

Video İçeriği için Cihazdan Cihaza Önbellekleme Device-to-Device Caching for Video Streaming Content

Koray Necip Aytaç, Tolga Girici, Ayşe Melda Yüksel
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara, Türkiye 06561
Email: {knaytac,tgirici,yuksel}@etu.edu.tr

Ali Telli, Murat İlter Köksal
Havelsan A.Ş.
Ankara, Türkiye 06561
Email: {atelli,mikoksal}@haveşsan.com.tr

Özetçe—5G'nin önceki nesil mobil iletişim sistemlerine göre getirdiği bir yenilik hızlı ve etkin şekilde zengin medya ve video içerik bilgisine erişime olanak sağlamasıdır. Diğer yandan 5G mevcut teknolojiye göre çok daha düşük gecikme ile yüksek veri hızı sağlamayı vaat etmektedir. Bunu mümkün kılacak tekniklerden biri popüler içeriklerin baz istasyonu veya mobil terminal ön belleklerinde tutulup talep edenlere düşük gecikmeyle iletilmesidir. Bu ön çalışmada içerik sunucusu, çekirdek ağ ve radyo erişim ağından oluşan bir benzetim modeliyle mobile cihazlarda video önbelleklemenin faydaları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler—5G, önbellekleme, mobil ağlar, cihazdan cihaza haberleşme, video yayını

Abstract—The novelty of 5G with respect to former generation mobile networks is to provide fast and effective access to rich media and video content information. On the other hand, 5G promises to provide very low latency and very high datarate with respect to current technology. One of the methods that makes this target possible is to store popular contents at the caches of base station and mobile terminals and then to transmit to the demanding users with a low latency. In this paper we constructed a simulation model consisting of a content server, core network and radio access network in order to quantify the benefits of video content caching.

Keywords—5G, caching, mobile networks, D2D(device to device), video streaming.

I. GİRİŞ

2015 yılı verilerine göre kablosuz trafiğin %66'sını video, %21'ini de web/veri iletimi oluşturmaktadır [1]–[3]. İnternete bağlı akıllı telefon ve tabletlerin kullanımının artmasıyla, kablosuz trafik yüksek bir hızla artmaya devam edecektir. 2020 yılı için tahmin edilen toplam kablosuz trafik 127 exabyte kadardır ve bunun 16 exbaytı video trafiğidir [1]. Kullanıcılar, çoğunlukla aynı popüler haber, müzik ve video bilgisini talep etmekte, fakat talepler farklı zamanlarda gerçekleşmektedir. Bu eş zamansızlık, aynı bilginin sistemde defalarca iletilmesine ve sistemin gereksiz tıkanmasına neden olmaktadır. Önbellekleme metodu, küçük baz istasyonlarında veya son kullanıcılarda bu popüler bilgilerin depolanmasını önermektedir.

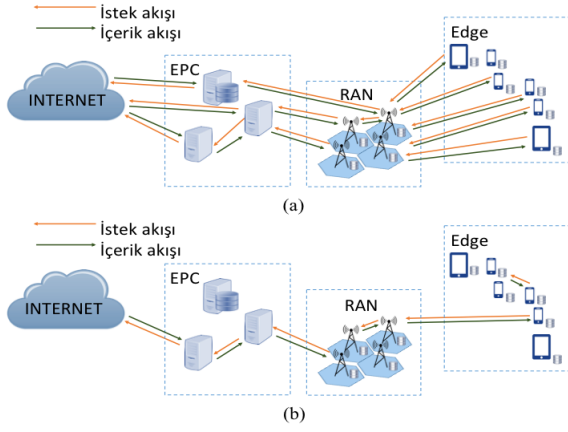
Kullanıcı ve baz istasyonundaki önbellekte verinin işlenmesi/depolanması literatürde mobile edge computing (MEC)

veya fog computing (FOG) olarak bilinmektedir [4]. 5G sistemlerde, MEC/FOG teknolojisini de kullanarak, önbellekleme ile verinin gerçek zamanlı olarak etkin şekilde işlenmesi/paylaşılması hedeflenmektedir [5]. Bu paylaşım sağlanırken iki yöntem üzerinde durulabilir: (i) küçük hücre baz istasyonlarının kullanılması ve (ii) mobil kullanıcı cihazlarının önbelleklerinin kullanılması. Bu sağlandığında, şebeke üzerindeki backhaul yükü azalacak, kullanıcılar daha az gecikmeyle içeriğe ulaşabilecekler, kullanıcılardaki atıl bellek kapasitesi verimli olarak değerlendirilmiş olacaktır. Radyo erişim ağı-çekirdek ağ veya çekirdek ağ-internet arasındaki veri trafiği azaltılmış olacaktır. Dolayısıyla, içerik sunucuları üzerindeki trafik de azalacaktır. Özellikle dinamik içerikli video iletimi için (önbellekte tutulmayan tüm veriler, ör: live video streaming, video on demand) bu yöntemlerin uygulanması planlanmaktadır.

Cihazdan cihaza (Device-to-Device – D2D) haberleşme, 5G'nin önemli bileşenlerinden biri olmaya adaydır. Bu teknoloji ile birbirine yakın olan kullanıcılar baz istasyonu üzerinden değil, doğrudan iletişim kurabilmektedir. D2D iletişim sayesinde, önbellekleme için yukarıda bahsedilen mobil kullanıcıların önbelleklerinin kullanılması da mümkün olacaktır. Kullanıcılar video içeriğini baz istasyonu yerine bu içeriği önbelleklemiş diğer bir kullanıcıdan doğrudan alabilecektir. Bu sayede baz istasyonu ve çekirdek ağın yükü önemli ölçüde azalacaktır.

Önbellekleme olmadığı durumdaki ağ trafiği modeli Şekil 1 (a) ile önbellekleme olduğu durumdaki ağ trafiği modeli ise Şekil 1 (b) ile gösterilmiştir. Şekilde gösterilen durumda mobil kullanıcıların önbellekleri de kullanılmakta ve cihazdan cihaza haberleşme de gerçekleşmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi ön bellekleme yapılan durumda ağ trafiği, yapılmayan durumdakine göre oldukça azalmaktadır.

Literatürde D2D iletişim ve önbelleklemeyi beraber ele alan çalışmalar büyük çoğunlukla küçük/büyük baz istasyonları ve onlara bağlı kullanıcıları ele almış ve çekirdek ağı dikkate almamışlardır. Yine bu çalışmalarda benzetim modellerinde gerçekçi bir kullanıcı etkinliği (ör. Kullanıcı etkinlik süresi, video trafiği vs.) modellenmemiştir. Bu çalışmalarda içeriklerin cihaz ön belleklerine yerleşimi genellikle bir optimizasyon problemi olarak [6], [7] veya performans analizi için ele alınmıştır [8], [9]. Diğer taraftan ön belleklemeyi, çekirdek ağı dikkate alıp sistem seviyesinde inceleyen çalışmalar da



Şekil 1: Önbellekleme (a) olmadığında ve (b) olduğunda ağ trafiğinin akışı. EPC: evolved packet core, RAN: radio access network, Edge: edge terminals.

olmuştur [10], [11]. Ancak bu çalışmalarda da D2D iletişim ele alınmamıştır.

Bu bildiriye mümkün olduğu kadar gerçekçi bir benzetim modeli kurularak, önbelleklemenin sistem maliyetinde sağladığı azalma ölçülmüştür. Bunun yanı sıra cihaz seviyesinde önbellekleme ve D2D iletişimin hangi durumlarda maliyette ekstra azalma sağladığı gözlemlenmiştir.

II. SİSTEM MODELİ

Sistem modelinde kullanıcılar, onların bağlı olduğu ve birbiriyle haberleşebilen baz istasyonları, baz istasyonlarını sisteme bağlayan bir çekirdek ağ ve son olarak kullanıcılara içerik sağlayan içerik sunucuları düşünülmüştür. İçerikler, kullanıcılarda, baz istasyonlarında, çekirdek ağda ve doğal olarak içerik sunucularında tutulabilmektedir. Sabit Önbellekleme (EPC/RAN) işlemi trafiğin az olduğu saatlerde yapılmaktadır. İçerik sağlama süreci aşağıdaki gibi olmaktadır:

- 1) Bir içeriği talep eden kullanıcı eğer bu içerik kendi önbelleğinde yoksa bağlı olduğu baz istasyonundan talep etmektedir
- 2) İçerik aynı baz istasyonuna bağlı yakın bir başka kullanıcının ön belleğinde ise D2D iletim ile elde edilmektedir.
- 3) D2D iletişim imkanı yoksa ve içerik baz istasyonunun ön belleğinde bulunuyorsa baz istasyonu içeriği sağlar.
- 4) İçerik baz istasyonunda da yoksa aynı bölgedeki başka baz istasyonunun önbelleğinden elde edilmeye çalışılır. Burada baz istasyonları arasındaki X2 iletişim hattı kullanılır [10].
- 5) İçerik çevre baz istasyonlarında da yoksa Çekirdek Ağ'da (Evolved Packet Core - EPC) bulunan ön belleğe bakılır.
- 6) İçerik EPC ön belleğinde de yoksa içerik sunucusundan elde edilir.

Yukarıda belirtilen aşamalar ilerledikçe sistemde daha fazla bant genişliği maliyeti oluşur. Örneğin, i numaralı baz istasyonundan EPC ön belleğine bant genişliği maliyeti c_i , EPC'den içerik sunucusuna bant genişliği maliyeti c_0 , ve son olarak i ve

j numaralı Baz istasyonları arasındaki haberleşmenin maliyeti $c_{i,j}$ 'dir [10]. Bir baz istasyonu içeriği kendisi önbelleklemişse, bu içerik talep edildiğinde $c_0 + c_i$ maliyet tasarrufu sağlanır. İçeriği bir komşu Bİ'den temin ederse $c_0 + c_i - c_{i,j}$ maliyet tasarrufu sağlanır. Bu çalışmamızda bu modele D2D iletim de eklenmiştir. İçeriğin komşu bir cihazda bulunması durumunda ekstra c_d maliyet tasarrufu oluşur. Benzetimlerde bant maliyetleri [10] makalesinden alınmıştır.

III. ÖN BELLEKLEME TEKNİKLERİ

Aşağıdaki teknikler baz istasyonu (Bİ) ve Evolved Packet Core (EPC) gibi sabit önbelleklerin yönetimi için [10]'de önerilmiştir.

A. EPC ve RAN Önbellekleme

- PF (Popularity First): Her sabit önbellek kendi popülerlik ölçümüne göre en popüler içerikleri belleği yettiği kadarıyla tutar.
- MH (Maximum Hit): Her Bİ önbelleği iki kısma ayrılır. İlk kısımda (%60) içerikler yerel popürlüğe göre belirlenir. EPC önbelleği ise geriye kalan en popüler içeriklerin hafızası yettiği kadarını tutar. Bİ'lerindeki ikinci kısımda (%40) ise işbirlikli olarak geriye kalan bütün içerikler tutulur. Geriye kalan her bir içerik sadece bir tane önbellekte yer alacak şekilde önbellekleme yapılır.
- OC (One copy only): Bu yöntemde her içerik en fazla bir sabit önbellekte tutulur. En popüler içerik EPC önbelleğinde tutulur. Bİ'lerinin önbellekleri dolduğunda EPC önbelleği geriye kalan içerikleri (hafızası yettiği kadar) tutar.

B. D2D Önbellekleme

Cihazların önbellekleri bağlı buldukları baz istasyonu tarafından yönetilebildiği gibi her cihaz kendi önbelleğini bağımsız olarak da yönetebilir. Bir cihazın önbelleği sadece bir veya birkaç video alacak kapasitededir. Her bir cihazın önbelleği p olasılıkla kullanılmaktadır. Benzetimlerde p parametresinin etkileri incelenmiştir. Çalışmamızda aşağıdaki önbellekleme yöntemleri ele alınmıştır:

- En son indirilen içerik (E): İlk başta hiçbir kullanıcı önbelleğinde içerik yoktur. Daha sonra her kullanıcı en son talep ettiği videoyu önbelleğinde tutar.
- İndirilmiş en popüler içerik (P): İlk başta hiçbir kullanıcı önbelleğinde içerik yoktur. Daha sonra her kullanıcı o ana kadar indirmiş olduğu en popüler videoyu önbelleğinde tutar. Burada video popülaritesi kullanıcının bağlı olduğu baz istasyonu tarafından elde edilen verilere göre belirlenir.

Yukarıdaki yöntemlerden farklı olarak kullanıcı önbelleği kullanıcının bağlı olduğu baz istasyonu tarafından da yönetilebilir. Trafiğin az olduğu zamanlarda belli popüler içerikler belli kullanıcılara iletilip önbelleklerine yüklenmeleri sağlanabilir. Bu tür yöntemler gelece çalışmalarının konusudur.

IV. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmalarında 7 altıgenen oluşan hücreli bir düzen varsayılmıştır. Her bir altıgenin merkezinde bir baz istasyonu bulunmakta ve her bir kullanıcı en yakın baz istasyonuna bağlanmaktadır. Sistemde çok sayıda potansiyel kullanıcı vardır ve bu kullanıcılar belli bir olasılıksal sürece göre aktif ve pasif duruma geçmektedir. Aktif kullanıcılar belli bir olasılıksal sürece göre video taleplerinde bulunmaktadır. Benzetim parametreleri Tablo I'de gösterilmiştir. Bir benzetim

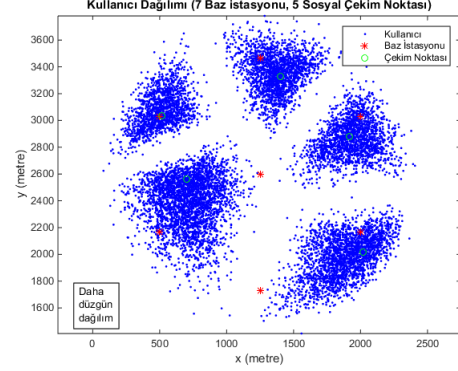
TABLO I: BENZETİM PARAMETRELERİ

Baz İstasyonu Sayısı	7
Hücre yarıçapı	500 metre
D2D kapsama alanı	50 metre
Toplam Potansiyel Kullanıcı Sayısı	10500
Sosyal Çekim Noktası Sayısı	5
Video talep sayısı	100000
Video Sayısı	10000
Video popülerite dağılımı	Zipf $\alpha = 0.8$
Video Büyüklüğü	$Uniform[50 - 400]MB$
Video hızı	2 Mbps (HD), 200 kb/sn (QVGA)
EPC Önbellek Büyüklüğü	450GB
Baz İstasyonu Önbellek Büyüklüğü	13.5GB
Cihazın Önbellek Büyüklüğü	1 video
Birim Maliyet/sn (Sunucu-EPC)	$c_0 = 12$,
Birim Maliyet/sn (EPC-Bİ)	$c_i = 10$,
Birim Maliyet/sn ($BI_i - BI_j$)	$c_{ij} [2, 18] \text{arası}$ <i>Brastgele</i>
Birim Maliyet/sn (Bİ-cihaz)	$c_d = 8$
Kullanıcı geliş süreci	Poisson (geliş hızı 1 kullanıcı/sn)
Kullanıcı aktif süresi	Üssel, ortalama 50dk
Kullanıcı Talep süreci	Poisson, ort. 400sn/de bir
Maks Bantgenişliği	$U_{max} = 216Mb/sn$
Cihazın önbellekleme olasılığı	$p = 0.2 - 1.0$
Zaman dilimi	1 sn

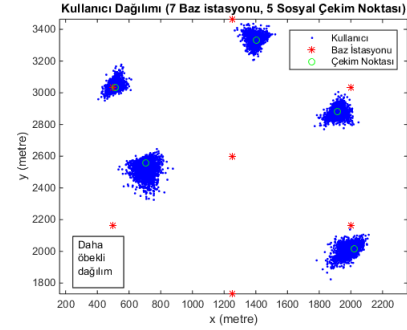
100 bin video talep edilene kadar sürdürülmüştür. Baz istasyonu kullanıcı arasındaki iletişim için bir toplam bant genişliği kısıtı tanımlanmamıştır. Tanımlanan 216 Mb/sn bant genişliği kısıtı baz istasyonları arasındaki X2 arayüzlü iletişim içindir. EPC, baz istasyonları ve kullanıcılar için önbellek kapasitesi tanımlanmıştır. Bir cihazın önbellekleme olasılığı (p) bir simülasyon parametresidir. Video içeriklerinin her biri eşit olasılıkla yüksek kalite (HD) ve QVGA olabilmektedir. İçerik sunucusu-EPC, EPC-baz istasyonu, baz istasyonları arası iletişim ve baz istasyonu kullanıcılar arası iletişim için bant genişliği maliyeti tanımlanmıştır. Bu maliyetler [10] makalesinden alınmıştır. Daha gerçekçi maliyetler gelecek çalışmalarda araştırılacaktır. Benzetimlerde önbellek kullanımı sonucu maliyet azalması ölçülmektedir. Örneğin bir kullanıcı içeriği kendi baz istasyonundan elde ederse $c_0 + c_i = 12 + 10 = 22$ birim/bit maliyet azalması (tasarufu) olmaktadır. İçerik D2D iletişim ile elde edilirse ekstra $c_d = 8$ birim daha tasarruf olmaktadır.

Sistemde toplam 10500 kullanıcı mevcuttur. Kullanıcılar bir olasılıksal sürece göre aktif ve pasif durumda olmaktadır. Aktif olan kullanıcılar belli bir olasılıksal sürece göre video isteğinde bulunmakta ve civarda istekte bulunan kullanıcılara önbelleklerdeki videoyu gönderebilmektedirler. Literatürdeki çalışmalarda genellikle kullanıcılar alana rastgele düzgün dağılmaktadırlar. Ancak bu gerçekçi olmayabilir. Biz bu çalışmada [12] çalışmasındaki gibi hücreli alanda belli sayıda (5 adet) sosyal çekim noktasını (İng. Social Attractor) rastgele konumlandırdık. İlk aşamada bütün kullanıcılar düzgün dağılımla dağıtıldı. Daha sonra her kullanıcı kendisine en yakın çekim noktasıyla eşleştirildi ve o noktaya doğru yaklaştırıldı. n kullanıcısının bağlı olduğu çekim noktası s_n

olsun ve bu kullanıcının koordinatı U_n, s_n 'nin koordinatı U_{s_n} olsun. Kullanıcının yeni konumu $U_n^{yeni} = \beta_n U_{s_n} + (1 - \beta_n) U_n$ olarak değiştirilmiştir. Burada $\beta_n, \mathcal{N}(\mu_\beta, \sigma_\beta^2)$ dağılımıdır. Ortalama $\mu_\beta \in [0, 1]$ arasında bir sayıdır. Standart sapma σ_β ise $0 \leq \beta_n \leq 1$ olacak şekilde belirlenir. [12]. Sonuçta oluşan örnek bir kullanıcı dağılımı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: 7 Baz İstasyonu ve 5 Sosyal Çekim Noktası olduğunda kullanıcı dağılımı. μ_β parametresi 0 olarak alınmıştır. Kırmızı olanlar baz istasyonu, mavi yuvarlaklar ise sosyal çekim noktalarıdır.

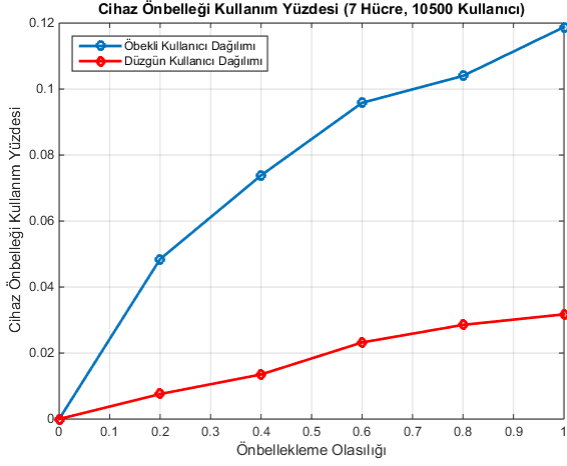


Şekil 3: 7 Baz İstasyonu ve 5 Sosyal Çekim Noktası olduğunda kullanıcı dağılımı. μ_β parametresi 0.8 olarak alınmıştır. Kırmızı olanlar baz istasyonu, mavi yuvarlaklar ise sosyal çekim noktalarıdır.

A. Benzetim Sonuçları

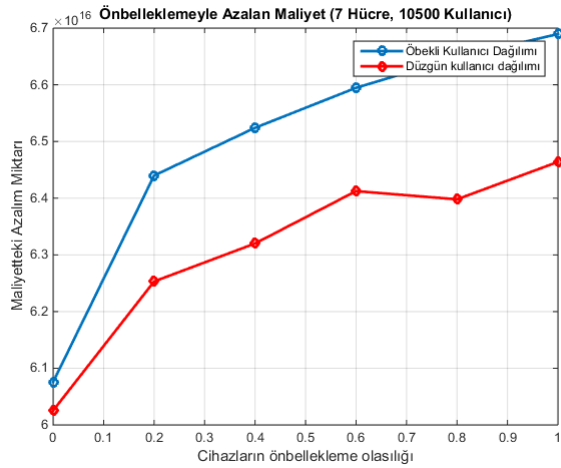
Bu ön çalışmada sabit (EPC, Bİ) önbellekleme için Popularity First (PF) kullanılmıştır. Her sabit önbellek, kendi ölçümüne göre en popüler videoları hafızası yettiği kadarıyla önbelleğinde tutar. Her kullanıcı ise en son indirdiği içeriği önbelleğinde tutar. Kullanıcı bir p olasılığıyla önbellekleme yapmaktadır. Böylece önbellekleme yoğunluğuna göre maliyet azalması incelenmiştir. Şekil 4'e göre kullanıcı önbellekleme olasılığı arttıkça D2D iletişim fırsatlarının arttığı görülmektedir. Bütün kullanıcılar önbellekleme yaptığında toplam iletişimin %12'sinin D2D iletimler olduğu görülmektedir. Böylece cihazlarda önbellekleme ve D2D iletişim teknolojisinin bant genişliği maliyetini ciddi oranda azaltabileceği görülmüştür.

Şekil 5'e göre kullanıcı önbellekleme olasılığı arttıkça bant genişliği maliyetinde daha fazla azalma görülmektedir. Bütün



Şekil 4: Toplam iletimin içindeki D2D iletim sayısı D2D önbellekleme olasılığı ile artış göstermektedir.

cihazlar önbellekleme işlemine katıldığında maliyette %14 daha ekstra tasarruf yapılabildiği görülmektedir.



Şekil 5: D2D önbellekleme olasılığının artması bant genişliği maliyetini azaltmaktadır.

Kullanıcılar belli noktalarda yoğunlaşmayıp alana düzgün rastgele dağıldığında kazanç çok daha az olmaktadır. Bunun sebebi düzgün dağılımda D2D iletişim (mesafenin 50 metreden az olması) fırsatının çok daha az oluşmasıdır. D2D önbellekleme ve iletişimin stadyumlar, konser salonları, şehir meydanları, AVM'ler gibi sosyal çekim noktalarında daha fazla işe yarayacağı değerlendirilmektedir. Diğer bir başarımlı ölçütü ise önbelleklerden karşılanabilen isteklerin yüzdesidir. Yapılan benzetimlerin bu haliyle D2D iletişimin bu yüzdeyi etkilemediği görülmüştür.

V. SONUÇ

Bu çalışmada geliştirilmiş paket çekirdeği (EPC), radyo erişim ağı (RAN) ve çok sayıda kullanıcı cihazın olduğu bir sistemde önbelleklemenin (caching) faydaları değerlendirilmiştir. Yapılan benzetimler sonucu, önbellekleme yapan kullanıcı

yoğunluğu arttıkça EPC ve RAN bant genişliği maliyetinde azalma olduğu görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda benzetimler daha fazla baz istasyonu ve kullanıcı sayısı için yapılacaktır. Kullanıcı dağılımı için daha gerçekçi modeller araştırılacaktır. Yukarıda bahsedilen önbellekleme modelleri benzetim ortamına aktararak maliyet ve önbelleklerden karşılanabilen istek yüzdesini daha fazla geliştirecek önbellekleme yöntemleri araştırılacaktır. Cihazlardaki atıl belleklerin toplamı büyük bir kapasiteye işaret etmektedir. Diğer yandan, her kullanıcının kendi yakın çevresinin isteklerini karşılayabilir. Bu hafıza kapasitesini doğru önbellek yönetimi ile kullanmak ve doğru bir iş modeli oluşturmak ağ yükünü ve bant genişliği maliyetini önemli ölçüde azaltabilir. Son olarak, cihazlarda önbellekleme ve D2D iletişimin servis sağlayıcı yatırım ve işletme giderlerine etkisi de incelenmeye değerdir.

TEŞEKKÜR

Koray Necip Aytaç ve Tolga Girici'nin araştırmaları Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Araştırma projeleri programı 215E123 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] UMTS, "Mobile traffic forecasts 2010-2020," *UMTS Forum*, vol. Jan, no. 44, pp. 1-10, 2011.
- [2] C. Liang and F. R. Yu, "Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 358-380, 2015.
- [3] X. Wang, M. Chen, T. Taleb, A. Ksentini, and V. Leung, "Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 131-139, 2014.
- [4] F. Malabocchia, R. Corgioli, M. Martina, A. Detti, B. Ricci, and N. Blefari-Melazzi, "Using information centric networking for mobile devices cooperation at the network edge," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015 IEEE 81st*. IEEE, 2015, pp. 1-6.
- [5] C. Liang, F. R. Yu, and X. Zhang, "Information-centric network function virtualization over 5G mobile wireless networks," *IEEE Network*, vol. 29, no. 3, pp. 68-74, 2015.
- [6] M. Gregori, J. Gomez-Vilardebo, J. Matamoros, and D. Gunduz, "Wireless content caching for small cell and D2D networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 5, pp. 1222-1234, May 2016.
- [7] L. Zhang, M. Xiao, G. Wu, and S. Li, "Efficient scheduling and power allocation for D2D-assisted wireless caching networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 6, pp. 2438-2452, June 2016.
- [8] C. Yang, Y. Yao, Z. Chen, and B. Xia, "Analysis on cache-enabled wireless heterogeneous networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 131-145, Jan 2016.
- [9] M. Ji, G. Caire, and A. F. Molisch, "Wireless device-to-device caching networks: Basic principles and system performance," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 1, pp. 176-189, Jan 2016.
- [10] S. Ren, T. Lin, W. An, G. Zhang, D. Wu, L. N. Bhuyan, and Z. Xu, "Design and analysis of collaborative EPC and RAN caching for LTE mobile networks," *Computer Networks*, vol. 93, pp. 80-95, 2015.
- [11] T. Lin, H. Li, H. Xie, J. Chen, H. Cui, G. Zhang, W. An, and Y. Li, "Performance and implications of RAN caching in LTE mobile networks: A real traffic analysis," in *Sensing, Communication, and Networking (SECON), 2016 13th Annual IEEE International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 1-9.
- [12] M. Mirahsan, R. Schoenen, and H. Yanikomeroglu, "Hetnets: Heterogeneous traffic distribution in heterogeneous wireless cellular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 10, pp. 2252-2265, 2015.