sunulmuştur.

```

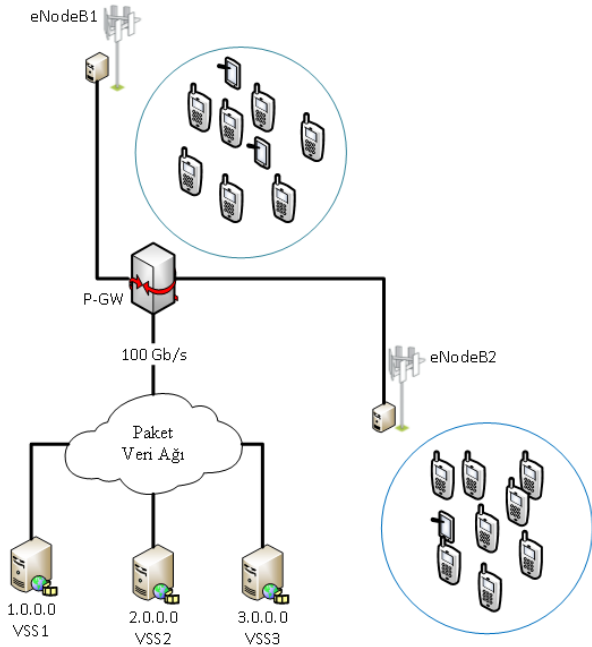
while (∀TTI)
{
  CQIUE,t ← referans sinyallere göre kaynak isteğinde bulunan UE'lerden CQI getir
  rt ∈ (RBG1, RBG2, ..., RBGN)
  rcqiMax ← 0
  For her i ∈ (UE1, UE2, ..., UEN)
    For her k < NRBG
      iletim_blok_boyutu ← getirTBS (getir ITBS (getirMCS(CQIi,k(t))), 1)
      Ri(k, t) ←  $\frac{\text{iletim\_blok\_boyutu}}{\text{TTI}}$ 
      ulaşılabilirHız ← ulaşılabilirHız + Ri(k, t)
    End For
    rcqi ←  $\frac{\text{ulaşılabilirHız}}{\text{avg}_t(UE_i)}$ 
    if (rcqi > rcqiMax)
      {
        rcqiMax ← rcqi
        UEsch ← UEi
      }
  End For
  UEsch ← rt
  For her i ∈ (UE1, UE2, ..., UEN)
    topt(UEsch) ← topt(UEsch) + iletim_Blok_Boyutu(UEsch)
    avgt(UEsch) ←  $(1 - \frac{1}{T_c})(\text{avg}_t(UE_{sch})) + (\frac{1}{T_c})(\text{top}_t(UE_{sch}))$ 
  End For
}

```

4. Araştırma Bulguları

4.1. LTE Altyapısı ile Yüksek Çözünürlüklü ve Gerçek Zamanlı Video İletimleri

Bu çalışmada, LTE altyapısı ile video iletimlerini gerçekleştirmek için Ns-3 benzetim programı kullanılmıştır. Ns-3, eğitim ve araştırma amaçlı kullanılabilen, açık kaynak ve ayrık olay benzetim programıdır (Ns3tutorial, 2016). Bu çalışmada, Ns-3 benzetimi ile OFDMA tabanlı iki hücreden oluşan LTE hücresel kablosuz ağı tasarlanmıştır. RAN'da hücrelerin uç noktalarına yerleştirilen eNodeB'ler ile UE'ler tanımlanmıştır. eNodeB'lerde kullanılan anten yapıları doğrusal olarak tanımlanmıştır. Şekil 5'te görülmekte olan tasarımda paket veri ağında tanımlı olan üç ayrı sunucu, bu sunuculardan gelen verileri yönlendirme işlemini gerçekleştiren P-GW, UE'lerin Paket Veri Ağları (PVA)'na bağlanabilmelerini sağlayan baz istasyonu olarak da bilinen eNodeB'ler ve UE'ler gösterilmektedir.



Şekil 5. Ns-3 ile oluşturulan LTE ağ altyapısı

eNodeB1, farklı konumlarda bulunma ihtimalleri yüksek olan insanların yoğun olarak bulunduğu üniversite kampüsleri gibi yaşam alanlarına, eNodeB2 ise daha çok betonarme binaların olduğu oturma alanlarına hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır. Ns-3 benzetim programında eNodeB2'nin hizmet verdiği bölgede 5 katlı ve her katta 6 oda bulunan 200 m² alana sahip bir bina tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem eNodeB1 hem de eNodeB2 üzerinden sunuculara istekte bulunabilen heterojen bir grup oluşturulmuştur. Bu gruplar sayesinde, kullanıcıların yoğun bir şekilde istekte bulunmaları halinde RAN ve EPC'nin istenilen paketlerin gecikme sürelerine ve paket kaybı sayılarına etkileri gözlemlenmiştir.

PVA'lar üzerinde tanımlı olan Tablo 3'te gösterilen üç farklı Video Akış Sunucusu (VSS - Video Streaming

Server) farklı ağlarda olacak şekilde IP adres atamaları gerçekleştirilmiştir. VSS'lerden UE'lerin isteğine göre video iletim paketleri gönderilmektedir.

Tablo 3. Sunucu IP adresleri ve video çözünürlükleri

Sunucu Adı	IP Adresi	Sunucuda Saklanan Dosyanın Çözünürlüğü
VSS_1	1.0.0.2	1920x1080 (1080p)
VSS_2	2.0.0.2	3240x2160 (2160p)
VSS_3	3.0.0.2	1280x720p (720p)

LTE altyapısında EPC'yi oluşturmak için Ns-3 benzetiminde P-GW oluşturulmuştur. P-GW, PVA ve RAN arasında yönlendirici olarak çalışmaktadır. Bu yönlendirici, PVA'da VSS'ler ile eNodeB'ler arasındaki yönlendirme işlemlerini gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. P-GW'nun PVA ile olan bağlantısı 100 Gbps hızında, 0,01 sn gecikmeli ve 1500 Maksimum İletim Birimi (MTU - Maximum Transmission Unit) paket boyutu özelliklerine sahiptir.

Tablo 4'de Ns-3 benzetim programında oluşturulan LTE ağının karakteristik özellikleri yer almaktadır.

Tablo 4. LTE ağının karakteristik özellikleri

Parametre	Değeri
Bant genişliği	20 MHz
Yol Kayıp Modeli	Serbest Uzay Yayılımı
eNodeB iletim Gücü	30 dBm
UE'lerin İletim Gücü	23 dBm
Kullanılan Hareketlilik Modelleri	Sabit Pozisyon / Belli Yönde Yürüyen / Rastgele yönde rastgele hızlarla hareket eden / Kapalı Alanda bulunan
TTI	1 ms
AMC Modeli	PiroEW2010 (Piro, Baldo, vd., 2011)
Hücre Boyutları	Hücre 1: 1 km ² Hücre 2: 0,5 km ²

Tablo 4'de belirtilen Serbest Uzay Yayılımı Yol Kayıp Modeli, UE'lerdeki CQI değerinin hesaplanması için seçilen modeldir. Bu modele göre, Ns-3 benzetim programında eNodeB ile UE arasındaki görüş mesafesine bağlı olarak sinyal gücü hesaplanmaktadır. UE'lerin eNodeB'lere olan uzaklığı en az 100m olarak belirlenmiştir. UE'ler dört farklı konumda tanımlanmıştır. Bunlar 1 km² (1000m x 1000m) açık alanda sabit duran, sabit hızla yürüyen, rastgele hızla hareket eden taşıt içerisinde yer alan ve 0,25 km² (500m x 500m) alan içerisinde tanımlı bina içerisinde yer alan rastgele konumlarda bulunan kullanıcılarıdır. UE'lerin farklı konumlarda seçilmesi sayesinde farklı ve değişken kanal kaliteleri elde edilmiştir. Tablo 5'te deneylerde belirlenen kullanıcı sayıları dağılımı gösterilmektedir.

Tablo 5. LTE ağında istekte bulunan kullanıcı sayıları

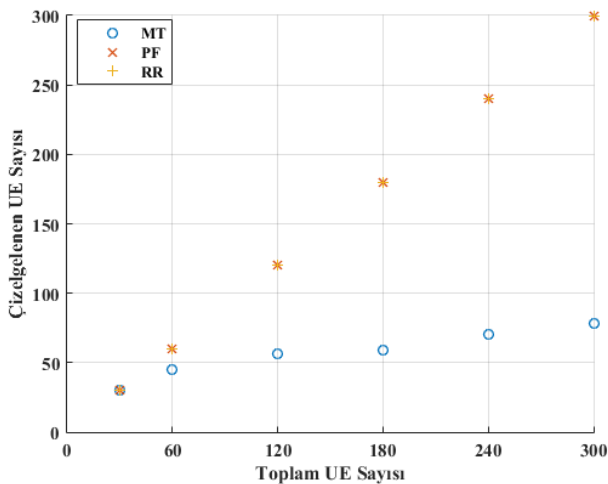
Sabit Duran	Sabit Hızla Yürüyen	Rastgele Hızla Hareket Eden Taşıt	Bina İçerisinde	Toplam Kullanıcı Sayısı
20	2	4	4	30
40	5	8	7	60
80	10	16	14	120
120	15	24	21	180
160	20	32	28	240
200	25	40	35	300

Ns-3 benzetiminde standart ağ altyapılarında ağ paket trafiği oluşturmak için rastgele üretilen paketler kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı video akışını sağlayan paket oluşturma hizmeti bulunmamaktadır. Bu nedenle gerçek zamanlı video akışlarını sağlayacak Evalvid yazılımı Ns-3'e entegre edilerek gerçek zamanlı video akışı sağlanmıştır (ns3programs, 2014). Evalvid, video çerçevelerinin farklı ağlar üzerinden aktarımının önemnin artmasıyla birlikte geliştirilmiş bir yazılımdır (Klaue vd., 2003).

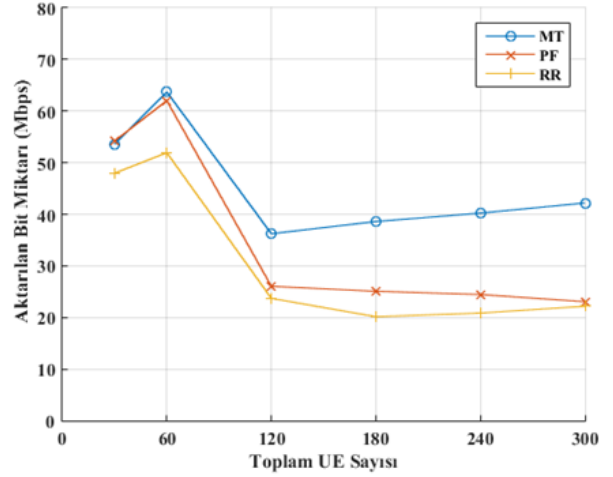
Deneyler, Intel Xeon 2.4 GHz 8 çekirdekli 8 GB belleğe sahip bir iş istasyonu ve Ubuntu 14.1 işletim sistemi bir dizüstü bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanıcıların isteklerine göre sunucu tarafından veri aktarımı sağlanmış ve eNodeB çizelgeleme algoritması olarak RR, PF ve MT çizelgeleme algoritmaları seçilerek farklı kullanıcı sayıları ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 9 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Deneylerin başlangıcında 2 sn'lik süre UE'nin sunucudan istekte bulunması için ayrılmış, deneyin 2,1. sn anında sunucu UE yönünde gelen isteklere cevap vermeye başlamıştır. Deneylerin indirme yönünde veri aktarım süresince 1 ms aralıklarla ağın durumu incelenmiştir.

4.1.1. 720p çözünürlükte videoların iletilmesi

Şekil 6'da göre, 720p çözünürlükte PF, RR ve MT algoritmalarına göre çizelgelenen UE sayıları sunulmuştur.

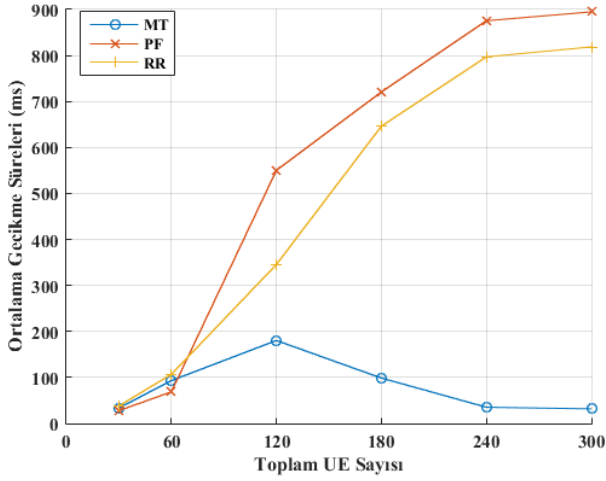
**Şekil 6.** 720p çözünürlüklü video aktarımında PF, RR ve MT algoritmalarına göre çizelgelenen UE sayıları

PF ve RR algoritmalarına göre 720p çözünürlükte yayın yapan sunucu ile iletişim kurabilen tüm UE'lere kaynak ataması gerçekleştirilmiştir. MT algoritmasında tüm UE'ler sunucu ile iletişim kurabilmiş ancak iletişim kuran toplam UE sayısı 30 iken eNodeB'ler tüm UE'lere hizmet verebilmiştir. Diğer durumlarda ise maksimum 78 UE'ye kadar hizmet verilebilmiştir.

**Şekil 7.** 720p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre UE'lere aktarılan bit miktarı

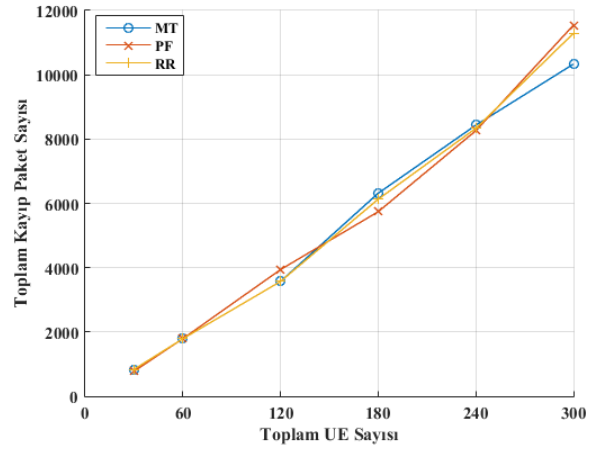
Şekil 7'ye göre, PF algoritması ile 7 sn'lik aktarım sürecinde indirme yönünde UE'lere aktarılan bit miktarı 30 kullanıcıda yaklaşık 54 Mbps, 60 kullanıcıda 62 Mbps değerlerine çıkmış, kullanıcı sayılarının giderek artması ile ortalama 24 Mbps bit hızına kadar azalmıştır. Bu azalmanın sebebi PF algoritmasının istekte bulunan UE'ler arasında veri aktarım miktarlarını eşitlemek için adil bir kaynak ataması yapmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kullanıcı sayısı arttıkça kaynak atama süreleri uzamakta ve buna bağlı olarak UE'lere aktarılan bit miktarlarında azalmalar meydana gelmektedir. UE'lere aktarılması gereken video paketleri kaynak ataması yapılamadığı için PDCP tampon belleğinde kalmakta ve tampon bellek kapasiteleri dolmaktadır. Bu sebeple de PF algoritmasında yüksek kullanıcı sayılarında kayıp paket sayıları da artmıştır. RR algoritmasında ise 30 UE sayısında 47 Mbps, 60 UE sayısında ise 52 Mbps veri aktarımı gerçekleşmiştir. Kullanıcı sayılarının giderek artması ile PF algoritmasına benzer veri aktarımları gerçekleşmiştir. Bu durum RR algoritmasında UE'lere eşit TTI süreleri içinde kaynak atamaları gerçekleştirildiği için kullanıcı sayısı arttığında aynı UE'nin çizelgelenme süresi giderek artış göstermekte ve bu nedenle kaynak atama süresi uzamaktadır. PF ve RR algoritmaları, istekte bulunan kullanıcıların tümüne hizmet vermeye çalışmaktadır. MT algoritması ise genellikle eNodeB'ye yakın olan kanal kalitesi iyi UE'lere hizmet

verdiği için aktarılan bit miktarı diğer algoritmalara göre daha yüksektir ve aktarılan bit miktarında diğer algoritmalara göre daha iyi bit aktarımları gerçekleşmiştir. Ancak hizmet verdiği UE sayısı çok düşüktür.



Şekil 8. 720p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre ortalama gecikme süreleri

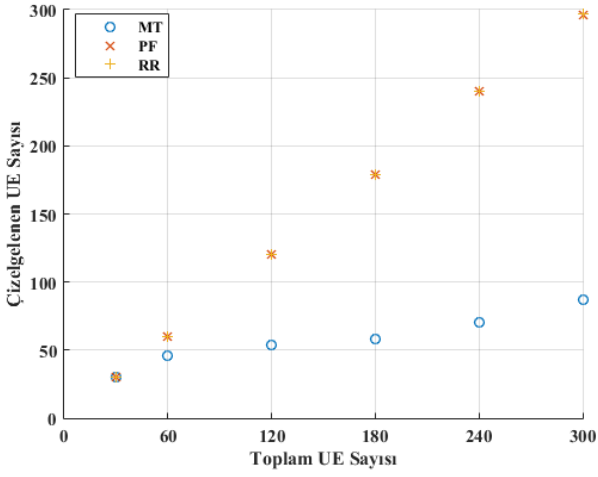
Şekil 8' e göre PF algoritması 30 ve 60 toplam UE sayılarında diğer algoritmalara göre daha düşük gecikme sürelerinde veri aktarımını gerçekleştirebilmiştir. Ancak UE sayılarının giderek artması ile PF algoritması diğer algoritmalara göre daha yüksek gecikme süreleri ile veri aktarımını gerçekleştirebilmiştir. PF algoritmasına göre UE'lere aktarılan verilerdeki gecikmeler, RR algoritmasına göre daha fazla artış göstermiştir. Bu durum PF algoritmasının tüm UE'lere eşit miktarda veri aktarımı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Kullanıcı sayısının artması ile Modülasyon Kodlama Şeması (MCS - Modulation Coding Scheme) değerlerindeki farklılıklar da giderek artmıştır. Bu nedenle PF algoritması MCS değeri düşük olan UE'leri daha çok çizelgelediği için diğer UE'lerin çizelgeleme zamanları uzamıştır. Bu durum da PF algoritmasında daha fazla gecikmenin yaşanmasına sebep olmuştur. MT algoritmasında ise çizelgelenen UE sayısından dolayı diğer algoritmalara göre yaklaşık % 85 oranında daha düşük gecikme süreleri ile veriler aktarılabilmektedir. Ancak çizelgelenemeyen diğer kullanıcılarda açlık durumları oluşmuş ve 7 sn boyunca hiçbir kaynak ataması yapılamamasından dolayı veri aktarımı gerçekleştirilememiştir.



Şekil 9. 720p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre toplam kayıp paket sayıları Şekil 9'da MT, PF ve RR algoritmalarına göre, 720p çözünürlükte indirme yönündeki toplam kayıp paket sayıları gösterilmiştir. Her üç algortmada da 30 UE sayısında bile bazı UE'lere aktarılan paketlerde kayıplar görülmüştür. Düşük kullanıcı sayılarında her üç algortmada da kayıp paket sayıları birbirlerini çok yakındır. Yüksek kullanıcı sayılarında kayıp paket sayıları her üç algortmada artma eğilimi göstermiştir. MT algoritmasında aktarılan bit miktarında ve gecikme sürelerinde diğer algoritmalara göre daha başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen kayıp paket sayıları yaklaşık aynı çıkmıştır. MT algoritmasında sunucudan tüm UE'ler istekte bulunmuş ve sunucu bu UE'lere veri aktarımını gerçekleştirmiştir. Ancak eNodeB tarafında MCS değeri düşük olan UE'lere kaynak ataması yapılamadığı için sunucudan gönderilen paketler PDCP katmanındaki tampon belleklerde kalmış ve bu nedenle kayıp paket sayıları artış göstermiştir. Sunucu tarafından aktarılan ortalama paket boyutları yaklaşık 1400 bayt olarak hesaplanmıştır. Bu paket boyutlarına göre 120 toplam UE sayısı sonrasında kayıp paket sayısı 4000 paketin üzerine çıkmış ve yaklaşık kayıp veri 5 MB değerini aşmıştır.

4.1.2. 1080p çözünürlükteki videoların iletilmesi

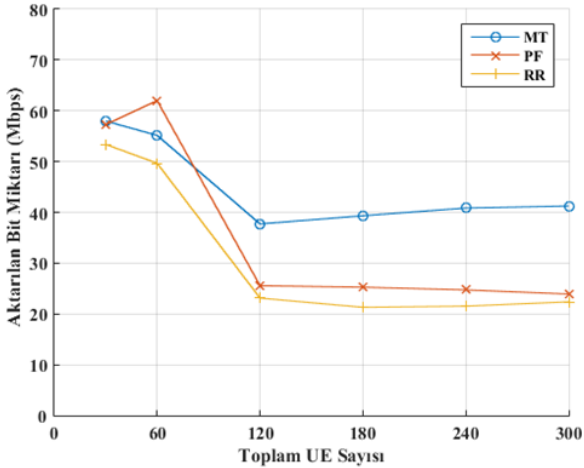
Şekil 10' da, 1080p çözünürlükte PF, RR ve MT algoritmalarına göre çizelgelenen UE sayıları gösterilmektedir.



Şekil 10. 1080p çözünürlüklü videolarda PF, RR ve MT algoritmalarına göre çizelgelenen UE sayıları

Buna göre, PF ve RR algoritmalarında 1080p çözünürlükte sunucu ile iletişim kurabilen tüm UE'lere kaynak ataması yapılmıştır. MT algoritmasında tüm UE'ler sunucu ile iletişim kurabilmiş ancak iletişim kuran UE sayısı 30 iken eNodeB'ler tüm UE'lere kaynak ataması yapmıştır. Diğer durumlarda ise maksimum 87 UE'ye kadar kaynak ataması yapılabilmektedir.

Şekil 11'de MT, PF ve RR algoritmalarına göre, 1080p çözünürlükte sunucudan UE'lere saniyede aktarılan bit miktarları Mbps olarak belirtilmiştir.

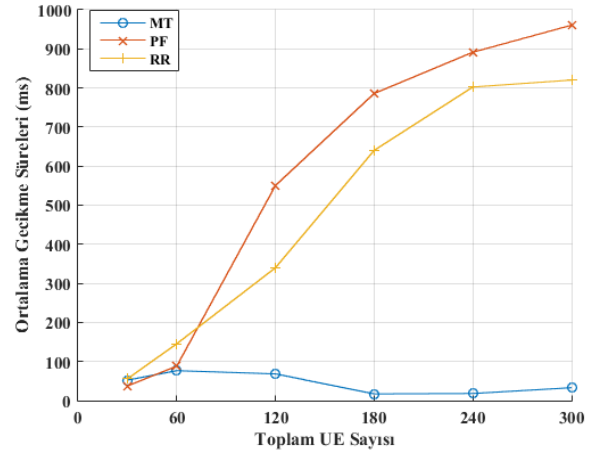


Şekil 11. 1080p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre UE'lere aktarılan bit miktarı

Şekil 11'e göre, PF algoritmasında 30 ve 60 UE sayılarında UE'lere aktarılan bit miktarları sırasıyla yaklaşık 57 Mbps ve 61 Mbps değerine ulaşmıştır. Ancak kullanıcı sayılarının giderek artması ile 23 Mbps bit hızına kadar azalmıştır. RR algoritmasında ise 30 UE sayısında 53 Mbps ve kullanıcı sayılarının giderek artması ile 21 Mbps bit hızına kadar azalmıştır. Bu azalmanın sebebi 720p çözünürlüklü video aktarımlarındaki gibi PF algoritmasının istekte bulunan UE'ler arasında veri aktarım miktarlarını eşitlemek için adil bir kaynak ataması yapmasından,

RR algoritmasında ise kullanıcı sayısı artması ile kaynak atama süresinin uzamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kullanıcı sayısı arttıkça kaynak atama süreleri uzamakta ve buna bağlı olarak UE'lere aktarılan bit miktarlarında azalmalar meydana gelmektedir. Bu algoritmalar istekte bulunan kullanıcıların tümüne hizmet vermeye çalışmaktadırlar. MT algoritması ise genellikle eNodeB'ye yakın olan kanal kalitesi iyi UE'lere hizmet verdiği için yüksek kullanıcı sayılarında aktarılan bit miktarı diğer algoritmalara göre daha yüksektir. Ancak hizmet verdiği UE sayısı çok düşüktür. PF ve RR algoritmalarının yüksek çözünürlüklü video aktarımlarında ve kullanıcı sayılarının artması durumunda UE'lere atanan kaynak sayılarından dolayı vermiş oldukları hizmetler çok fazla değişiklik göstermemektedir. Özellikle toplam UE sayısı 30 iken PF algoritması RR algoritmasına göre %8, MT algoritmasına göre %1 oranında daha fazla veri aktarımı gerçekleştirmiştir. Toplam UE sayısı 60 iken PF algoritması RR algoritmasına göre %20, MT algoritmasına göre %10 oranında daha fazla veri aktarımı gerçekleştirmiştir. Daha yüksek UE sayılarında MT algoritmasının aktardığı bit miktarı çok fazla değişikliğe uğramamasına rağmen RR ve PF algoritmaları birbirlerine yakın bit aktarımları gerçekleştirmiştir.

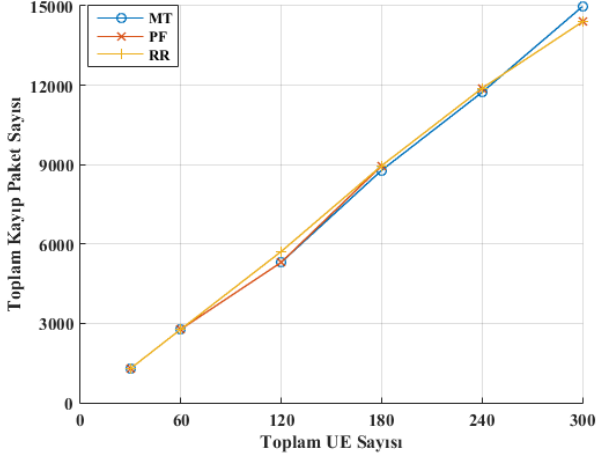
Şekil 12'de MT, PF ve RR algoritmalarına göre, 1080p çözünürlükte sunucudan UE'lere aktarılan verilerin ortalama gecikme süreleri "ms" olarak gösterilmiştir.



Şekil 12. 1080p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre ortalama gecikme süreleri

1080p video aktarımlarında, PF algoritması 30 ve 60 toplam UE sayılarında RR algoritmasına göre daha düşük gecikme sürelerinde veri aktarımını gerçekleştirebilmiştir. Ancak UE sayılarının artması ile PF algoritmaları diğer algoritmalara göre daha yüksek gecikme süreleri ile çalışmıştır. PF ve RR algoritmaları kullanıcı sayılarının giderek artması ile 300ms'nin üzerindeki gecikme sürelerinde veri aktarımını gerçekleştirebilmişlerdir. Ancak istekte bulunan UE sayısının artması ile PF algoritmasına göre yapılan kaynak atamalarında UE'lere aktarılan verilerdeki gecikmeler, RR algoritmasına göre daha fazla artış göstermiştir. Bu durum PF algoritmasının

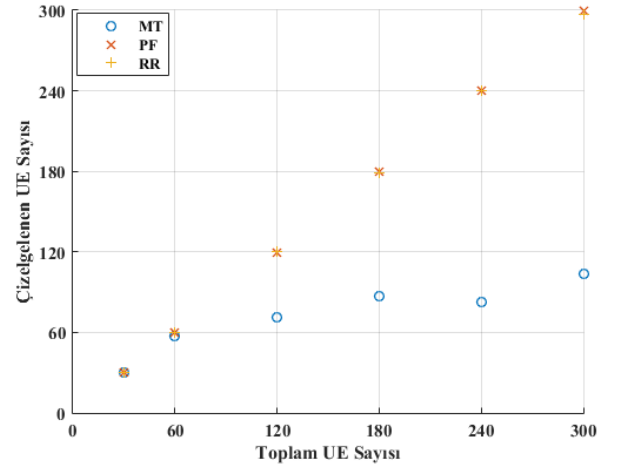
tüm UE'lere eşit miktarda veri aktarımı sağlamasından kaynaklanmaktadır. MT algoritmasında ise çizelgelenen UE sayısından dolayı diğer algoritmalara göre yaklaşık % 91 oranında daha düşük gecikme süreleri ile veriler aktarılabilmektedir. Ancak çizelgelenemeyen diğer kullanıcılarda açlık durumları oluşmuş ve benzetim süresi boyunca hiçbir kaynak ataması yapılamamasından dolayı veri aktarımı gerçekleştirilememiştir.



Şekil 13. 1080p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre toplam kayıp paket sayıları. Şekil 13'te MT, PF ve RR algoritmalarına göre, 1080p çözünürlükte indirme yönündeki toplam kayıp paket sayıları gösterilmiştir. 1080p video aktarımında, her üç algortmada da en düşük UE sayısında bile bazı UE'lere aktarılan paketlerin kayıp sayıları birbirlerine çok yakındır. Yüksek kullanıcı sayılarında kayıp paket sayıları her üç algortmada artma eğilimi göstermiştir. Sunucu tarafından aktarılan ortalama paket boyutları yaklaşık 1400 bayt olarak hesaplanmıştır. Bu paket boyutlarına göre 60 toplam UE sayısı sonrasında kayıp paket sayısı 5000 paketin üzerine çıkmış ve yaklaşık kayıp paket boyutu 8MB, 300 kullanıcıda 20MB değerine ulaşmıştır. Bu durum LTE ağında gerçek zamanlı video aktarımlarında kullanıcı sayılarının giderek artmasıyla ile tıkanıklıklar oluştuğunu göstermektedir. Paket kayıplarının artması, bazı kullanıcılarda video çerçevelerinde atlamalara veya görüntü akışında duraklamalara neden olmaktadır.

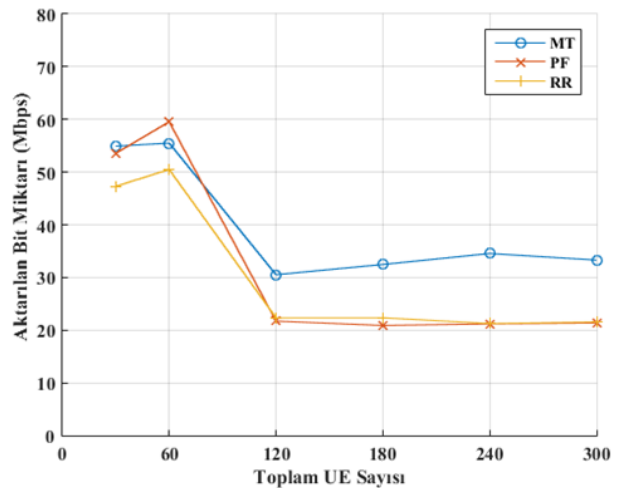
4.1.3. 2160p çözünürlükteki videoların iletilmesi

Şekil 14'te 2160p çözünürlükte PF, RR ve MT algoritmalarına göre çizelgelenen UE sayıları gösterilmektedir. PF ve RR algoritmalarına göre sunucu ile iletişim kurabilen tüm kullanıcılara kaynak ataması yapılmıştır. MT algoritmasında ise UE sayısı 30 iken tüm UE'lere kaynak ataması yapılmış, diğer durumlarda en fazla 104 UE'ye kadar kaynak ataması yapılabilmektedir.



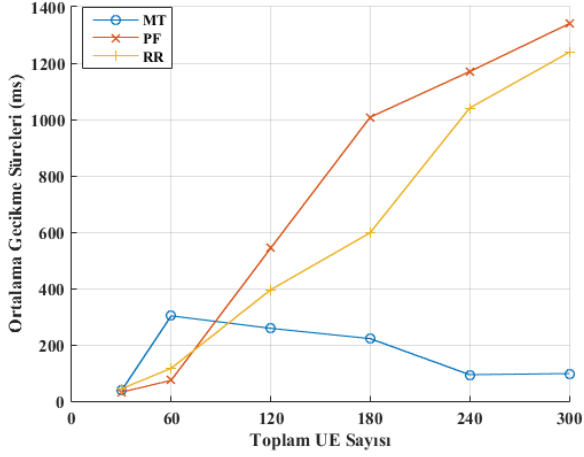
Şekil 14. 2160p çözünürlüklü video aktarımında PF, RR ve MT algoritmalarına göre çizelgelenen UE sayıları

Şekil 15'te MT, PF ve RR algoritmalarına göre, 2160p çözünürlükte sunucudan UE'lere aktarılan toplam bit miktarları gösterilmektedir. Aktarılabilecek video çerçevelerinin boyutlarının artması ile aktarılan bit miktarı PF algoritmasında 30 UE için 53 Mbps, 60 UE sayısında 59 Mbps bit aktarılmış ve kullanıcı sayılarının artması ile aktarılan bit miktarı 25 Mbps bit hızını geçememiştir. RR algoritmasında ise 30 UE için 47 Mbps, 60 UE için 51 Mbps bit hızlarına ulaşmış, ancak kullanıcı sayılarının artması ile PF algoritmasında olduğu gibi aktarılan bit miktarı 25 Mbps bit hızını geçememiştir. 1080p video aktarımlarında da toplam UE sayısı 180 ve üzeri olması durumunda algoritmaların çalışması sonucunda yaklaşık olarak benzer sonuçlar meydana gelmiştir. PF ve RR algoritmalarının yine düşük UE sayılarında daha iyi hizmet verdiği görülmektedir. MT algoritmasında ise sunucudan istekte bulunan kullanıcı sayısı 300 olması durumunda bile toplam 104 UE'ye hizmet vermesinden dolayı aktarılan bit miktarı diğer algoritmalara göre yüksek çıkmıştır. Bu durum MT algoritmasının da düşük kullanıcı sayılarında daha iyi hizmet verdiğini göstermektedir.



Şekil 15. 2160p video aktarımında MT, PF ve RR algoritmalarına göre UE'lere aktarılan bit miktarı

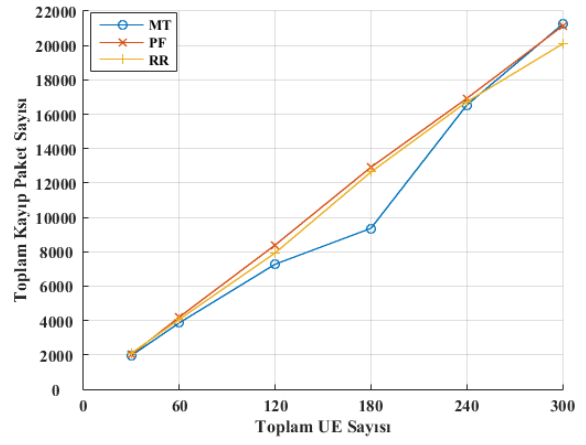
Şekil 16'da PF, RR ve MT algoritmalarına göre, 2160p çözünürlükte sunucudan UE'lere aktarılan verilerin ortalama gecikme süreleri "ms" olarak gösterilmiştir.



Şekil 16. 2160p video aktarımında PF, RR ve MT algoritmalarına göre ortalama gecikme süreleri

2160p çözünürlükte UE sayısı 30 iken PF, RR ve MT algoritmalarında gecikme süreleri birbirlerine çok yakındır. UE sayısı 60 iken PF ve RR algoritmalarındaki gecikme süreleri sırasıyla 73 ve 116 ms iken, MT algoritmasında 302 ms çıkmıştır. 120 UE için ise PF algoritmasındaki gecikme süresi RR algoritmasına göre daha fazla artış göstermiştir. MT algoritmasında ise kaynak atanan UE sayısı düşük olduğu için 120 UE sayısında gecikme süresi diğer algoritmalara göre daha düşüktür. UE sayısı 180 ve üzeri olması durumunda PF algoritmasında RR algoritmasına göre daha fazla gecikme süreleri meydana gelmiştir. MT algoritmasında ise 2160p çözünürlüklü video aktarımı ve yüksek kullanıcı sayılarında gecikme sürelerinde çok fazla değişiklik yaşanmamıştır. Algoritmalara göre ortalama gecikme sürelerinde yoğun bir veri aktarımından dolayı düşük kullanıcı sayılarında bile 1080p video aktarımına göre birbirinden çok farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle algoritmaların yoğun veri aktarımlarında yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Ayrıca yüksek kullanıcı sayılarında PF ve RR algoritmalarında gecikme süreleri 1 saniyenin üzerine çıkmıştır. Bu duruma göre UE taraflarında oynatılan videolarda paket aktarımlarının yetersiz kaldığı için kaynak atamalarında bu algoritmalarda video kaliteleri çok düşük olacaktır.

Şekil 17'de, PF, RR ve MT algoritmalarına göre, 2160p çözünürlükte indirme yönündeki kayıp paket sayıları gösterilmiştir.



Şekil 17. 2160p video aktarımında PF, RR ve MT algoritmalarına göre toplam kayıp paket sayıları

2160p çözünürlükteki kayıp paket sayıları ile 1080p çözünürlükteki kayıp paket sayıları karşılaştırıldığında her üç algortmada da yine en düşük UE sayısında bile bazı UE'lere aktarılan paketlerde kayıplar görülmüştür. Düşük kullanıcı sayılarında her üç algortmada da kayıp paket sayıları birbirlerine çok yakındır. Yüksek kullanıcı sayılarında kayıp paket sayıları her üç algortmada artma eğilimi göstermiş 2160p çözünürlükteki artış oranı yaklaşık 1080p göre %33 daha fazla olmuştur. Yüksek kullanıcı sayılarında PF ve RR algoritmalarında toplam kayıp paket sayıları birbirlerine çok yakındır. Sunucu tarafından aktarılan paket boyutları ortalama 1380 bayt olarak hesaplanmıştır. Bu paket boyutlarına göre 120 toplam UE sayısında kayıp paket sayısı yaklaşık 8000 paket ve yaklaşık kayıp veri miktarı 10,5 MB değerine ulaşmıştır. Toplam UE sayısı 300'e ulaştığında kayıp paket boyutları 26,3 MB değerinin üzerine çıkmıştır. Bu duruma göre LTE ağında 2160p çözünürlükte video aktarımlarında tıkanıkların arttığı ve bu video çözünürlüğünde çizelgeleme algoritmalarının yetersiz kaldığı gözlenmiştir.

5. Tartışma ve Sonuç

Mevcut algoritmaların 720p, 1080p ve 2160p çözünürlükteki video aktarımlarındaki karakteristik özelliklerine bakıldığında düşük kullanıcı sayılarında daha etkin bir şekilde hizmet vermektelerdir. Ancak UE sayılarının artması ile ortalama gecikme sürelerinde ve kayıp paket sayılarında artışlar olmuştur. Bu durum, PF algoritmasının kaynak atamalarında her UE'nin eşit miktarda veri almasını amaç edinmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle UE sayılarının artması ve kanal kalite durumlarının değişmesi UE'ler arasındaki geç kaynak atamasında gecikmelere neden olmuştur. Bu nedenle kullanıcı sayısı artması durumunda PF algoritmasında diğer algoritmalara göre daha fazla gecikme süreleri yaşanmıştır. RR algoritmasında ise eşit TTI sürelerinde kaynak ataması yapıldığı için yüksek kullanıcı sayılarında yüksek paket gecikme süreleri yaşanmıştır. RR ve PF algoritmaları kullanımı

durumunda, artan kullanıcı sayısı ile yaklaşık olarak aynı gecikme süreleri gözlemlenmiştir. Bu duruma göre yüksek kullanıcı sayısı ve gerçek zamanlı video aktarımlarında algoritmaların çizelgeleme özellikleri birbirleri ile yaklaşık aynı olmaktadır. MT algoritmasının ise sadece 30 UE sayısında daha iyi hizmet verdiği gözlemlenmiştir. Ancak bir UE'ye kaynak atamasının, MCS değeri yüksek olan UE'lere paket aktarımları tamamlandıktan sonra yapılabileceği görülmüştür.

Teşekkür

4443-D1-15 numaralı proje ile desteklenen bu çalışmada Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne teşekkür ederiz.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

3GPP TS 36.213, 2010. Physical layer procedures (Release 9). European Telecommunications Standards Institute-3GPP,France.

3GPP TS 36.3 .321, 2015. Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 12). European Telecommunications Standards Institute-3GPP, France.

Abdelhadi, A. ve Clancy, C., 2015. An optimal resource allocation with joint carrier aggregation in 4G-LTE. International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 16-19 February, USA, 138-142.

Al Tamimi, A., SoIn, C. ve Jain, R., 2010. Modeling and resource allocation for mobile video over WiMAX broadband wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,28(3),354-365.

Alreshoodi, M., Adeyemi-Ejeye, A. O., Walker, S. D. ve Woods, J., 2015. Fuzzy logic inference system-based hybrid quality prediction model for wireless 4kUHD H.265-coded video streaming. IET Networks, 4(6), 296-303.

Assaad, M., 2008. Frequency-Time Scheduling for streaming services in OFDMA systems. 1st IFIP Wireless Days, 24 - 27 November, Dubai, United Arab Emirates, 1-5.

Castanho, M. A. M., 2015. Analysis and optimisation of video transmission in LTE networks. Tecnico Lisboa University, M. Sc. Thesis, 2015, Portugal.

Cisco, 2016. VNI Global Fixed and Mobile Internet Traffic Forecasts, USA, Erişim Tarihi: 10.01.2016, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni>

Cox, C., 2012. An Introduction to LTE. John Wiley & Sons, Ltd,337p, Chichester, UK.

Dahlman, E., Parkvall, S. ve Sköld, J.,2013. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. WILEY, 447, UK.

Deniz, C., 2015. The Republic Of Turkey Performance Evaluation Of The Lte Downlink Scheduling Algorithms. Bahçeşehir University. M.Sc Thesis, İstanbul

Ersoy, M., 2017. LTE Teknolojilerinde Tıkanıklık Tahminlerine göre Gerçek Zamanlı ve Yüksek Çözünürlüklü Video Aktarımı. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye.

Kela, P., Puttonen, J., Kolehmainen, N., Henttonen, T., Moisio, M. ve Rinne, M., 2008. Mixed traffic packet scheduling in UTRAN Long Term Evolution Downlink. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 15 - 18 Sep, Cannes, France, 1-5.

Kim, W., Park, G. S. ve Song, H., 2015. An effective cross-layer designed packet scheduling, call admission control, and handover system for video streaming services over LTE network. Journal of Visual Communication and Image Representation, 31, 335-346.

Klaue, J., Rathke, B. ve Wolisz, A., 2003. Evalvid-A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation. 13th International Conference, TOOLS 2003, 2-5 September, IL, USA, 255-272.

Lin, Y. ve Yue, G., 2008. Channel-Adapted and Buffer-Aware Packet Scheduling in LTE Wireless Communication System. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 12 - 14 October, Africa, 1-4.

Luo,H.,Ci,S., Wu,D., Wu, J.veTang, H.,2010.Quality-driven cross-layer optimized video delivery over LTE.IEEE Communications Magazine,48(2),102-109.

Monghal, G., Pedersen, K. I., Kovács, I. Z. ve Mogensen, P. E., 2008. QoS oriented time and frequency domain packet schedulers for the UTRAN long term evolution. IEEE Vehicular Technology Conference, 21 - 24 September, Marina Bay, Singapore. 2532-2536.

- ns3programs., 2014. Install Evalid In Ns3. ns3 Code. Erişim Tarihi:19.12.2015 <http://ns3-code.com/install-evalid-in-ns3/>.
- Ns3tutorial., 2016. NS - 3 LTE Module. ns-3. Erişim Tarihi: 01.01.2016 <https://www.nsnam.org/docs/release/3.24/modules/html/lte-design.html#fig-epc-topology>.
- Qian, Y., Ren, C., Tang, S. ve Chen, M., 2009. Multi-service QoS guaranteed based downlink cross-layer resource block allocation algorithm in LTE systems. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, 13 - 15 November, Nanjing, China, 978-982.
- Park, J., Hwang, S. ve Cho, H.-S., 2007. A Packet Scheduling Scheme to Support Real-Time Traffic in OFDMA Systems. IEEE 65th Vehicular Technology Conference, 22-25 April, Dublin, Ireland, 2766-2770.
- Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., Fortuna, R. ve Camarda, P., 2011. Two-Level Downlink Scheduling for Real-Time Multimedia Services in LTE Networks. IEEE Transactions on Multimedia, 13(5), 1052-1065.
- Stefania, S., Issam, T. ve Matthew, B., 2009. LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice. A John Wiley and Sons, Ltd, 6., 6136-144,.
- Vergados, D. J., Michalas, A., Sgora, A. ve Vergados, D. D., 2012. An Adaptive Video Transmission Algorithm to Improve Quality of Experience over LTE Access Networks. 16th Panhellenic Conference on Informatics, 5-7 October, Piraeus, Greece, 240-244.
- Viridis, A., Stea, G. ve Nardini, G., 2014. SimuLTE-A Modular System-level Simulator for LTE/LTE-A Networks based on OMNeT+. proc. of SimulTech. Erişim Tarihi: 25.06.2015, [http://info.iet.unipi.it/~stea/papers/SimulTech14_20140625 CR.pdf](http://info.iet.unipi.it/~stea/papers/SimulTech14_20140625_CR.pdf)