

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CİHAZDAN CİHAZA ÖNBELLEKLEMEDE KAYNAK TAHSİSİ
ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Cihat KAZEZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Nisan 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Ahmet Cihat KAZEZ

İMZA

ÖZET

Doktora Tezi

CİHAZDAN CİHAZA ÖNBELLEKLEMEDE KAYNAK TAHSİSİ ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Ahmet Cihat KAZEZ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Tarih: Nisan 2021

Teknolojik gelişmelerle birlikte çevrimiçi cihazların kullanımı daha da yaygınlaşmıştır. Bu durum, mobil veriye olan talepte aşırı artışa neden olmuştur. Servis sağlayıcılar talebi karşılarken kullanıcıların kesintisiz bağlantı, yüksek veri hızı ve düşük gecikme gibi temel servis kalitesi gereksinimlerini de gözetmek durumundadır. Bu gereklilik gelecek nesil haberleşme sistemlerinde, özellikle 5G ötesi için, yeni teknolojilerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Cihazdan Cihaza Haberleşme (CCH), kenar önbelleklemeye ve yakın cihazlar arasında içerik iletimine imkân veren yeni ve gelecek vadeden teknolojilerden biridir. CCH ile mobil cihazların önbellekleri kullanılarak diğer kullanıcıların içerik ihtiyacının düşük gecikme ve yüksek veri hızıyla hücresele şebekede yük oluşturmadan iletilmesi mümkündür. Tez çalışması kapsamında, CCH kabiliyeti bulunan cihazların yer aldığı kablosuz bir ağda; kenar önbellekleme, içerik iletimi ve cihaz keşfi problemleri kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. İlk olarak, Baz İstasyonu'nun toplam maliyetini CCH'nin sağladığı yük boşaltmanın katkısıyla minimize etmeyi amaçlayan Karma Tamsayı Programlama (KTP) modeli oluşturulmuştur ve en iyi çözüm sağlanmıştır. Daha sonra bu model dağıtık olarak uygulanan Stackelberg Lider-Takipçi Oyunu algoritması ile çözümlenerek en iyiye yakın çözüm sunulmuştur. İkinci olarak, yine CCH'nin kullanıldığı kablosuz bir ağda en iyi önbellekleme problemi ele alınmıştır. Modelin amacı toplam yük boşaltma miktarının eniyilemesidir. Bu problem de Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (KTDP) ile modellenmiş ve en iyi çözüm sunulmuştur. Optimizasyon tabanlı çözümlerin özellikle kullanıcı yoğunluğunun fazla

olduğu durumlarda pratiklikten uzaklaşmasından ötürü iki tane sezgisel algoritma önerilmiş ve uygulanmıştır. Algoritmalarından bir tanesi öbikleme kabiliyeti bulunan Yardımcı Kullanıcıların (YK) öbekler oluşturarak işbirliği yapmasını ve içerik çeşitliliği sağlamaktadır. Diğeri ise öbek içinde içerik popüleriğine ve öbek içi hiyerarşiye göre önbelleklenecek içerikleri belirlemektedir. Son olarak, CCH'de iletim öncesi cihazların birbirlerinden haberdar olması gerekliliği üzerine öbikleme ve önbellekleme algoritmalarına tamamlayıcı bir yaklaşım olarak Keşif ve Duyuru tabanlı prosedürler önerilmiştir ve LTE şebekesine sadık kalınarak uygulanmıştır. alışmalar kapsamında ele alınan bütün yöntemlerin başarımı kullanıcı sayısı, içerik sayısı, içerik popüleriği gibi değişkenler üzerinden incelenmiştir. Girişim, önbellek kapasitesi, kullanıcı hareketliliği gibi kısıtlar gözönünde bulundurulmuştur. Sonuçlar, zorlayıcı koşullarda dahi önerilen algoritmaların optimizasyon tabanlı en iyi sonuca yakın başarım sağladığını, denektaşı olarak sunulan temel yöntemlere kıyasla da üstün olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Cihazdan cihaza haberleşme, İçerik iletimi, Karma tamsayılı doğrusal programlama, İçerik ve kullanıcı keşfi, Öbikleme, Önbellekleme, Stackelberg oyunu, Stokastik öğrenme.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

DEVELOPING RESOURCE ALLOCATION ALGORITHM IN DEVICE-TO-DEVICE CACHING

Ahmet Cihat KAZEZ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Date: April 2021

Evolving technology has triggered the widespread use of online devices and results in an excessive increase in mobile data demand. While meeting this demand service providers must also fulfill users' essential Quality of Service (QoS) requirements such as always-on connectivity, high data rate, and low latency. This exigency conduces to the born of new technologies in the next generation communication systems particularly for 5G and beyond. Device-to-device (D2D) communication is a recent and promising technology that allows edge caching and content delivery between nearby devices. D2D communication exploits the cache capacity of mobile devices and promises content delivery with very low latency and without occupying the cellular network capacity. In this dissertation study, edge caching, content delivery, and device discovery problems in D2D enabled wireless networks are investigated comprehensively in three parts. First, we have derived and solved a Mixed Integer Programming (MIP) model that aims to minimize the Base Station's (BS) total cost with the contribution of data offloading via D2D links. Then we have adopted a distributively implementable Stackelberg Leader-Follower Game algorithm to the corresponding problem and provided the sub-optimal solution. Secondly, the problem of optimal cache placement in a D2D enabled cellular network is considered. The goal of cache placement is to maximize the offloaded traffic. For this purpose, we have derived and solved Mixed Integer Linear Programming (MILP) model with an objective function of maximizing data offloading and burden the load of BS. Optimization-based approaches are not practical in D2D since they provide

centralized solutions and bring computational overhead along especially for dense networks. Accordingly, we have proposed two distributively implementable heuristic algorithms. One of them clusters helpers and provides content diversity and cooperation between cache enabled Helper Users (HU). The other algorithm decides the contents to be cached in each cluster, based on the content popularity and intra cluster hierarchy. Lastly, as a preliminary requirement of D2D link establishment, users must be aware of each other and cached contents beforehand. Based on this, we have proposed Discovery and Advertisement-based D2D communication procedures as complementary to the proposed algorithms and applied them to an LTE-based simulation setup. Performance evaluation of all approaches is done according to several varying parameters such as the number of users, the number of contents, content popularity. We also considered interference, cache capacity, and user mobility. Results show that our proposed algorithms provide close to optimal results and outperform basic benchmark schemes even for compelling conditions.

Keywords: Device to device communication, Caching, Clustering, Content delivery, Content and device discovery, Mixed integer linear programming, Stackelberg game, Stochastic learning.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, yoğun iç temposundan çalışmalara yeterince vakit ayıramadığım zamanlarda anlayıő gösteren hocam Doç. Dr. Tolga GİRİCİ'ye kıymetli tecrübelerinden faydalandığım tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Elif UYSAL ve Doç. Dr. Ayőe Melda YÜKSEL TURGUT'a, bu uzun süreçte hep yanımda olan ve desteğini esirgemeyen; "kız arkadaşım, niőanlım ve biricik eőim Merve'ye", canım oğlum Kadir'e ve baőta babam Dr. Kadir KAZEZ olmak üzere geniş aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	3
1.2 Problem Tanımı	3
1.3 Katkılar ve Tezin Organizasyonu	5
2. TEMEL BİLGİLER	6
2.1 Cihazdan Cihaza Haberleşme	6
2.2 Mevcut CCH Teknolojileri	7
2.3 CCH’de Önbellekleme Yaklaşımları	9
2.3.1 Matematiksel programlama	9
2.3.1.1 Karma tamsayılı doğrusal programlama	9
2.4 Sezgisel Yöntemler	10
2.5 Optimizasyon Araçları	10
2.6 Zipf Dağılımı	11
3. OYUN TEORİSİ İLE ÖNBELLEKLEME	13
3.1 Giriş	13
3.2 Literatür Taraması	13
3.3 Oransız Kodlar	14
3.4 Stackelberg Oyunu	15
3.5 Sistem Modeli	15
3.6 Problem Formülasyonu	17
3.6.1 Stackelberg oyun modeli	17
3.6.2 Matematiksel programlama modeli	19
3.7 Temel Önbellekleme Yaklaşımları	20
3.8 Benzetimler ve Sonuçlar	21
3.9 Değerlendirme	24
4. YÜK BOŞALTMA ENİYİLEMESİ	25
4.1 Giriş	25
4.2 Literatür Taraması	25
4.3 Sistem Modeli	27
4.4 Problem Formülasyonu	28
4.5 Stokastik Öğrenme Tabanlı Önbellekleme	29
4.5.1 Önbellekleme algoritması	29

4.5.2 2'li ve 3'lü öbikleme yöntemleri	30
4.5.3 Benzetimler ve sonuçlar	31
4.5.4 Değerlendirme	34
4.6 Sezgisel Öbikleme ve Önbellekleme Yaklaşımı	35
4.6.1 Mesafe tabanlı öbikleme algoritması - MTÖA	35
4.6.1.1 MTÖA'nın karmaşıklık analizi	36
4.6.1.2 MTÖA'nın dağıtık uygulanması	37
4.6.2 Hiyerarşik önbellekleme algoritması - HÖA	38
4.6.2.1 HÖA'nın karmaşıklık analizi	39
4.6.3 Benzetimler ve sonuçlar	40
4.6.4 Değerlendirme	43
4.7 Hareketli Kullanıcı Senaryosu	44
4.7.1 Hareket modeli	44
4.7.2 Öbikleme yöntemleri	45
4.7.3 Benzetimler ve sonuçlar	46
4.7.4 Değerlendirme	50
4.8 Hareketlilik Farkında Yaklaşım ile Kıyaslama	51
4.8.1 Problem formülasyonu	51
4.8.2 Benzetimler ve sonuçlar	51
4.8.3 Değerlendirme	55
5. KEŞİF ve DUYURU PROSEDÜRLERİ	56
5.1 Giriş	56
5.2 Literatür Taraması	56
5.3 Mevcut Teknolojilerde Servis ve Cihaz Keşfi	58
5.3.1 Bluetooth-LE	58
5.3.2 Wi-Fi direkt	58
5.3.3 LTE direkt	60
5.4 Yük Boşaltma Formülasyonu	63
5.5 Sistem Modeli	63
5.6 Duyuru Tabanlı CCH Prosedürü - DTCCH	66
5.7 Keşif Tabanlı CCH Prosedürü - KTCCH	69
5.8 Benzetimler ve Sonuçlar	71
5.9 Değerlendirme	76
5.10 Modelin HücreSEL Şebekeye Uyarlanması	77
6. SONUÇLAR ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	80
EKLER	92
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Yıllara göre mobil veri trafiği ve kapsama miktarındaki artış. [1]	1
Şekil 1.2: Mobil veri trafiğinin dağılımı. [1]	2
Şekil 1.3: Şebekede kenar önbellekleme.	4
Şekil 2.1: CCH'nin sınıflandırması.	6
Şekil 2.2: CCH'de spektrum kullanımı	7
Şekil 2.3: $C = 10$ ve $C = 20$ için içeriklerin talep edilme olasılıkları.	12
Şekil 3.1: Bİ'nin toplam maliyeti için KDF. ($G_{maks} = 0.2$)	22
Şekil 3.2: Bİ'deki ortalama toplam girişim için KDF. ($G_{maks} = 0.2$)	22
Şekil 3.3: Bİ'nin toplam maliyeti için KDF. ($G_{maks} = 0.25$)	23
Şekil 3.4: Bİ'deki ortalama toplam girişim için KDF. ($G_{maks} = 0.25$)	23
Şekil 3.5: Değişken G_{maks} için Bİ servis maliyetinin KDF.	24
Şekil 4.1: Öbekleme yaklaşımı ve sistem modeli.	28
Şekil 4.2: 2'li ve 3'lü öbekleme için akış diyagramı.	32
Şekil 4.3: Ortalama yük boşaltma için KDF. ($K = 500, YK = 75, \alpha = 1$)	33
Şekil 4.4: Kullanıcı sayısının yük boşaltmaya etkisi. ($YK = 75, \alpha = 1$)	33
Şekil 4.5: YK sayısının yük boşaltmaya etkisi ($K = 500, \alpha = 1$)	34
Şekil 4.6: Zipf parametresinin yük boşaltmaya etkisi. ($YK = 75, K = 500$)	34
Şekil 4.7: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 300, \alpha = 0.6$)	41
Şekil 4.8: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 300, \alpha = 1.5$)	42
Şekil 4.9: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 1000, \alpha = 0.6$)	42
Şekil 4.10: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 1000, \alpha = 1.5$)	43
Şekil 4.11: RYHM'ye göre 0.5m/ZD ve 1.5m/ZD hızla hareket eden kullanıcıların hareket örüntüsü.	45
Şekil 4.12: KKÖA ve YKÖA için akış diyagramı.	47
Şekil 4.13: Toplam yük boşaltma için KDF. ($\alpha = 0.6$)	48
Şekil 4.14: Toplam yük boşaltma için KDF. ($\alpha = 1$)	48
Şekil 4.15: Değişken hesaplama periyoduna göre ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 0.6$)	49
Şekil 4.16: Değişken hesaplama periyoduna göre ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 1$)	49
Şekil 4.17: Rastgele bir topolojide sağlanan yük boşaltma. ($\alpha = 0.6$)	50
Şekil 4.18: Rastgele bir topolojide sağlanan yük boşaltma. ($\alpha = 1$)	50
Şekil 4.19: 10 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.	53
Şekil 4.20: 25 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.	53
Şekil 4.21: 50 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.	53
Şekil 4.22: 100 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.	54
Şekil 4.23: Değişken hesaplama periyodu için ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 0.6$)	54
Şekil 4.24: Değişken hesaplama periyodu için ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 1$) .	55
Şekil 5.1: Bluetooth LE aktif tarama.	58
Şekil 5.2: Bluetooth LE pasif tarama.	59
Şekil 5.3: Wi-Fi Direkt kullanıcı keşfi.	59

Şekil 5.4: LTE Direkt otonom keşif prosedürü. (Model A ve Model B)	61
Şekil 5.5: LTE Direkt ağ destekli keşif prosedürü.	62
Şekil 5.6: Periyodik TB tahsisi.	64
Şekil 5.7: TB yapısı	64
Şekil 5.8: TB 1. bölgenin yapısı. (L=20 ms)	65
Şekil 5.9: Duyuru Tabanlı CCH Prosedürü.	68
Şekil 5.10: Keşif Tabanlı CCH Prosedürü.	70
Şekil 5.11: 3 Farklı operatör için Ankara şehir merkezinde LTE hız testi.	72
Şekil 5.12: Değişken MP süresine göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.	72
Şekil 5.13: Değişken MP süresine göre ortalama yük boşaltma miktarı	73
Şekil 5.14: Değişken YK sayısına göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.	73
Şekil 5.15: Değişken YK sayısına göre ortalama yük boşaltma miktarı.	74
Şekil 5.16: Değişken kullanıcı sayısına göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.	75
Şekil 5.17: Değişken kullanıcı sayısına göre ortalama yük boşaltma miktarı.	75
Şekil 5.18: Değişken SGGO eşik değerine göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.	76
Şekil 5.19: Değişken SGGO eşik değerine göre ortalama yük boşaltma miktarı.	76
Şekil 5.20: YK cihazının yapısı.	77
Şekil 5.21: CCH kullanıcılarının şebeke mimarisindeki konumu.	78

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1: Stackelberg lider-takipçi oyunu için benzetim parametreleri.	21
Çizelge 4.1: Stokastik öğrenme algoritması için benzetim parametreleri.	31
Çizelge 4.2: Stokastik öğrenme algoritması için nümerik sonuçlar.	34
Çizelge 4.3: Sabit kullanıcı senaryosu için benzetim parametreleri.	41
Çizelge 4.4: MTÖA + HÖA ile KTDP'nin kıyaslaması için nümerik sonuçlar. . .	43
Çizelge 4.5: Hareketli kullanıcı senaryosu için benzetim parametreleri.	46
Çizelge 4.6: Hareket farkında çözüm için benzetim parametreleri.	52
Çizelge 4.7: KTDP-HF'nin diğer yöntemler ile kıyaslanması. (% cinsinden) . .	54
Çizelge 5.1: Kıyaslanan yöntemlerin kapsamı.	69
Çizelge 5.2: DTCCH & KTCCH için benzetim parametreleri.	71

KISALTMALAR

3GPP	: 3. Nesil Ortaklık Projesi (İng. 3rd Generation Partnership Project)
5G	: 5. Nesil Hücreyel Haberleşme Teknolojisi
64-DGM	: 64 Dördül Genlik Modülasyonu (İng. 64 Quadrature Amplitude Modulation, 64-QAM)
AÖ	: Açgözlü Önbellekleme (İng. Greedy Caching)
Bİ	: Baz İstasyonu
CCH	: Cihazdan Cihaza Haberleşme (İng. Device-to-Device Communication, D2D)
CPLEX	: Optimizasyon Yazılım Paketi (İng. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio)
DFBÇ	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (İng. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)
DFBÇE	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (İng. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA)
DFKA	: Dördül Faz Kaydırmalı Anahtarlama) (İng. Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)
DM	: Duyuru Mesajı
DÖ	: Düzgün Önbellekleme (İng. Uniform Caching)
-DT	: Denektaşı
DTCCH	: Duyuru Tabanlı CCH
EKMKA	: Ev Kamusal Mobil Karasal Ağ (İng. Home Public Land Mobile Network)
eNodeB	: LTE (4G) Baz İstasyonu (İng. Evolved Node B)
EPC	: Gelişmiş Paket Şebeke Özü (İng. Evolved Packet Core)
EPÖ	: En Popüler Önbellekleme
GAMS	: Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (İng. General Algebraic Modeling System)
GH	: Görüş Hattı (İng. Line of Sight, LOS)
HF	: Hareketlilik Farkında
HM	: Hareket Modeli (İng. Mobility Model, MM)
HSS	: Yerleşik Abone Sunucusu (İng. Home Subscriber Server)
İYK	: İzole Yardımcı Kullanıcı
K	: Kullanıcı
KB	: Kaynak Bloğu (İng. Resource Block, RB)
KDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (İng. Cumulative Distribution Function, CDF)
KKÖA	: Kullanıcı Komşuluğu Tabanlı Öbikleme Algoritması
KM	: Keşif Mesajı
KMKA	: Kamusal Mobil Karasal Ağ (İng. Public Land Mobile Network, PLMN)

KO	: Karekök Ortalama (İng. Root Mean Square, RMS)
KTCCCH	: Keşif Tabanlı CCH
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Mixed Integer Linear Programming, MILP)
KTP	: Karma Tamsayılı Programlama (İng. Mixed Integer Programming, MIP)
LTE	: 4. Nesil Hücresel Haberleşme Teknolojisi (İng. Long Term Evaluation)
MATLAB	: Matris Laboratuvarı (İng. Matrix Laboratory)
MME	: Hareketlilik Yönetim Birimi (İng. Mobility Management Entity)
MP	: Mesaj Periyodu
MTÖA	: Mesafe Tabanlı Öbekleme Algoritması
ÖB	: Öbek Başı
ÖM	: Ödül Maliyeti
PGW	: Paket Şebeke Ağ Geçidi (İng. Packet Core Gateway)
ProSe	: Yakınlık Servisleri (İng. Proximity Services)
PTÖ	: Popülerite Tabanlı Önbellekleme
QoS	: Servis Kalitesi (İng. Quality of Service)
RÖ	: Rastgele Önbellekleme (İng. Random Caching)
RYHM	: Rastgele Yönlü Hareket Modeli (İng. Random Direction Mobility Model, RDMM)
-S	: Sabit (Algoritmanın sadece ilk zaman diliminde koşturulması)
S1	: Bİ-EPC Arayüzü
SGGO	: Sinyal Gürültü Girişim Oranı (İng. Signal to Interference Noise Ratio, SINR)
SGO	: Sinyal Gürültü Oranı (İng. Signal to Noise Ratio, SNR)
SGW	: Servis Ağ Geçidi (İng. Serving Gateway)
SM	: Servis Maliyeti
SÖA	: Stokastik Öğrenme Algoritması (İng. Stochastic Learning Algorithm, SLA)
-T	: Tekrar Eden (Algoritmanın her zaman diliminde tekrar koşturulması)
TB	: Tespit Bölgesi
TKÖ	: Tek Kopya Önbellekleme
TM	: Toplam Maliyet
TOGO	: Tepe-Ortalama Güç Oranı (İng. Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)
TT-FBÇE	: Tek Taşıyıcı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (İng. Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA)
Uu	: Şebekede Kullanıcı-Bİ Radyo Arayüzü
YB	: Yük Boşaltma
YKÖA	: Yardımcı Kullanıcı Komşuluğu Tabanlı Öbekleme Algoritması
YP	: Yanıt Periyodu
ZD	: Zaman Dilimi
ZKMKKA	: Ziyaretçi Kamusal Mobil Karasal Ağ (İng. Visiting Land Mobile Network, VLMN)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

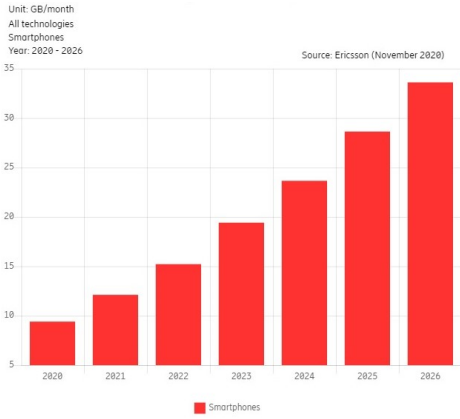
Simgeler	Açıklama
α	Zipf parametresi
β	Temel algoritmalar için içerik artışı adım boyu
δ	Önbelleklenen içerik artışı adım boyu
Δ_r	Ödül artışı adım boyu
$\gamma_{n,m}$	n ve m kullanıcıları arasındaki SGO
\mathbf{x}	Bütün kullanıcılar için önbellekleme sonucu
\mathcal{C}	İçerik kümesi
\mathcal{G}_i	i numaralı öbek
\mathcal{N}	Kullanıcı kümesi
\mathcal{N}_n	n kullanıcısının komşusu olan kullanıcıların kümesi
\mathcal{YK}	YK kümesi
$\nabla_n^c(r, \mathbf{x})$	Fayda fonksiyonundaki değişim ile hesaplanan gradyan değeri
\bar{t}_c	Geçici önbellekleme
ψ_0	SGGO Eşik Değeri
σ^2	Gürültü gücü
θ	SÖA adım boyu
ζ	Stackelberg oyunu gradyan çarpanı
$U_n(r, \mathbf{x}_n, \mathbf{x})$	Kullanıcı n için fayda fonksiyonu
$a_{hh'}$	YK'ler h ve h' 'nin komşuluk bilgisi
a_{hu}	YK h ile kullanıcı u 'nun komşuluk bilgisi
a_{hut}	t 'inci zaman diliminde, YK h ile kullanıcı u 'nun komşuluk bilgisi
C	İçerik sayısı
$C(r, \mathbf{x})$	Toplam maliyet
c_{th}	SÖA için yakınsama eşik değeri
C_c	Önbellek kapasitesi
$d_{hh'}$	YK'ler h ve h' arasındaki uzaklık
d_{hu}	YK h ile kullanıcı u arasındaki uzaklık
D_{MP}	Mesajlaşma periyodunun süresi
$d_{n,m}$	n ve m kullanıcıları arasındaki mesafe
d_{rad}	Sektörün yarıçapı
d_0	CCH menzili
f_m	Çalışma frekansı
$F_{n,m}^c(x_n^c, \mathbf{x}^c)$	n kullanıcısının, m kullanıcısı tarafından talep edilmesi halinde önbelleklemiş olduğu c içeriğinden ne kadar iletileceği
$F_0(\mathbf{x})$	Bİ Servis maliyeti
G_{maks}	Maksimum girişim miktarı

$G_n(\mathbf{x})$	n kullanıcısının Bİ'de yarattığı girişim
$h_{n,m}$	n ve m kullanıcıları arasındaki kanal kazancı
h_{YK}, h_K	Kullanıcıların yüksekliği
i_c	SÖA için iterasyon sayacı
i_{maks}	SÖA için azami iterasyon sayısı
K	Kullanıcı sayısı
k_n	n kullanıcısının en iyi k 'inci komşusu
$KB_{i,j}^{MP}$	MP'deki i 'inci zaman dilimindeki j 'inci kaynak bloğu
$KB_{i,j}^{YP}$	YP'deki i 'inci zaman dilimindeki j 'inci kaynak bloğu
L	Tespit Bölgesi için 1. ve 3. kısımların uzunluğu
N	Stackelberg oyunu kullanıcı sayısı
N_h	Öbekteki YK sayısı
$N_h(g)$	\mathcal{G}_g öbeğindeki YK sayısı
p_{cc}	SÖA'da içeriklerin önbelleklenme ihtimali
P_i	İletim gücü
$P_{n,m}$	n kullanıcısının m kullanıcısına iletim yaparken çıkış gücü
p_{uc}	u kullanıcısı için c içeriğinin popülerliği
$PL_{n,Bi}$	Kullanıcı n ile Bİ arasındaki yol kaybı
$PL_{n,m}$	Kullanıcılar n ve m arasındaki yol kaybı
$PL_{YK,K}$	YK'lar ile kullanıcılar arasındaki yol kaybı
r	Ödül miktarı
r_{dur}	SÖA için içerik taleplerinin gözlem süresi
r_{talep}	SÖA için gözlem sonucu
s_c	İçerik boyutu
S_{maks}	Bütün kullanıcılar için azami Hız
T	Tespit bölgesi için 2.kısımın uzunluğu
T_s	Zaman dilimi sayısı
v_{hc}	KTDP çözümünde yapılan önbellekleme sonucu
w_i	Girişim katsayısı
w_s	Servis maliyeti katsayısı
x_{hc}	Sezgisel algoritmalar ve denektaşları yaklaşımlarda yapılan önbellekleme sonucu
x_n^c	Stackelberg oyun kuramı yaklaşımında n kullanıcısının c içeriğini önbellekleme miktarı
y_{huc}	YK h 'nin u kullanıcısına c içeriğini talep ettiği durumda yardım edip edemeyeceği
y_{huct}	t 'inci zaman diliminde, YK h 'nin u kullanıcısına c içeriğini talep ettiği durumda yardım edip edemeyeceği
YK	Yardımcı Kullanıcı sayısı

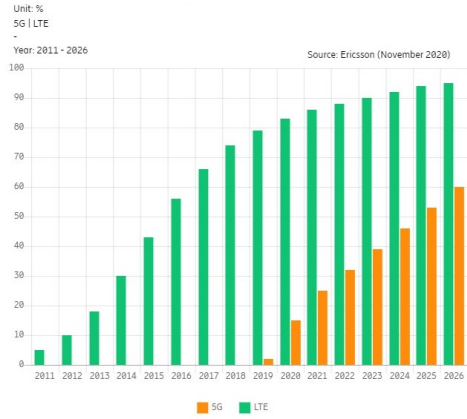
1. GİRİŞ

Teknolojinin günlük hayata her geçen gün daha fazla müdahil olması ve kablosuz haberleşme alanında süregelen gelişmeler mobil cihazların veri erişim ihtiyacında öngörülen fakat karşılanması güç bir artış meydana getirmiştir. Günümüzde yalnızca bilgisayar, telefon ve tabletler değil; televizyonlar, giyilebilir cihazlar, arabalar, kameralar ve ev eşyaları dahi internete bağlanabilmektedir.

Bu duruma, bilgi teknolojileri ve telekomünikasyon alanında dünyanın önde gelen firmalarından; Ericsson [1], Huawei [2], ve Cisco [3] tarafından dönemsel olarak yayınlanan raporlarda dikkat çekilmiştir. Ericsson'un Hareketlilik Raporu (İng. Ericsson Mobility Report) yılın her çeyreğinde yayınlanmakta olup önceki yıllara ait gerçekleşen veriler ile önümüzdeki yıllara dair öngörüler belirli başlıklar altında sunulmaktadır. Şekil 1.1 ve 1.2'de 2020 yılı dördüncü çeyreğinde yayınlanan raporda yer alan grafikler sunulmuştur. Şekil 1.1a'da görüldüğü üzere önümüzdeki yıllarda cihaz bazında aylık ortalama mobil veri trafiğinde dünya genelinde artış beklenmektedir. Bunun nedeni olarak da daha teknolojik cihazlara erişimin artması, uygun fiyatlı tarifeler ve zenginleşen içeriklerin boyutlarının artması gösterilmiştir. 2020 yılında abone başına aylık ortalama 9.4 GB olan mobil veri trafiğinin 2026 yılında 33.6 GB olarak gerçekleşmesi öngörülmektedir.



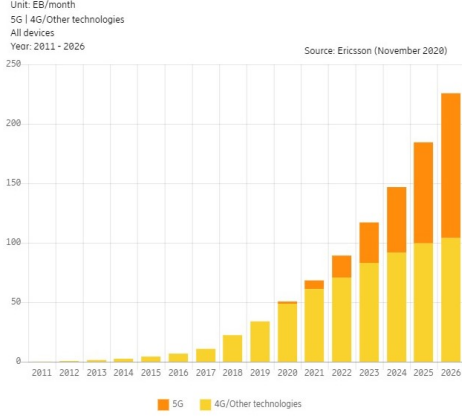
(a) Ortalama aylık mobil veri trafiği.



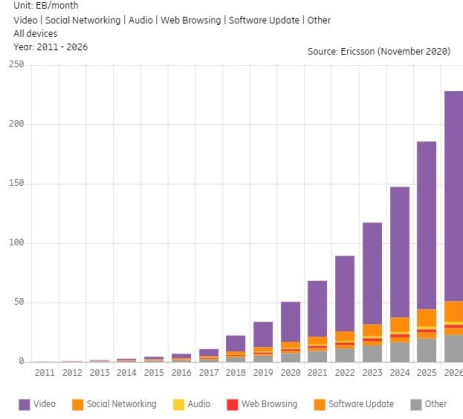
(b) Nüfus kapsamı

Şekil 1.1: Yıllara göre mobil veri trafiği ve kapsama miktarındaki artış. [1]

Veri trafiğinin artmasının bir diğer nedeni de dünya genelinde genişleyen kapsama alanıdır. Şekil 1.1b'deki verilere göre 2020 yılında dünya nüfusunun %80'ine LTE kapsamı sağlanabilmekteyken bu oranın 2026 yılı sonunda %95'e çıkması öngörülmektedir. Henüz deneme aşamasında olan 5G teknolojisinin ise önümüzdeki beş sene içinde dünya genelinde %60 kapsama sağlaması beklenmektedir.



(a) Teknoloji bazlı trafik dağılımı.



(b) İçerik bazlı trafik dağılımı.

Şekil 1.2: Mobil veri trafiğinin dağılımı. [1]

Günümüzde mobil verinin neredeyse tamamı LTE şebekesi üzerinden sağlanmaktayken, 5G teknolojisinin hizmete alınmasıyla birlikte trafiğin hacimsel olarak da artacağı yine rapordaki öngörüler arasındadır (Şekil 1.2a). Artan trafiğin dağılımına bakıldığında ise video içeriğinin neredeyse diğer uygulamaların tamamından daha fazla veri kullandığı görülmektedir (Şekil 1.1b). Haberler, reklamlar, canlı yayınlar gibi yüksek çözünürlüklü zenginleştirilmiş içeriklerin gitgide daha fazla erişilebilir olması bunun başlıca nedenidir. Bu doğrultuda, 2011 yılında video içeriğinin bütün trafiğe oranı %29 iken, 2020 yılında %66 olarak gerçekleşmiş olup 2026'da ise %77 olması beklenmektedir.

Öngörülen talep artışının nasıl karşılanacağına dair çözümler de farklı açılardan konunun paydaşları olan servis sağlayıcılar, teknoloji firmaları ve araştırmacılar tarafından geliştirilmektedir. Bu noktada, servis kalitesinde (İng. Quality of Service - QoS) düşüşe neden olmayacak çözümlerin üretilmesi önem arz etmektedir. Daha fazla baz istasyonu kurmak, çekirdek şebekede (İng. core network) iyileştirmeler yapmak, mobil şebekeye daha geniş bant tahsis etmek alternatif çözümler olarak ele alınmakta ve uygulanmaktadır. Fakat kullanıcı yoğunluğunun yüksek olduğu veya ani değiştiği durumlarda ve trafiğin tepe yaptığı günün belirli saatlerinde belirtilen konvansiyonel çözümlerin haricinde, hücresel haberleşmedeki yük yoğunluğunu hafifletecek yenilikçi yaklaşımlara da ihtiyaç duyulmaktadır.

Cihazdan Cihaza Haberleşme (CCH), gelecek nesil haberleşme teknolojilerinde bu amaçla kullanılması öngörülen yenilikçi ve gelecek vadeden yaklaşımlardan biridir. CCH teknolojisi temel olarak birbirlerine yakın kullanıcıların birbirlerinin varlığından haberdar olup altyapı gereksinimi duymadan haberleşebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, kullanıcılar arasında şebekeyi meşgul etmeden iletim yapabilmektedir. Böylelikle, şebeke trafik yükünün hafiflemesi ve servis kalitesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır.

CCH'nin sağladığı bir diğer önemli fayda da spektrum kaynaklarının etkin kullanılmasıdır. CCH nispeten kısa iletim mesafesinden ötürü tahsis edilen spektrum kaynaklarının tekrarlı kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır. Fakat frekans tekrar kullanımı sırasında oluşacak girişimin de doğru planlanması gerekmektedir [4].

LTE'ye CCH teknolojisi LTE Direkt (İng. LTE Direct) adıyla eklenti olarak dahil edilmiş olup 5G'den itibaren hücre sel haberleşmede temel teknolojilerden biri olarak yer alması öngörülmektedir [5]. Ayrıca, CCH teknolojisi düşük gecikme ve yüksek veri hızı sunma potansiyelinden ötürü 5G için belirlenen 10 önemli teknoloji arasında görülmektedir [6].

CCH; yerel servisler, acil durum haberleşmesi, Nesnelerin İnterneti, röleme ve konumlandırma gibi birçok alanda yakınlık tabanlı servislerin kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır [7]. Bunların yanı sıra CCH'nin sağladığı en büyük avantajlardan biri de kenar önbelleklemedir. Kenar önbellekleme ile iletilecek içerikler ağda son kullanıcıya yakın bir yerde tutulur (Şekil 1.3). Talep edilmesi halinde CCH bağlantılar üzerinden iletir. Bu sayede, şebeke üzerinden yük boşaltma [8] ve gecikmede iyileşme [9, 10] sağlanmaktadır. Başarılı yük boşaltma ise etkin ve verimli bir önbellek yönetimi problemini ele almaktadır.

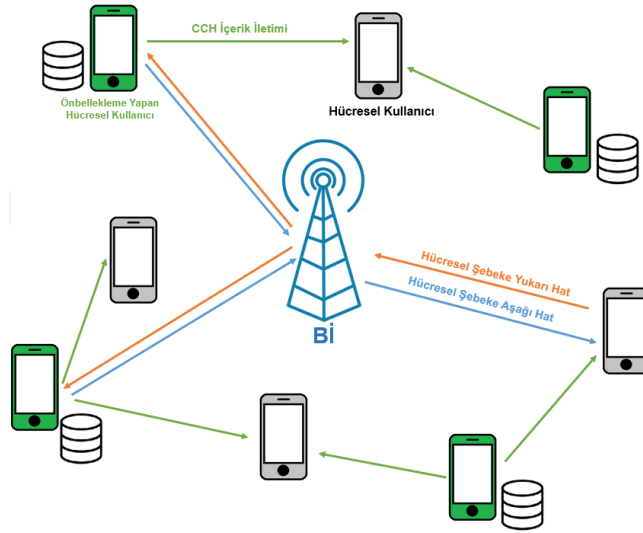
1.1 Amaç

CCH'de cihazlar altyapıya bağımlı olmadan veri iletimi yapabilmektedir fakat öncesinde sağlanması gereken iki koşul vardır. Bunlardan ilki, cihazların birbirlerinin varlığından haberdar olması ve erişim sağlayabilmesidir. İkincisi ise talep edilen içeriklerin erişilebilir cihazlar tarafından halihazırda önbelleklenmiş olmasıdır. Mobil cihazların sınırlı kapasitedeki önbelleklerinde sınırsız miktarda içerik tutmaları mümkün değildir. Bu durum, önbellek yönetiminin etkin bir biçimde yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamında gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde şebeke üzerindeki trafik yoğunluğunu hafifletmek amacıyla kullanılması planlanan Cihazdan Cihaza Haberleşme Teknolojisi'nde önbelleklemenin etkin bir şekilde yapılmasına yönelik algoritmaların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Matematiksel Programlama modellerinin optimizasyon araçları kullanılarak çözülmesi ile en iyi çözümün elde edilmesi, önerilen algoritmaların ise en iyi çözüme yakın başarımlar göstermesinin yanı sıra basit, ölçeklenebilir, uygulanabilir ve gerçekçi kısıtlar altında tutarlı çalışması da amaçlanmaktadır. Böylelikle; kullanıcıların servis kalitesini etkileyecek girişim kaynaklı kesintilerin önlenmesi, Baz İstasyonu'nun (Bİ) hesaplama ve sinyalleşme yükünün hafifletilmesi ve mobil cihazların bir diğer sınırlı kaynağı olan bataryalarının gözetilerek enerji verimli iletim yapılması da çalışmanın dolaylı amaçlarındandır. Önerilen keşif ve duyuru tabanlı prosedürlerin uygulanması ile de bir diğer koşul olan cihazların iletim öncesinde birbirlerinin varlığından haberdar olmaları amaçlanmıştır.

1.2 Problem Tanımı

CCH'de önbellekleme problemi birçok araştırmacının ilgi gösterdiği güncel bir konudur. Bunun başlıca nedeni, günümüzde CCH teknolojisinin farklı uygulamalar ile (Bluetooth, Wi-Fi Direkt, LTE Direkt) halihazırda kullanılıyor oluşu ve yeni nesil haberleşme teknolojilerinde de alternatif bir yaklaşım olarak kullanılmasının öngörülmesi gösterilebilir.



Şekil 1.3: Şebekede kenar önbellekleme.

Önbellekleme için literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar temelde ikiye ayrılmaktadır. Merkezi yaklaşımlarda önbellek yönetimi kullanıcı inisiyatifi dışında belirlenmektedir. Otonom (dağıtık) yaklaşımlarda ise her cihaz kendi önbellek yönetimini kendisi yapmaktadır [11]. Merkezi yaklaşımlarda özellikle ağı bağlı cihaz sayısı arttıkça ortaya çıkan hesaplama ve sinyalleşme yükü ölçeklenebilirliği engellemektedir. Dağıtık yaklaşımlar ise ağı bağlı cihaz sayısındaki artıştan daha az etkilenmektedir fakat merkezi yöntemlere kıyasla başarımı daha düşüktür.

Bu doğrultuda, CCH'de önbellekleme problemi aşağıdaki sorulara yanıt aramaktadır.

- Matematiksel Programlama ile elde edilen modelin en iyi çözümü nedir?
- En iyi çözüm uygulanabilir ve ölçeklenebilir midir?
- Temel ve basit yaklaşımlar ile elde edilen sonuçlar yeterli midir?
- Literatürde yer alan yöntemler/algortmalar modele uygulanabilir mi? Elde edilen sonuçlar gereken başarıyı sağlıyor mu?
- Daha pratik ve uygulanabilir yaklaşımlarla daha iyi sonuçlar elde edilebilir mi?
- Sezgisel algortmaların geliştirilmesi fayda sağlar mı?
- Ele alınan yöntemlerin farklı değişkenler (İçerik popülerliği, içerik boyutu, kullanıcı hareketleri) ve kısıtlar (önbellek kapasitesi, girişim, gecikme) karşısında davranışı nasıldır?
- Merkezi olmayan yaklaşımlar için gerekli olan kullanıcı ve içerik keşfi için nasıl bir prosedür izlenmeli?
- Keşif işlemleri için kaynak tahsisi ve erişim modeli nasıl olmalı?

1.3 Katkılar ve Tezin Organizasyonu

CCH'de önbellekleme problemi literatürdeki çalışmaların çoğunda içerik iletimi ve kullanıcı keşfi konularından ayrı olarak ele alınmıştır. Birbirleriyle ilintili olan problemlerin bir arada incelenmesi önem arz etmektedir.

Bu doğrultuda, tez çalışmaları kapsamında, CCH'de önbellekleme problemi sistematik ve kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Sağlanan katkılar ve sunuldukları bölümler şu şekildedir;

- 2. Kısımda, CCH teknolojisine ana hatlarıyla yer verilmiş ve tez çalışması kapsamında kullanılan matematiksel eniyileme yöntemlerine dair temel bilgiler sunulmuştur.
- 3. Kısımda, amaç fonksiyonu baz istasyonunun maliyetini minimize etmek olan eniyileme problemi, "Stackelberg Oyun Teorisi" kullanılarak girişim farkında bir yaklaşımla çözülmüştür. Önerilen algoritmanın başarımı "Karma Tamsayılı Programlama (KTP)" ile elde edilen en iyi çözüm ve temel yaklaşımlar ile kıyaslanmıştır.
- 4. Kısımda, CCH'de yük boşaltma eniyilemesi problemi ele alınmıştır. Bu kapsamda, "Stokastik Öğrenme Algoritması, SÖA" ve temel öbelleme algoritmaları önerilmiş ve başarımları incelenmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlardan yola çıkarak sezgisel "Mesafe Tabanlı Öbelleme (MTÖA)" ve "Hiyerarşik Önbellekleme (HÖA)" algoritmaları önerilmiş olup başarımları temel önbellekleme yaklaşımları ve "Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP)" ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Ayrıca, önerilen algoritmaların kullanıcıların hareketliliğine karşı dayanıklılığı ve hareketlilik farkında (İng. mobility aware) yaklaşım ile kıyaslaması da yapılmıştır. Bu kısımdaki çalışmalara basit ve yalın bir ağ modeli ile başlanmış olup peyderpey detaylandırılmıştır.
- 5. Kısımda, CCH'de iletim öncesinde yakın kullanıcıların birbirlerinin varlığından haberdar olmaları gerekliliği önkoşulundan yola çıkarak "Duyuru ve Keşif Tabanlı CCH Prosedürleri" önerilmiş olup, 4. Kısımda sunulan problem formülasyonu üzerinden, LTE Direkt teknolojisinde kullanılan parametreleri dikkate alarak ve başarımları incelenmiştir.
- 6. Kısım'da ise elde edilen sonuçların genel değerlendirmesi yapılmış olup, gelecekte yapılabilecek çalışmalara dair önerilere yer verilmiştir.

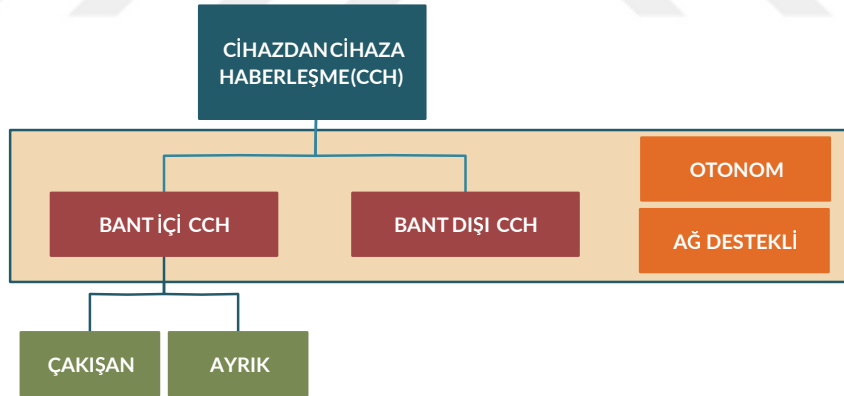
Matematiksel Programlama modelleri, yazılımsal çözümler kullanılarak çözülmüştür ve en iyi çözüm elde edilmiştir. Bu sayede önerilen yöntemler/algoritmalar için erişilebilecek üst sınır belirlenmiş ve sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi mümkün olmuştur. Temel yaklaşımların başarımları da karşılaştırma yapılırken denektaşı olarak kullanılmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

2.1 Cihazdan Cihaza Haberleşme

CCH Teknolojisi her ne kadar birbirlerine yakın cihazların altyapıya (baz istasyonu veya erişim noktası) ihtiyaç duymadan birbirleriyle iletişim kurabildiği bir teknoloji olarak tanımlansa da çalışma şekline ve spektrum kullanımına göre farklı sınıflandırmalara tabidir (Şekil 2.1 ve 2.2) [12]. Bu doğrultuda, CCH terminolojisi ana hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

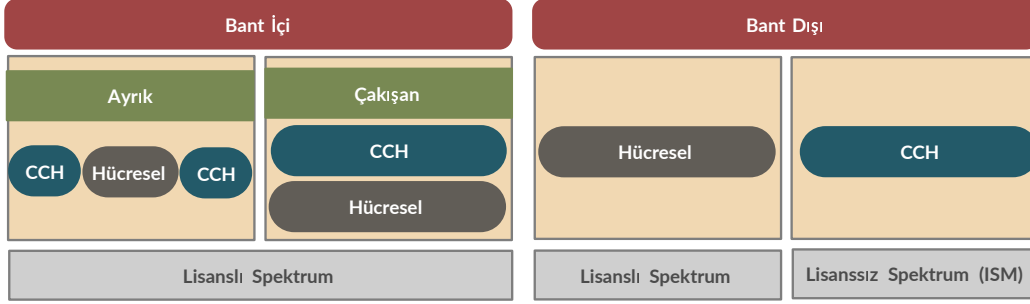
- **Ağ destekli CCH (İng. Network Assisted):** Veri iletimi için altyapı, şebeke veya erişim noktasına ihtiyaç duymamaktadır. Fakat kaynak tahsisi, keşif, senkronizasyon, önbellek yönetimi, çizelgeleme gibi başlıca gereksinimlerden tamamı veya bazıları merkezi bir şekilde, ağ destekli karşılanmaktadır.
- **Otonom (Direkt) CCH (İng. Autonomous):** Cihazlar veri iletimi ve öncesinde herhangi bir altyapı gereksinimi duymazlar. Kullanıcı keşfi, kaynak erişimi, önbelleklenecek içeriklerin belirlenmesi gibi bütün işlemler kullanıcıların inisiyatifindedir.



Şekil 2.1: CCH'nin sınıflandırması.

- **Bant İçi (İng. In-band):** CCH için hücrel haberleşmeye tahsisli bantlar kullanılmaktadır. Kullanıcıların yetkilendirilmesi, şebeke içi dolaşım, zaman senkronizasyonu gibi hususlar operatör destekli gerçekleşmektedir. Kendi içinde iki çeşittir. **Ayrık** (İng. overlay) yaklaşımda CCH ve hücrel haberleşme kendilerine tahsis edilen bantları kullanırlar ve birbirlerine girişim yaratmazlar. Kullanım olmadığı anlarda dahi spektrumun CCH için tahsisli olması verimlilik açısından tercih edilen bir durum değildir. **Çakışan** (İng. underlay) yaklaşımda ise CCH ve hücrel haberleşme aynı spektrumu kullanırlar. Bu yaklaşım spektrum verimliliği açısından faydalı olsa da girişim konusunun iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

- **Bant Dışı (İng. Out-band):** CCH regülasyona tabi fakat lisanssız kullanıma açık ISM (İng. Industrial Scientific Medical) bantları kullanılmaktadır. Bant dışı CCH'nin sağladığı en önemli avantaj kullanıcıların eş zamanlı olarak CCH ve hücrel haberleşme yapabilmesidir. Fakat senkronizasyon, yetkilendirme ve servis kalitesinin gözetimi gibi unsurları barındırmamaktadır.



Şekil 2.2: CCH'de spektrum kullanımı

2.2 Mevcut CCH Teknolojileri

- **Bluetooth LE:** Cep telefonu, akıllı saat, hoparlör gibi cihazların arasındaki bağlantılar için kullanılan bir teknolojidir. ISM bandında (2.4 GHz), serpme ağ (İng. scatternet) topolojisinde çalışmaktadır. Serpme ağ, piko ağların (İng. pikonet) birleşmesiyle oluşmaktadır. Bu sayede klasik Bluetooth teknolojisine kıyasla azami katılımcı sayısı fazla ve kapsama alanı geniştir. Kullanıcılara sahip (İng. master), köle (İng. slave) ve hibrit roller tanımlanabilmekte olup aralarında öbek kurma imkânı bulunmamaktadır. 2 MHz band genişliğinde 40 kanal tanımlı olup bunlardan 3 tanesi keşif, 37 tanesi ise veri iletimi için tahsis edilmiştir. Kullanıcı sayısının fazla olduğu durumlar için kullanışlı değildir, ölçeklenebilirliği kısıtlıdır. Teknik spesifikasyonları [13], Bluetooth Özel İlgi Grubu (İng. Bluetooth Special Interest Group - SIG) tarafından tanımlanmıştır.
- **Wi-Fi Direkt:** Cep telefonu, yazıcı, kamera, televizyon gibi cihazların birbirleriyle Wi-Fi bandı üzerinden (2.4 GHz, 5 GHz (802.11 a/g/n) ve 60 GHz (WiGig 802.11 ad)) IP tabanlı bağlantı kurarak haberleşmelerine olanak sağlayan bir teknolojidir. İnternet bağlantısına veya erişim noktasına ihtiyaç duymamaktadır. Bluetooth LE'ye kıyasla daha geniş bantlı iletim ve düşük gecikme sunmaktadır. IP tabanlı olmasının en büyük avantajı cihazlarda güvenlik duvarı gibi uygulamaların kullanılabilmesidir. Cihazlar arasında birebir bağlantı kurulabildiği gibi grup bazlı bağlantı imkânı da sunmaktadır. Temel grup operasyonları şunlardır;
 - Oluşturma (davet veya istek tabanlı)
 - Katılım ve ayrılma (istemci tarafından)
 - Fesih, katılımcı ekleme & çıkartma (grup sahibi tarafından)
 - Grup sahibinin belirlenmesi (istemiciler tarafından)

Teknik spesifikasyonları [14], Wi-Fi İttifakı (İng. Wi-Fi Alliance) tarafından tanımlanmıştır.

- **LTE Direkt:** CCH hücrel haberleşmede ilk olarak LTE Direkt ile sunulmuştur. LTE Direkt Yakınlık Servisleri'nin (İng. Proximity Services, ProSe) amacı yakın cihazların birbirlerini tespit ederek doğrudan haberleşmelerine imkân sağlamaktır. Böylelikle; Gelişmiş Paket Ağ Çekirdeği (İng. Evolved Packet Core, EPC) üzerindeki veri yükünü hafifletmek, tahsis edilen bant içinde kapasiteyi arttırmak ve kapsamanın olmadığı yerlerde de iletişimi sağlamak mümkündür.

LTE Direkt lisanslı spektrumu kullanmaktadır (ayrık veya çakışan). Bu durum özellikle girişim konusunda diğer teknolojilere kıyasla büyük avantaj sağlamaktadır çünkü bant yalnızca hücrel haberleşme için kullanılmaktadır ve iletim yapan cihazların tamamı şebekeye bağlıdır. Otonom keşife (İng. self discovery) ve ağ destekli keşife (İng. network assisted discovery) imkân sağlamaktadır. Diğer iki teknolojinin aksine kullanıcılar arasında senkronizasyon vardır.

Keşif ve Duyuru mesajları tüm kullanıcılar tarafından eşzamanlı olarak gönderilmektedir. Böylelikle CCH bağlantı kurulumu ve ardından veri iletilmesi belirlenen zaman dilimlerinde periyodik olarak yapılabilmektedir. Bu durum, güç tüketimi konusunda da fayda sağlamaktadır.

LTE Direkt teknolojisinde ProSe'yi oluşturan 3 ana unsur olup temel fonksiyonları şunlardır:

- **ProSe Uygulaması:** Cihazlarda çalışan CCH uygulamasıdır. Keşif, tanıtım ve CCH'yi yönetir, başlatır, sonlandırır.
- **ProSe Uygulama Sunucusu:** Uygulama katmanı kullanıcı kodları ile EPC kullanıcı kodlarının tahsisi, saklanması ve eşleştirilmesini yönetir. ProSe Fonksiyonuna bağlı çalışır.
- **ProSe Fonksiyonu:** Cihazlardan gelen taleplere istinaden yetkilendirme ve konfigürasyonu yönetir. EPC'ye doğrudan bağlıdır.

Daha önce de belirtildiği üzere LTE Direkt, LTE'ye LTE-A (İng. LTE-Advance) ile sonradan eklenmiş bir teknolojidir. Günümüzde yalnızca kamusal güvenlik uygulamalarında kullanılmakta olup önümüzdeki yıllarda farklı uygulamalar ile yaygın olarak kullanılması öngörülmektedir.

Yakınlık Servisleri'nin Teknik Spesifikasyonları ilk olarak 2014 yılında, 3. Nesil Ortaklık Projesi'nin (İng. 3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 23.303/12.0.0 sürümünde yayınlanmıştır. [15]. En güncel hali ise 2020 yılında yayınlanan 23.303/16.0.0 sürümü olup doküman hala güncellemeye açık statüdedir [16].

2.3 CCH'de Önbellekleme Yaklaşımları

CCH'de önbellekleme problemi; şebekeden yük boşaltma, kullanıcıların isabet oranı, kaynak tahsisi, girişim ve gecikme gibi farklı başarımların iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, CCH'de önbellekleme probleminin çözümü için literatürde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında ele alınan önbellekleme problemlerinde de, önbelleklenecek içeriklerin ve hangi kullanıcılar arasında iletim yapılacağı belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca; maliyet, önbellek kapasitesi, içerik boyutu, girişim miktarı gibi değişkenlerin ve kısıtların da gözlemlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, hem optimizasyon tabanlı yöntemler hem de sezgisel yaklaşımlar kullanılmıştır.

2.3.1 Matematiksel programlama

Matematiksel Programlama (MP), problemin tanımlanması, optimizasyon modelinin oluşturulması ve matematiksel yöntemlerle en iyi çözümün bulunması yöntemidir. Mühendislik, ekonomi, biyoloji, işletme gibi farklı disiplinlere ait problemler MP ile çözülebilir. MP; amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlar, parametreler ve çözüm için gerekli veriden oluşmaktadır. Örnek bir MP modeli şu şekilde tanımlanır; 2.1 amaç fonksiyonunu, 2.2 kısıtları, 2.3 ise parametreleri temsil etmektedir.

$$\text{(maks, min)} f(x_1, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

$$g_i(x_1, \dots, x_n) \begin{cases} = \\ \geq \\ \leq \end{cases} b_i \quad (2.2)$$

$$x_1, \dots, x_n \in \mathcal{X} \quad (2.3)$$

2.3.1.1 Karma tamsayılı doğrusal programlama

Matematiksel Programlama modelleri, amaç fonksiyonu ve kısıtların niteliğine göre sınıflandırılmaktadır. Doğrusal Programlama (DP) (İng. Linear Programming, LP), doğrusal bir amaç fonksiyonunu bir veya daha fazla kısıta göre maksimize veya minimize eder. Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) (İng. Mixed Integer Linear Programming, MILP) ise karar değişkenlerinden en az bir tanesinin yalnızca tamsayı değerler alabildiği optimizasyon modelidir [17]. KTDP modelinin amaç fonksiyonu doğrusal olup ayrık ve sürekli karar değişkenleri içermektedir ve şu şekilde tanımlanmaktadır.

Eniyilenecek amaç fonksiyonu 2.4 olup, 2.5 doğrusal kısıt, 2.6 sınırlı kısıt, 2.7 ise tamsayı kısıttır.

$$(\text{maks, min}) c^T x \quad (2.4)$$

Kısıtlar:

$$Ax \begin{cases} = \\ \geq \\ \leq \end{cases} b \quad (2.5)$$

$$0 \leq x \leq u \quad (2.6)$$

$$x_i \in \mathbb{Z} \quad (2.7)$$

$$c = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$$

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

$$b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

2.4 Sezgisel Yöntemler

Matematiksel optimizasyon problemleri, amaç fonksiyonu (doğrusal, doğrusal olmayan, kuadratik vb.), kısıtların sayısı, türü ve değişkenlerin niteliğine (tam sayı, ikili, ayrık, sürekli vb.) göre sınıflandırılmaktadır. Optimizasyon modellerinin matematiksel çözümü bazı durumlarda mümkün değilken, mümkün olduğu modellerde en iyi çözüm için gerekli hesaplama yükü de bu kriterlere göre değişiklik göstermektedir. Büyüyen çözüm uzayıyla birlikte, en iyi çözüme ulaşmanın gerektirdiği hesaplama karmaşıklığından ötürü çok zaman alacağı durumlarda sezgisel (İng. heuristic) yöntemler tercih edilmektedir. Sezgisel yöntemler ile en iyi çözüme ulaşmak kesin değildir fakat sağladığı yakınsamanın yeterli seviyede olması, uygulanabilirlik ve kısa sürede sonuçlanmasından ötürü tercih edilmektedir. Bazı durumlarda çok düşük başarımla sergilemesi de olasıdır. Literatürde CCH'de önbellekleme problemini sezgisel yöntemlerle ele alan çalışmalar bulunmaktadır [18–21].

2.5 Optimizasyon Araçları

Matematiksel optimizasyon modellerinin çözümü için alternatif yazılımlar mevcuttur. Tez çalışmaları kapsamında incelenen KTP ve KTDP modelleri GAMS (The General Algebraic Modeling System) ile modellenip CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Tamsayı ve karma tamsayı optimizasyon modelleri eş boyutlu salt doğrusal modellere göre çok daha fazla hesaplama yükü getirmektedir. Bu yüzden görece olarak basit modellerin çözümü bile oldukça zaman almaktadır [22].

CPLEX çözücüsü KTDP modelleri için dal - buda (İng. branch and cut) algoritmasını kullanmaktadır. Bu algoritma ile optimizasyon modeli alt problemlere ayrılarak çözülmekte bu sayede karşılaşılan hesaplama yükü ve fiziksel hafıza gereksinimleri makul seviyelerde tutulmaktadır.

Karma Tamsayı Programlama çözümü için ticari olmayan diğer alternatifler; Python'un optimizasyon kütüphanesi PuLP, GLPK (İng. GNU Linear Programming Kit) ve BLIS (İng. BiCePS Linear Integer Solver)'dir. Bunlara ek olarak; GAMS'ta yer alan bir başka çözücü olan Gurobi, SAS'ın Optmodel kütüphanesi içinde sunulan çözücüler ve LINDO (İng. Linear Interactive and Discrete Optimizer) ticari alternatifler arasında yer almaktadır.

Optimizasyon modellerinde GAMS'a girdi olarak verilen parametreler (kullanıcı konumları, hareket modeli, içerik popülerliği vb.) MATLAB kullanılarak hazırlanmıştır. GAMS'ın çıktıları da yine MATLAB kullanılarak görselleştirilmiştir. GAMS-MATLAB arayüzü GDXMRW (GAMS Date eXchange - MATLAB Read/Write) paketi ile sağlanmaktadır. Bu sayede MATLAB kullanıcıları GAMS'ın optimizasyon kabiliyetlerine ve çözücülerine erişebilmektedir.

Çalışma kapsamında sunulan; "Stackelberg Oyun Kuramı Algoritması", "Stokastik Öğrenme Algoritması", Sezgisel öbikleme ve önbellekleme algoritmaları ile denektaşı yaklaşımların çözümleri ise MATLAB ile hesaplanmıştır.

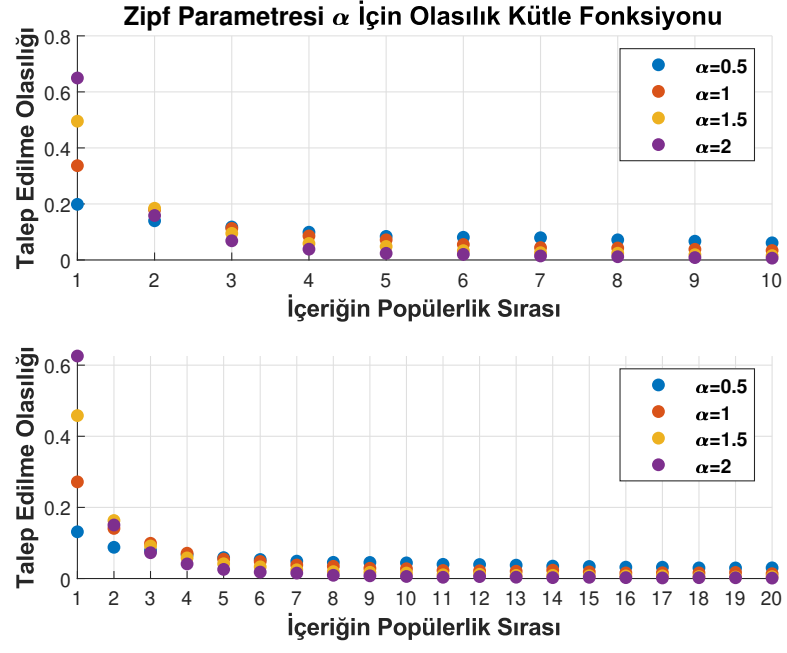
2.6 Zipf Dağılımı

Çalışma kapsamında, içeriklerin kullanıcılar nezdindeki popülerliği (talep edilme olasılığı) ayrık Pareto dağılımı olarak da bilinen Zipf dağılımı ile modellenmiştir [23]. İçerik popülaritesine göre u kullanıcısının c içeriğini isteme olasılığı p_{uc} bütün kullanıcılar için $1/(c^\alpha)$ ile orantılıdır. α değişkeni Zipf dağılımının eğimini belirlemektedir. Azalan α değerleri için dağılım daha düzgün bir hal almaktadır.

Zipf dağılımına göre C elemanlı bir içerik kümesinde, talep edilen içerikler arasında popülerliğe göre n 'inci sırada olan içeriğin talep edilme olasılığı 2.8'deki gibidir.

$$f(n : \alpha, C) = \frac{1}{n^\alpha} \frac{1}{\sum_{c=1}^C \frac{1}{c^\alpha}} \quad (2.8)$$

Farklı boyutlardaki içerik kümeleri ve α değerleri için Zipf dağılımının olasılık kütle fonksiyonu değerleri Şekil 2.3'te sunulmuştur.



Şekil 2.3: $C = 10$ ve $C = 20$ için içeriklerin talep edilme olasılıkları.

3. OYUN TEORİSİ İLE ÖNBELLEKLEME

3.1 Giriş

Tez çalışmasının bu kısmında CCH haberleşme teknolojisinin kullanıldığı hücresel bir ağda önbellekleme problemi Stackelberg Oyun Kuramı kullanılarak ele alınmıştır. Model ağ bir adet Baz İstasyonu (Bİ) ve birden fazla tek tip kullanıcı içermektedir. Kullanıcılar ihtiyaç duydukları içeriklerin mümkünse tamamını, değilse bir kısmını komşu kullanıcılardan CCH ile temin etmektedirler. Tamamı alınamayan içeriklerin eksik kalan kısımları ve komşu kullanıcılar tarafından önbelleklenmemiş içeriklerin tamamını şebeke üzerinden temin etmektedirler.

Önerilen yöntem dağıtık uygulanabilir bir yapıdadır. CCH'nin bant içi gerçekleştiği, yani hücresel ağ ile aynı bandı kullandığı varsayılmaktadır. Bu durum girişim yönetiminin de yapılmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, önerilen algoritma popüler içeriklerin önbelleklenmesini ve CCH haberleşmeyi teşvik ederken yukarı hat (İng. uplink) girişimini de gözetmektedir.

3.2 Literatür Taraması

Literatürde, CCH'de önbellekleme probleminin çözümü için oyun teorisinin kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Oyun teorisinin tercih edilmesinin başlıca nedeni, önbelleklemenin işbirlikli veya tekil olarak kullanıcılar tarafından dağıtık olarak uygulanabilmesidir.

[24]'te kullanıcıların CCH için teşvik edildiği ve önbelleklenecek içeriklerin önerilen sezgisel yöntem ile belirlendiği bir model incelenmiştir. İsbet oranı ve içeriğe erişimde yaşanan gecikmede iyileşme sağlandığı gösterilmiştir. [25, 26]'da yazarlar şebekeden içerik sağlamanın yarattığı maliyeti minimize etmek için oyun teorisi tabanlı yaklaşımlar önermişlerdir. [27, 28]'de ise açık arttırma tabanlı önbellekleme yaklaşımı oyun teorisi ile modellenmiştir. [29], [30]'da önbellekleme problemi sırasıyla; Stokastik Oyun ve Nash Pazarlık Oyunu (İng. Nash Bargain Game) ile ele alınmıştır. CCH'de gecikme iyileşmesi sağlanması amacıyla [31]'de İflas Oyunu (İng. Bankruptcy Game) [32]'de ise Koalisyon Oyunu (İng. Coalition Game) kullanılmıştır.

Stackelberg Oyunu da CCH'de önbellekleme için sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer oyun teorisi tabanlı yaklaşımlarda olduğu gibi dağıtık olarak uygulanabilir olması sağladığı avantajlardan biridir.

Stackelberg oyun modelinin tercih edildiği en kapsamlı çalışmalardan biri olan [33]'te yazarlar CCH'de önbellekleme problemini merkezi ve Stackelberg oyun kuramı tabanlı açgözlü önbellekleme yaklaşımları ile incelemiştir. Merkezi yaklaşımda servis sağlayıcı kullanıcıların önbelleklerini kendi maliyetini ve kazancını eniyileyecek şekilde planlamaktadır. Aç gözlü algoritmada ise servis sağlayıcı ile kullanıcılar arasındaki fiyatlandırma/maliyet dengesi Stackelberg oyunu, kullanıcıların kendi aralarındaki dengesi ise altoyun mükemmel Nash dengesi (İng. Subgame Perfect Nash Equilibrium, SPNE) ile modellenmiştir.

[34]'teki çalışmada Bİ kullanıcılara ödül vererek CCH'ye katılmalarını sağlamaktadır. Kullanıcılar ise ödül-gecikme ödünleşiminde sağladıkları faydayı maksimize edecek önbellekleme yapmaya çalışmaktadır. Bir başka çalışmada, mobil şebeke operatörü lider, içerik sağlayıcılar ise takipçi rolündedir. Operatör saklama alanı sağlamakta, içerik sağlayıcılar ise bu saklama alanını etkin bir biçimde kullanarak servis kalitesini maksimize etmeye çalışmaktadırlar [35]. [36]'daki çalışmada ise CCH'de iletim yapacak kullanıcının ve en uygun çıkış gücünün belirlenmesi Stackelberg oyun modeli ile ele alınmıştır. Gecikme kısıtı da içeren modelde iletim kalitesinde sağlanan artış gösterilmiştir. Bir başka çalışmada, Bİ'nin kendi kârını gözeterek kullanıcıları teşvik ettiği, CCH ile içerik sağlayan kullanıcıların ise kendi faydalarını maksimize etmeye çalıştığı problem Stackelberg oyunu ile modellenmiş elde edilen sonuçlar teorik sonuçlar ile kıyaslanmıştır [37].

Benzer bir maliyet optimizasyon problemi [38]'de modellenmiştir ve Stackelberg oyunu kullanılarak hareket farkında bir önbellekleme algoritması önerilmiştir. Algoritmanın başarımı; en iyi çözüm, rastgele önbellekleme ve popülerite bazlı öbellekleme ile kıyaslanmıştır. [39]'daki çalışmada ise hiyerarşik bir ağ modelinde Stackelberg oyun modeli ile dağıtık önbellekleme yaklaşımı önerilmiştir. Bİ, CCH ile kullanıcılara içerik sağlayan yardımcı kullanıcılara ödül vermektedir. Başarım kriterleri olarak da fiyat, fayda ve harcanan güç belirlenmiştir. CCH'de maliyet/ağ verimi dengesi [40], girişim farkında spektrum kullanımı [41], bileşik güç ve kaynak tahsisi problemi [42] Stackelberg oyun modeli ile ele alınmıştır.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak ele alınan problem içerik iletimi ve girişim gözetimini de kapsamaktadır. Ayrıca, amaç fonksiyonu doğrudan maliyet, dolaylı olarak da yük boşaltma eniyilemesi sağlamaktadır.

3.3 Oransız Kodlar

Daha önce de belirtildiği üzere, kullanıcılar içerikleri tamamen veya kısmi olarak önbellekleyebilmektedirler. İçerik talep eden kullanıcılar ise ihtiyaç duydukları içerikleri farklı kullanıcılardan kısmi olarak temin edebilmektedirler. Bu varsayım önbelleklenmiş verinin oransız kodlar (İng. Rateless Codes, Fountain Codes) kullanılarak kodlanması durumunda mümkün olmaktadır. Oransız kodlar bir kanal kodlaması olup, silinti kanallarda (İng. erasure channels) gürültü ve girişim gibi etkenlerden dolayı meydana gelecek kayıpların üstesinden gelmek amacıyla kullanılmaktadır [43]. Temel olarak içeriğe ait K adet veri sembolünün rastgele seçilip XOR işlemi uygulanarak üretilen sembollerin iletilmesi prensibiyle çalışmaktadır. Alıcı bu sembollerden L adet alabildiği zaman başarılı kod çözümü

yapabilmektedir. Alınan sembol sayısının toplam sembol sayısına en az eşit veya biraz fazla olması $L = K + \varepsilon$ gerekmektedir. Burada K/L kod oranı diye anılmaktadır ve sabit olmadığı için oransız kodlar olarak adlandırılmaktadır [44]. Oransız kodların, LT Kodlar (İng. Luby Transform) ve Raptor Kodlar gibi varyantları bulunmaktadır. Bunlar; kodlama ve kod çözümü mimarisi, karmaşıklık, ek yük açısından farklılık göstermektedir [45]. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında önbelleklenmiş içeriklerin Oransız Kodlar ile kodlandığı varsayılmaktadır.

3.4 Stackelberg Oyunu

Stackelberg Oyunu'nun geçmişi, Heinrich Freiherr von Stackelberg tarafından ekonomik modellemelerde kullanılmak için önerilen ve 1934 yılında yayınlanan Pazar Yapısı ve Denge (İng. Market Structure and Equilibrium), (Alm. Marktform und Gleichgewicht) isimli makalede önerilen yaklaşıma uzanmaktadır [46]. Özellikle ekonomi biliminde pazardaki arz talep dengesinin sağlanması ve fiyatlandırmanın yapılması üzerine kurulan modellerde kullanılmaktadır.

Stackelberg oyununda sayıları modele göre değişkenlik gösteren (tek veya birden fazla olabilir) **lider** ve **takipçi** olmak üzere iki farklı rol vardır. Lider(ler) fayda fonksiyonunun çıktısını maksimize edecek şekilde hamle yaptıktan sonra, takipçi(ler) bu hamleyi de göz önünde bulundurarak kendi faydalarını maksimize edecek kararlar vermektedir. Döngüsel yapı tüm katılımcılar için mevcut durumlarını iyileştirecek bir hamlenin kalmadığı denge noktasına erişene kadar devam etmektedir.

3.5 Sistem Modeli

CCH'de kullanıcılar, cihazlarının sınırlı batarya ve hafızasını başka cihazların ve şebekenin yararına kullanılmasına yönelik istekli olmazlar. Bunun için CCH haberleşmeye teşvik edilmeleri gerekmektedir. Bu da merkezi bir yapıda verilecek teşvik ve ödüllerle mümkündür. Bu doğrultuda, problem ödül tabanlı Stackelberg Oyununa göre modellenmiştir. Model **lider** rolündeki Bİ'nin CCH'ye katkı sağlayan **takipçi** rolündeki kullanıcılara ödül vererek onları teşvik ettiği, kullanıcıların ise aldıkları ödüle istinaden önbelleklerinde içerikleri tutmaya ve iletmeye istekli olduğu bir ödünleşim üzerine kuruludur.

Bİ ödül miktarını arttırdıkça CCH'ye katılım artmaktadır. Böylelikle Bİ'nin servis maliyeti (SM) azalmakta fakat ödül maliyeti (ÖM) artmaktadır. Bu durumda Bİ toplam maliyetini (SM+ÖM) minimize edecek optimum ödüle karar vermektedir. Oyun kuramı tabanlı önbellekleme algoritması da belirlenen ödüle göre dağıtık olarak uygulanabilen bir yapıdadır.

Ağ modeli, dairesel bir alanda sınırlı bir sektöre rastgele konumlandırılmış N adet kullanıcı içermektedir. Kullanıcı kümesi $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ olup \mathcal{N}_n kümesi ise n kullanıcısının komşusu olan kullanıcıları içermektedir ve $\mathcal{N}_n \subseteq \mathcal{N}$ sağlanmaktadır. Ağ'da yer alan bütün kullanıcılar CCH kabiliyetine sahip olduğu ve başarılı haberleşme için birbirlerine CCH menzili d_0 'dan daha yakın konumda olmaları gerekmektedir. Örneğin, n ve m birbirlerine $d_{n,m}$ yakınlıkta iki kullanıcı olsun, $d_{n,m} <$

d_0 sağlanıyorsa CCH mümkündür. $h_{n,m}$ kullanıcılar arasındaki kanal kazancını ifade etmekte olup yol kaybı, gölgeleme ve sönmülemeyi içermektedir.

İçerik kümesi $\mathcal{C} = \{1, \dots, C\}$ 'dir ve kullanıcılar sınırlı önbelleklerinde istedikleri içeriği tutabilmektedirler. İçeriklerin eşit boyutta ve oransız kodlar kullanılarak (Luby Transform, Raptor) kodlandığı varsayılmaktadır. Bu varsayıma dayanarak kullanıcıların içerikleri parçalar halinde de önbellekleyebilmesi mümkün olmaktadır. x_n^c ifadesi n kullanıcısının c içeriğinin ne kadarlık kısmını önbelleklediğini belirtmektedir ve bir içeriğin mükerrer miktarda tutulmasının engellenmesi açısından $0 \leq x_n^c \leq 1$ eşitsizliğini sağlamaktadır. $x_n^c = 1$ içeriğin tamamının önbelleklendiği anlamına gelmektedir.

Kullanıcılar talep ettikleri içeriklerin tamamını temin etmek istemektedirler ve öncelikleri CCH'dir. İçeriğe ait alınan parçaların toplam boyutunun 1 olması halinde elde edilen verinin kod çözümünün yapılabildiği ve içeriğin elde edilebildiği kabul edilmektedir. Bir kullanıcının talep ettiği içerik için CCH üzerinden aldığı parçaların tamamının 1'den küçük olması durumunda ise geri kalan kısım hücrel şebeke üzerinden, Bİ'den, talep edilmektedir.

Kullanıcı n nezdinde c içeriğinin popürlüğü p_{uc} olarak tanımlanmıştır. Bu ifade bütün içerik kümesi göz önünde bulundurulduğunda, bir olasılık kütle fonksiyonu gibi, $\sum_{c \in \mathcal{C}} p_{uc} = 1$ şeklinde de ifade edilebilir. İçerik popürlüğünün Zipf dağılımına sahip olduğu varsayılmaktadır ve kullanıcıdan kullanıcıya farklılık gösterebilmektedir.

Bir kullanıcı talep ettiği içerik için öncelikle kendi önbelleğine bakar, eğer içeriğin tamamı mevcutsa herhangi bir talepte bulunmaz. Eğer söz konusu içerik kısmi olarak mevcutsa, yani $x_n^c < 1$ ise kullanıcı n en yakın komşusundan başlayarak içeriğin eksik kısmını CCH üzerinden talep eder. Eğer diğer kullanıcılardan bu talebi karşılanamaz ise Bİ'den talep eder.

Kullanıcılar n ve m arasındaki Sinyal Gürültü Oranı (SGO)(İng. Signal-to-Noise Ratio, SNR) $\gamma_{n,m}$ olsun;

$$\gamma_{n,m} = \frac{P_{n,m} h_{n,m}}{\sigma^2} \quad (3.1)$$

Burada $P_{n,m}$ iletim gücü σ^2 ise gürültü gücüdür. Başarılı bir iletim için SGO'nun eşik değeri olarak belirlenen γ_0 'dan büyük olması gerekmektedir. Böylelikle kullanıcı n 'den kullanıcı m 'ye başarılı bir iletim için gerekli iletim gücü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P_{n,m} = \frac{\gamma_0 \sigma^2}{h_{n,m}} \quad (3.2)$$

Kullanıcıların en yakın komşularından (en iyi kanal kazancına sahip olduğu varsayılmaktadır) başlayarak talepte bulunmaktadır. Burdan yola çıkarak, $(k)_n$ ifadesi n kullanıcısının en iyi k 'nci komşusunu ifade etmektedir. Bir kullanıcının en yakın komşusu kendisi olduğu varsayılmakta olup $(0)_n = n$ 'dir. $[n]_m$ ise m kullanıcısının komşuları arasında n kullanıcısının kaçınıcı sırada olduğu göstermektedir.

Kullanıcı n 'nin, kullanıcı m tarafından talep edilmesi halinde önbelleklemiş olduğu c içeriğinden ne kadar ileteceği şu şekilde ifade edilmektedir.

$$F_{n,m}^c(x_n^c, \mathbf{x}^c) = \min \left\{ x_n^c, \max \left\{ 0, 1 - \sum_{k=0}^{[n]_m-1} x_{(k)_m}^c \right\} \right\} \quad (3.3)$$

Kullanıcılar hücrel haberleşme için tahsis edilmiş olan lisanslı bantları kullanırlar. Bu yüzden CCH iletim esnasında Bİ'ye girişimde bulunurlar. Kullanıcı n ile Bİ arasındaki kanal kazancı $h_{n,0}$ ile ifade edildiğinde aynı kullanıcının yarattığı ortalama girişim, iletilen veri miktarı ile ilişkili olarak 3.4'teki şekilde ifade edilebilir. Bu ifade anlık girişim olmasa da onun iyi bir göstergesi olarak ele alınabilir.

$$G_n(\mathbf{x}) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{m \in \mathcal{N}} p_{mc} h_{n,0} \frac{\gamma_0 \sigma^2}{h_{n,m}} F_{n,m}^c(x_n^c, \mathbf{x}^c) \quad (3.4)$$

CCH iletişiminde içeriklerin önbellekte bulundurmanın asıl amacı Bİ üzerindeki yükün boşaltılmasıdır. Bu doğrultuda doğru içeriklerin önbellekte tutulması önem arz etmektedir. Çünkü CCH bağlantılar üzerinden temin edilemeyen içerikler kısmi veya tamamen Bİ'den talep edilmektedir. Bu da Bİ üzerinde ilave bir yüklenmeye sebebiyet vermektedir.

Tarife istinaden Bİ'den talep edilen içerik miktarı 3.5'teki gibi ifade edilebilir. Bu ifade aynı zamanda çalışmanın geri kalan kısmında Bİ'nin **Servis Maliyeti (SM)** olarak anılacaktır.

$$F_0(\mathbf{x}) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{nc} \max \{ 0, 1 - \sum_{m \in \mathcal{N}_n} x_m^c \} \quad (3.5)$$

SM'yi azaltmanın yolu CCH linkler üzerinden daha fazla iletim yapmaktan geçmektedir. Fakat bu da Bİ'deki girişimin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle tarif edilen ödünleşimin kullanıcılar tarafından akıllıca ele alınması gerekmektedir. Buradan yola çıkarak her kullanıcının kendi önbellek yönetimini yaptığı dağıtık bir önbellekleme yaklaşımı önerilmiştir.

3.6 Problem Formülasyonu

3.6.1 Stackelberg oyun modeli

Bİ, kullanıcılara CCH ile sağladıkları içerik miktarı ile orantılı olarak ödül (teşvik) vermektedir. Verilen ödülün mahiyeti çalışma kapsamında tanımlanmamıştır fakat literatür araştırmasında behsedildiği üzere kullanıcıların CCH'ye teşvik edilmesi için kullanılan bir yaklaşımdır.

Problem formülasyonu, sağlanan içerik miktarı, girişim, içerik popülerliği ve ödül bileşenlerini içeren bir **Fayda Fonksiyonu**'ndan temel almaktadır. Kullanıcı n için

Fayda fonksiyonu, sağladığı yük boşaltma ve kazandığı ödül miktarıyla artarken neden olduğu girişim ile ters orantılı olup 3.6'daki biçimde ifade edilmektedir. Fayda fonksiyonunda kavramlar arasında türsel ilişki bulunmadığından girişim miktarı ampirik yollarla belirlenen w_i katsayısı ile çarpılmıştır.

$$\max_{\mathbf{x}_n} U_n(r, \mathbf{x}_n, \mathbf{x}) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{m \in \mathcal{N}_n} p_{mc} r s_c F_{n,m}^c(\mathbf{x}^c) - w_i G_n(\mathbf{x}) \quad (3.6)$$

s.t

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} x_n^c s_c \leq C_c \quad (3.7)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} G_n(\mathbf{x}) \leq G_{maks} \quad (3.8)$$

Burada 3.7 önbellek kapasitesi, 3.8 ise azami girişim kısıtıdır. Bu kısıtlardan birinin ihlal edilmesi halinde önbelleğe içerik ekleme işlemi sonra ermektedir.

Bİ'nin amacı kendi maliyetini minimize etmektir. Söz konusu maliyet iki bileşenden oluşmaktadır. Biri kullanıcılara CCH iletişime sağladıkları katkıya karşılık verilen ödüllerin neden olduğu ÖM'dir. Diğeri ise CCH iletişim ile sağlanamayan içeriklerin kalan kısımlarının iletilmesinden kaynaklı SM'dir. Bİ'nin toplam maliyeti (TM=ÖM+SM) 3.9'daki gibidir. Burada denklemde de birimler arasında türsel bir ilişki bulunmadığından TM hesaplanırken SM ampirik yöntemlerle belirlenen w_s katsayısı ile çarpılmıştır.

$$C(r, \mathbf{x}) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{nc} s_c \sum_{m \in \mathcal{N}_n} r F_{m,n}^c(\mathbf{x}^c) + w_s F_0(\mathbf{x}) \quad (3.9)$$

Önerilen ödül tabanlı önbellekleme yönteminin sözde kodu Algoritma 1'de yer almaktadır. Bİ başlangıçta ödülü sıfır olarak belirler (Satır 1). Ana döngü (Satırlar 3-15) ödülü Δ_r adımlarla artırır. Ödülün artması önbellekte tutulan içeriklerin fazlaşmasını tetikler bu da Bİ'nin SM azaltır. Diğeri bir deyişle CCH hat üzerinden gerçekleşen trafik artar. Belirli bir noktada, ÖM'deki artış SM'deki azalıştan fazla olur ve Bİ'nin toplam maliyeti $C(r, \mathbf{x})$ artmaya başlar. Bu noktada Algoritma 1 durur.

İç döngüde (Satırlar 6-13) her kullanıcı ve içerik için bir gradyant ($\nabla_n^c(r, \mathbf{x})$) hesaplamaktadır. Bu değer, belirlenen adım değeri (δ) miktarınca önbelleğe alınan içeriğin fayda fonksiyonunda yarattığı etkiyi ifade etmektedir. Fayda fonksiyonunda en fazla artışı sağlayan içerik kullanıcıya en yüksek ödül getirisini sağlayacağı için önbelleklenir. Bu yaklaşımla, talep görmeyen içerikler için düşük gradyant değerleri hesaplanacakken bazı içerikler için negatif değerlerin hesaplanması da mümkündür.

Bu yöntem ile kullanıcıların kendi komşuluklarında talep gören içeriklerin önbelleklenmesi sağlanmaktadır. Bir noktada algoritma denge noktasına yakınsar. Bu noktada, aşağıda belirtilen kriterlerden en az biri sağlanmıştır ve daha çok içerik önbelleklenmesi daha fazla ödül kazanmaya imkân vermez.

Algoritma 1 Stackelberg Oyunu Tabanlı Önbellekleme

```
1: İlkle:  $r = 0$ 
2: Girdi: azami girişim =  $G_{maks}$ , gradyan çarpanı= $\zeta$ , adım boyu= $\delta$ , önbellek
   kapasitesi =  $C_c$ , içerik boyutu= $s_c$ 
3: while  $C(r, \mathbf{x})$  azaldıkça do
4:    $r = r + \Delta_r$ 
5:   Önbellek Durumlarını İlkle:  $x_n^c = 0, \forall n \in \mathcal{N}, c \in \mathcal{C}$ .
6:   while  $\sum_{c \in \mathcal{C}} x_n^c s_c \leq C_c \forall n \in \mathcal{N}$  ve  $\sum_{n \in \mathcal{N}} G_n(\mathbf{x}) \leq G_{maks}$  do
7:     for  $n \in \mathcal{N}, c \in \mathcal{C}$  do
8:        $\nabla_n^c(r, \mathbf{x}) = \frac{U(r, x_n^c + \delta, \mathbf{x}) - U(r, x_n^c, \mathbf{x})}{\delta}$ 
9:     end for
10:    if  $\sum_{c \in \mathcal{C}} x_n^c + \nabla_n^c(r, \mathbf{x}) \times \zeta \leq C_c$  then
11:      Güncelle:  $x_n^c = x_n^c + \nabla_n^c(r, \mathbf{x}) \times \zeta \forall n \in \mathcal{N}, c \in \mathcal{C}$ 
12:    end if
13:  end while
14:  Hesapla  $C(r, \mathbf{x})$ 
15: end while
```

Denge noktasını sağlayan kullanıcılar Bİ'yi bu durumdan haberdar eder, bütün kullanıcılar için denge noktasının sağlanmasıyla Algoritma 1 durur. Nihai önbellek dağılımı ve ödül miktarlarıyla ortaya çıkan Bİ maliyeti $C(r, \mathbf{x})$ hesaplanır.

Denge noktasının sağlanması için üç koşuldan birinin sağlanması gerekmektedir.

- Belirlenen azami girişim kısıtına erişilmiştir.
- Kullanıcıların önbellek kapasiteleri dolmuştur.
- Bİ'nin toplam maliyetindeki azalma durmuştur ve ödül miktarını arttırmamıştır.

Önerilen algoritmayı dağıtık olarak uygulamak için, girişim kısıtını gözetmek amacıyla, kullanıcılara neden oldukları anlık girişim bilgisinin $(h_{n,0} \frac{\gamma_0 \sigma^2}{h_{n,m}})$ Bİ tarafından sağlandığı varsayılmaktadır.

3.6.2 Matematiksel programlama modeli

Önerilen algoritmayı en iyi çözüm ile de kıyaslamak amacıyla problem Karma Tamsayılı Programlama (İng. Mixed Integer Programming (MIP)) ile modellenmiş ve CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Bu merkezi bir çözümdür yani Bİ bütün kullanıcıların hangi içeriği hangi miktarda önbelleğinde tutacağına karar vermektedir. Bundan dolayı maliyet fonksiyonu yalnızca SM'den oluşmaktadır.

$$\min\{F_0(\mathbf{x}) = \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{uc} \max\{0, 1 - \sum_{m \in \mathcal{N}_n} x_m^c\}\} \quad (3.10)$$

s.t

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} x_n^c s_c \leq C_c \quad (3.11)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} G_n(\mathbf{x}) \leq G_{maks} \quad (3.12)$$

$$0 \leq x_m^c \leq x_n^c \leq s_c \forall n \in \mathcal{N}, c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{N}_n \quad (3.13)$$

En iyileme probleminde amaç fonksiyonu 3.10 Baz İstasyonu için SM'dir. İçerik boyutu 1 birim olarak belirlenmiştir ve CCH iletim ile sağlanamayan kısım Bİ tarafından sağlanmaktadır. İlk iki kısıt, 3.11 ve 3.12 sırasıyla önbellek kapasitesi ve azami girişim kısıtlarıdır. Son kısıt 3.13 ise; **1)** CCH iletim miktarının negatif olmaması ($0 \leq x_m^c$), **2)** kullanıcıların önbelleklerinde tutulan veri miktarından fazlasını gönderememesi ($x_m^c \leq x_n^c$) **3)** kullanıcıların bir içeriği boyutundan fazla önbelleklerine alamamasını ($x_n^c \leq s_c$) sağlamaktadır.

3.7 Temel Önbellekleme Yaklaşımları

Stackelberg oyun kuramı tabanlı önbellekleme modelinin başarımını değerlendirmek için bazı temel önbellekleme algoritmaları da [34] ele alınmıştır. Bu temel algoritmalarda kullanıcılar başlangıçta boş olan önbelleklerini kademeli bir şekilde aşağıda tarif edilen yaklaşımlara göre doldurmaktadırlar.

Her döngüde, her kullanıcı;

- **Rastgele Önbellekleme (RÖ):** İçerik kümesinden rastgele bir içerik seçilerek β miktarınca önbelleğine ekler.
- **Düzenli Önbellekleme (DÖ):** Bütün içeriklerden β miktarınca önbelleğine ekler.
- **Popülerite Tabanlı Önbellekleme (PTÖ):** Her içeriği, popüleritesi ile doğru orantılı olacak miktarda ($\beta \times p_{nc}$) kadar önbelleğinde tutar. Burada p_{nc} , c içeriğinin n 'inci kullanıcı tarafından talep edilme ihtimalini göstermektedir.
- **Açgözlü Önbellekleme (AÖ):** Kendi tercihine göre en popüler içerikten β kadar önbelleğine alır. Söz konusu içerik tamamen önbelleğe eklendiyse sıradaki en popüler içeriğe geçer.

Bu aşamalar, önbellek kapasitesi kısıtı veya girişim kısıtı ihlal edilene kadar döngüsel olarak tekrar etmektedir.

3.8 Benzetimler ve Sonuçlar

Benzetimlerde Çizelge 3.1’de yer alan değerlere göre hücrel bir ağda 60° ’lik bir sektör için gerçekleştirilmiştir. Kullanıcıların sektör içinde rastgele konumlandırıldığı ve benzetimler boyunca hareketsiz oldukları varsayılmaktadır.

Kullanıcılar n ve m arasındaki CCH bağlantılar için yol kaybı modeli olarak;

$$PL_{n,m} = 148 + 40\log_{10}(d_{n,m}) \quad (3.14)$$

Kullanıcı n ile Bİ arasındaki yol kaybı olarak ise;

$$PL_{n,Bi} = 128.1 + 36.7\log_{10}(d_{n,Bi}) \quad (3.15)$$

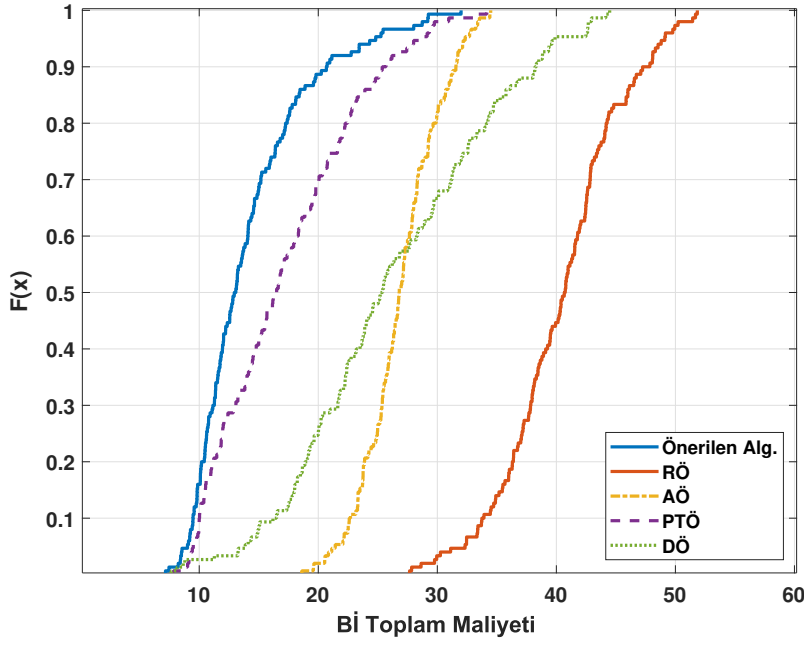
kullanılmıştır [47]. Burada, $d_{n,m}$ n ve m kullanıcıları arasındaki mesafeyi, d_n ise n kullanıcısı ile Bİ arasındaki mesafeyi km cinsinden ifade etmektedir.

Çizelge 3.1: Stackelberg lider-takipçi oyunu için benzetim parametreleri.

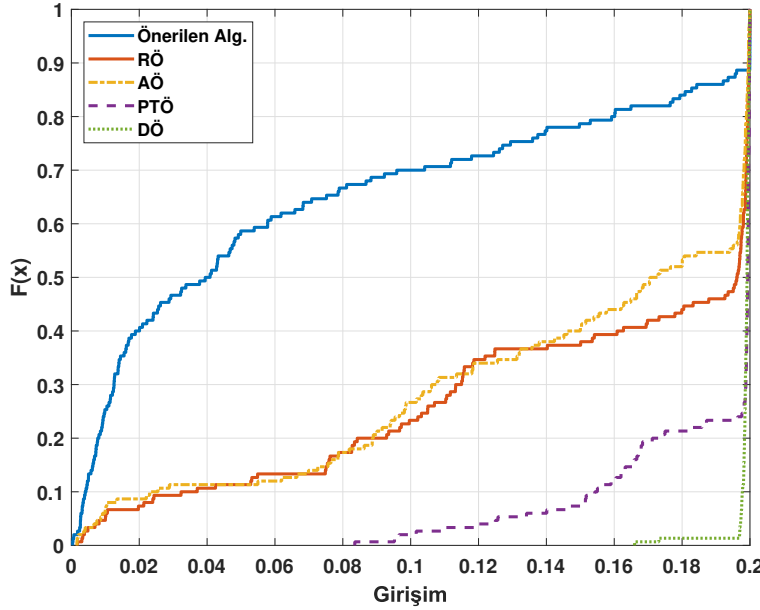
Parametre	Değer
Topoloji sayısı	150
İçerik sayısı (C)	20
Kullanıcı sayısı (K)	8
Sektörün yarıçapı (r)	200 m
İçerik boyutu (s_c)	1 birim
CCH menzili (d_0)	50 m
Önbellek kapasitesi (C_c)	2 birim
Ödül artışı adım boyu (Δ_r)	0.02
Önbelleklenmiş içerik artışı adım boyu (δ)	0.001
Stackelberg modeli gradyan çarpanı (ζ)	0.001
Zipf parametresi (α)	1
Servis maliyeti katsayısı (w_s)	3
Girişim katsayısı (w_i)	2
Azami girişim G_{maks}	[0.1, 0.2, 0.25]
Temel algoritmalarda içerik artışı adım boyu (β)	0.005

Her topoloji için önerilen algoritma ve denektaşı algoritmaların toplam maliyet ve Bİ’nin maruz kaldığı ortalama toplam girişim sonuçları elde edilmiştir. KTP çözümü için ise yalnızca Bİ’nin SM yine 150 farklı topoloji için hesaplanmıştır. KTP çözümünde herhangi bir ödül mekanizması olmadığı için ÖM hesaplanmamıştır.

Şekil 3.1 Bİ toplam maliyetinin kümülatif dağılım fonksiyonunu (KDF) (İng. Cumulative Distribution Function, CDF) maksimum girişim kısıtı $G_{maks} = 0.2$ için göstermektedir. Önerilen Stackelberg Oyun Kuramı tabanlı yöntem benzetimlerin tamamında da en etkin maliyete sahiptir. Ortalama maliyete bakıldığında ise başarımlı sıralaması PTÖ, DÖ, AGÖ ve RÖ şeklindedir. Önerilen algoritma en yakın denektaşı yaklaşımdan (PTÖ) ise ortalama %20 daha maliyet etkindir.

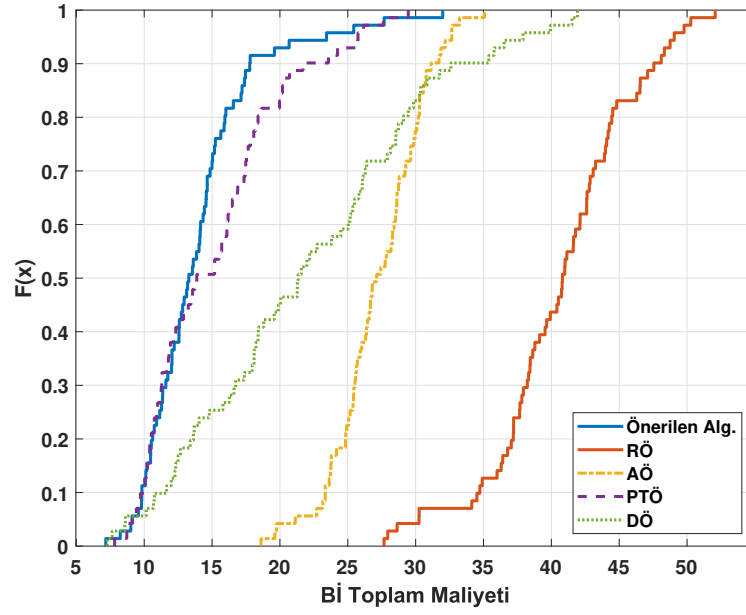


Şekil 3.1: Bİ'nin toplam maliyeti için KDF. ($G_{maks} = 0.2$)



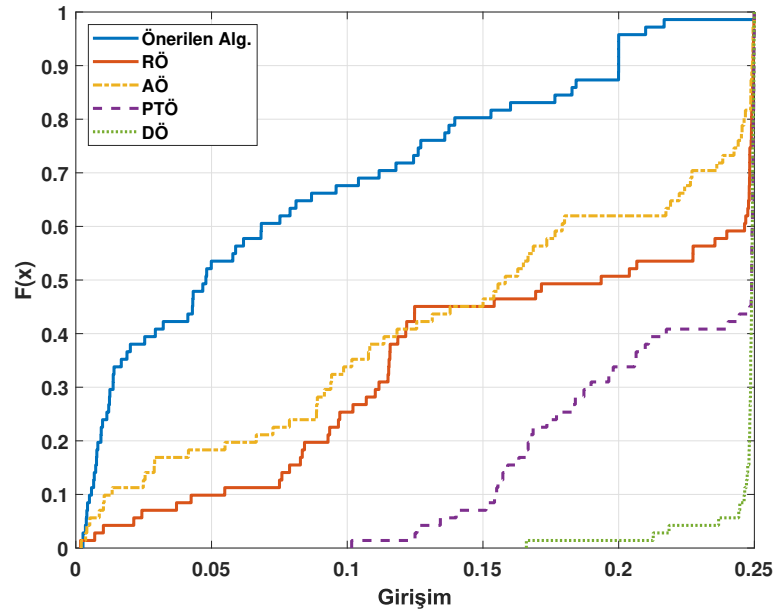
Şekil 3.2: Bİ'deki ortalama toplam girişim için KDF. ($G_{maks} = 0.2$)

Şekil 3.2 ise aynı yöntemler için ortalama toplam girişimin KDF'si girişim kısıtı olan $G_{maks} = 0.2$ için göstermektedir. Bütün yaklaşımların azami girişim kısıtına yakınsamışken önerilen algoritma benzetimlerin %90'ında azami değerden daha az girişim oluşturmuştur. Önerilen algoritmanın maliyet yanı sıra girişim olarak da ele alınan diğer yaklaşımlardan üstündür. Önerilen yaklaşım sonuçların yarısında ($F(x) = 0.5$ için) 0.04 ve daha az girişime neden olurken maliyet olarak en iyi ikinci başarıyı gösteren RÖ benzetimlerin %10'u hariç azami girişim kısıtına takılmıştır.

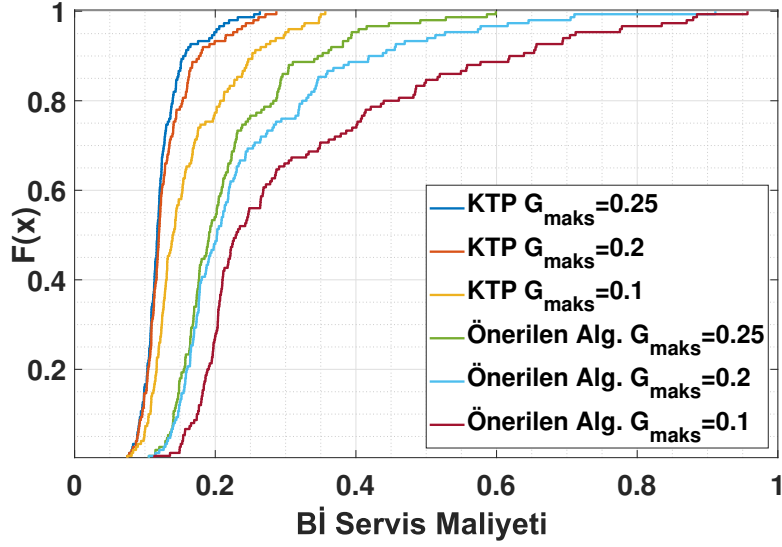


Şekil 3.3: Bİ'nin toplam maliyeti için KDF. ($G_{maks} = 0.25$)

Benzetimlerin ikinci kısmında aynı kıyaslamalar %20 daha rahatlatılmış azami girişim kısıtı $G_{maks} = 0.25$ için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3 ve 3.4'te önerilen algoritmanın yine en az maliyet ve girişim değeri verdiği görülmektedir. PTÖ yaklaşımının diğer 4 temel yaklaşıma kıyasla daha maliyet etkin olma nedeni talep edilmesi olası içeriklerin önbellekte tutulması iken maliyeti düşüren bu etkenden kaynaklı olarak diğer yaklaşımlara kıyasla fazla girişim yaratmaktadır.



Şekil 3.4: Bİ'deki ortalama toplam girişim için KDF. ($G_{maks} = 0.25$)



Şekil 3.5: Değişken G_{maks} için Bİ servis maliyetinin KDF.

Benzetimlerin son kısmında önerilen algoritma ve KTP çözümü farklı G_{maks} değerleri için kıyaslanmıştır. Şekil 3.5'te yer alan sonuçlara göre KTP çözümü benzetimlerin yarısında ($F(x) = 0.5$) ortalamada %65 daha az SM sağlamıştır. Azami girişim kısıtı sıkılaştıkça bu fark artmaktadır. Bunun nedeni kullanıcıların bireysel olarak yaptığı girişim kontrolünün merkezi bir yaklaşıma kıyasla daha verimsiz olmasıdır.

3.9 Değerlendirme

Benzetimlerde, önerilen algoritma temel önbellekleme yaklaşımlarına kıyasla belirgin bir üstünlük sağlamıştır. Fakat KTP çözümüyle kıyaslandığında daha yüksek SM'ye neden olduğu görülmüştür. SM'nin fazla olması yük boşaltmanın başarımının daha kötü olduğu anlamına gelmektedir. Önerilen algoritmanın dağıtık olarak uygulanıyor oluşu optimizasyon tabanlı KTP çözümüne göre bir avantaj olarak görülmelidir. Bununla birlikte, önerilen algoritmanın başarımı ve yakınsama süresi (döngü sayısı) Çizelge 3.1'de belirtilen adım büyüklükleri ile ilintilidir. Ödül miktarının ve her döngüde önbelleğe alınan içerik miktarının daha küçük adımlarla artması fayda fonksiyonundaki değişimin daha sık değerlendirilmesi anlamına gelmektedir. Bu durum, algoritmanın başarımını arttırdığı gibi yakınsama için gerekli döngü sayısını yani yakınsama süresini de uzatmaktadır.

4. YÜK BOŞALTMA ENİYİLEMESİ

4.1 Giriş

Bu bölümde, CCH'de önbellekleme problemi farklı profilde kullanıcıların bulunduğu bir ağ için incelenmiştir. Kullanıcıların bir kısmının önbellekleme yapabildiği ve talep edilmesi halinde röle vazifesi görerek önbelleklediği içeriği ilettiği bir model ele alınmıştır. Optimizasyon problemi KTDP olarak modellenmiştir ve CPLEX ile çözülmüştür. Optimizasyon tabanlı en iyi çözüm, yine çalışma kapsamında önerilen algoritmalar ve sezgisel yaklaşımların sonuçlarının kıyaslanmasında kullanılmıştır. Geniş çaplı benzetimler ile elde edilen sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir.

Sistem Modeli ve Problem Formülasyonu sırasıyla 4.3 ve 4.4'te sunulmuştur. 4.5'te stokastik öğrenme algoritması ve önbellekleme yapan kullanıcıların öbeklenmesi için basit yöntemler incelenmiştir. 4.6'da Öbekleme ve Önbelleklemede için dağıtık olarak da uygulanabilen sezgisel yaklaşımlar önerilmiştir ve başarımları farklı kriterler için değerlendirilmiştir. 4.7'de ise önerilen sezgisel yaklaşımların kullanıcıların hareketli olduğu durumdaki başarımları gösterilmiştir. Son olarak, 4.8'de problem formülasyonu hareket farkında bir yapıya evrilmiştir ve farklı uzunluklarda benzetimler için KTDP ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar önerilen sezgisel yaklaşımların sağladığı başarımla kıyaslanmıştır.

4.2 Literatür Taraması

CCH'nin hücreyel şebekede kullanılmaya başlanacağı öngörüsüyle birlikte, önbellekleme yönelik etkin, pratik ve uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesi çalışmaları da ilgi duyulan bir konu haline gelmiştir [48]. Bu kısımda, CCH'de önbellekleme problemine yönelik literatür araştırması 4. Bölüm kapsamında incelenen yaklaşımlar ve kavramlar üzerinden yapılmıştır.

CCH'de **makine öğrenmesi** disiplinine dayalı yöntemler; isabet oranı [49–51], yük boşaltma [52, 53], gecikme [54, 55] ve enerji tüketimi [56, 57] gibi başarımla kriterlerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, ağda yer alan kullanıcıların tercihlerinin kestirilmesi [58, 59] ve bu doğrultuda önbelleklemenin dağıtık olarak yapılması [60–62] amacıyla da kullanılmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme (İng. reinforcement learning) yöntemleri kullanan çalışmalara da literatürde sıklıkla rastlanmaktadır [63–65]. Başlangıçta önbellekleme kararı vermede kullanılacak ön bilginin olmadığı modellerde pekiştirmeli öğrenmenin bir çeşidi olan Q-öğrenmesi de (İng. Q-learning) kullanılmaktadır [66–68]. Bu yaklaşım, ön bilgi olmadan verilen kararın ağdaki etkisinin ölçülmesi ve bu geri beslemenin takip eden hamleler için kullanılması üzerine kuruludur.

Literatürde CCH önbellekleme probleminin **optimizasyon tabanlı yaklaşımlar** ile ele alındığı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalarda, Matematiksel Programlama ile; kapsama [69], yük boşaltma [70], isabet oranı [71–74], gecikme [75] eniyilemesi amaçlanmakta olup önbellek kapasitesi [73, 74], girişim [76], ve güç tüketimi [77] gibi kısıtları göz önünde bulundurulmuştur. Sunulan çözümler yüksek başarımlar sağlmasına rağmen optimizasyon problemlerinin doğası gereği barındırdıkları hesaplama karmaşıklığı nedeniyle uygulanabilirlikten uzaktır.

Optimizasyon tabanlı çözümlerin yanı sıra daha pratik **sezgisel algoritmaların** sunulduğu çalışmalar da bulunmaktadır. [19, 78]’de isabet oranını maksimize etmek için, [79, 80]’de ise gecikme iyileştirmesi için önbellekleme amaçlı sezgisel algoritmalar önerilmişken [81]’de yazarlar hem isabet oranını hem de istenen içeriğe erişirken yaşanan gecikmenin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Önerilen sezgisel yöntem ile en iyi çözüme yakın ve az karmaşıklıkta bir önbellekleme yaklaşımı [82]’de sunulmuştur. CCH’de enerji verimliliğini gözetilen bir önbellekleme yaklaşımı ise [21]’de ele alınmıştır. [83]’teki çalışmada CCH önbellekleme ve kanal tahsisi problemini ele alırken içerik iletimindeki gecikmeyi iyileştirmeyi amaçlamıştır. Önerilen sezgisel algoritmalar ile optimizasyon tabanlı çözüm kıyaslanmıştır. Spektrum kaynağına erişim yöntemi ve tahsisi ağ kapasitesinde iyileştirme amaçlı olarak modellenmiş ve sezgisel çözüm önerilmiştir [84].

Önbellekleme optimizasyonu probleminin yük boşaltmayı maksimize etmek üzere modellendiği ve CCH bağlantı kurulumunu da içeren yaklaşım [85]’te sunulmuştur. Diğer bir takım çalışmalar önbellekleme için stokastik geometriyi kullanmıştır ve düğümlerin dağılımı uzaysal rastgele süreç (İng. spatial random process) olarak ele alınmıştır. [86–89]’de da stokastik geometri kullanılmış olup çıktıyı (İng. throughput) maksimize etmek için rastgele önbellekleme yaklaşımı ele alınmıştır. [90]’de çizelgeleme de rastgele bir yaklaşımla yapılmaktadır. Bu çalışmalar düğüm yoğunluğu ve çıktı gibi bazı temel ödüneşimlere değinmektedir. Gerçekçi modellerde düğüm dağılımı Poisson nokta süreci (İng. Poisson point process) olmayabilir bu yüzden bahsedilen çalışmalar gerçekçi modeller için çıkarım yapmaktan uzaktır. Ayrıca yukarıdaki çalışmalarda CCH önbelleklemenin merkezi bir yolla yapıldığı varsayılmaktadır. Bu da CCH’nin önemli kriterlerinden olan uygulanabilirlik ve ölçeklenebilirlik açısından bekleneni sağlayamamaktadır. [90] öbellekleme ve iletim problemini birlikte incelemiştir ve yük boşaltma kazancı sağlanması amaçlanmıştır. Girişimin gözetildiği rastgele çizelgeleme yaklaşımı ve dağıtık olarak uygulanabilen düşük karmaşıklığa sahip önbellekleme çözümü ile yük boşaltma performansındaki artış gösterilmiştir. [91]’deki çalışmada önbellekleme problemi Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ağdaki yük boşaltmada iyileştirme sağladığı gösterilmiştir.

Tasarsız ağlarda **öbellekleme** de önemli bir konsepttir ve tez çalışması kapsamında uygulanmıştır. CCH’de kullanıcılar için merkezi öbellekleme algoritmaları önerilen çalışmalardan [92, 93]’te enerji tüketimi, ağ çıktısı ve gecikmede iyileşme sağlanması amaçlanmıştır. [94]’te yazarlar LTE standartlarına uygun bir öbellekleme yaklaşımı önermiştir. Kullanıcılar yakınlarındaki kullanıcıları tespit edip Bİ’ye raporlamakta, Bİ’de bu bilgilere göre öbellekmeyi yönetmektedir. [95–97]’de yine merkezi olarak öbellekleme öneren ve bunu kullanıcıların sosyal özelliklerini kullanarak yapan çalışmalardır. Belirlenen öbek başlarının röle gibi davranarak CCH çizelgelemesi

taleplerini şebekeye iletteği başka bir çalışmada ise sınırlı sayıdaki Fiziksel Rastgele Erişim Kanalları'nda (İng. Physical Random Access Channels, PRACH) yaşanan yoğunluğun giderilmesi amaçlanmaktadır. Sunulan çözümde öbek başı seçimi rastgele olup dağıtık mimaride uygulanmaktadır. [98]'deki çalışma ise taşıtsal ağlarda dağıtık bir öbekleme önermektedir. Yeni çalışmalardan, [99, 100] ise önbellekleme için bir yöntem önermemiş fakat öbeklemeyi hâlihazırda önbelleklenmiş içeriklere göre ele almıştır.

Wi-Fi Direkt, ISM bandında çalışan bir CCH teknolojisidir ve kullanıcılar kendi aralarında grup oluşturabilmektedir. [101]'de kullanıcılar kendi arasında Wi-Fi Direkt prosedürlerine göre grup oluşturmaktadır. Grup sahibi LTE şebeke erişimine sahip olup grup üyeleri ile LTE şebekesi arasında röle vazifesi görmektedir. [102]'de ise yine Wi-Fi Direkt ağında kullanıcıların dağıtık bir yaklaşımla grup oluşturma prosedürü ele alınmıştır, ek olarak bir kullanıcı birden fazla gruba üye olabilmektedir. Bu alışmalar öbeklemenin CCH'de önemli yaklaşımlardan biri olduğunu işaret etmektedir. Yukarıda değinilen çalışmaların hiçbiri önbellekleme problemini incelememiş olup yalnızca öbekleme işlemini içermektedir.

Bu kısımdaki çalışma literatür özetinde gruplandırılarak sunulan; öğrenme algoritmaları, sezgisel yaklaşımlar, yük boşaltma, öbekleme, kullanıcı hareketliliği gibi yöntemlerin/kavramların tamamını içermektedir ve CCH'de önbellekleme problemini kapsamlı bir biçimde ele alıp çözüm sunmaktadır.

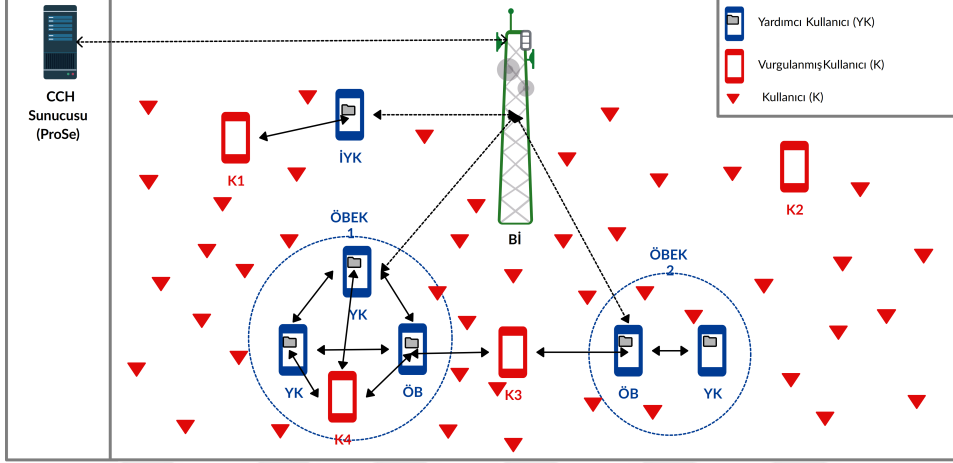
4.3 Sistem Modeli

Çalışmamızda Baz İstasyonu'nun (Bİ) K tane kullanıcı (K) ve YK tane yardımcı kullanıcıya (YK) hizmet verdiği hücrenel ağ modeli ele alınmaktadır. Kullanıcılar sınırlı içerik kümesinden talep ettikleri içerikleri mümkünse YK'lerden değilse Bİ'den temin etmektedir. Ağ topolojisinde Bİ'nin dairesel bir alanın ortasında yer aldığı, kullanıcıların tamamının başlangıç anında rastgele konumlandığı varsayılmaktadır.

Çalışma kapsamında üç farklı kullanıcı profili tanımlanmıştır.

- **Yardımcı Kullanıcı (YK):** Bİ'den hücrenel şebeke kullanılarak temin edilen içerikleri önbellekleme ve öbek oluşturma kabiliyeti olan, talep edilen içerikleri CCH ile tek yönlü olarak ileten kullanıcılarıdır.
- **İzole Yardımcı Kullanıcı (İYK):** Topolojik olarak bir öbeğe dahil olamamış YK'lerdir. Standart YK'ler ile aynı role ve kabiliyete sahiptirler. Kullanıcılara bireysel olarak hizmet sağlamakta olup hareketli kullanıcıların ele alındığı senaryolarda görece konumlar sürekli değiştiğinden geçici bir profildir.
- **Kullanıcı (K):** Ağ'daki standart kullanıcılarıdır. İçerik taleplerini CCH bağlantılar üzerinden temin etmek isterler. İçeriğin önbelleklenmediği veya CCH bağlantı kurulamadığı durumlarda ihtiyaçlarını şebeke üzerinden talep ederler.

İçerik kümesi $\{1, 2, \dots, C\}$ sonlu olup YK'ler sınırlı önbellek kapasitesine (C_c) sahiptir. Önbellek kapasitesine kıyasla geniş bir içerik kümesinin olması etkin bir önbellekleme yaklaşımının gerekliliğini doğurmaktadır.



Şekil 4.1: Öbekleme yaklaşımı ve sistem modeli.

Şekil 4.1'de bazı kavramlar görsel olarak sunulmuştur. K1 kullanıcısı hiçbir öbeğe dahil olmamış İzole Yardımcı Kullanıcı'dan içerik almaktadır. K2 kullanıcısı ise komşuluğunda içerik sağlayan bir YK olmadığı için CCH bağlantı kuramamıştır. K3 kullanıcısı ise farklı öbeklerdeki iki farklı kaynaktan içerik temin edebilmektedir. K4 kullanıcısı da bir öbekteki bütün YK'ler ile bağlantı kurabilmektedir ve erişebildiği içerik kümesi oldukça geniştir. ÖBEK 1'de gösterildiği öbek üyesi bütün YK'ler birbirleriyle doğrudan haberleşebilecek konumlardadır.

4.4 Problem Formülasyonu

Problem formülasyonunda iki tane ikili karar değişkeni tanımlanmıştır. İki önbellekleme sonucunu göstermektedir. Eğer içerik c , YK h tarafından önbelleklenmişse $x_{hc} = 1$ olmaktadır. İkincisi ise içerik sağlama durumunu göstermektedir. Kullanıcı u , YK h 'den c içeriğini talep ettiğinde iletilebiliyorsa, önkoşul olarak içeriğin önbelleklenmiş ve cihazların CCH iletimi için yakınlık veya kanal durumunu sağlamalı, $y_{huc} = 1$ olmaktadır. Parametrelerden s_c ve C_c sırayıyla içerik boyutu ve önbellek kapasitesidir. p_{uc} , $u \times c$ boyutunda bir matris olup içeriklerin talep edilme olasılıklarıdır. a_{hu} , ise $h \times u$ boyutunda bir matristir ve YK h ile kullanıcı u arasında CCH iletim için kanal veya yakınlık şartı sağlanıyorsa $a_{hu} = 1$ olmaktadır.

$$\max \left\{ \sum_{u=1}^U \sum_{c=1}^C p_{uc} \sum_{h=1}^H y_{huc} s_c \right\} \quad (4.1)$$

s.t.

$$\sum_{c=1}^C x_{hc} s_c \leq C_c, \forall h = 1, \dots, H \quad (4.2)$$

$$\sum_{h=1}^H y_{huc} \leq 1, \forall u = 1, \dots, U, c = 1, \dots, C \quad (4.3)$$

$$y_{huc} \leq a_{hu} x_{hc}, \forall u = 1, \dots, U, c = 1, \dots, C, h = 1, \dots, H \quad (4.4)$$

4.1 amaç fonksiyonu olup, yük boşaltmanın maksimize edilmesidir. 4.2 YK'lerin önbellek kapasitelerini sınırlandırmaktadır. 4.3 ise her kullanıcının bir içerik için yalnızca bir YK'den içerik alabileceğinin kısıtıdır. Bu yüzden $\sum_{h=1}^{YK} Y_{huc} = 1$ ikili bir değer alabilmektedir. 4.4 da u kullanıcısının, c içeriğini, YK h 'den, onun komşuluğunda ve ilgili YK tarafından önbelleklenmişse alabileceğinin kısıtıdır.

4.5 Stokastik Öğrenme Tabanlı Önbellekleme

Çalışmanın bu kısmında Amaç Fonksiyonu (4.1) Stokastik Öğrenme Tabanlı Önbellekleme yaklaşımına göre hesaplanmıştır. YK'ler Zipf dağılımına sahip içerik popülerliği bilgisine sahip değildir. Önerilen algoritma ile yaptıkları çıkarıma göre hangi içeriği önbellekleyeceğine karar vermektedir. YK'lerin önbellek kapasitesi 1 içerik tutabilmektedir. YK'lerin tekil olarak hizmet verdiği veya 2'li ve 3'lü öbekler oluşturabildiği yaklaşımlar da incelenmiştir.

4.5.1 Önbellekleme algoritması

Stokastik Öğrenme Algoritması (SÖA)'nın önbellekleme sözde kodu Algoritma 2'de sunulmuştur. Başlangıçta YK'ler için bütün içeriklerin önbelleklenme olasılığı eşit olup içerik kümesinin C elemanlı olduğu durumda $p_{cc}(1) = 1/C$ 'dir. Her YK bu olasılık kütle fonksiyonuna göre (OKF) (İng. Probability Mass Function, PMF) bir içeriği rastgele seçerek önbellekler. Daha sonra kullanıcılar tarafından gelen içerik taleplerini belirlenen süre r_{dur} kadar gözlemler, her içeriğin önbelleklenme olasılığını talep edilme sayısı ile doğru orantılı olarak artırır ve diziyi normalize eder. Bu sayede dizi elemanları toplamının 1 olarak kalması ve OKF formunu koruması sağlanır.

Algoritmanın durması için iki koşul tanımlanmış olup birinin sağlanması gerekli ve yeterlidir. Birinci koşul, içeriklerden birinin önbelleklenme ihtimalinin belirlenen eşik değerine (c_{th}) ulaşmasıdır. İkinci koşul ise ön tanımlı azami döngü sayısıdır (i_{maks}). Azami döngü kısıtının kullanımı iki nedeni vardır. İlki, Zipf dağılımında α azaldıkça içeriklerin talep edilme olasılığı daha düzgün bir dağılıma sahip olmasıdır (Şekil 2.3). Bu durumda, algoritmanın yakınsaması gecikir veya mümkün olmaz ve azami döngü kısıtı devreye girer. Diğeri ise bütün YK'ler için önbellekleme kararının belirlenen

süre içinde verilmesinin sağlanmasıdır. Bu sayede önerilen yöntem zaman bölmeli bir yaklaşım için uygun bir hal almış olur. Algoritma 2'nin yakınsama hızı ve hassasiyeti belirlenen adım boyu (θ) ile ilintilidir. Daha küçük belirlenen θ çözüm uzayının daha detaylı taranması anlamına gelmektedir.

Algoritma 2 Stokastik Öğrenme Algoritması

- 1: **İlke:** döngü sayacı $i_c = 0$, önbellekleme profili $p_{cc}(1) = 1/C$
 - 2: **Girdi:** azami döngü sayısı i_{maks} , yakınsama eşiği c_{th} , talep toplama süresi r_{dur} , adım boyu = θ ,
 - 3: **while** $i_c \leq i_{maks}$ veya $maks(p_{cc}(i_c)) \leq c_{th} \forall h \in H$ **do**
 - 4: $p_{cc}(i_c)$ 'ye göre rastgele önbellekleme yap
 - 5: r_{dur} kadar gözlem yap
 - 6: r_{talep} oluştur.
 - 7: **Hesapla:** $p_{cc}(i_c + 1) = p_{cc}(i_c) + \theta r_{talep}$
 - 8: **Normalize et:** p_{cc}
 - 9: **Sıfırla:** r_{talep}
 - 10: **end while**
-

4.5.2 2'li ve 3'lü öbikleme yöntemleri

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, YK'lerin tekil olarak içerik sağlamaları durumunda yakın YK'lerin benzer talep profiliyle karşılaşmasından ötürü aynı içerikleri önbellekledikleri görülmüştür. Bu doğrultuda, sunulan içerik çeşitliliğinin sağlanması için YK'lerin 2'li ve 3'lü gruplar halinde önbellekleme yaptığı yaklaşımlar incelenmiştir. Böylelikle aynı içeriklerin mükerrer önbelleklenmesinden kaynaklı verim kaybının önlenmesi de amaçlanmıştır.

YK'lerin iki elemanlı öbekler oluşturduğu yani eşleştiği yaklaşımın akış diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. YK'lerin birbirleri ile olan mesafe matrisi $d_{hh'}$ küçükten büyüğe sıralandıktan sonra en yakın ikiliden başlayarak eşleştirme yapılır. Sadelik sağlanması amacıyla belirlenen azami CCH iletim menzili d_0 kısıt olarak kullanılmıştır. Ayrıca bir alt sınırın ($0 \leq d_{hh'}$) belirtilmesinin nedeni ise $d_{hh'}$ matrisinin diyagonal elemanlarının sıfır olmasıdır. Her eşleşmeden sonra mükerrer eşleşmeleri engellemek adına eşleşen YK'ler kümeden ($\mathcal{YK} = \{1, 2, \dots, YK\}$) ve mesafe matrisinden ($d_{hh'}$) çıkartılır. Döngü eşleşmeye müsait bütün YK'ler bitene kadar devam eder. Eşleşmemiş YK'ler ise İzole Yardımcı Kullanıcı (İYK) olarak yalnız hizmet vermeye devam eder.

3'lü öbiklemede ise önce mümkün olan eşleşmeler 2'li eşleşmeye göre yapıldıktan sonra kalan YK'lerin doğrudan İYK olarak tanımlanmadan önce herhangi bir eşleşmeye üçüncü olarak dahil olup olamayacaklarına bakılır. Aranılan tek koşul yeni eklenen YK'nin öbekte halihazırda bulunan 2 YK ile de CCH menzili d_0 'dan daha yakın olmasıdır. Bu işleme ilk oluşturulan öbektan başlanır ve her ekleme işleminden sonra \mathcal{YK} güncellenir.

Çizelge 4.1: Stokastik öğrenme algoritması için benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
İçerik sayısı (C)	10
Kullanıcı sayısı (K)	[250, 500, 750]
Yardımcı kullanıcı sayısı (YK)	[50, 75, 100]
Zipf parametresi (α)	[0.5, 1, 1.5]
CCH menzili (d_0)	50 m
Önbellek kapasitesi (C_c)	1 birim
İçerik boyutu (s_c)	1 birim
Benzetim sayısı	100 farklı topoloji
Alanın yarıçapı (d_{rad})	250 m
Azami döngü sayısı (i_{maks})	100
Adım boyu (θ)	0.05
Yakınsama eşik değeri (c_{th})	0.9

Öbekte bulunan YK 'ler Algoritma 2'nin 3. satırında belirtildiği şekilde önbellekleme yaptıktan sonra seçimlerinin diğer YK (lar) ile çakışması halinde farklı bir içerik seçene kadar bu işlemi tekrar eder. Burada öncelik r_{dur} süresince daha çok talep alan YK 'nindir.

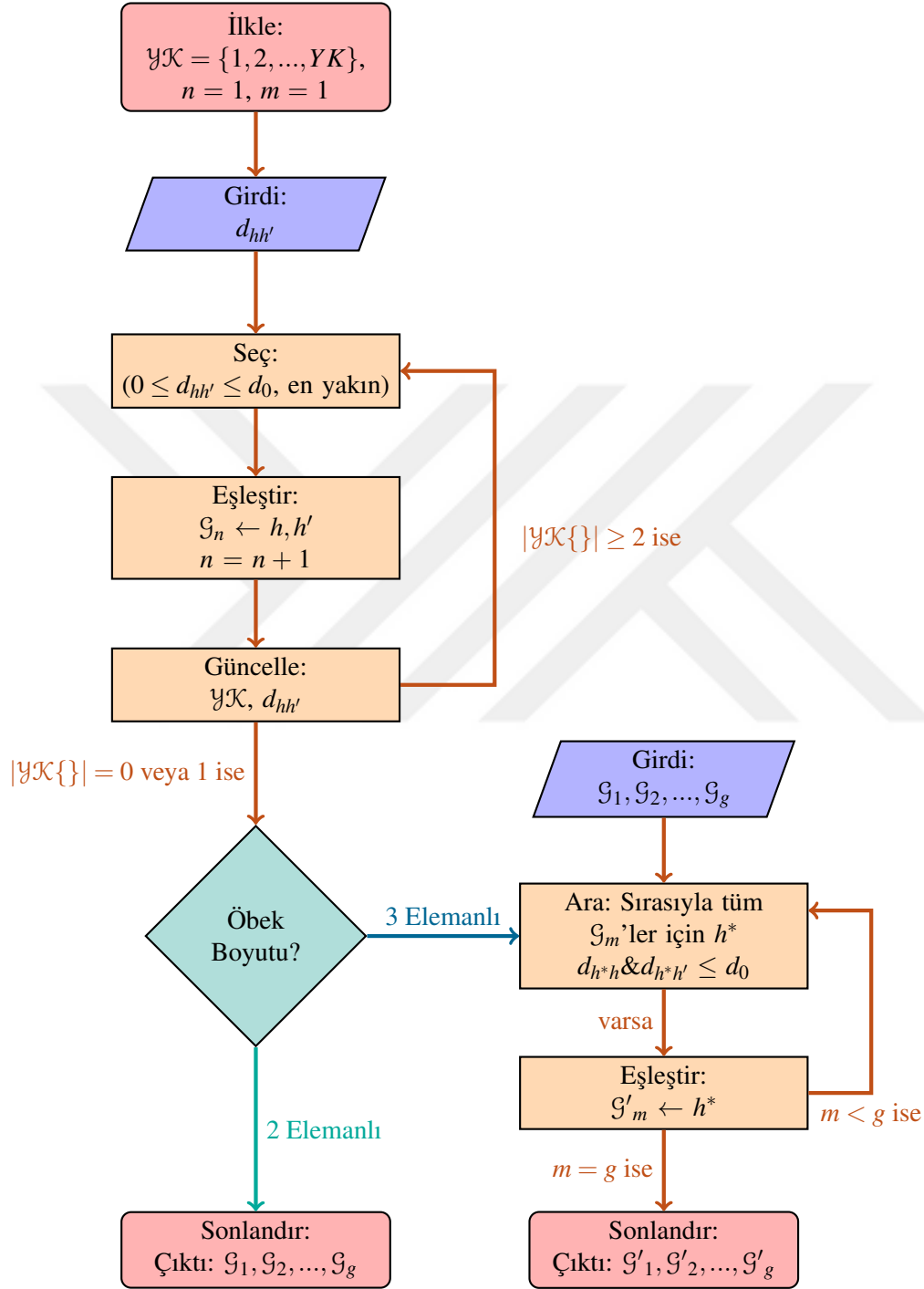
4.5.3 Benzetimler ve sonuçlar

Benzetimler Çizelge 4.1'deki parametrelere göre 100 rastgele topoloji için gerçekleştirilmiştir. Değişken Zipf parametresi, YK sayısı ve kullanıcı sayısına göre; Tekli, 2'li ve 3'lü yaklaşımların sonuçları sunulmuş ve Karma Tamsayı Programlama ile karşılaştırılmıştır. Ortalama yük boşaltma miktarlarının nümerik kıyaslanması ise Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

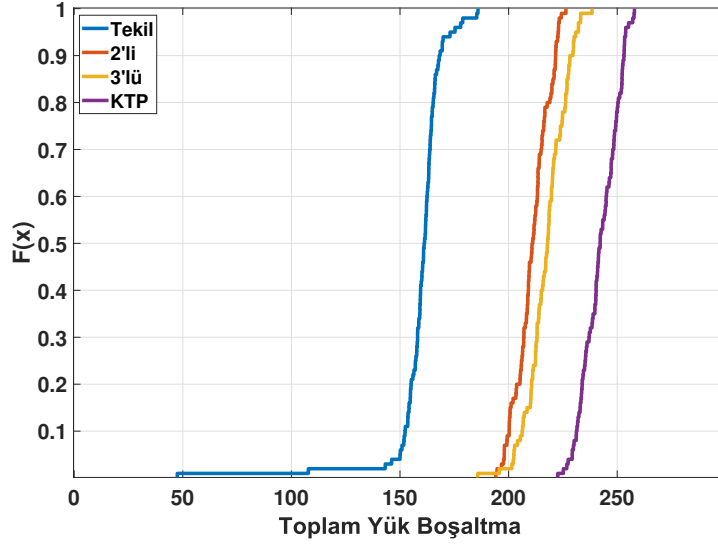
Şekil 4.3 ortalama değişkenler ($K = 500, YK = 75, \alpha=1$) için yapılan benzetimlerin sonuçlarıdır. Ortalama yük boşaltma için öbikleme kazancı yaklaşık %35 olup KTP çözümünün %90'ı kadar başarımlı sağlamıştır.

Şekil 4.4a ve 4.4b kullanıcı sayısındaki değişimin diğer parametreler sabit kaldığı durumdaki sonuçlarını içermektedir. Kullanıcı sayısının artması beklenildiği üzere yük boşaltma miktarını arttırmıştır. Oransal olarak bakıldığında ise önerilen yöntemlerin KTP'ye kıyasla daha fazla iyileşme gösterdiği görülmektedir. Kullanıcı sayısındaki artışın öbikleme üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Bu iyileşmenin nedeni içerik çeşitliliğinin kullanıcı sayısındaki artış ile daha verimli hale gelmesidir.

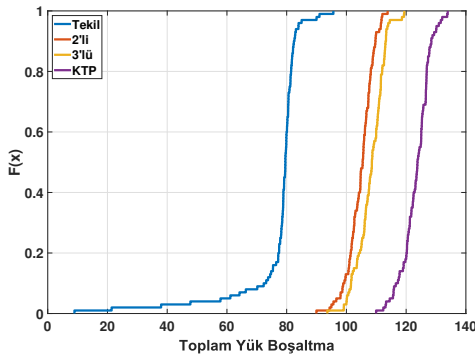
Şekil 4.5a ve 4.5b YK sayısındaki artışın sonuçlarını göstermektedir. YK sayısındaki artış ile bütün yaklaşımlar en iyi çözümü sunan KTP'ye kıyasla kötüleşme göstermiştir. Diğer üç yöntem kıyaslandığında ise 3'lü yaklaşımın 2'liden, 2'linin ise Tekil'den daha başarılı olduğu görülmektedir. Rastgele dağılım ile topoloji üzerinde yaygın kapsama sağlayacak sayıda YK 'nin bulunması yük boşaltma için çok önemlidir. Fakat her YK 'nin yalnızca bir adet içerik önbellekleyebilmesinden ve kapasite kısıtı olmadan bütün talepleri karşılayabildiği varsayımından ötürü bir



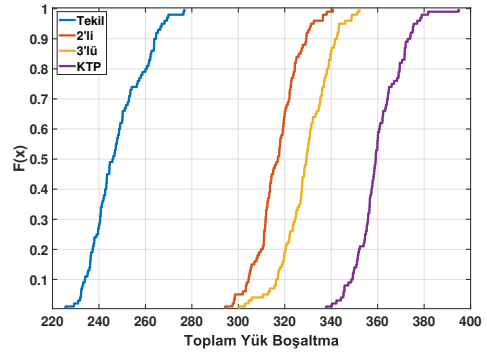
Şekil 4.2: 2'li ve 3'lü öbeleme için akış diyagramı.



Şekil 4.3: Ortalama yük boşaltma için KDF. ($K = 500$, $YK = 75$, $\alpha = 1$)



(a) $K = 250$

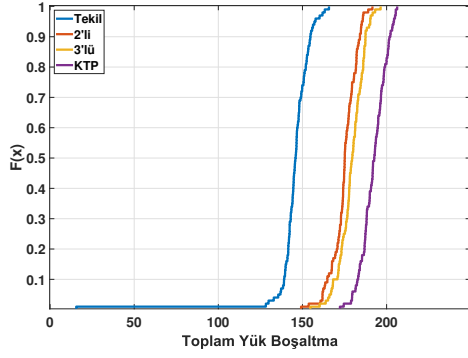


(b) $K = 750$

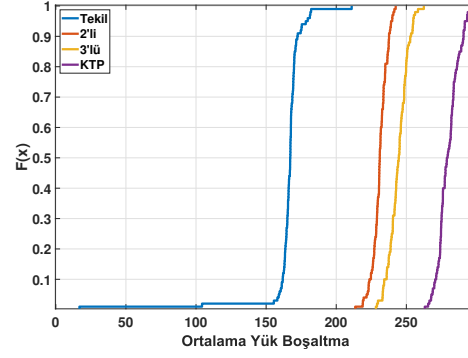
Şekil 4.4: Kullanıcı sayısının yük boşaltmaya etkisi. ($YK = 75$, $\alpha = 1$)

noktadan sonra YK sayısındaki artışın yük boşaltma açısından beklenen faydayı sağlamamasıyla sonuçlanmaktadır. Bu durumda, öbek üyelerinin aynı içeriği önbelleklemediği ve içerik çeşitliliğinin sağlanabildiği öbeklenme yaklaşımının faydası görülmektedir.

Şekil 4.6a ve 4.6b α değerindeki değişimin diğer parametreler sabit kaldığı durumdaki yansımasıdır. Artan α ile içeriklerin popülerlik dağılımı daha sivri bir hal almıştır ve bir önceki kısımda vurgulanan içerik çeşitliliğinin önemi azalmıştır, en popüler içeriklere rağbet artmıştır. Bundan dolayı Tekil yaklaşım en çok iyileşmeyi göstermiş, 3'lü ve 2'li yaklaşımın arasındaki fark azalmıştır. Bunun aksine azalan α değeri ile içerik popülerlik dağılımı daha düzgün bir hal almakta ve içerik çeşitliliğinin önemli hale gelmesi sonuçlara yansımıştır.

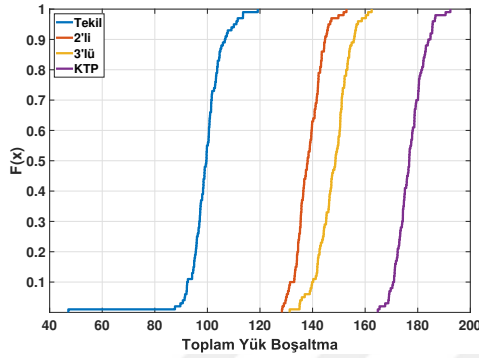


(a) $YK = 50$

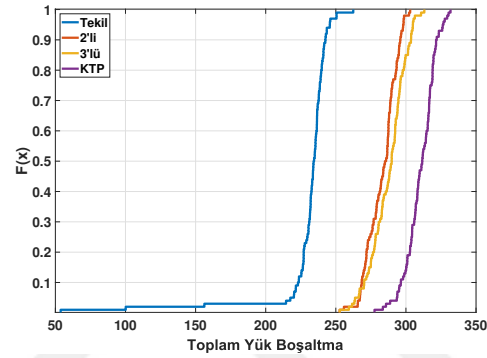


(b) $YK = 100$

Şekil 4.5: YK sayısının yük boşaltmaya etkisi ($K = 500, \alpha = 1$)



(a) $\alpha = 0.5$



(b) $\alpha = 1.5$

Şekil 4.6: Zipf parametresinin yük boşaltmaya etkisi. ($YK = 75, K = 500$)

Çizelge 4.2: Stokastik öğrenme algoritması için nümerik sonuçlar.

	Tekil		2'li		3'lü		KTDP
	YB	Fark(%)	YB	Fark(%)	YB	Fark(%)	YB
Şekil 4.3	161.3	50.1	211.1	14.7	218.0	11.1	242.2
Şekil 4.4a	79.7	55.4	105.5	17.4	108.5	14.1	123.8
Şekil 4.4b	246.2	45.9	317.1	13.3	329.4	9.0	359.2
Şekil 4.5a	145.8	32.2	175.2	10.0	179.7	7.28	192.7
Şekil 4.5b	167.2	67.2	231.1	20.9	244.7	14.2	279.4
Şekil 4.6a	99.7	77.4	138.1	27.0	148.7	18.9	176.8
Şekil 4.6b	234.5	32.9	285.0	9.4	289.9	7.5	311.7

4.5.4 Değerlendirme

Sonuçlar içerik çeşitliliğinin sağlanmasının yük boşaltma üzerinde olumlu etki yarattığını göstermektedir. İçerik çeşitliliği, hem tahsis edilen önbellek kapasitesinin hem de öbeklemenin uygulanması ile mümkündür.

4.6 Sezgisel Öbekleme ve Önbellekleme Yaklaşımı

Yük boşaltma eniyilemesi isabet oranının iyileştirilmesi ile mümkündür. İsabet oranı kullanıcıların talep ettikleri içeriklerin CCH bağlantılar üzerinden sağlayabilme ihtimalidir. Bu hususta, YK'lerin en popüler içerikleri önbelleklerinde tutmaları akla gelen ilk yöntem olabilir. Bu yaklaşımla, kayda değer bir isabet oranı yakalanıp herhangi bir hesaplama güçlüğü yaşanmayacak olup başarıyı denektaşı olarak çalışma kapsamında sunulmuştur. Düşünüldüğü kadar etkin bir yaklaşım olmadığının da belirtmekte şimdiden fayda var.

Birbirine yakın iki YK'yi ele alalım. Bu durumda farklı içerikleri önbelleklemek kullanıcıların talep ettikleri içeriklere, çok popüler olmasa dahi, erişebilme ihtimalini arttıracaktır. Bu doğrultuda, önceki kısımdaki sonuçların da yönlendirmesiyle çalışmanın bu kısmında öbekleme tabanlı bir önbellekleme yaklaşımı sunulmaktadır.

Önerilen yöntem, birbirleriyle CCH bağlantı kurabilecek yakınlıkta olan YK'lerin öbekler oluşturmasını, ardından da öbek seviyesinde önbellekleme işlemini içermektedir. Bu sayede artan isabet oranıyla sağlanan yük boşaltmanın artırılması hedeflenmektedir.

Öbekleme yaklaşımının temelinde YK'ler arasındaki işbirliğinin teşvik edilmesi yatmaktadır. Öbek tanımındaki en önemli kriter öbek üyelerinin birbirlerine CCH iletim menziline daha yakın olmalarıdır. Bu sayede örgüsel ağ yapısı (İng. mesh network) kurulabilecek olup;

- Öbek üyesi YK'ler birbirleriyle doğrudan haberleşebilecek ve öbek içi hiyerarşik önbellekleme yapılabilecektir. Örneğin, YK'ler Öbek Başı'na (ÖB) önbellek kapasitelerini ve içeriklerin talep edilme sıklığını gönderebilecek ve önbellek yönetim planını ÖB'den alabilecektir. ÖB seçimi Öbek kurulduktan sonra yapıldığı için ön koşul olarak sağlanması gerekmektedir.
- YK'ler birbirlerine yakın oldukları için büyük ölçüde aynı kullanıcılara içerik sağlayacaklardır.

4.6.1 Mesafe tabanlı öbekleme algoritması - MTÖA

"Mesafe Tabanlı Öbekleme Algoritması"nın sözde kodu Algoritma 3'te sunulmuştur. Algoritma YK'ler arasındaki komşuluk $a_{hh'}$ ve mesafe $d_{hh'}$ bilgisini girdi olarak almaktadır. Kanal kazançları da mesafe yerine kullanılacak alternatif bir değişkendir.

Algoritma iç içe iki adet **while** döngüsünden oluşmaktadır. Dış döngüde, öncelikle birbirine en yakın mesafedeki iki YK seçilir (Satır 4). Eğer bu YK'ler komşuluk kısıtını sağlıyorsa (Satır 5), yeni bir öbek oluşturulur (Satır 7) ve bu YK'ler kümeden çıkartılır. İç döngüde ise kurulan öbeğe yeni YK'lerin eklenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, öbek üyeleri ile komşuluk kısıtını sağlayan diğer YK'ler aranır (Satır 10). Eğer bu koşulu sağlayan YK yoksa öbek olduğu şekilde kalır. Birden fazla YK'nin bu koşulu sağlaması durumunda diğer öbek üyeleriyle toplam mesafesi en az

olan YK'ye öncelik sağlanmaktadır (Satır 12). İç döngü ele alınan öbeğe dahil olabilecek YK kalmayana kadar devam eder. Öbekleme işlemleri sonrasında YK kümesi sürekli güncellenir (Satır 8,14). Algoritma azami ölçüde fazla üyeli öbekler oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu işlemler sonucunda, \mathcal{H} kümesinin elemanı olarak kalan YK'ler ise İzole Yardımcı Kullanıcılar (İYK) olarak sınıflandırılmış olup kullanıcılara tekil olarak içerik sağlayaklardır.

MTÖA literatürdeki "azami klik" (İng. maximal clique) problemini çözmeye çalışmaktadır. Azami klik oluşturulan öbekler daha fazla katılımcı eklenemeyene kadar genişletilir. Öbekler ne kadar fazla YK içerirse öbek içinde önbelleklenen içeriğin çeşitliliği o kadar fazla olacaktır. Çeşitliliğin sağladığı fayda α azaldıkça artarken, α arttıkça azalmaktadır.

Azami klik problemi NP-Zor'dur (İng. Nondeterministic Polynomial-Hard) [103], [104] ve çalışma kapsamında dağıtık olarak uygulanmasına yönelik detaylı bir çözüm sunulmamıştır. Fakat şu şekilde yapılabileceği öngörülmektedir; ilk düğüm komşularından bağlantı bilgilerini toplamaktadır. Daha sonra her düğüm öbek duyurusu yapmadan önce rastgele bir süre beklemektedir. Bu süre komşuluğundaki kullanıcı sayısı ile ters orantılıdır. Böylelikle ilk girişimi en fazla komşusu olan düğüm yapmaktadır. Duyuru mesajını alan düğüm tek atlama kısıtını sağlıyorsa, yani öbekteki diğer düğümlerle doğrudan haberleşebiliyorsa öbeğe dahil olur. Daha sonra komşuluğunda en fazla kullanıcı olan YK öbek başı olur. Benzer bir biçimde, [105]'te yazarlar azami klik problemi fikrini kullanmıştır ve dağıtık bir öbekleme algoritması önermiştir.

4.6.1.1 MTÖA'nın karmaşıklık analizi

Algoritma 3 merkezidir ve her YK'nin komşuluğunda kaç adet kullanıcı olduğu bilinmektedir.

1. Komşuluğunda en çok kullanıcı olan YK seçilir ve ÖB olarak belirlenir. (YK)
2. Diğer YK'ler arasından en iyi kanala sahip olan seçilir. ($YK - 1$)
3. Kalan YK'ler arasından bu iki yardımcıyla en iyi kanala sahip olan seçilir (koşulu sağlayan YK olduğu varsayılmaktadır). ($YK - 2$)
4. ... Öbek'teki diğer kullanıcılarla ($\mathcal{G}_1 - 1$) komşuluk kısıtını sağlayan büyük YK'ler bulunur ve öbeğe dahil edilir. ($YK - \mathcal{G}_1 + 1$)
5. Henüz öbeğe dahil olmamış YK'ler arasından komşuluğunda en fazla kullanıcı olan YK \mathcal{G}_2 için ÖB1 olarak belirlenir. ($YK - \mathcal{G}_1$)
6. Diğer YK'ler arasından ÖB2 ile en iyi kanala sahip olan seçilir. ($YK - \mathcal{G}_1 - 1$)
7. Kalan YK'ler arasından bu iki YK ile en iyi kanala sahip olan seçilir. ($YK - \mathcal{G}_1 - 2$)
8. ... Öbek'teki diğer kullanıcılar ($\mathcal{G}_2 - 1$) ile koşulları sağlayan YK bulunur. ($YK - \mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2 + 1$)

Algoritma 3 Mesafe Tabanlı Öbeleme Algoritması

```
1: İlke:  $\mathcal{YK} = \{1, 2, \dots, YK\}$ , Döngü1 = 0, Döngü2 = 0,  $g = 0$ ;  
2: Girdi: YK'ler arasındaki komşuluk bilgisi ve mesafeler  $a_{hh'}, d_{hh'} \forall h, h' \in \mathcal{YK}$ .  
3: while Döngü1 = 0 do  
4:   Bul  $\min_{h, h' \in \mathcal{YK}} \{d_{h, h'}\}$   
5:   if  $a_{hh'} = 1$  then  
6:      $g = g + 1$   
7:     Yeni öbek:  $\mathcal{G}_g = \{h, h'\}$   
8:     Güncelle:  $\mathcal{YK} = \mathcal{YK} \setminus \{h, h'\}$   
9:     while Döngü 2=0 do  
10:      Bul:  $\mathcal{N} = \{i | i \in \mathcal{YK}, a_{ih} = 1, \forall h \in \mathcal{G}_g\}$   
11:      if  $\mathcal{N} \neq \emptyset$  then  
12:        Bul  $i^* = \min_{i \in \mathcal{N}} \{\sum_{h \in \mathcal{G}_g} d_{ih}\}$   
13:        Ekle  $\mathcal{G}_g = \mathcal{G}_g \cup \{i^*\}$   
14:        Güncelle:  $\mathcal{YK} = \mathcal{YK} \setminus \{i^*\}$   
15:      else  
16:        Döngü2=1;  
17:      end if  
18:    end while  
19:  else  
20:    Döngü1=0  
21:  end if  
22: end while  
23: Çıktı: Bütün öbekler  $\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_g$ .
```

Algoritma koşulları sağlayan bütün öbekler oluşana kadar devam eder. MTÖA'nın karmaşıklığı ardışık sayıların toplamı $\sum_1^n (\frac{n \times (n+1)}{2})$ olup büyük O notasyonuna göre $O(YK^2)$ 'dir.

4.6.1.2 MTÖA'nın dağıtık uygulanması

MTÖA çalışma kapsamında yapılan benzetimlerde merkezi olarak uygulanmıştır. Fakat aşağıdaki biçimde dağıtık olarak da uygulanabilecek bir yapıdadır.

1. Kullanıcılar (K) öbeleme işlemi öncesinde bilgilerini çoğa gönderim ile yayınlılar (5.7'te tarif edilen Keşif Mesajı gönderimi şeklinde). Böylelikle YK'ler kendilerinden haberdar olmuş olur.
2. YK'ler kullanıcılardan gelen bilgileri belirlenen süre kadar dinledikten sonra öbeleme isteği yayınlılar (5.6'te tarif edilen Duyuru Mesajı gönderimi şeklinde). (Duyuru mesajı göndermeden önceki bekleme süresi komşuluklarında bulunan sıradan kullanıcı sayısı ile ters orantılıdır.) Bu yöntemle, ilk istek komşuluğunda en fazla kullanıcı bulunan (ÖB olacak) YK'den gelir.

3. Komşu YK'ler alınan sinyal gücü ile (İng. Received Signal Strength Indicator, RSSI) ile ters orantılı bir süre kadar bekleyip öbekteleme isteğini yanıtlarlar. Bu sayede ilk yanıt en iyi kanala sahip YK'den gelmiş olur.
4. Öbeğe dahil olan YK kendi bilgisi ile öbekteki diğer YK'lerin bilgilerini yayınlar bu sayede dahil olacak YK'lerin öbekteki YK'lerin CCH menziline bulunması garanti altına alınmış olur.

Bu işlemler öbeğe dahil olacak YK kalmayana kadar devam eder.

4.6.2 Hiyerarşik önbellekleme algoritması - HÖA

Öbekteleme yapıldıktan sonra öbek içindeki hiyerarşiye göre yapılan önbelleklemenin sözde kodu Algoritma 4'te sunulmuştur. Başlangıçta bütün YK ların önbellekleri boş olarak kabul edilmektedir. Öbek bilgisinin ve kullanıcılar arasındaki içerik popülerliği girdi olarak verilmektedir.

Algoritma üç tane **for** döngüsünden oluşmaktadır (Satırlar 3-24). İlk döngüde (Satırlar 6-11) öbek içindeki önbellekleme profili oluşturulmaktadır. Diğer bir deyişle hangi içerikten kaç kopya önbellekleneceği belirlenmektedir. Bu işlem toplam önbellek kapasitesi ($toplam$) dolana kadar sürmektedir. Bu doğrultuda bütün içerikler kontrol edilmektedir. İkinci döngüde (Satırlar 13-21) YK bazlı önbelleklenecek içerikler belirlenmektedir.

Algoritmanın adında da belirtildiği üzere, bu aşamada YK'ler arasında hiyerarşik bir öncelik sıralaması vardır. En popüler içeriklerin önbelleklenmesine komşuluğunda en çok kullanıcı bulunan YK'den başlanmaktadır. Son döngüde ise herhangi bir öbeğe dahil olmamış İYK'ler için en popüler içeriklerin önbelleklenmesi yapılmaktadır, bu bilgi belirtildiği üzere algoritmaya girdi olarak verilmektedir. İlk iki döngü her öbek için uygulanmaktadır.

Aşağıdaki örnek ($C = 10$, $C_c = 2$, $\alpha = 1$, $s_c = 1$ için) HÖA'nın çalışmasını açıklamaktadır. Bu durumda, içeriklerin tercih edilme olasılıkları azalan sıralamada $\mathbf{p}_{uc} = [0.341, 0.171, 0.114, 0.085, 0.068, 0.057, 0.049, 0.043, 0.038, 0.034]$ şeklindedir. Toplam önbellek kapasitesi ise $toplam = 3 \times 2 = 6$ içeriktir. Burada \bar{t}_c geçici önbelleklemeyi ifade etmektedir.

- \mathbf{p}_{uc} 'u en popüler içeriğin talep edilme sıklığına ($p_{uc}(1) = 0.341$) böl ve yuvarla.
Sonuç: $\bar{t}_c = [1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$.
 \bar{t}_c 'de önbelleklenen içerik sayısı = $2 \leq toplam$.
Devam et.
- \mathbf{p}_{uc} 'u en popüler ikinci içeriğin talep edilme sıklığına ($p_{uc}(2) = 0.171$) böl ve yuvarla.
Sonuç: $\bar{t}_c = [2, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$.
 \bar{t}_c 'de önbelleklenen içerik sayısı = $5 \leq toplam$.
Devam et.

- p_{uc} 'u en popüler üçüncü içeriğin talep edilme sıklığına ($p_{uc}(3) = 0.114$) böl ve yuvarla.
Sonuç: $\bar{t}_c = [3, 2, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]$.
 \bar{t}_c 'de önbelleklenen içerik sayısı = $9 \geq$ toplam.
Döngüden çık.
Bu işlemler neticesinde;
- ÖB 1. ve 2. içerikleri önbellekler. Güncelle $\bar{t}_c = [2, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]$.
- YK1 1. ve 2. içerikleri önbellekler. Güncelle $\bar{t}_c = [1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]$.
- YK2 1. ve 3. içerikleri önbellekler. Güncelle $\bar{t}_c = [0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]$.
- Ele alınan öbeğin önbellekleme tamamlandıktan sonra sıradaki öbeğe geçilir.

Bu örneğe göre, en popüler içerik öbek üyelerinin tamamı tarafından, ikinci en popüler içerik 2 öbek üyesi tarafından üçüncü en popüler içerik ise yalnızca bir YK tarafından önbelleklenmiştir. Geri kalan içerikler ise önbelleklenmemiştir. Bu yaklaşım isabet oranını artırıp içerik çeşitliliği sağlamakta olup öbek boyutu, α değeri ve önbellek kapasitesindeki değişikliğe göre farklılık göstermektedir. Önbelleklemenin komşuluğunda en fazla kullanıcı olan ÖB'den başladığı ve bu sırayla yapıldığı varsayılmaktadır. Bu yüzden hiyerarşik diye nitelendirilmektedir.

Öbek içinde bütün YK'lerin birbirleriyle CCH haberleşecek kadar yakın olması bir kriter olarak belirlenmesine rağmen içerik sağladıkları kullanıcılar farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden daha popüler içeriklerin birden fazla YK tarafından önbelleklenmesiyle popüler içerikler için isabet oranının yüksek tutulması sağlanmaktadır.

4.6.2.1 HÖA'nın karmaşıklık analizi

Önbellekleme işlemi ÖB tarafından hesaplanır ve yönetilir. Algoritmanın karmaşıklığını etkileyen parametreler: Öbekteki YK sayısı (N_h), Zipf parametresi (α), Önbellek kapasitesi (C_c) ve İçerik kümesinin boyutudur ($|\mathcal{C}|$). Parametrelerdeki değişimlerin etkisi de şu şekildedir;

- N_h artarsa toplam da ($N_h \times C_c$) doğrusal olarak artar, karmaşıklık artar (doğrusal).
- α azalırsa OKF daha düzgün bir hal alır, karmaşıklık artar.
- C_c artarsa toplam da ($N_h \times C_c$) artar, önbellekleme kararı verilecek saklama alanı arttığı için karmaşıklık da artar (doğrusal).
- $|\mathcal{C}|$ artarsa Şekil 2.3'te sunulduğu üzere OKF daha düzgün bir hal alır, karmaşıklık artar.

Algoritma 4 Hiyerarşik Önbellekleme Algoritması (HÖA)

```
1: İlkle  $x_{hc} = 0, \forall h = 1, \dots, H, c = 1, \dots, C$ 
2: Input: Bütün öbekler  $\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_g$ , İçerik popülaritesi:  $p_{uc}$ , İçerik sayısı:  $C$ ,
   Önbellek kapasitesi:  $C_c$ 
3: for Bütün öbekler  $g$  do
4:   Öbekteki YK sayısı  $N_h(g) = |\mathcal{G}_g|$ 
5:   toplam= $N_h(g) \times C_c$ 
6:   for  $i=1:C$  do
7:      $\bar{t}_c = \min\left(N_h(g), \text{yuvarla}\left(\frac{p_{uc}}{p_{ui}}\right)\right), \forall c$ 
8:     if  $\sum_{c=1}^C \bar{t}_c \geq \text{toplam}$  then
9:       Döngüden çık
10:    end if
11:  end for
12:  Öbekteki YK'leri  $(1), (2), \dots, (N_h(g))$  şeklinde, komşuluğundaki kullanıcı
   sayısına göre sırala
13:  for  $h = 1 : N_h(g)$  do
14:    for  $c=1:C$  do
15:      if  $\bar{t}_c > 0$  then
16:         $x_{h,c} = 1$ 
17:         $\bar{t}_c = \bar{t}_c - 1$ 
18:      end if
19:    end for
20:  end for
21: end for
22: for bütün YK'ler  $h \notin \bigcup_{i=1}^g \mathcal{G}_i$  do
23:   Yap  $x_{hc} = 1, c = 1, 2, \dots, C_c$  için
24: end for
25: Çıktı:  $x_{hc}, \forall h = 1, \dots, H, c = 1, \dots, C$ 
```

4.6.3 Benzetimler ve sonuçlar

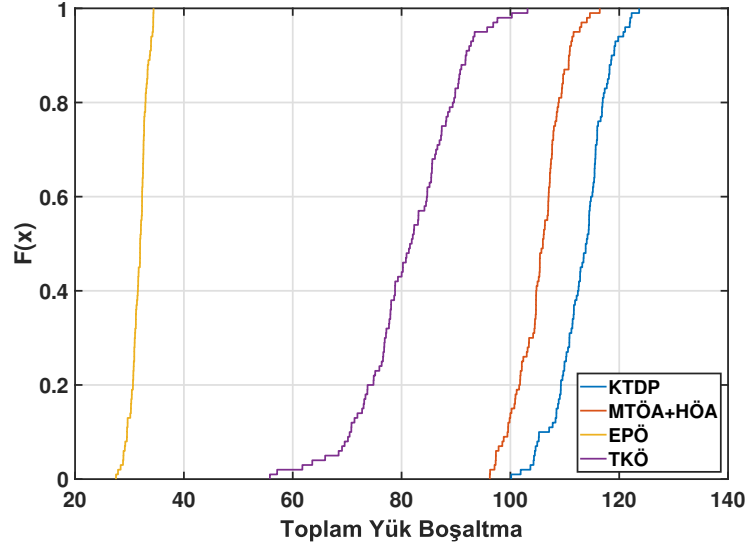
Bu kısımda önerilen algoritmaların başarımları KTDP modeli ve denektaşı yaklaşımlarla kıyaslanmıştır. Benzetim parametreleri Çizelge 4.3'te sunulmuş olup kıyaslanan yöntemler şu şekildedir;

- **KTDP:** Optimizasyon tabanlı en iyi çözüm,
- **MTÖA + HÖA:** Önerilen öbelleme ve önbellekleme algoritmalarının sırayla birlikte kullanıldığı yaklaşımdır.
- **En Popüler Önbellekleme (EPÖ):** Öbelleme yapılmadan her YK'nin önbellek kapasitesi elverdiğince en popüler içerikleri önbelleklediği yaklaşımdır.
- **Tek Kopya Önbellekleme (TKÖ):** MTÖA uygulandıktan sonra, kurulan öbeklerde her içerik yalnızca bir YK tarafından önbelleklenebildiği yaklaşımdır. İYK'ler ise EPÖ uygulamaktadır.

Çizelge 4.3: Sabit kullanıcı senaryosu için benzetim parametreleri.

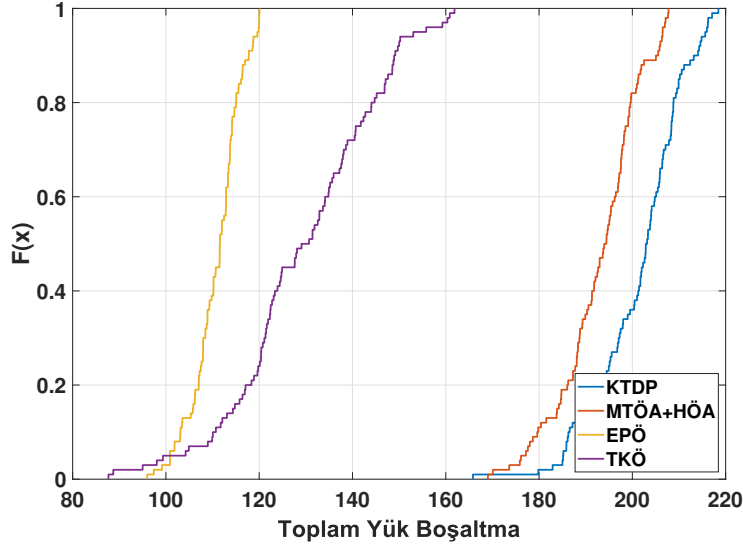
Parametre	Değer 1.Kısım	Değer 2.Kısım
Kullanıcı sayısı (K)	[300,1000]	1000
Yardımcı kullanıcı sayısı (YK)	50	[40,45,55,60]
Önbellek kapasitesi (C_c)	4 birim	[2,4,6,8] birim
İçerik sayısı (C)	30	40
Zipf parametresi (α)	[0.6,1.5]	1.5
CCH menzili (d_0)	50 m	
İçerik boyutu (s_c)	1 birim	
Alanın yarıçapı (d_{rad})	200 m	

Benzetimin birinci kısmında önerilen algoritmaların başarımı değişken içerik popülerliği ve kullanıcı sayısına göre incelenmiştir. Şekil 4.7 toplam yük boşaltmanın KDF'sini göstermektedir. Elde edilen ortalama değer ($F(x) = 0.5$ için) toplam yük boşaltma sonucu önerilen algoritmanın en iyi çözüme %7 yakınlıkta başarımlı sağladığını göstermektedir. Bu sonuç oldukça ümit vericidir. Ayrıca EPÖ en iyi çözümün dörtte biri kadar başarımlı gösterebilmiştir. Bu sonuç öbeklemenin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. TKÖ ise EPÖ'ye kıyasla daha fazla yük boşaltma sağlasa da en iyi çözümün %70'i kadardır.

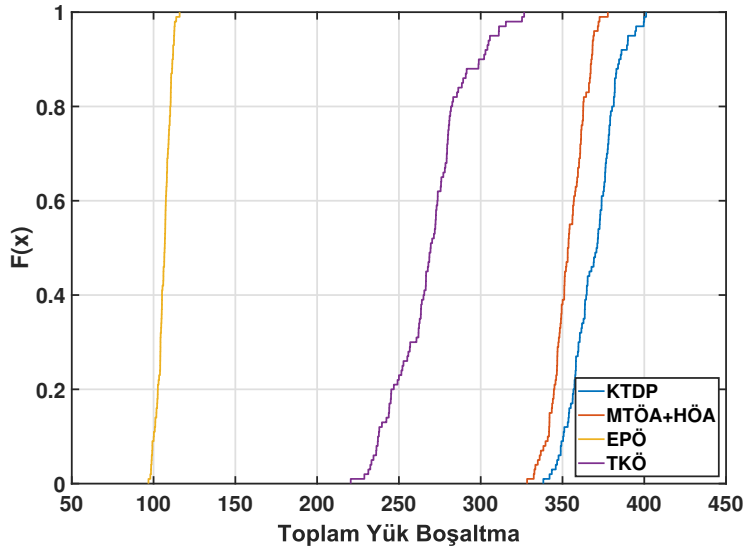


Şekil 4.7: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 300$, $\alpha = 0.6$)

Şekil 4.8 ise $\alpha = 1.5$ değeri için önceki benzetimin tekrarı niteliğindedir. Artan α değeri popülerlik sırasında önde olan içeriklerin daha da yüksek olasılıkla talep edilmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda az sayıda içerik kullanıcı popülerliğinde büyük bir kısma sahip olmaktadır. Önerilen algoritmalar (MTÖA ve HÖA) bu durumda daha da iyi başarımlı göstermiştir ve en iyi çözüme %5 yakınlıkta yük boşaltma sağlamıştır. EPÖ yine en kötü başarımlı sahiptir ve KTDP tabanlı çözümün yarısı kadar başarımlı göstermiştir. TKÖ ise görece olarak başarımlı kaybı yaşamıştır ve en iyi çözümün %64'ü kadar yük boşaltma sağlamıştır. Bunun nedeni TKÖ'nün talep görme ihtimali düşük içerikleri de önbelleklemesidir.



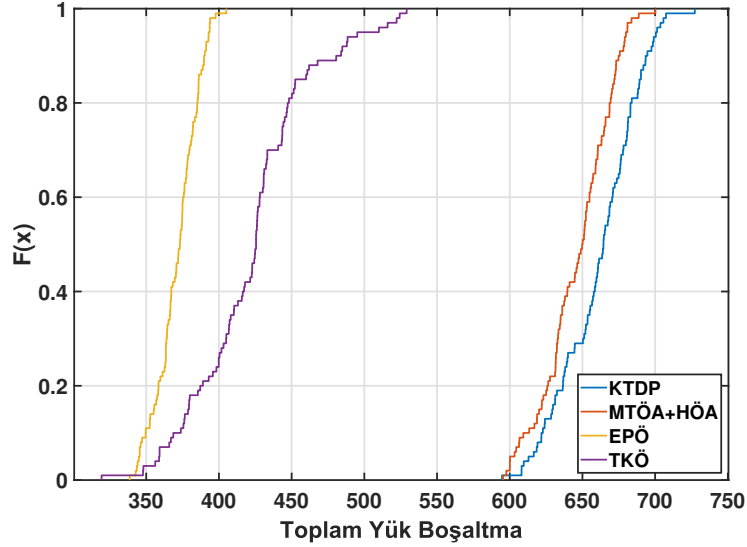
Şekil 4.8: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 300, \alpha = 1.5$)



Şekil 4.9: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 1000, \alpha = 0.6$)

Şekil 4.9 ve 4.10 kullanıcı yoğunluğunun arttığı durumlardaki ($K = 1000$) başarımları göstermektedir. Beklenildiği üzere bütün yöntemler için yük boşaltma artmıştır. Önerilen algoritmalar ise en iyi çözüme yine en yakın başarımları göstermiştir ve düşük kullanıcı yoğunluğuna kıyasla da başarımları artmıştır. Değişken $\alpha = 0.6$ ve $\alpha = 1.5$ değerleri için sırasıyla KTDP tabanlı çözüme %4 ve %2.5 yakın başarımlar göstermiştir.

Benzetimlerin ikinci kısmı ise önbellek kapasitesi ve YK sayısındaki değişimlerin MTÖA+HÖA'nın başarımları üzerindeki etkilerinin incelenmesi için yapılan benzetimlerin sonuçlarını içermektedir. Önerilen algoritmalar ve KTDP çözümü 100 farklı rastgele topoloji için uygulandıktan sonra sağlanan yük boşaltma için yüzdesel olarak topoloji bazlı (MTÖA+HÖA),KTDP farkı hesaplanmıştır.



Şekil 4.10: Toplam yük boşaltma için KDF. ($K = 1000, \alpha = 1.5$)

Çizelge 4.4: MTÖA + HÖA ile KTDP'nin kıyaslaması için nümerik sonuçlar.

		YK				
		40	45	50	55	60
C_c	2	maks: %99.39 min: %90.55	maks: %98.13 min: %89.32	maks: %96.39 min: %89.26	maks: %97.62 min: %88.78	maks: %95.82 min: %87.43
	4	maks: %99.77 min: %93.68	maks: %99.66 min: %93.17	maks: %99.19 min: %92.98	maks: %98.77 min: %92.36	maks: %98.42 min: %91.63
	6	maks: %99.66 min: %94.77	maks: %99.58 min: %94.01	maks: %99.60 min: %94.32	maks: %99.41 min: %93.32	maks: %98.92 min: %92.65
	8	maks: %99.60 min: %95.24	maks: %99.57 min: %94.81	maks: %99.39 min: %94.73	maks: %96.65 min: %93.99	maks: %99.09 min: %93.16

Çizelge 4.4'te yer alan **maks**, ele alınan topolojilerin %95'lik kısmına, **min** ise %5'lik kısmına karşılık gelmektedir. Görüldüğü üzere önerilen algoritma çifti, YK sayısındaki ve önbellek kapasitesindeki değişime karşı gürbüz bir tutum sergilemiş olup neredeyse benzetimlerin tamamında KTDP çözümünün %90'ı kadar yük boşaltma sağlamıştır.

4.6.4 Değerlendirme

Elde edilen sonuçlar önerilen algoritmaların başarılı yük boşaltma sağladığını göstermektedir. Benzetimlerde öbikleme ve önbellekleme işlemi her rastgele topoloji için baştan hesaplanmaktadır. Kullanıcıların durağan olması ve tek pozluk topolojilerde elde edilen sonuçlar ilk izlenim için olumludur fakat gerçekçi senaryolara yeteri kadar ışık tutmamaktadır. Bu görüş, insan hareketlerine uygun bir modelin belirlenerek, algoritma başarımının kullanıcıların hareketli olduğu durumda incelenmesi gerekliliğine işaret etmektedir.

4.7 Hareketli Kullanıcı Senaryosu

Kısım 4.6'da optimizasyon modeli hareketsiz kullanıcıların yer aldığı bir model için çözülmüştü. Bu kısımda ise aynı optimizasyon modeli hareketli kullanıcıların olduğu bir senaryoda ele alınmıştır. Tüm kullanıcıların yer değiştirmesi, YK'ler için öbekleme ve önbelleklemenin tamamlanması ve içerik iletiminin **bir zaman dilimi (ZD)** içinde tamamlandığı varsayılmaktadır. Önerilen algoritmaların (Algoritma 3 ve 4) yanı sıra iki öbekleme yaklaşımı daha önerilmiştir ve kullanıcı hareketliliğine karşı gürbüzlüğü (İng. robustness) incelenmiştir.

4.7.1 Hareket modeli

Literatürde hareket modelleri (HM) (İng. Mobility Model, MM) karakteristik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır [106]. Bunlardan başlıcaları;

- **Bağımlı HM:** Hareketin geçmişe dönük nedensel bir ilişkisinin olduğu veya birden fazla hareketlinin birbirlerinin hareketi üzerinde etkisinin olduğu modeldir.
- **Kısıtlı HM:** Coğrafi etmenlere, ön tanımlı haritaya veya engellere tabi hareket modelleridir. İzlenebilecek rotanın ana hatlarıyla belirli olduğu durumlarda ve kapalı alanlardaki hareketin modellenmesinde kullanılmaktadır.
- **Rastgele HM:** Herhangi bir kısıta veya bağıntıya tabi olmayan modeldir. Hız ve doğrultu değişkenleri rastgeledir. İnsan hareketinin modellenmesinde tercih edilmektedir.[107]

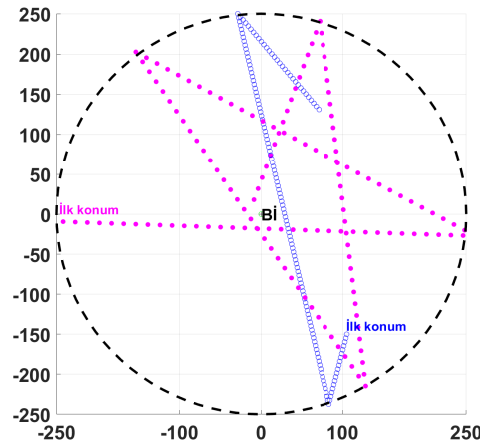
Rastgele hareket modelinin de kendi içinde farklı çeşitleri vardır;

- **Rastgele Yönlü HM (İng. Random Direction MM):** Yönün ve hızın rastgele seçildiği ve hareket süresince değişmediği bir modeldir. Tanımlı alanın sınırlı olması durumunda sınır noktasına varan hareketli hızını koruyup yönünü alana geri dönecek şekilde güncelleyerek hareketini sürdürür [108].
- **Rastgele Yol Noktası HM (İng. Random Waypoint MM):** Rastgele iki nokta arasında hız, ivme ve rotanın değişken olduğu bir karakteristiğe sahiptir.
- **Rastgele Yürüme HM (İng. Random Walk MM):** Yön ve hız rastgele seçilmektedir ve hareket süresince değişkendir. Kaotik bir hareket örüntüsüne sahiptir.

Ağ modelindeki bütün kullanıcıların (YK ve K) cep telefonu olduğu ve insanların üzerinde taşındığı, kullanıcılar arasında sosyal ilişki olmadığı ve benzetim alanında kısıtlayıcı bir örüntü bulunmadığı varsayılmaktadır.

Bu doğrultuda, benzetimlerde Rastgele HM kullanılmıştır. "Rastgele Yol Noktası" ve "Rastgele Yürüme" modellerinde yön ve hız rastgele biçimde sürekli değişmektedir. İnsan hareketinde böylesi kaotik değişimler beklenmediği için "Rastgele Yönlü Hareket Modeli (RYHM)" tercih edilmiştir.

RYHM'de kullanıcılar belirlenen alanın sınırına eriştikten sonra geri dönmektedir. Bu da insanlardan beklenen bir durum olmadığı için sınıra erişen kullanıcıların alandan çıktığı, geri dönenlerin ise ağa yeni katılan kullanıcılar ve YK'ler olduğu varsayılmıştır. Bu sayede uzun süreli benzetimlerde kullanıcı yoğunluğunun sabit kalması sağlanmıştır. Şekil 4.11'de RYHM'ye göre hareket eden kullanıcıların 150 ZD boyunca dairesel alandaki hareket örüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.11: RYHM'ye göre 0.5m/ZD ve 1.5m/ZD hızla hareket eden kullanıcıların hareket örüntüsü.

4.7.2 Öbekleme yöntemleri

Çalışma kapsamında YK'ler için 3 farklı öbekleme algoritması önerilmiş olup ortak özellikleri şu şekildedir:

- Komşuluk $a_{hh'}$, a_{hu} ve mesafe $d_{hh'}$, $d_{hu'}$ bilgileri algoritmalara girdi olarak verilmektedir.
- Aynı öbekte yer alan YK'ler birbirlerine CCH menzilinden daha yakın olmalıdır.
- Her YK yalnızca bir öbeğe dahil olabilmektedir. Bu doğrultuda öbeğe her katılımdan sonra \mathcal{YK} güncellenmektedir.
- Öbekleme algoritmaları tamamlandıktan sonra herhangi bir öbeğe dahil olamayan YK'ler İYK olarak gelen talepleri tekil olarak karşılayacaktır.

MTÖA'da öbeklerin oluşturulması sonrasında öbek içi hiyerarşi belirlenmektedir ve önbellekleme hiyerarşik olarak yapılmaktadır. Önerilen iki yeni öbekleme algoritmasında ise ÖB belirlendikten sonra diğer YK'lerin hiyerarşideki sırası öbeğe dahil olma sırasına göre belirlenmektedir.

Çizelge 4.5: Hareketli kullanıcı senaryosu için benzetim parametreleri.

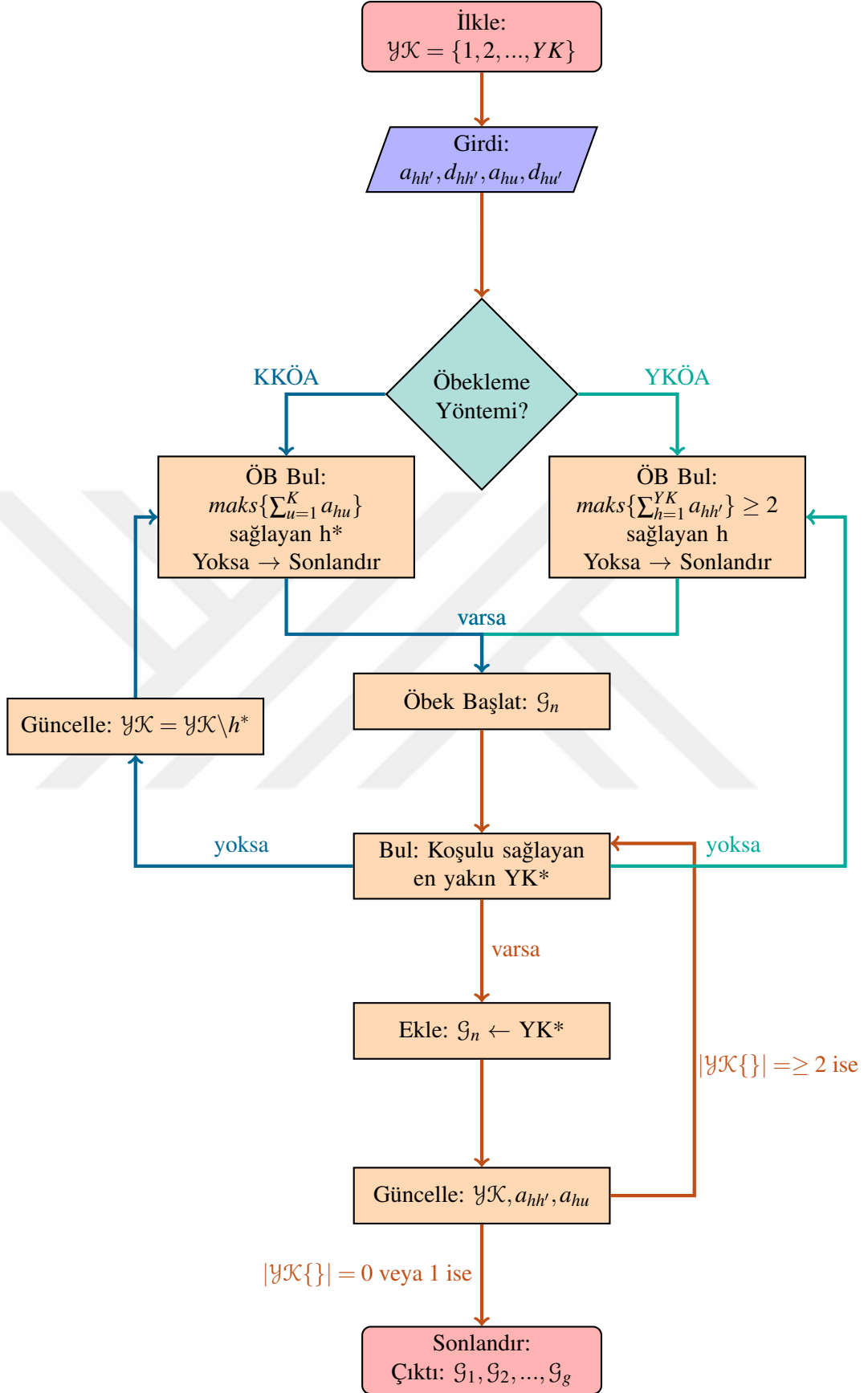
Parametre	Değer
İçerik sayısı (C)	20
Kullanıcı sayısı (K)	300
Yardımcı Kullanıcı sayısı (YK)	25
Zipf parametresi (α)	[0.6, 1]
CCH menzili (d_0)	50 m
Önbellek kapasitesi (C_c)	4 birim
İçerik boyutu (s_c)	1 birim
Alanın yarıçapı (d_{rad})	250 m

- **Mesafe Tabanlı Öbkleme Algoritması (MTÖA):** Kısım 4.6.1’de detaylı bir şekilde incelenmiştir.
- **Yardımcı Kullanıcı Komşuluğu Öbkleme Algoritması (YKÖA):** Dış döngüde, komşuluğunda en çok yardımcı bulunan YK ÖB olarak seçilir ve yeni bir öbek başlatılır. İç döngüde ise ÖB komşuluğundaki YK’ler komşuluk kısıtına göre öbeğe dahil olur. Döngüler komşuluk kısıtını sağlayan YK kalmayana kadar devam eder.
- **Kullanıcı Komşuluğu Tabanlı Öbkleme Algoritması (KKÖA):** Dış döngüde, komşuluğunda en çok kullanıcı bulunan yardımcı ÖB olarak seçilir. İç döngüde ise ÖB komşuluğundaki YK’ler komşuluk kısıtına göre öbeğe dahil olur. Döngüler komşuluk kısıtını sağlayan YK kalmayana kadar devam eder.

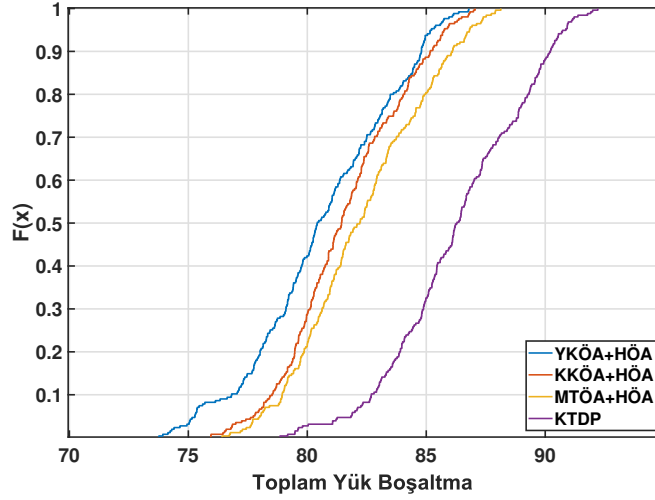
4.7.3 Benzetimler ve sonuçlar

Önerilen algoritmaların başarımı öncelikle değişken topolojiler için incelenmiştir. Benzetimlerde öbkleme ve önbellekleme her zaman diliminde baştan hesaplanmıştır. Şekil 4.13 ve 4.14, Çizelge 4.5’te yer alan değerlere göre sırasıyla $\alpha = 0.6$ ve $\alpha = 1$ için hesaplanan toplam yük boşaltmanın KDF’sidir. Elde edilen sonuçların ortalaması için toplam yük boşaltma değeri önerilen algoritmaların optimum çözüme %3.5 ile %7 yakınlıkta olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar önbellekleme için HÖA’yı kullanan fakat öbkleme yaklaşımları farklı olan YKÖA, KKÖA ve MTÖA’nın da tatmin edici bir yük boşaltma sağladığını göstermektedir. Bunun da temelinde öbkleme ile sağlanan içerik çeşitliliği yatmaktadır. Sadelik ve önceki çalışma ile bütünlük sağlanması amacıyla, çalışmanın devamına en iyi başarımları gösteren MTÖA kullanılmıştır.

İkinci kısımda benzetimler, bütün kullanıcıların Çizelge 4.6’da verilen hızlarla 255 ZD boyunca hareket ettiği bir senaryoyu kapsamaktadır. Şekil 4.15 ve 4.16 sırasıyla $\alpha = 0.6$ ve $\alpha = 1$ için değişken hesaplama periyoduna (MTÖA+HÖA için öbkleme ve önbellekleme periyoduna) göre ortalama yük boşaltmanın değişimini göstermektedir. KTDP anlık topoloji için en iyi çözümü vermektedir ve hesaplama periyodu 1 iken yani optimizasyon problemi her ZD’de tekrar çözülürken en iyi yük boşaltmayı sağlamaktadır. MTÖA+HÖA sonucu ise hesaplama periyodu 1 iken en iyi çözüme %6 yakınlıkta başarımları göstermiştir.

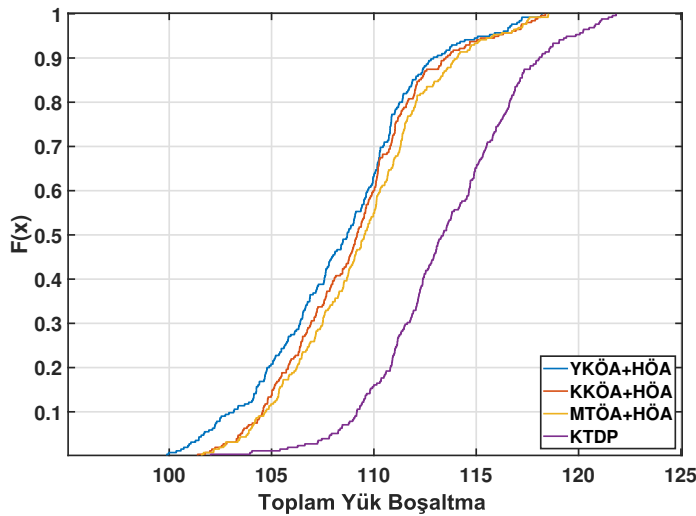


Şekil 4.12: KKÖA ve YKÖA için akış diyagramı.

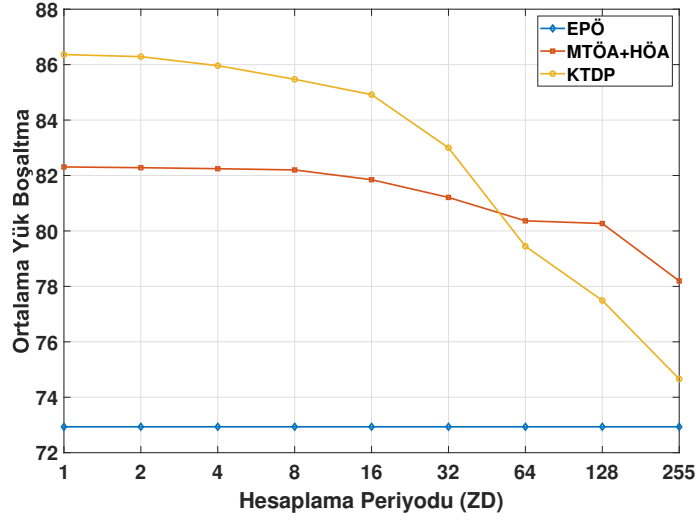


Şekil 4.13: Toplam yük boşaltma için KDF. ($\alpha = 0.6$)

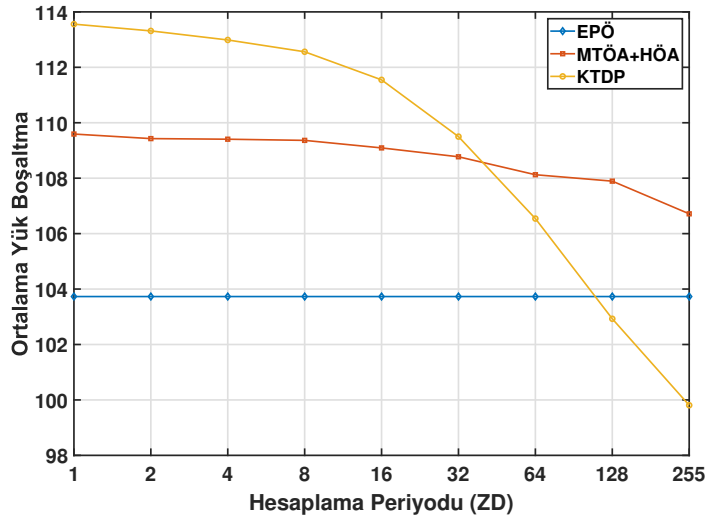
EPÖ'de sürekli en popüler içerikler önbelleklendiğinden ve öbekleme uygulanmadığından sağlanan yük boşaltma sabit kalmaktadır. Değişken hesaplama periyodu, anlık topoloji kullanılarak yapılan öbekleme ve önbellekleme kullanıcıların hareket etmesiyle değişen topoloji karşısında ne kadar dayanıklı olduğunu göstermek için tercih edilen bir kıyaslamadır. Görüleceği üzere $\alpha = 0.6$ için hesaplama periyodu 64'ten büyük olduğunda, $\alpha = 1$ için ise hesaplama periyodu 32'den büyük olduğunda önerilen algoritmalar KTDP tabanlı çözümden daha iyi sonuç vermiştir. Bu da önerilen algoritma çiftinin anlık topolojide başarılı olduğu kadar hareketlilik karşısında da gürbüz bir tutum sergilediğini göstermektedir. Çünkü hesaplamaların her ZD'de gerçekleştirilmesi yerine daha uzun periyotlarla yapılması sadelik ve uygulanabilirlik açısından önemlidir. Hesaplama periyodu 128'den uzun ve $\alpha = 1$ iken KTDP çözümü denektaş olarak sunulan EPÖ yaklaşımından bile daha az yük boşaltma sağlamıştır.



Şekil 4.14: Toplam yük boşaltma için KDF. ($\alpha = 1$)

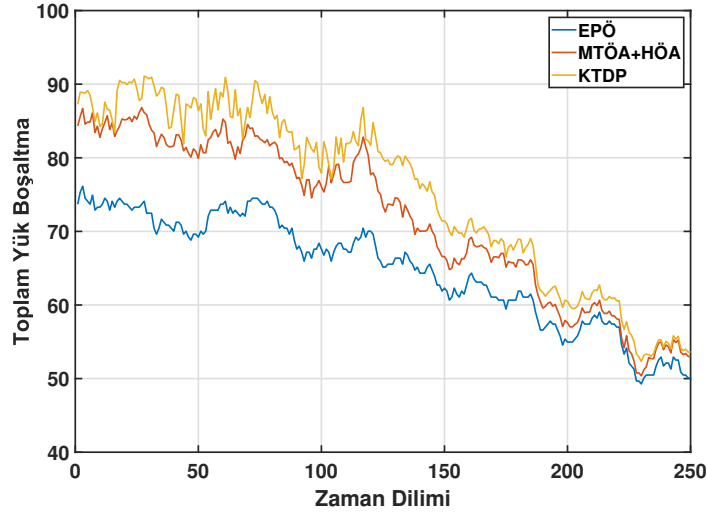


Şekil 4.15: Değişken hesaplama periyoduna göre ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 0.6$)

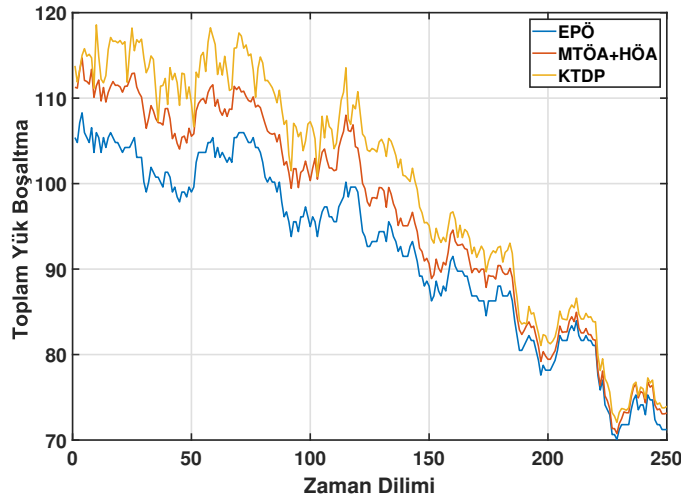


Şekil 4.16: Değişken hesaplama periyoduna göre ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 1$)

Kullanıcıların hareketli olduğu tüm modellerde RYHM kullanılmaktadır. Benzetimlerin son kısmında ise farklı bir bakış açısı incelenmiştir ve sınıra ulaşan kullanıcıların alanı terkettiği varsayılmıştır. Bu varsayımın rastgele bir topolojide, her ZD’de hesaplamanın yapıldığı durumda, 250 ZD boyunca sağlanan yük boşaltma sırasıyla $\alpha = 0.6$ ve $\alpha = 1$ için Şekil 4.17 ve 4.18’de sunulmuştur. Görüldüğü üzere MTÖA+HÖA KTDP çözümüne neredeyse bütün zaman dilimlerinde oldukça yakın başarımlar göstermiştir ve beklenildiği üzere hiç bir zaman daha iyi olamamıştır. Zaman ilerledikçe ağda bulunan kullanıcı ve YK sayısı azaldığından (Başlangıçta 25 olan YK sayısı benzetimlerin sonunda 12’ye düşmüştür.) sağlanan yük boşaltmada yaklaşık %50 düşüş meydana gelmiştir. Böyle bir durumda karşılaştırılan algoritmalar birbirlerine yakınsamıştır.



Şekil 4.17: Rastgele bir topolojide sağlanan yük boşaltma. ($\alpha = 0.6$)



Şekil 4.18: Rastgele bir topolojide sağlanan yük boşaltma. ($\alpha = 1$)

4.7.4 Değerlendirme

Kullanıcıların hareketine istinaden nispi konumlarının değiştiği bir senaryoda yapılan önbelleklemenin ne kadar başarılı göstereceği çalışmanın bu kısmında incelenmiştir. Optimizasyon tabanlı KTDP çözümü anlık en iyi çözümü sağlamaktadır fakat kullanıcı hareketlerine karşı çok duyarlıdır ve değişen konumlara göre tazelenmediğinde başarımında kayda değer biçimde düşmektedir. Hesaplama periyodunun uzun tutulduğu durumda EPÖ'den dahi daha kötü bir performans sergilemiştir. Aksine önerilen MTÖA+HÖA çözümü anlık topoloji için başarılı olurken daha genel dağılımlarda da tatmin edici sonuçlar sağlamıştır.

4.8 Hareketlilik Farkında Yaklaşım ile Kıyaslama

Bütün kullanıcıların (YK & K) hareketli olduğu bir ağ modelinde her ZD'de önbellekleme ve öbikleme yapmanın gerekliliği veya periyodik olarak yapılacaksa başarımdan ne kadar ödün verileceğinin değerlendirilmesi optimizasyon probleminin Hareketlilik Farkında (HF) bir yaklaşım ile çözümlenip önerilen yöntemlerle kıyaslanması ile mümkündür.

HF yaklaşımda kullanıcıların benzetimler boyunca hareketlerinin başlangıç anında bilinmesi gerekmektedir. Kullanıcı sayısının fazla olduğu ve değerlendirme yapılan sürenin uzun olduğu durumlarda hesaplama yükü artmakta ve donanımsal kısıtlar ortaya çıkmaktadır.

4.8.1 Problem formülasyonu

Hareketlilik farkında (HF) yaklaşım için problem formülasyonu 4.5'te verilmiştir. Kullanıcıların hızlarının ve yönlerinin bilindiği varsayılarak zaman değişkeninin t formülasyona eklenmiştir. Bu varsayımla, bütün kullanıcıların konumları bütün ZD'lerde önceden bilinmektedir. Böylelikle,

- y_{huct} : t 'inci ZD'de, YK h 'nin u kullanıcılarına c içeriğini talep ettiği durumda yardım edip edemeyeceğini göstermektedir.
- a_{hut} : t 'inci ZD'de, h yardımcısının u kullanıcısının komşuluğunda olup olmadığını göstermektedir.

$$\max \left\{ \sum_{u=1}^U \sum_{c=1}^C p_{uc} \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H y_{huct} s_c \right\} \quad (4.5)$$

s.t.

$$\sum_{c=1}^C x_{hc} s_c \leq C_c, \forall h = 1, \dots, H \quad (4.6)$$

$$\sum_{h=1}^H y_{huct} \leq 1, \forall u = 1, \dots, U, c = 1, \dots, C, t = 1, \dots, T \quad (4.7)$$

$$y_{huct} \leq a_{hut} x_{hc}, \forall u = 1, \dots, U, c = 1, \dots, C, h = 1, \dots, H, t = 1, \dots, T \quad (4.8)$$

4.8.2 Benzetimler ve sonuçlar

HF çözüm donanımsal kısıtlardan ötürü önceki çalışmalara kıyasla daha az kullanıcı ve YK'nin bulunduğu ve daha kısa benzetimlerle incelenebilmiştir. KTDP-HF çözümünde MATLAB'da hesaplanarak CPLEX çözücüsünü kullanan GAMS'a girdi olarak verilen a_{hut} matrisi kullanılan bilgisayarın RAM kapasitesinden (16 GB)

Çizelge 4.6: Hareket farkında çözüm için benzetim parametreleri.

Parametre	Değer 1.Kısım	Değer 2.Kısım
Kullanıcı sayısı (K)	300	200
Yardımcı kullanıcı sayısı (YK)	30	20
Zaman dilimi sayısı (T_s)	[10, 25, 50, 100]	128
İçerik sayısı (C)	20	
Zipf parametresi (α)	[0.6, 1]	
CCH menzili (d_0)	50 m	
Önbellek kapasitesi (C_c)	4 birim	
İçerik boyutu (s_c)	1 birim	
Alanın yarıçapı (d_{rad})	200 m	
Tüm kullanıcılar için azami hız (S_{maks})	3 m/s	

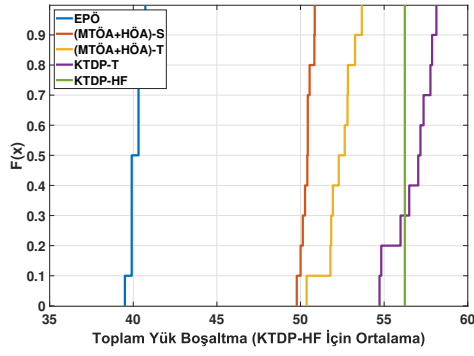
kaynaklı “**max. array size limit**” uyarısı vermektedir. Değişken sayılarındaki kısıtlamaya rağmen, KTDP-HF model 50 ZD için çözüldüğünde (İşlemci: Intel-i7 6700K) 50 farklı topoloji için yaklaşık 9-10 saat sürmektedir. Bu süre 80 ZD için 24-30 saat'e kadar çıkmaktadır. Bu da böylesi bir çözümün uygulanabilirlikten uzak olduğunun bir göstergesidir.

Benzetimler Çizelge 4.6'da yer alan değerler için rastgele 50 topolojide yapılmıştır. İlk kısımda, farklı uzunlukta ZD için elde edilen yük boşaltma miktarları değişken α değerleri için incelenmiştir. İkinci kısımda ise önbellekleme periyodunun etkisini gözlemlemek adına 128 ZD boyunca hesaplama periyodu üstel (2^n) olarak artırılarak sağlanan yük boşaltma miktarları kıyaslanmıştır.

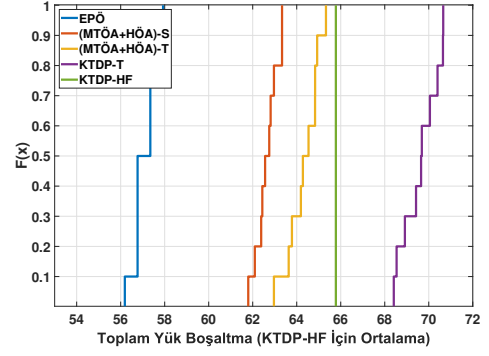
Yöntemlerin kısaltmalarında yer alan **-S** ve **-T** takıları sırasıyla **Sabit** ve **Tekrarlı** anlamı taşımaktadır. Sabit, öbekleme ve önbelleklemenin başlangıçta bir defaya mahsus yapıldığı, tekrarlı ise her ZD'de hesaplamının tekrar yapıldığı anlamına gelmektedir.

Şekil 4.19, 10 ZD için elde edilen sonuçları göstermektedir. HF çözüm bütün ZD'lerde önerilen ve denektaş algoritmadan daha iyi bir başarımla göstermiştir. Benzetimlerin süresi uzadıkça HF çözüm başarımlarında kayda değer bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun nedeni anlık topolojinin zamanla çok farklı noktalara evrilmektedir. Bu yüzden bütün ZD'lerde başarımla sağlayacak şekilde önbellekleme yapmak zorlaşmaktadır. Bu noktada basit ve etkin öbekleme ve önbellek yönetiminin sağladığı fayda açıkça görülmektedir. Şekil 4.20'de 25 ZD için, her ZD'de uygulanan tekrarlı MTÖA+HÖA, KTDP-HF çözüme kıyasla daha fazla yük boşaltma sağlamıştır. Benzetim uzunluğunun 50 ve 100 ZD olduğu durumlardaki sonuçlar Şekil 4.21 ve 4.22'de yer almaktadır. Yalnızca başlangıç anında uygulanan (MTÖA+HÖA)-S algoritmasının sağladığı başarımla KTDP-HF çözümüne oldukça yakın olup yük boşaltma ($F(x) = 0.5$) için elde edilen nümerik sonuçlar Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Çizelgedeki değerler KTDP-HF çözümü ile olan farkın % cinsinden hesaplanmış halidir. KTDP-HF en iyi başarımla sağladığı durumda bile MTÖA-S'den %11.5 daha iyi başarımla sağlamışken benzetim süresi uzadıkça bu fark %1.3'ye kadar gerilemiştir. (MTÖA+HÖA)-T çözüm ise $\alpha = 0.6$ iken 25 ZD ve daha uzun benzetimlerde, $\alpha = 1$ iken ise 50 ZD ve daha uzun benzetimlerde

KTDP-HF'den daha iyi başarımlar sergilemiştir.

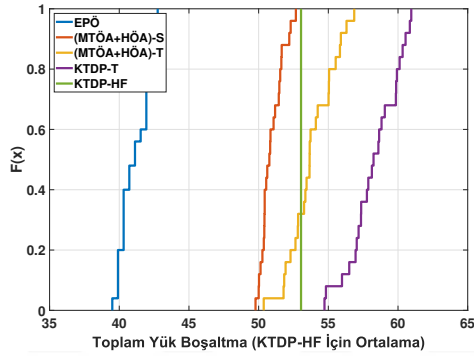


(a) $\alpha = 0.6$

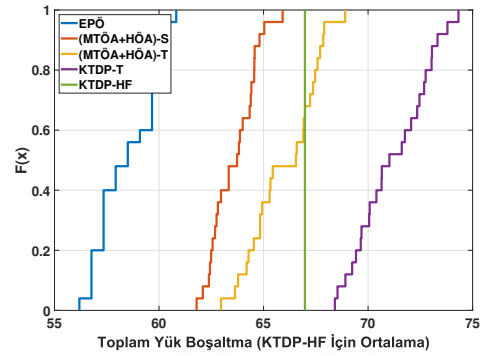


(b) $\alpha = 1$

Şekil 4.19: 10 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.

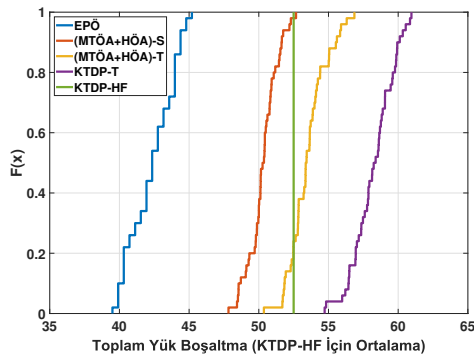


(a) $\alpha = 0.6$

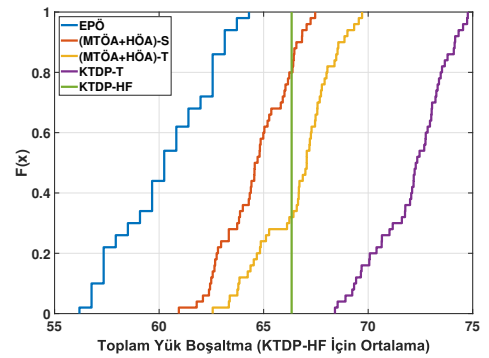


(b) $\alpha = 1$

Şekil 4.20: 25 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.

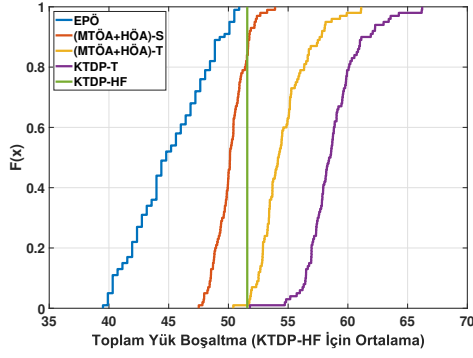


(a) $\alpha = 0.6$

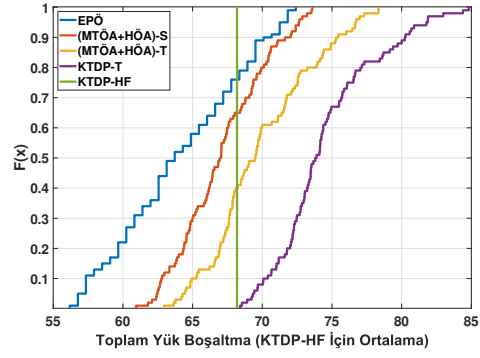


(b) $\alpha = 1$

Şekil 4.21: 50 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.



(a) $\alpha = 0.6$

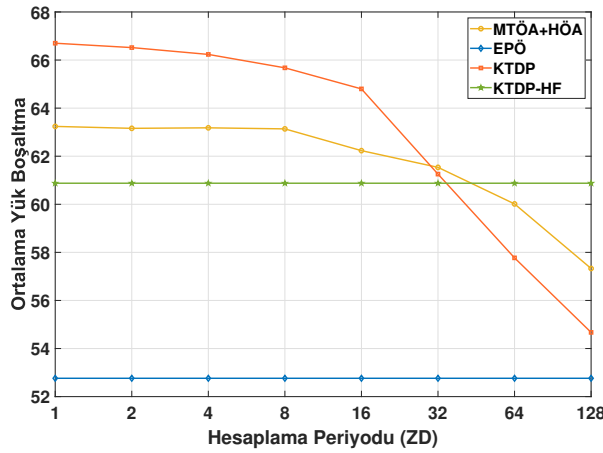


(b) $\alpha = 1$

Şekil 4.22: 100 ZD için HF çözüm ile kıyaslama.

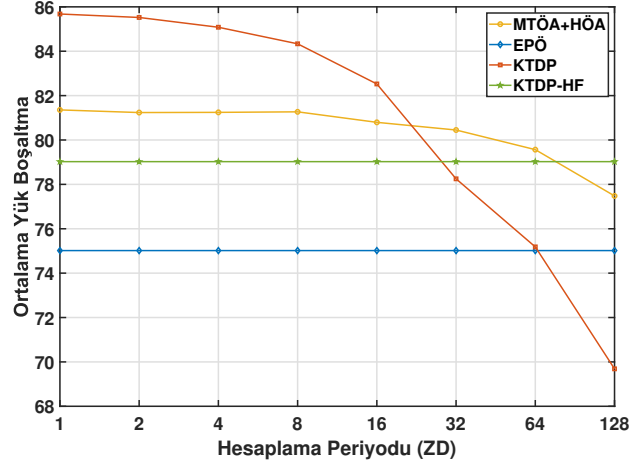
Çizelge 4.7: KTDP-HF'nin diğer yöntemler ile kıyaslanması. (% cinsinden)

	Benzetim Uzunluğu (ZD)							
	10	25	50	100	10	25	50	100
	$\alpha = 0.6$				$\alpha = 1$			
EPÖ	-39.5	-29.2	-24.1	-16.2	-14.8	-14.5	-10.1	-6.6
(MTÖA+HÖA)-S	-11.5	-4.5	-4.2	-3.0	-5.1	-5.2	-2.6	-1.3
(MTÖA+HÖA)-T	-6.8	1.1	1.7	4.8	-2.3	-0.8	1.2	2.3
KTDP-HF	Referans Değer							
KTDP-T	1.7	8.8	10.1	11.8	5.6	5.6	8.3	8.1



Şekil 4.23: Değişken hesaplama periyodu için ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 0.6$)

Benzetimlerin ikinci kısmında; MTÖA+HÖA, EPÖ, KTDP ve KTDP-HF'nin sağladığı ortalama yük boşaltma miktarları kıyaslanmıştır. Daha uzun süreli benzetim yapabilmek için (128 ZD), YK ve K sayısı azaltılmıştır. EPÖ ve KTDP-HF yalnızca başlangıç anında önbellekleme yaptıkları için sağlanan ortalama yük boşaltma miktarı sabittir. MTÖA+HÖA ve KTDP ise gitgide artan periyotlarla hesaplanmıştır. Hesaplama periyodunun 1 olması her ZD'de, 128 olması ise yalnızca ilk ZD'de önbelleklemenin (MTÖA için ayrıca önbelleklemenin) yapıldığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.24: Değişken hesaplama periyodu için ortalama yük boşaltma. ($\alpha = 1$)

Önbellekleme periyodu 1 iken KTDP beklenildiği gibi en iyi başarıyı göstermektedir. MTÖA+HÖA ise $\alpha = 0.6$ için KTDP'ye %5.3 ila %4.7 yakınlıkta, $\alpha = 1$ için ise %5.1 ila %11.1 yakınlıkta başarıyı sergilemiştir. Hesaplama periyodu arttıkça KTDP'nin dramatik bir düşüş yaşadığı, MTÖA+HÖA'den hatta EPÖ'den dahi daha az ortalama yük boşaltma sağladığı görülmektedir. Bunun nedeni çözümün hareket duyarlı olmasıdır. MTÖA yaklaşımı nispi olarak hareketliliğe karşı daha gürbüzdür ve önbellekleme periyodunun her iki α değeri için 32'den fazla olduğu durumlarda KTDP'den daha iyi başarıyı göstermiştir. KTDP-HF çözümü ise önbellekleme periyodu arttıkça diğer yaklaşımların performans düşüşleri karşısında onlardan daha yüksek ortalama yük boşaltma sağlamıştır.

4.8.3 Değerlendirme

Hareket farkında yaklaşımın optimizasyon tabanlı çözümü (KTDP-HF) için bütün kullanıcıların benzetimler süresince anlık konumlarının girdi olarak sağlanması gerekmektedir. Bu gereksinim uygulanabilir ve gerçekçilikten uzaktır. Yapılan benzetimlerde önerilen algoritma çiftinin bir defaya mahsus hesaplandığı yaklaşım (MTÖA+HÖA-S) en kötü koşulda bile KTDP-HF'ye %11 yakınlıkta yük boşaltma sağlamıştır. Benzetimlerin ikinci kısmında ise KTDP'nin hesaplama periyodu uzadıkça EPÖ'den bile daha kötü başarıyı göstermesi dikkat çekici bir noktadır.

5. KEŞİF ve DUYURU PROSEDÜRLERİ

5.1 Giriş

Başarılı yük boşaltma için verimli önbelleklemenin ne kadar önemli olduğuna önceki kısımlarda yer verilmiştir. Bununla birlikte, CCH'de bağlantı kurulmadan önce yakın cihazların birbirlerinin varlığından ve sağlanan servislerden haberdar olmaları gerekmektedir.

Tez çalışmalarının bu kısmında, Duyuru Tabanlı Cihazdan Cihaza Haberleşme (DTCCH) Prosedürü ve Keşif Tabanlı Cihazdan Cihaza Haberleşme (KTCCH) Prosedürü önerilmiş, sunulan sistem modeli kapsamında uygulanmış ve başarımları kıyaslanmıştır. İki prosedür de Algoritma 3 ve Algoritma 4 uygulandıktan sonra oluşan öbekler ve yapılan önbelleklemeye göre çalışmaktadır.

Keşif ve duyuru işlemleri için her kullanıcıya özel kanal tahsis etmek mümkün değildir. Bu yüzden sınırlı spektrumun özellikle kullanıcı yoğunluğunun fazla olduğu senaryolarda verimli kullanılması önem arz etmektedir. Böylelikle, girişim kaynaklı kesinti ihtimali ve gecikme gibi servis kalitesini düşürecek sonuçlardan kaçınmak mümkün olmaktadır.

Önerilen prosedürlerin hücresele şebekede kullanılacak olmasından ötürü kullanıcıların şebeke kapsama alanında bulunduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım kullanıcılar arasında zaman senkronizasyonunun şebeke üzerinden sağlanabileceğine işaret etmektedir. Bu sayede, Duyuru ve Keşif için ayrılan zaman dilimlerinde kullanıcıların tahsis edilen kanalları zaman bölmeli tarayarak dinleyebildiği ve iletim yapabildiği varsayılmıştır.

Prosedürler hibrit yapıda çalışmakta olup cihazların birbirlerinin varlığından ve sağlanan içeriklerden haberdar olmaları otonom olarak gerçekleşmektedir. CCH veri iletimi çizelgelemesi ise ağ destekli biçimde yapılmaktadır.

5.2 Literatür Taraması

CCH'de keşif; cihaz, içerik ve servis keşfini kapsamaktadır. Keşif işlemi amacından bağımsız olarak, kullanıcı yoğunluğunun fazla olduğu durumlarda girişim kaynaklı kesintilere maruz kalabildiği gibi kullanıcı yoğunluğunun az olduğu durumlarda da CCH'nin kısa menziline ötürü başarısız olabilmektedir. Bu yüzden dikkatlice ele alınması gereken bir konudur [48].

Keşif işlemi ağ destekli (merkezi) ve otonom (dağıtık) olarak yapılabilir [109]. Ağ destekli keşifte, kullanıcılara Bİ veya ağdaki başka bir merkezi varlık tarafından; yakınlık (görece konum), kanal durum ve erişilebilirlik gibi gerekli bilgiler sağlanmaktadır. Ayrıca kaynak tahsisi ve zaman çizelgelemesi de yapılmaktadır. Bu bilgilerin sağlanabilmesi için kullanıcıların kapsama alanı içinde bulunması gerekmekte olup kullanıcı sayısının artması ile merkezi varlık üzerindeki hesaplama yükü de artmaktadır. Otonom keşifte ise kullanıcılar bu işlemi kendi başlarına gerçekleştirmektedir [110]. Böylesi bir yaklaşımda kullanıcıların kapsama alanında bulunmalarına gerek yoktur. Fakat başarıyı merkezi yaklaşıma kıyasla daha düşük olup spektrum ve enerji gibi kaynakların kullanımını nipsi olarak verimlilikten uzaktır.

Literatürde keşif kavramını inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. [111–113]’te cihaz keşfi için ağ destekli yaklaşımlar önerilmiştir. [114, 115]’te ise cihaz keşfi otonom bir yaklaşımla ele alınmıştır. Yazarlar [99]’daki çalışmada öbekleme ve mesajlaşma yükünü azaltan iki aşamalı keşif prosedürü önermişlerdir. Fakat, önbellekleme ve içerik iletimi makale kapsamında incelenmemiştir. [116]’da CCH’de direkt keşif ve ağ destekli haberleşme için hibrit bir model önerilmiştir. Keşif fazında yetkilendirme ve doğrulama kullanıcı talebine istinaden servis sağlayıcı tarafından yapılmaktadır. Bu sayede kullanıcıların güvenlik endişesinin de ortadan kalkacağı vurgulanmıştır. Başka bir çalışmada ise, hibrit yaklaşımın direkt keşife kıyasla enerji tüketiminde ve keşif için gerekli sürede sağladığı iyileşme gösterilmiştir [117]. [118]’de hücrel bir ağda Gelişmiş Paket Ağ Çekirdeği (EPC) destekli keşif yaklaşımı ele alınmıştır. Kullanıcılar enerji verimliliği ve başarı oranını iyileştirmek amacıyla eNodeB’den gelen uyarı sonrasında CCH için girişimde bulunmaktadır. Başka bir eNodeB destekli keşif ve CCH bağlantı kurulumu prosedürü [119]’da önerilmiş olup başarıyı değerlendirme enerji tüketimi ve gecikme kriterleri üzerinden yapılmıştır.

Yazarlar [120]’de merkezi ve yarı-merkezi CCH keşif algoritmaları önermiştir. Önerilen algoritmalar ile bir hücredeki bütün CC eşleşmeleri için gerekli sürede iyileşme sağlanması amaçlanmaktadır. [121]’de CCH’de merkezi ve otonom iki cihaz keşif yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemlerle güç tüketimi ve sinyalleşme yükünün azaltılması hedeflenmiştir. Yazarlar ayrıca önerilen algoritmaların önbellekleme yapılabilen ağlarda da kullanılabileceğini belirtmiştir. Başka bir çalışmada, kullanıcıların birbirlerini direkt veya yönlendirici düğümler vasıtasıyla keşfedebildiği bir model incelenmiştir [122]. [123]’teki çalışmada ise Wi-Fi Direkt teknolojisinde keşif işleminde enerji tüketimini iyileştirmek için LTE destekli bir süreç önermiştir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için Wi-Fi kullanıcılarının hücrel şebeke kapsamında olması gerekmektedir.

Daha önce de belirtildiği üzere, LTE Direkt, CCH teknolojileri arasında hücrel haberleşme ile aynı spektrumu kullanan (bant içi CCH) tek yöntemdir. LTE Direkt için teknik tarifnamelerde iki adet keşif yöntemi belirtilmiştir [16]. Bunlardan ağ destekli keşifte, kullanıcılar CCH için kayıt olduktan sonra yakınlarında bir cihaz veya sunulan servis olması durumunda CCH için merkezi olarak uyarılmaktadırlar. Direkt keşifte ise kullanıcılar keşif mesajları göndererek kendi başlarına servis veya cihaz keşfi yapmaya çalışmaktadır.

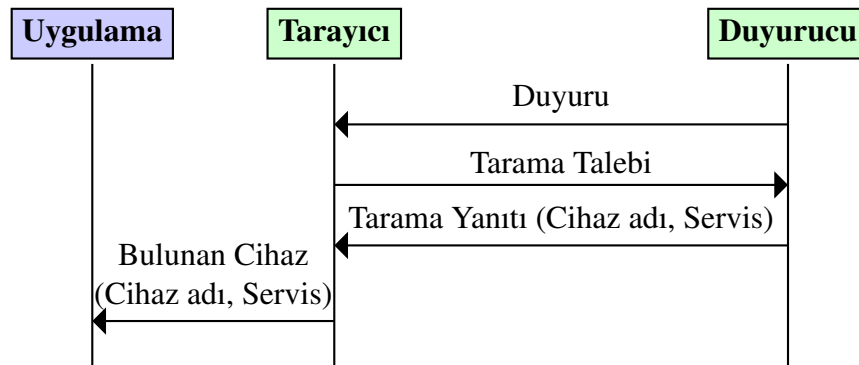
Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu kısımda önerilen prosedürler kaynak tahsisi ve erişimini de içermektedir. Sistem modeli ve kaynak kullanımı yaklaşımları geliştirilirken ve yapılan benzetimlerde hücresele şebekenin kısıtları da dikkate alınmıştır.

5.3 Mevcut Teknolojilerde Servis ve Cihaz Keşfi

Mevcut teknolojilerde CCH'nin kapsamına ve temel özelliklerine Kısım 2.2'de yer verilmiştir. Kullanılan keşif prosedürleri ise teknik tanımlama dokümanlarında [13, 14, 16] detaylı biçimde anlatılmış olup ana hatlarıyla şu şekildedir;

5.3.1 Bluetooth-LE

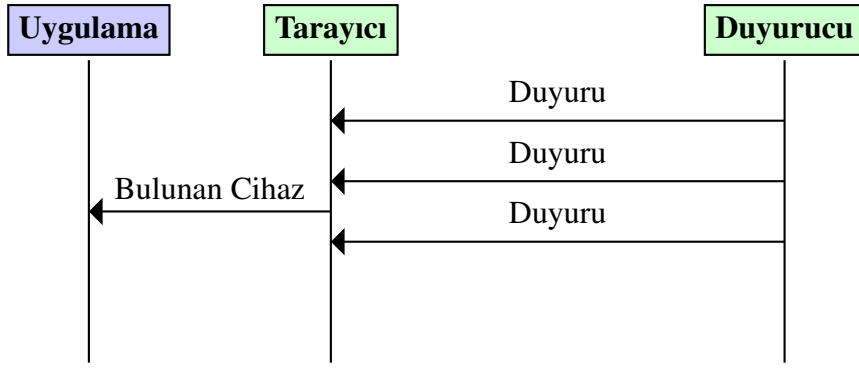
Keşif, duyuru ve bağlantı kurma işlemleri bağlantı katmanında (İng. link layer) yapılmaktadır. Cihaz keşfi için Aktif ve Pasif tarama olmak üzere iki farklı yöntem vardır. Aktif tarama modunda tarayıcı cihaz gelen duyuru paketlerini bekler ve gelen paketlere yanıt olarak daha detaylı bilgi almak için ek tarama isteği gönderir. Duyurucu cihaz buna yanıt olarak desteklenen servisler, sağlanan içerikler ve cihaz adı gibi bilgileri iletir. Pasif tarama modunda ise tarayıcı yalnızca duyuru kanallarını sıralı biçimde (İng. round robin) dinler ve uygulamayı bilgilendirir. Pasif taramaya örnek olarak araba-cep telefonu eşleşmesi verilebilir. Prosedürlerin sıralı diyagramları Şekil 5.1 ve 5.2'de yer almaktadır. Bluetooth LE'de kullanıcı bazlı kaynak tahsisi ve senkronizasyon yoktur.



Şekil 5.1: Bluetooth LE aktif tarama.

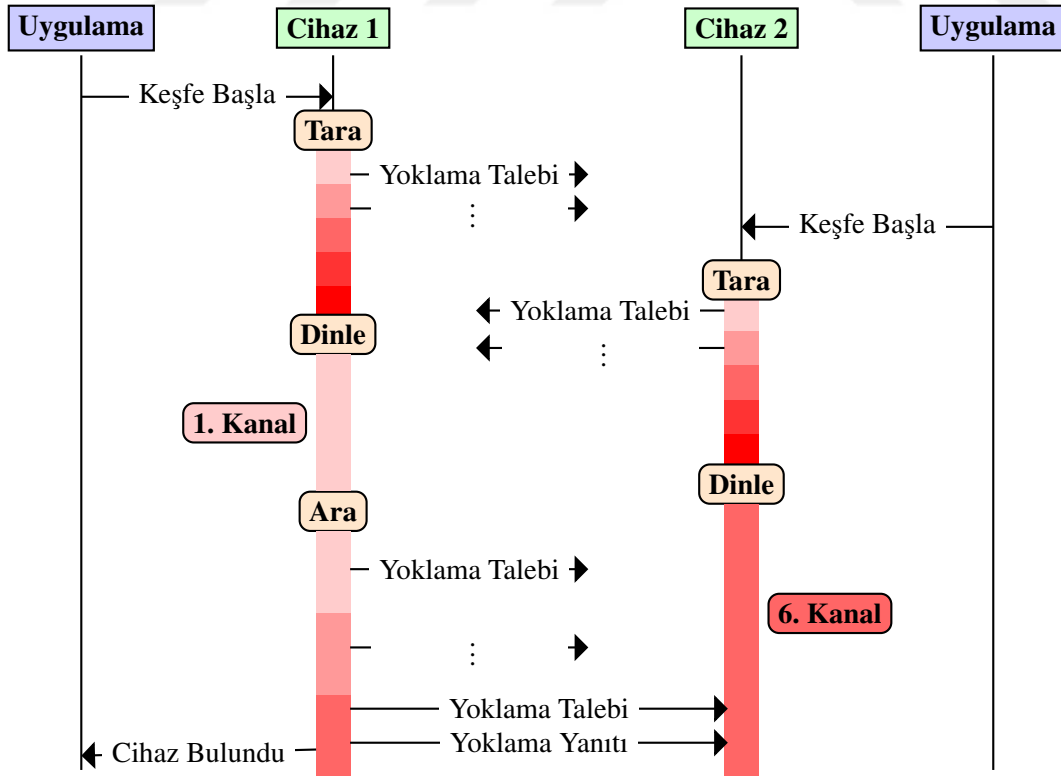
5.3.2 Wi-Fi direkt

Wi-Fi Direkt teknolojisinde Cihaz ve Servis keşfi için ağ desteğine ihtiyaç duymayan otonom prosedürler tanımlanmıştır [14]. Cihaz keşfi cihazların birbirlerinin varlığından haberdar olduktan sonra ortak bir kanalda bağlantı kurma işlemini kapsamaktadır. Servis keşfi ise opsiyonel bir özellik olup uygulama katmanı (İng. application layer) servislerinin bağlantı kurmadan önce cihazlar tarafından keşfedilmesini tanımlamaktadır. Keşif işlemine ait akış diyagramı Şekil 5.3'te sunulmuştur. Uygulama tarafından başlatılan keşif, Tara (İng. scan) ve Bul (İng. find)



Şekil 5.2: Bluetooth LE pasif tarama.

olmak üzere iki ana faz içermektedir. Tara fazında cihazlar Wi-Fi kanallarının tamamından yoklama mesajı gönderirler. Bu işlemle etraftaki grupların ön keşfi amaçlanmaktadır. Bul fazında ise cihaz arama ve dinleme olmak üzere iki farklı modda çalışır. Ara modunda bu işlem için kullanılmak üzere belirlenmiş 1. 6. ve 11. kanallardan yoklama mesajları gönderirken dinle modunda ise bu kanallardan birini seçerek kendisine gelecek olan yoklama mesajlarını bekler. Dinleme kanalı keşif operasyonu boyunca bir defaya mahsus seçilir (Cihaz 1 için 1. kanal, Cihaz 2 için 6. kanal) ve değiştirilemez. Dinleme süresinin uzunluğu ise ön tanımlı olup her kullanıcı için farklı uzunlukta olabilir. Akış diyagramında gösterildiği üzere Cihaz 1 ara fazında 6. kanalda iletim yaparken aynı kanalı dinleyen Cihaz 2'yi keşfetmiştir. Cihaz 1'in dinleme süresi de Cihaz 2'den uzundur.



Şekil 5.3: Wi-Fi Direkt kullanıcı keşfi.

5.3.3 LTE direkt

LTE Direkt teknolojisinde otonom ve ağ destekli kullanıcı keşfi desteklenmektedir [16]. Cihazlar arasındaki sinyalleşme prosedürleri ve veri iletim işlemi yan kanal (İng. side channel) olarak da isimlendirilen PC5 arayüzü üzerinden gerçekleşmektedir.

- **Otonom Keşif:** Yakın kullanıcıların birbirlerini LTE hava arayüzü (İng. E-UTRA) üzerinden tespit edip tanımlama işlemidir (Şekil 5.4). Serbest ve kısıtlı olmak üzere iki çeşittir. Serbest keşifte bütün kullanıcılar keşfedilmeye elverişlidir. Kısıtlı keşif ise keşfedilecek kullanıcının izin vermesi halinde mümkündür. Öncelikle tüm kullanıcılar Kamusal Mobil Karasal Ağ bazında (EKMKA, ZKMKA) (İng. Home Public Mobile Land Network - HPLMN, Visitor Public Land Mobile Network - VPLMN) servis izni almaktadır. Bu izin LTE radyo arayüzünü (EUTRA) CCH amaçlı kullanabilmek için zorunludur. Servis izni alındıktan sonra kullanılacak keşif yaklaşımları alınan iznin kapsamı ile kısıtlıdır.

Model A ("Buradayım!"): İki çeşit kullanıcı tanımlanmıştır.

Duyuran: Cihaz önce EKMKA'ya bağlı ProSe Uygulama Sunucusu'ndan duyuru talebinde bulunur. Bu talep HSS sorgusu ile yanıtlanır ve kullanıcı bilgilendirilir. Olumlu yanıtlanması halinde yakın cihazlar tarafından alınmak üzere duyurucu hakkında bilgiler içeren duyuru mesajları gönderir.

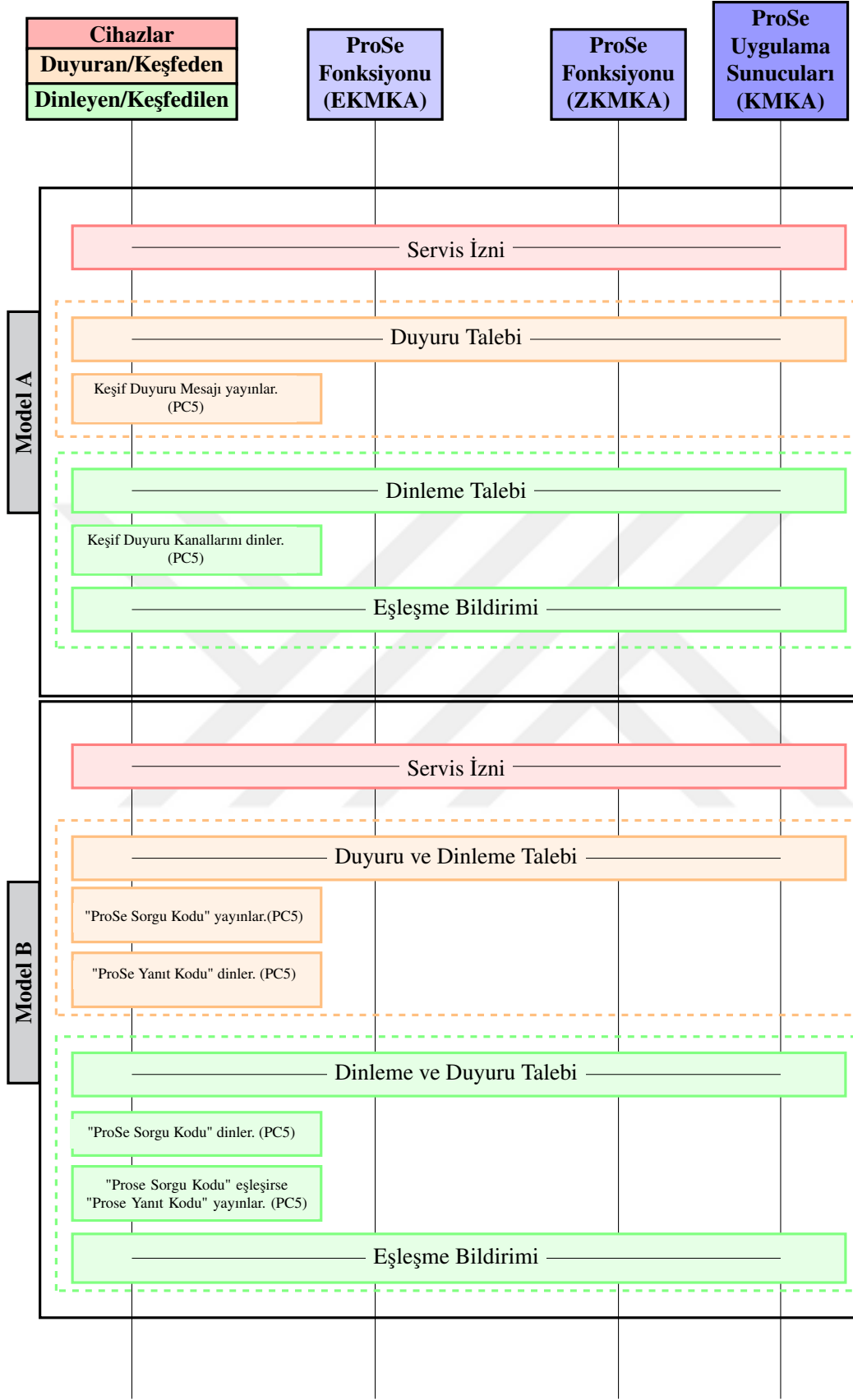
Dinleyici: Dinleme talebinde bulunduktan sonra kendisine Prose Uygulama Kodları bildirilir. Bu filtreye göre duyuru kanallarını dinler. Eşleşen kullanıcı olması halinde bilgilendirme yapar.

Model B ("Orada mısınız?"): İki çeşit kullanıcı tanımlanmıştır.

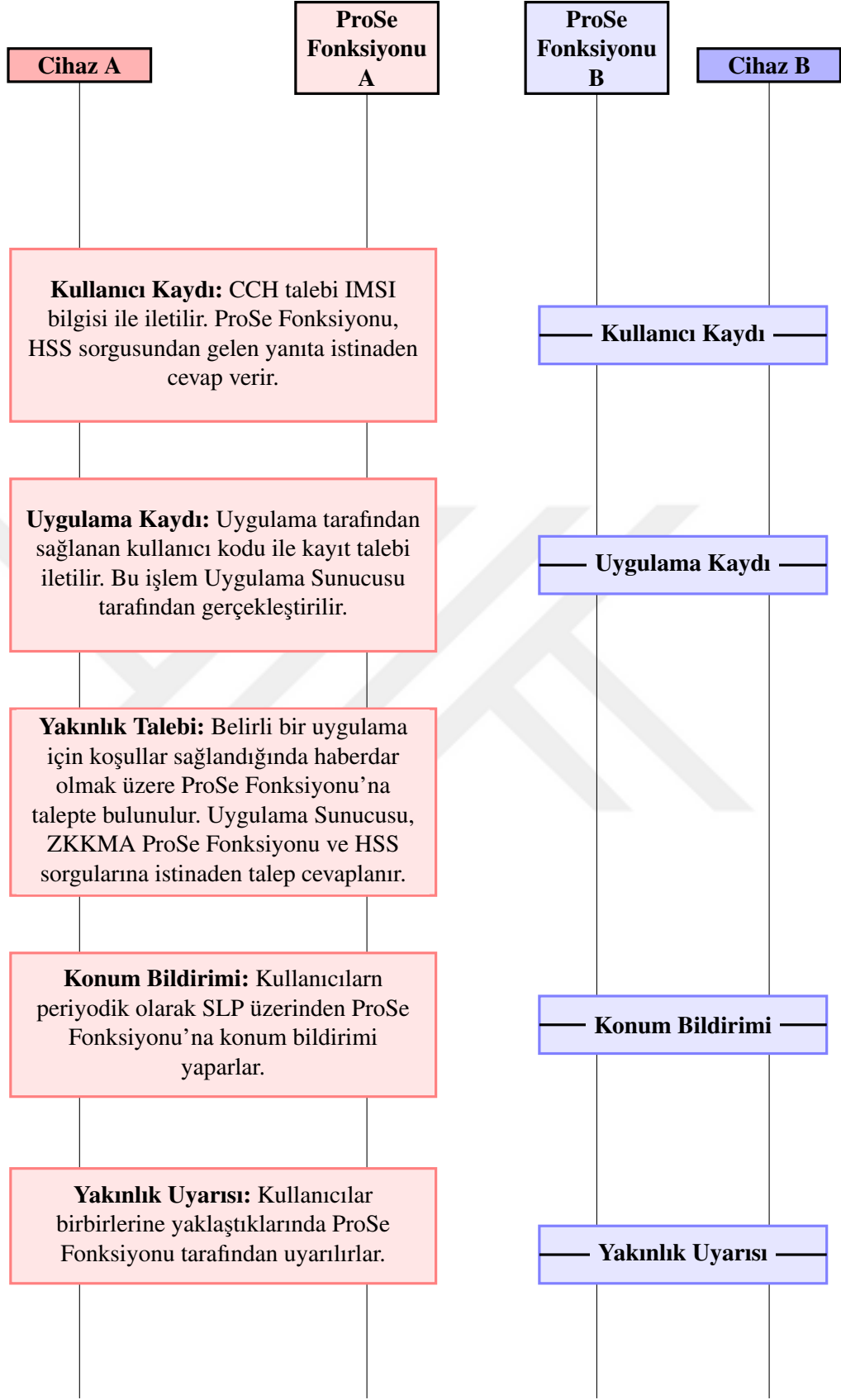
Bulucu: İlgilendiği ve keşfetmek istediği içerik ve servislere yönelik istek mesajları gönderir.

Bulunan: Bulucunun isteğine yönelik cevap veren kullanıcılarıdır.

- **Ağ Destekli Keşif:** Kullanıcıların birbirlerini ve sunulan servisleri keşif süreçlerinin Gelişmiş Paket Şebeke Özü (EPC) destekli biçimde gerçekleşmesidir. Kullanıcıların EPC ile bağlantısı ProSe fonksiyonu üzerinden sağlanmaktadır (PC3). ProSe kayıt öncesi kullanıcıların bilgilerini HSS'den (PC4a), Uygulama kaydı talebini Uygulama Sunucusu'ndan (PC2), konum bilgisini ise SLP'den sağlar (PC4b). Akış diyagramı Şekil 5.5'te yer almakta olup kullanıcılar ilk olarak EKMKA'daki ProSe Uygulama Sunucusu'na kayıt olurlar. Bu aşamada kullanıcının yetkilendirilmesi için abonelik bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bilgiler, ProSe Fonksiyonu tarafından HSS'den alınır. Daha sonra yine EKMKA'daki Uygulama Sunucusu'na kayıt olurlar. Sıradaki aşamada, kullanıcının Uygulama Sunucusu'na kaydı gerçekleşir. Kayıt talebi, üçüncü parti CCH uygulamasından alınan uygulama katmanı kullanıcı kimliğiyle gerçekleşir. Daha sonra kullanıcı ProSe fonksiyonuna yakınlık talebinde bulunur. Bu adımda kullanıcı, belirli bir uygulama için uygun şartların sağlanması halinde haberdar edilmeyi amaçlamaktadır. Kullanıcılar daha sonra periyodik olarak konum güncellemesi yaparlar ve yakınlaşmaları halinde ProSe Fonksiyonları tarafından CCH bağlantı kurabilecekleri bildirilir.



Şekil 5.4: LTE Direkt otonom keşif prosedürü. (Model A ve Model B)



Şekil 5.5: LTE Direkt ağ destekli keşif prosedürü.

5.4 Yük Boşaltma Formülasyonu

Yük boşaltma formülasyonu 5.1’de verilmiştir. Kısıtlar 4.1’deki optimizasyon problemindeki formülasyonla aynı olup değişkenlerde bazı nüanslar vardır. 4.2’de KTDP çözümü olan önbellekleme sonucunun (x_{hc}) yerine, HÖA’ya göre yapılan önbellekleme (v_{hc}) kullanılmaktadır. Kullanıcı h ’nin önbelleklediği içerikler için $v_{hc} = 1$ olmaktadır.

Komşuluk değişkeni a_{hu} yerine ise SGGO eşik değerine bağlı CCH yapabilme değişkeni g_{hu} kullanılmıştır. Bu değişken, iletim yapılan ZD’de ve seçilen KB’de kullanıcı u ile YK h arasında belirlenen SGGO eşik değerinin sağlanması durumunda 1 olmaktadır. İletim yapan ve girişime maruz kalan taraf prosedürün hangi aşamasında olduğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

$$YB = \left\{ \sum_{u=1}^U \sum_{c=1}^C p_{uc} \sum_{h=1}^H y_{huc} s_c \right\} \quad (5.1)$$

s.t.

$$\sum_{c=1}^C v_{hc} s_c \leq C_c, \forall h = 1, \dots, H \quad (5.2)$$

$$\sum_{h=1}^H y_{huc} \leq 1, \forall u = 1, \dots, U, c = 1, \dots, C \quad (5.3)$$

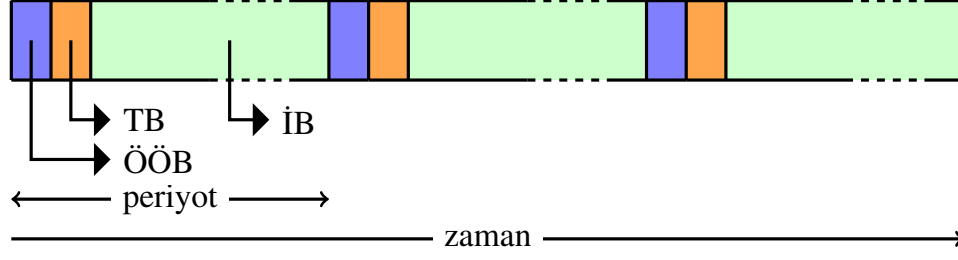
$$y_{huc} \leq g_{hu} v_{hc}, \forall u = 1, \dots, U, c = 1, \dots, C, h = 1, \dots, H \quad (5.4)$$

5.5 Sistem Modeli

Ağ modelinde zaman periyodik olarak tekrar eden 3 kısımdan (ÖÖB, TB, İB) oluşmaktadır (Şekil 5.6). Öbikleme ve Önbellekleme Bölgesi’nde (ÖÖB) adından da anlaşılacağı üzere MTÖA ve HÖA uygulanmaktadır. Tespit Bölgesi (TB), bu kısımda önerilen KTCCH ve DTCCH prosedürleri ile kullanıcıların (K & YK) birbirlerinden haberdar olmaları için tahsis edilmiştir. İletim Bölgesi (İB) ise CCH bağlantıları kurulduktan sonra içerik iletimi için ayrılmıştır.

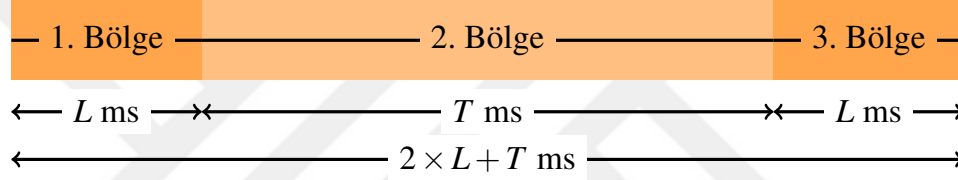
Çalışma kapsamında kaynak tahsisi ve erişimi konusu keşif ve duyuru prosedürlerinin gerçekleştiği TB için incelenmiştir. ÖÖB ve İB’nin tahsis edilen işlemlerin tamamlanması için yeterli uzunlukta olduğu, değişken TB sürenin ise periyot uzunluğunu değiştirmediği varsayılmaktadır.

Her TB, $2 \times L + T$ ms uzunluğunda olup kendi içinde üç bölgeden oluşmaktadır. Birinci ve üçüncü bölgeler L ms uzunluğundadır ve cihazlar arasındaki mesajlaşma için tahsis edilmiştir. İkinci bölge ise T ms uzunluğunda olup öbek içi mesajlaşma ve EPC bağlantısının gerçekleştiği süreyi tanımlamaktadır ve kullanıcı sayısından bağımsız biçimde sabittir. İYK’ler öbek içi mesajlaşmaya ihtiyaç duymayıp yalnızca Bİ ile hücrel şebeke üzerinden haberleşeceği için ikinci bölgede tahsis edilen



Şekil 5.6: Periyodik TB tahsisi.

KB'lerin öbek içi mesajlaşma için yeterli olacağı varsayılmakta olup çalışma kapsamında incelenmemiştir. TB'nin 1. ve 3. Bölgelerinde spektrum ve kanal tahsisi kullanıcı bazlı değildir ve genele yapılmaktadır. Spektrum kaynakları ise yarı sabit olarak tahsis edilmiştir ve kaynak yönetimi eNodeB aracılığıyla EPC tarafından sağlanmaktadır. Kullanıcıların bilgilendirilmesi ise LTE'ye benzer bir biçimde Sistem Bilgi Bloğu (İng. System Information Block - SIB 18-19-20) üzerinden yapılmaktadır [124].



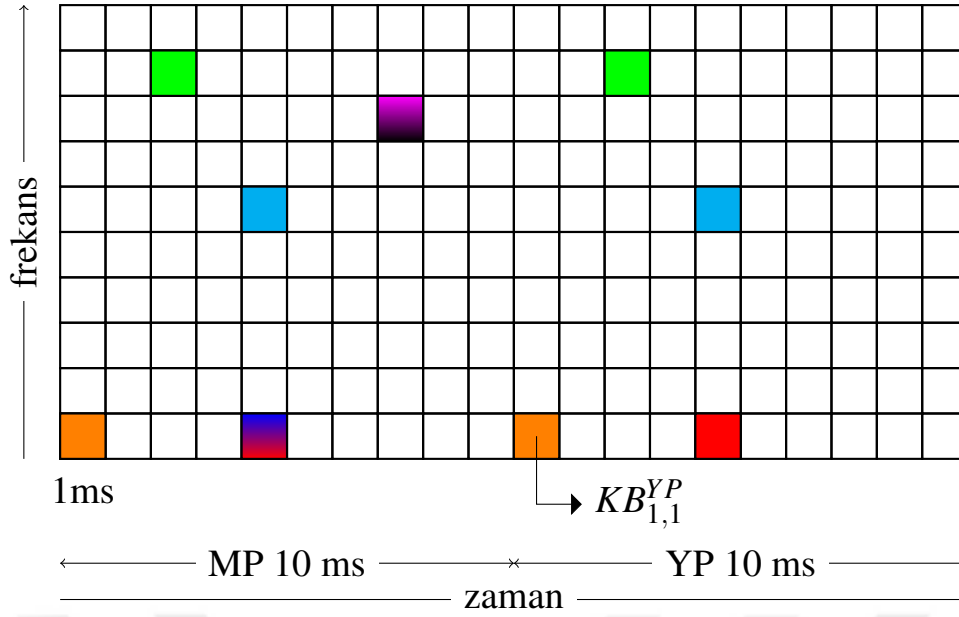
Şekil 5.7: TB yapısı

Keşif ve duyuru prosedürleri yarı çift yönlü (İng. half duplex) yapıdadır. Bu yaklaşımdan ötürü, Şekil 5.7'de belirtildiği üzere her TB için 1. ve 3. Bölge kendi içinde, Mesaj Periyodu (MP) ve Yanıt Periyodu (YP) olmak üzere eşit sürelerle kullanılmaktadır. Ağ modelinde kullanıcıların tamamının kapsama alanında olduğu varsayılmaktadır. Bu da, senkronizasyonun şebeke yardımıyla sağlanmasına ve zaman bölmeli bir çoklamaya imkân sağlamaktadır.

MP ve YP 1 ms'lik zaman dilimleri (ZD)¹ (İng. slot) halinde kullanılmakta olup her dilim 25 adet kaynak bloğu (KB) (İng. resource block) içermektedir. Kullanıcıların keşif mesajı (KM), ÖB'lerin ve İYK'lerin ise duyuru mesajı (DM) iletimi için her dilimde 10 tane KB'nin tahsis edildiği diğer kanalların ise kontrol kanalı olarak kullanıldığı varsayılmaktadır. LTE'deki yapıya benzer bir biçimde KB'ler 180 KHz bant genişliğinde olup her biri 15KHz olan 12 tane alt taşıyıcı (İng. subcarrier) içermektedir.

Kullanıcılar TB (MP) boyunca seçtikleri ZD ve KB üzerinden iletim yaparken ÖB'ler ve İYK'lar bütün KB'leri dinlerler ve iletim yapmazlar. ÖB'ler ve İYK'lar iletim yaparken de kullanıcılar dinleme yaparlar. KB'lere, MP içinde seçilen bir ZD'de kullanıcılar tarafından rastgele erişim sağlanmaktadır. Bu yaklaşım LTE Teknik Dokümanları'nda Tip-1 olarak tanımlanmıştır [124]. Böylelikle Bİ'nin kullanıcı odaklı kaynak tahsis etmesine gerek duyulmadığı için sadelik sağlanmaktadır.

¹Bu bölümde ele alınan modelde ZD'nin tanımı Kısım 4.7'dekinden farklıdır.



Şekil 5.8: TB 1. bölgenin yapısı. (L=20 ms)

Bir kullanıcının MP'de, i 'inci ZD'de, j 'inci KB'yi seçtiği $KB_{i,j}^{MP}$ şeklinde ifade edilmektedir. TB'nin uzunluğunu arttıkça tahsis edilen KB sayısı da artmaktadır. Fakat kullanıcıların yaşadıkları gecikme TB ile doğru orantılı olduğundan dolayı bir ödünleşim söz konusudur.

İletim yapılacak KB'nin birden fazla kullanıcı tarafından (İYK ve ÖB de olabilir.) seçilmesi durumunda alıcıda girişim meydana gelmektedir. Alıcıdaki SGGO'nun belirlenen eşik değerini (ψ_0) sağlayamaması halinde mesaj iletimi başarısız olmaktadır. Eşik değeri belirlenirken modülasyon ve kod oranı belirleyicidir [125]. SGGO kısıtının sağlanamaması durumunda, KTCCH için ilk keşif mesajı, DTCCH için ise ilk duyuru mesajının iletimi başarısız olacağı için içinde bulunulan TB'de bahse konu kullanıcı CCH bağlantılar üzerinden içerik temin edemeyecek, ÖB ve İYK'lar ise içerik sağlayarak yük boşaltmaya katkıda bulunamayacaktır.

CCH bağlantılarında yol kaybı için Winner II B1 Görüş Hattı (İng. Line of Sight, LOS) modeli kullanılmıştır [126]. Bu model, 3GPP tarafından hazırlanan teknik raporlarda LTE Direkt teknolojisinde, kullanıcıların tamamının açık alanda bulunduğu senaryolarda kullanılmaktadır [124].

$$PL_{YK,K} = 40 \log_{10}(d_{YK,K}) + 9.45 - 17.3 \log_{10}(h_{YK}) - 17.3 \log_{10}(h_K) + 2.7 \log_{10}(f_m/5) \quad (5.5)$$

İlk mesajın (DM veya KM) MP içinde başarılı bir biçimde alınmasına müteakip yanıt mesajları YP'de karşılık gelen ZD ve KB üzerinden iletilmektedir. Böylelikle rastgeleliğin ortadan kalkması ile başarılı bir şekilde iletilen keşif/duyuru mesajlarına verilen yanıtların iletilmemesi ihtimali de ortadan kalkmaktadır. Şekil 5.8'da bir kullanıcıya ait TB şablonu sunulmuştur. Şablonun ilk yarısında (MP) gönderilen mesajlar, ikinci yarısında (YP) bu mesajlara gönderilen yanıtlar gösterilmektedir.

- Turuncu renkle ifade edilen, $KB_{1,1}^{MP}$ den iletilen mesajın yanıtı $KB_{1,1}^{YP}$ 'den verilmiştir. Aynı biçimde yeşil ve mavi renkli mesajlarda aynı KB'nin başka bir kullanıcı tarafından seçilmemesinden ötürü başarılı bir şekilde iletilebilmiş ve yanıtlanmıştır.
- $KB_{5,1}^{MP}$ iki farklı kullanıcı tarafından seçildiği için çift renkli gösterilmiştir. $KB_{5,1}^{YP}$ üzerinden verilen yanıt tek renkli olması SGGO eşik değerinin kırmızı renkli kullanıcı tarafından sağlandığını göstermektedir.
- $KB_{8,8}^{MP}$ 'de iki kullanıcı tarafından iletim yapılmak istenmiştir. Alıcıda SGGO eşik değeri sağlanamadığı için $KB_{8,8}^{YP}$ 'den yanıt mesajı gönderilmemiştir.

KM ve DM iletimi için OFDMA tekniğinin kullanılması ile her KB'de yer alan 12 alt kanalın farklı kullanıcılar tarafından kullanılarak keşif için tahsis edilen kaynak sayısının artırılması teorik olarak uygulanabilir bir yaklaşımdır. Fakat ağ modelinde çıkış gücü kontrolü bulunmamaktadır ve bütün cihazlar LTE Direkt teknolojisinde olduğu gibi sabit güçte iletim yapmaktadır (23 dBm, 200 mW) [127]. Bu yaklaşım güç yönetimi açısından sadelik sağlamaktadır fakat OFDMA tekniği kullanılması durumunda farklı kullanıcıların erişim sağlayacağı alt kanallar arasında yüksek Tepe-Ortalama Güç Oranı'na (TOGO) (İng. Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)) neden olmaktadır. Bu da, OFDMA tekniğinin kullanımına imkân vermemektedir. Bu yüzden keşif ve duyuru prosedürlerinde MP'de Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (TT-FBÇE) (İng. Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) tekniği ile kullanılmaktadır.

$$TOGO_{dB} = 10 \log_{10} \frac{|g_{tepe}|^2}{g_{kok}^2} \quad (5.6)$$

KTCCH için bir kullanıcı tarafından gönderilen KM'nin birden fazla ÖB ve İYK tarafından alınması olasıdır. Aynı şekilde DTCCH'de bir ÖB veya İYK tarafından gönderilen DM'nin de birden fazla kullanıcı tarafından alınması da ihtimal dahilindedir. Bu durumlarda, yanıt mesajı gönderilirken çakışma yaşanmaması adına YP'de genelliği kaybetmeden Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (DFBÇE) (İng. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) tekniğinin kullanıldığı varsayılabilir [128]. Keşif tabanlı prosedürde bir KB'de bütün alt taşıyıcılarda iletim birbirlerine yakın ÖB veya İYK'ler tarafından, duyuru prosedüründe ise birbirlerine yakın kullanıcılar tarafından yapılacağı için yukarıda bahsedilen yüksek TOGO yaşanmayacaktır.

5.6 Duyuru Tabanlı CCH Prosedürü - DTCCH

DTCCH Prosedürü ile ÖB'ler ve İYK'ler tarafından önbelleklenen içeriklerin duyurusunun yapılması, kullanıcılardan talep gelmesi halinde içeriklerin kurulan CC bağlantılar üzerinden iletilmesi ve bu sayede yük boşaltma sağlanması amaçlanmaktadır.

İlk olarak, ÖB'nin öbek ve önbelleklenen içeriklerin bilgisini içeren Duyuru Mesajları (DM) sınırlı süreli tahsis edilen Mesaj Periyodu (MP) süresince rastgele seçilen bir ZD'de, rastgele seçilen bir Kaynak Bloğu (KB) üzerinden gönderilir. MP süresince iletim yapılan kanallar kullanıcılar tarafından zaman bölmeli şekilde taranarak dinlenilmektedir.

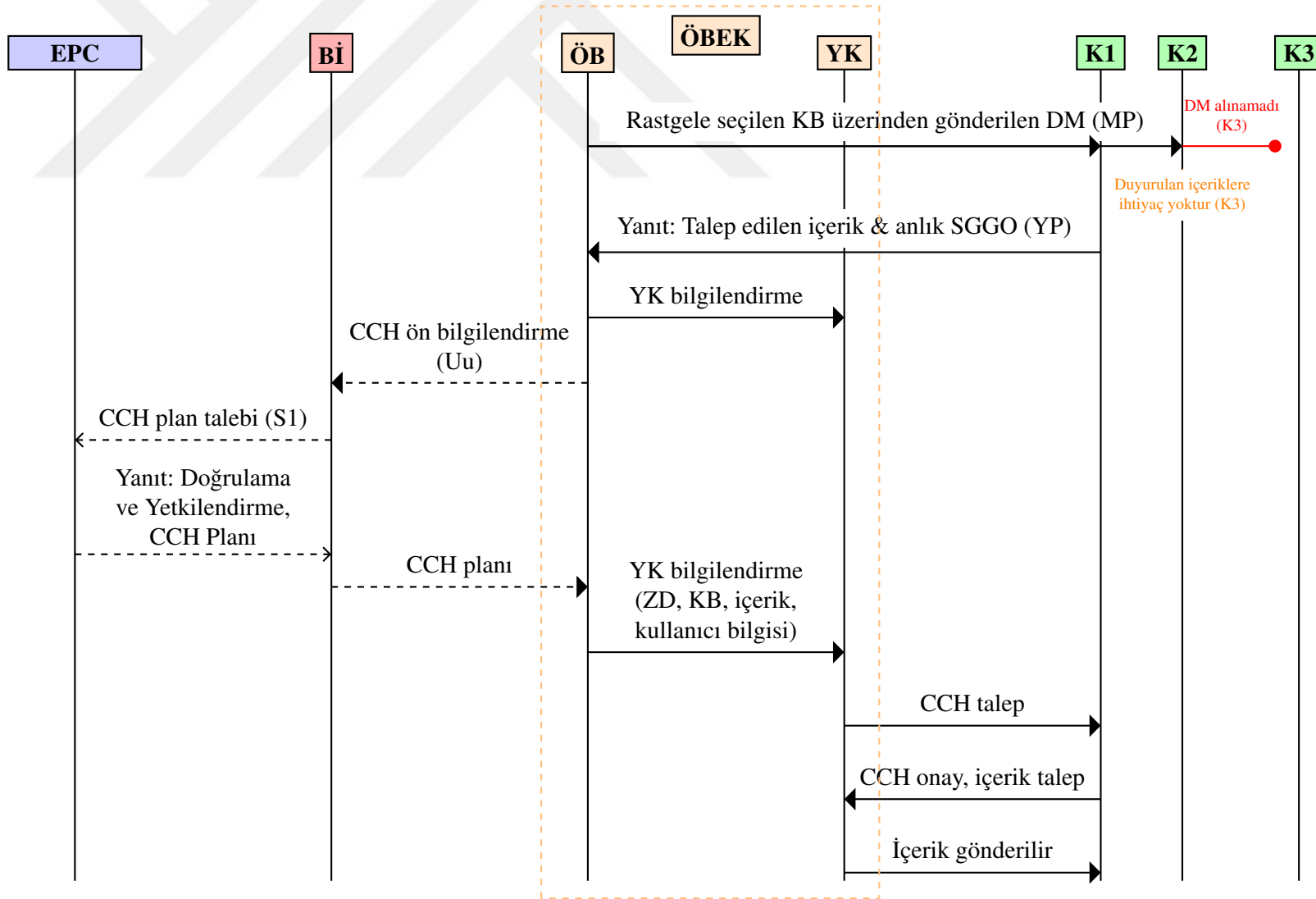
DM'yi alan kullanıcılar ihtiyaç duydukları içeriklerin sağlandığı bir öbek veya İYK olması halinde YP'de karşılık gelen ZD ve KB'de yanıt mesajı gönderirler. Bir kullanıcı birden fazla DM alması halinde, ölçülen SGGO değeri ve içeriğin önceliğine göre yalnızca bir tane DM için yanıt mesajı gönderebilmektedir. Sağlanan içerik bilgisinin DM'de yer almasından ötürü Bİ'nin veya EPC'nin kullanıcı veya öbek bazlı önbelleklenen içerik bilgisinden haberdar olmasına gerek yoktur. Yanıt mesajı da yalnızca içeriğe ihtiyacı olan kullanıcılar tarafından gönderildiği için sinyalleşme bakımından sadelik sağlanmaktadır.

Ardından ÖB talep edilen içeriği önbelleğinde tutan YK'yi bilgilendirir. Bu bilgilendirme konum güncellemesi yapması içindir. Bahse konu içerik ÖB tarafından sağlanacaksa bilgilendirmeye gerek yoktur. Ardından ÖB CCH planlama sürecini başlatır ve kurulması muhtemel CC bağlantı hakkında Bİ'ye ön bilgilendirme yapar. Bu bilgilendirmede cihaz bilgilerini de içermektedir.

Daha sonra Bİ, S1 arayüzü üzerinden EPC'ye CCH plan talebinde bulunur. EPC 5.21'de gösterildiği üzere bünyesinde bulunan sunucular ile doğrulama, yetkilendirme ve CCH planlamasını yönetir ve Bİ'ye iletir. EPC, tüm kullanıcıların koordinat düzlemindeki konumlarını bildiği için DM yanıtında iletilen anlık SGGO bilgisi de planlama yapılırken kullanılmaktadır. CCH planı; İletim Bölgesi (İB) için KB ve ZD bilgisi, iletilecek içerik ve iletilecek kullanıcı bilgisini içermektedir. Sonrasında öbek içi bilgilendirme yapılır ve kullanıcı ve ilgili YK arasında CCH bağlantı kurulur.

Aynı KB'de gönderilen DM'ler kullanıcılarda girişime neden olur. Bu durumda, anlık SGGO değeri belirlenen eşik değerinin (ψ_0) altında kalmış olursa DM kullanıcı tarafından alınamaz ve CC bağlantı kurulamaz. Şekil 5.9'da sunulan akış diyagramında da gösterildiği üzere ÖB tarafından gönderilen DM; K1 tarafından alınmış ve yanıtlanmıştır, K2 tarafından alınmış fakat sunulan içeriklere ihtiyaç duyulmadığı için yanıtlanmamıştır, K3 tarafından ise sönmülemeden veya SGGO eşik değerinin sağlanamamasından dolayı alınmamıştır.

YK'lar birbirleriyle CCH bağlantı kurabilecek durumda olsa da hizmet verdikleri kullanıcılar tamamen aynı değildir. Bu yüzden, çalışmanın bu kısmında sadelik sağlanması amacıyla, model ağda bir kullanıcının DM'yi alması halinde ÖB'nin yer aldığı öbekteki bütün içeriklere erişebildiği varsayılmaktadır.



Şekil 5.9: Duyuru Tabanlı CCH Prosedürü.

5.7 Keşif Tabanlı CCH Prosedürü - KTCCH

KTCCH Prosedürü önbellek sorgusu temelinde çalışmaktadır. Kullanıcıların talep ettikleri içeriklerin hangi öbekler veya İYK'ler tarafından sağlanabileceğini öğrenmek için yürüttükleri keşif sürecinin işletilmesidir.

Kullanıcılar ihtiyaç duydukları içeriklere ilişkin taleplerini MP içinde rastgele seçilen bir ZD'de, rastgele seçilen KB üzerinden Keşif Mesajları (KM) ile iletmektedir. Bu mesajlar, MP boyunca kanalı zaman bölmeli biçimde dinleyen ÖB'ler ve İYK'ler tarafından alınabilir. Mesajı alan ve talep edilen içeriği önbelleğinde tutmakta olan İYK'ler veya ÖB'ler bu mesajı yanıtlar. Ardından keşif mesajını alan ÖB öbek içinde içeriği sağlayacak olan YK'ye ve Bİ'ye ön bilgilendirme yapar. keşif mesajında talep edilen içerik öbek içinde herhangi bir YK tarafından önbelleklenmemişse yanıt verilmez. İlgili YK'nin bu aşamada bilgilendirilmesi hücrel şebeke üzerinden konum güncellemesi yapmasını sağlamaktır. Ardından ÖB CCH planlama sürecini başlatır ve kurulması muhtemel CC bağlantı hakkında Bİ'ye ön bilgilendirme yapar. Bu kısım DTCCH ile aynıdır. EPC'den gelen CCH planı; İletim Bölgesi (İB) için KB ve ZD bilgisi, iletilecek içerik ve iletilecek kullanıcı bilgisini içermektedir.

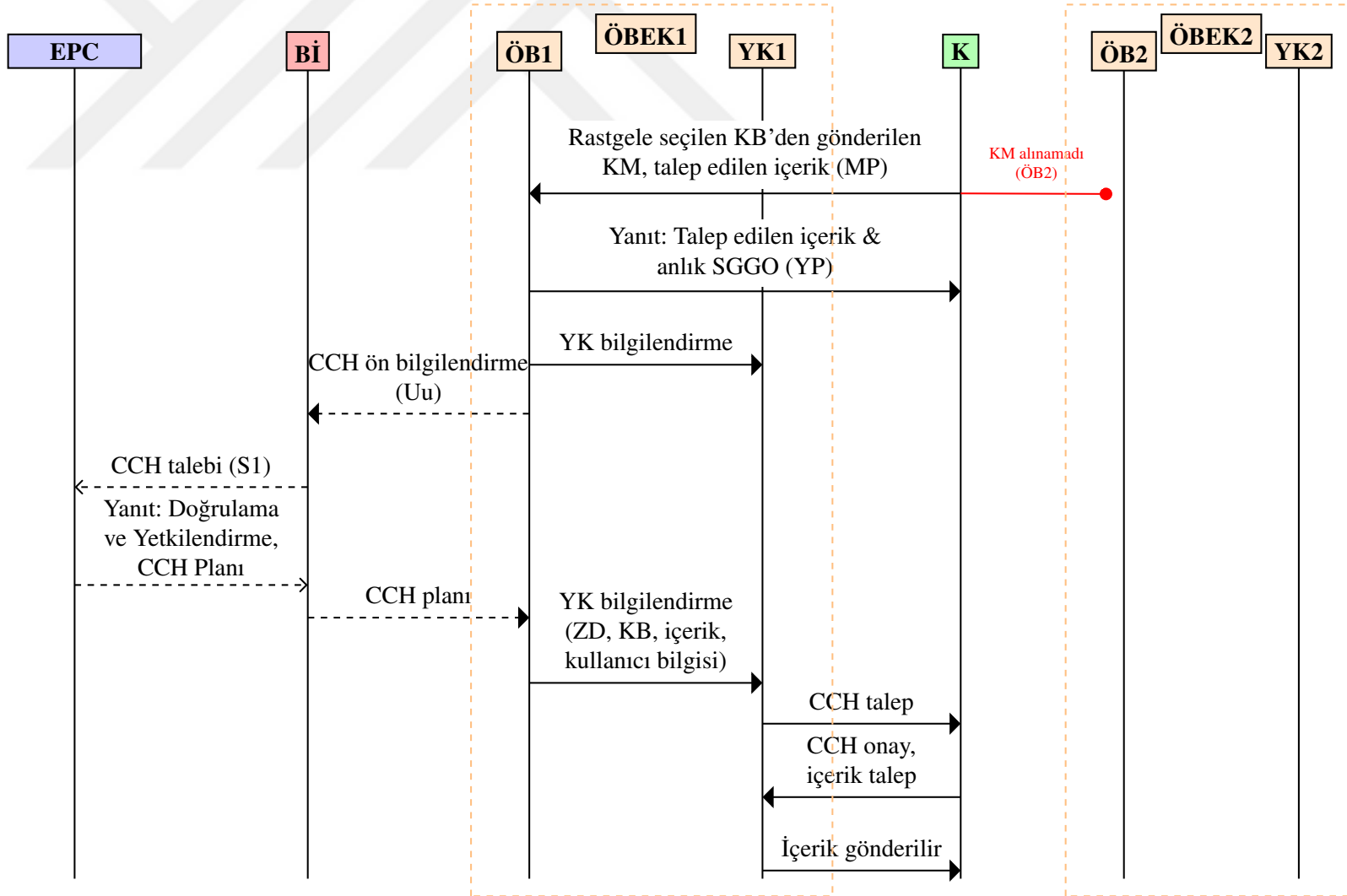
Aynı KB'yi seçen kullanıcılar ÖB'ler ve İYK'lerde girişime neden olurlar ve DTCCH prosedüründe de belirtilen SGGO kısıtı sağlanamadığı takdirde CCH bağlantı kuramazlar. Şekil 5.10'de sunulan akış diyagramında gösterildiği üzere ÖB2 yol kaybı veya girişim kısıtından ötürü iletilen KM'yi alamamıştır. Kullanıcıların bizzat ihtiyaç duydukları içerikleri talep etmelerinden dolayı DTCCH'ye kıyasla daha amaca yöneliktir. Fakat model ağda kullanıcı sayısı YK sayısından çok daha fazla olması çakışma kaynaklı başarısızlık ihtimali yüksektir. Şekil 5.9 ve 5.10'de gösterilen iki prosedür için de düz çizgiler CCH'yi, kesikli çizgiler ve kalın oklar hücrel haberleşmeyi, kesikli çizgiler ile ince oklar ise kontrol düzlemini (İng. control plane) ifade etmektedir. Bİ ile EPC arasındaki bağlantı LTE mimarisindeki S1 arayüzüne benzerdir.

Sunulan iki prosedürün eşgüdümlü biçimde kullanılması ağ etkinliği açısından önem arz etmektedir. Böylelikle kullanıcı bir içeriği edinmek istediğinde öncelikle sunulan içerikleri kontrol eder, erişim sağlayamaması halinde keşfetme yoluna gider. İki yaklaşım da olumsuz sonuçlanırsa içeriğin hücrel şebeke üzerinde karşılanması yolu izlenir.

Önerilen prosedürleri kıyaslamak için Çizelge 5.1'de yer alan 4 farklı denektaşı yaklaşım ele alınmıştır. İlk defa uygulanacak olan DTCCH-DT ve KTCCH-DT'de önerilen prosedürler öncesinde öbekleme yapılmamaktadır ve tüm YK'ler İYK gibi davranarak içerik sağlamaktadır. Önbellekleme ise EPÖ yaklaşımı ile yapılmaktadır.

Çizelge 5.1: Kıyaslanan yöntemlerin kapsamaları.

	DTCCH	DTCCH-DT	KTCCH	KTCCH-DT	MTÖA+HÖA	EPÖ
Öbekleme	✓	×	✓	×	✓	×
Önbellekleme	✓	×	✓	×	✓	×
Duyuru Prosedürü	✓	✓	×	×	×	×
Keşif Prosedürü	×	×	✓	✓	×	×



Şekil 5.10: Keşif Tabanlı CCH Prosedürü.

Çizelge 5.2: DTCCCH & KTCCH için benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Kullanıcı sayısı (K)	[100, 250, 400 , 550, 700]
Yardımcı kullanıcı sayısı (YK)	[30, 45, 60 , 75, 90]
MP süresi (D_{MP})	[1, 2 , 3, 4, 5, 10, 15]ms
Zipf parametresi (α)	0.6
SGGO eşik değeri (ψ_0)	[-10, -5, 0 , 5, 10, 15, 20] dB
İletim gücü (P_i)	200 mW, 23 dBm
İçerik sayısı (C)	20
Önbellek kapasitesi (C_c)	4 birim
İçerik boyutu (s_c)	1 birim
Benzetim süresi	100× periyot
Periyot süresi	2 sn
Alanın yarıçapı (R_{alan})	250 m
Hareket modeli	RYHM
Bütün kullanıcılar için azami hız (S_{maks})	3 m/s
Kullanıcıların yüksekliği (h_{YK}, h_K)	1.2 m
Çalışma frekansı (f_m)	2 GHz

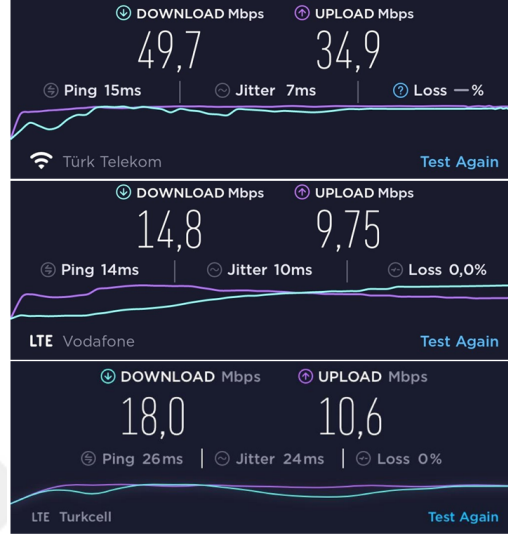
5.8 Benzetimler ve Sonuçlar

Bu kısımda, DTCCCH ve KTCCH Prosedürleri'nin başarımlarını değerlendirmeleri sunulmuştur. Ortalama yük boşaltma ve birim yük boşaltma için gerekli mesaj sayısı temel başarımların kriterleri olarak ele alınmış olup değişken YK sayısı, kullanıcı sayısı, SGGO eşik değeri ve MB süresine göre elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Benzetimler Çizelge 5.2'de yer alan değerlere göre yapılmış olup şekillerdeki her nokta rastgele bir topolojide 100 periyot (ÖÖB+TB+İB) uzunlukta zaman için hesaplanan değerlerin ortalamasına karşılık gelmektedir. Değişkenlerin tipik değerleri $K = 400$, $YK = 60$, $\psi_0 = 0$ dB, $MP = 2$ ms olarak kabul edilmiştir.

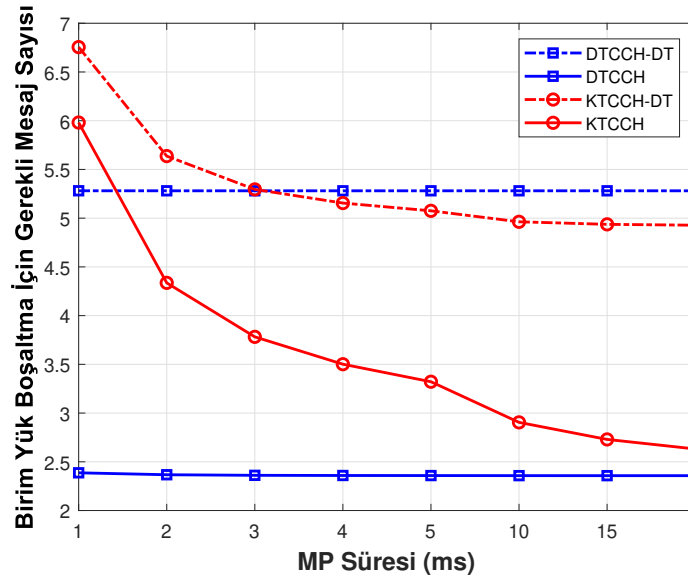
Şekil 5.12 değişken MP süresine göre birim yük boşaltma için gerekli mesaj sayısını göstermektedir. Tahsis edilen MP uzadıkça erişilebilen KB sayısı artmakta, çakışmalardan kaynaklı iletilmeyen mesajların sayısı azalmaktadır. Böylelikle özellikle KTCCH için mesaj sayısında bariz düşüş görülmektedir. DTCCCH için ihtiyaç duyulan kanal sayısı KTCCH'ye kıyasla daha azdır. Bu yüzden 1 ms'lik MP ile sağlanan KB sayısı bile yeterli olduğu için MP'deki artış karşısında değişmemiştir. Bunun nedeni YK sayısının kullanıcı sayısından oldukça az olması ve duyuru mesajlarının bütün YK 'ler yerine yalnızca ÖB ve İYK'ler tarafından gönderilmesidir. KTCCH'de ise bütün kullanıcılar bireysel olarak keşif mesajı göndermektedir. DTCCCH için mesajlaşma yükü DTCCCH-DT'ye kıyasla daha azdır. Bu da gönderilen duyuru mesajı sayısının daha az olması ve sağlanan yük boşaltmasının daha fazla olmasından kaynaklıdır.

MP'nin 1 ms uzaması AZ'nin 4 ms uzamasına neden olmaktadır. Diğer bir deyişle, 1 ms uzayan MP'nin sağladığı 10 adet ilave KB CCH'de 4 ms daha fazla gecikme yaratmaktadır. Önemsiz gibi duran bu değerleri kıyaslamak adına Ookla (www.speedtest.net) firmasının mobil uygulaması üzerinden 2021 yılı Mart ayında

Ankara/Çankaya’da yapılan testlerde LTE şebekesindeki indirme-yükleme hızı ve yaşanan gecikme (İng. ping) süresi Şekil 5.11’de verilmiştir. Görüleceği üzere, üç operatör için gecikme miktarları (15 ms, 14 ms, 26 ms) yaklaşık ortalama 18 ms’dir. Buradan yola çıkarak, CCH’nin sağladığı temel faydalarından biri olan düşük gecikmenin sağlanabilmesi için kullanabilecek KB sayısının son derece kısıtlı olduğu görülmektedir.



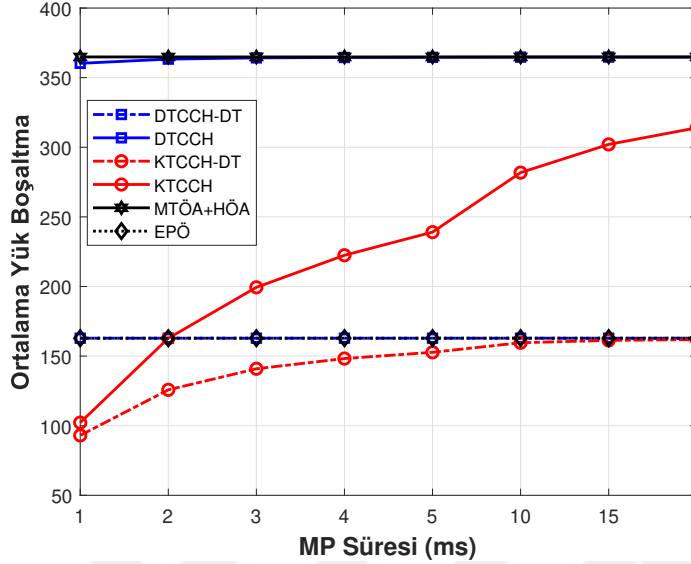
Şekil 5.11: 3 Farklı operatör için Ankara şehir merkezinde LTE hız testi.



Şekil 5.12: Değişken MP süresine göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.

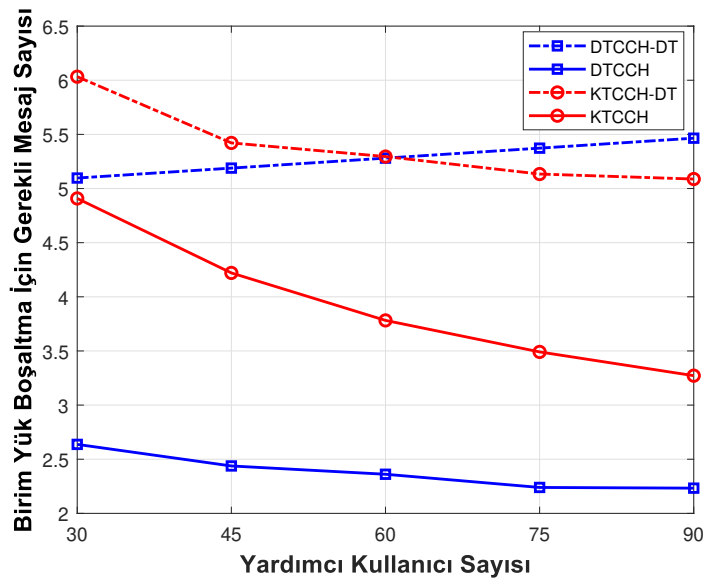
Şekil 5.13 ortalama yük boşaltmayı göstermektedir. Önerilen prosedürlerin çakışma olmadığı durumda MTÖA+HÖA’ya, denektaş (-DT) yaklaşımların ise EPÖ ile sağlanan yük boşaltmaya yakınsaması beklenmektedir. Yakınsama için DTCCH ve DTCCH-DT’de MP’nin 2 ms olması yeterlidir bu da 20 KB’nin gerektiği anlamına gelmektedir. Fakat aynı durum KTCCH ve KTCCH-DT için geçerli değildir.

KTCCH-DT prosedürü için 10 ms uzunluğunda MP gerekli iken KTCCH için 20 ms'lik MP bile yakınsamaktan uzaktır. MP'nin 1ms yerine 20 ms olması, TB'nin $4 + T$ ms yerine $80 + T$ ms olması anlamına gelmektedir ki LTE standartları için aradaki 76 ms'lik fark (gecikme) çok fazladır.

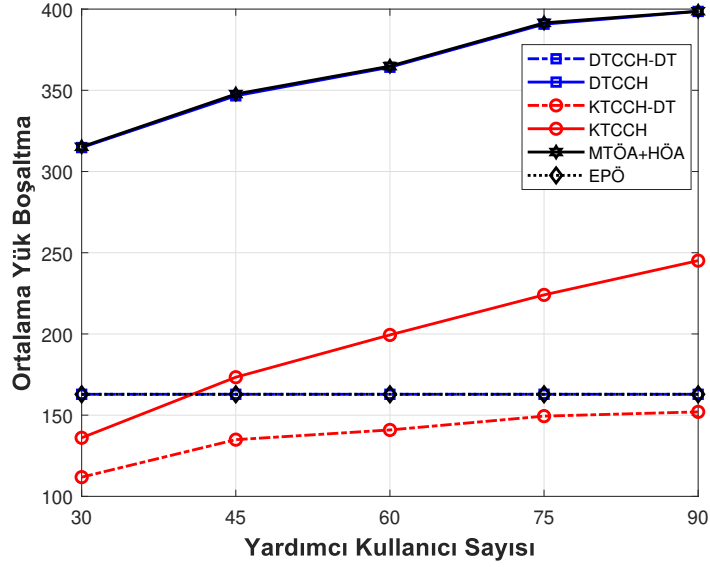


Şekil 5.13: Değişken MP süresine göre ortalama yük boşaltma miktarı

Şekil 5.14 ve 5.15 değişken YK sayısına göre başarımların grafiğidir. YK sayısının üç katına çıkması ile Keşif tabanlı prosedürler ve DTCCH için birim yük boşaltma için gerekli mesaj sayısı azalmıştır. Bunun nedeni artan YK sayısı ile yük boşaltmanın artmasıdır. DTCCH-DT'de bu değer artış göstermiştir. Yük boşaltma sabitken görülen artışın nedeni öbeklemenin uygulanmamasıdır çünkü denektaşı yaklaşımında dahil olan her YK kendi başına DM yayınlar ve mesaj yüküne sebep olur.



Şekil 5.14: Değişken YK sayısına göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.

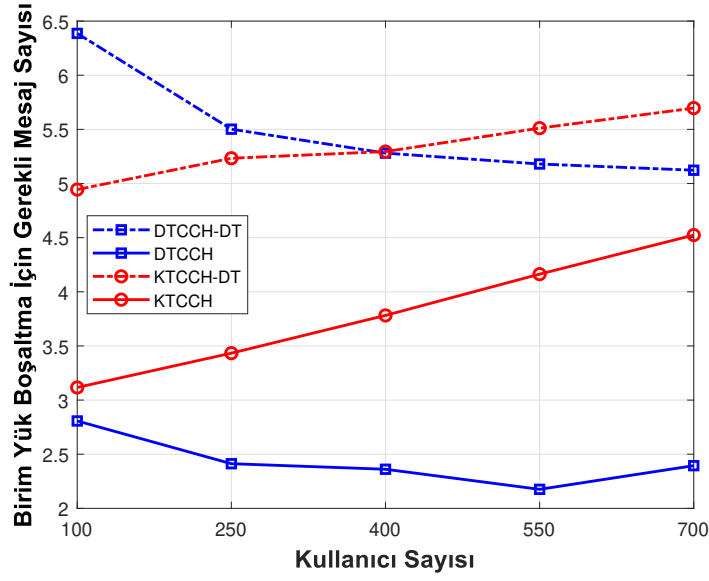


Şekil 5.15: Değişken YK sayısına göre ortalama yük boşaltma miktarı.

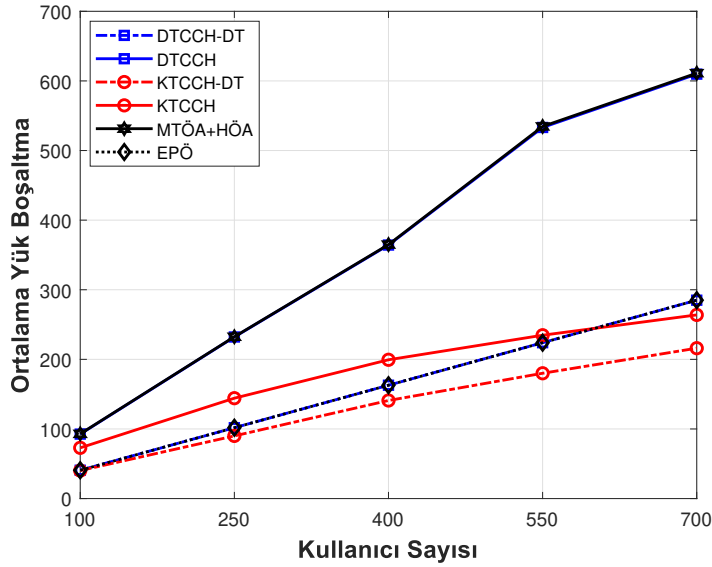
Şekil 5.16 ve 5.17 sırasıyla değişken K sayısına göre başarımlarının grafiğidir. Kullanıcı sayısındaki aşırı artışın (7 kat) etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Duyuru tabanlı yaklaşımlar sağladıkları ortalama yük boşaltma ile MTÖA+HÖA ve EPÖ'ye yakınsamıştır ve kullanıcı sayısındaki artıştan etkilenmemiştir. Hatta yük boşaltmadaki artış gerekli mesaj sayısına kıyasla daha hızlı arttığından dolayı birim yük başına gerekli mesaj sayısında düşüş meydana gelmiştir. Kullanıcı sayısı 100 iken ortalama yük boşaltma bütün prosedürler için 50-100 birim aralığındadır. Kullanıcı sayısı arttıkça sınırlı KB'larına erişim sağlayan kullanıcı sayısı artmıştır bu da çakışmaları ve başarısız iletimleri beraberinde getirmiştir. Öyle ki, kullanıcı sayısının 550'den fazla olduğu durumda keşif mesajlarının iletilmemesinden kaynaklı olarak KTCCH prosedürü EPÖ'den bile daha az yük boşaltma sağlamıştır.

Şekil 5.18 ve 5.19 değişken SGGO eşik değerine göre başarımlarının grafiğidir. Eşik değeri kullanılan modülasyon ve kod oranı ile alakalıdır. Sayısal modülasyonda, modülasyon mertebesi (bit/sembol) arttıkça iletim gürültü ve girişime daha duyarlı hale gelmektedir ve başarılı haberleşme için gerekli eşik değeri yükselmektedir. Modülasyon tipi aynı iken gürültüye karşı gürbüzlük kod oranı artırılarak sağlanmaktadır fakat yüksek kod oranı spektral verimliliği ve veri hızını düşürmektedir [129].

LTE'de Dördümlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DFKA) (İng. Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) kullanıldığında, kod oranı 0.1523 bilgi biti/sembol iken $\psi_0 = -6.936$ dB'dir. 64 Dördümlü Genlik Modülasyonu (64-DGM) (İng. 64 Quadrature Amplitude Modulation, 64-QAM) kullanıldığında, kod oranı 5.5547 bilgi biti/sembol iken ise $\psi_0 = 19.829$ dB'dir [125]. Bu doğrultuda, benzetimler için SGGO eşik değeri minimum -10 dB, maksimum 20 dB olarak belirlenmiştir.

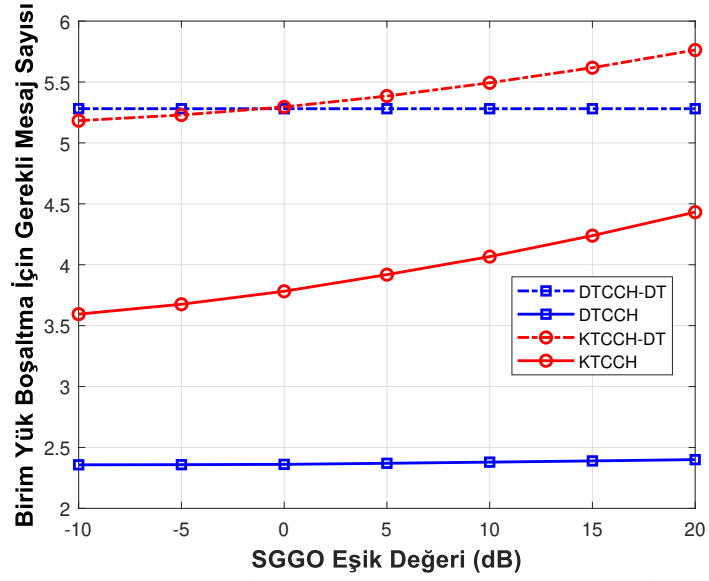


Şekil 5.16: Değişken kullanıcı sayısına göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.

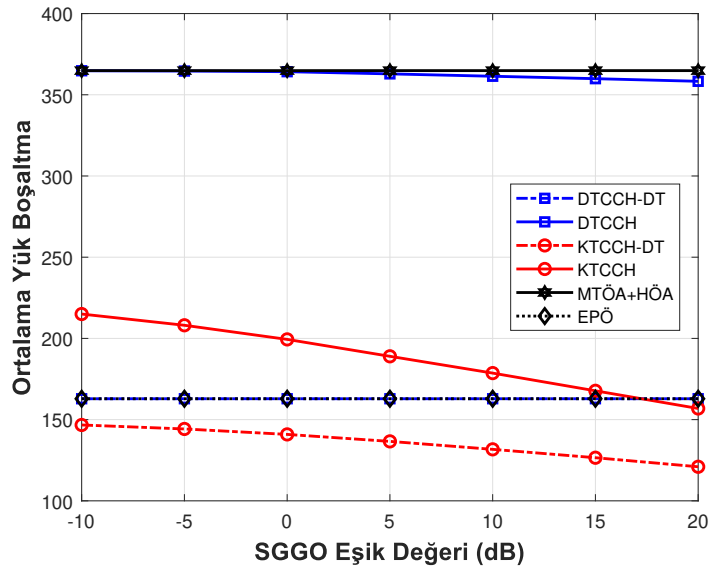


Şekil 5.17: Değişken kullanıcı sayısına göre ortalama yük boşaltma miktarı.

Duyuru tabanlı prosedürler, SGGÖ eşik değeri değişiminden daha az etkilenmektedir. Öyle ki, DTCCH tarafından sağlanan ortalama yük boşaltma $\psi_0 < 10$ dB için MTÖA+HÖA ile neredeyse aynıdır. Keşif tabanlı yaklaşımların başarımları ise artan ψ_0 değeri ile yaklaşık %20 düşüş göstermiştir. Bu da yüksek mertebeli modülasyonlar için duyuru tabanlı yaklaşımların daha uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.18: Değişken SGGO eşik değerine göre birim yük boşaltma için gerekli ortalama mesaj sayısı.



Şekil 5.19: Değişken SGGO eşik değerine göre ortalama yük boşaltma miktarı.

5.9 Değerlendirme

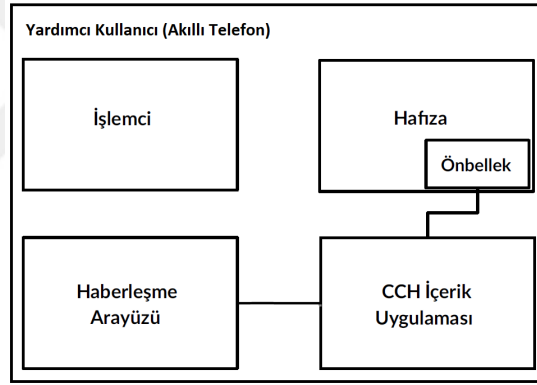
Bu kısımda sunulan Keşif ve Duyuru Prosedürleri, öncelikle önerilmiş ve başarımı gösterilmiş algoritma çifti (MTÖA, HÖA) ile birlikte çalışan tamamlayıcı süreçlerdir. Duyuru tabanlı yaklaşımda öbeklerin ve sunulan içeriklerin reklamı yapılarak kullanıcılardan talep gelmesi ve içerik sağlanması amaçlanmaktadır. Keşif tabanlı yaklaşımda ise kullanıcılar ihtiyaç duydukları içeriklere erişebilmek için proaktif bir yaklaşım sergilemektedir. Bu işlemler, mevcut bantıçi CCH teknolojisinin tek örneği olan LTE Direkt ile benzer kaynak tahsisi ve erişim yöntemleri ile ele alınmıştır. Bu yaklaşım uygulanabilirlik ve geçerlilik açısından önem arz etmektedir.

DTCCH yüksek kullanıcı yoğunluğu, sınırlı KB ve yüksek SGGO gibi zorlayıcı durumlarda dahi KTCCH'ye kıyasla daha az sinyalleşme yükü ve gecikme sunarken yüksek yük boşaltma sağlamıştır. DTCCH ve DTCCH-DT kısa MP süreleri için bile denektaşı yöntemlere yakın yük boşaltma sağlamıştır. KTCCH ve KTCCH-DT için ise denektaşı yöntemlere yakınsama sırasıyla 20 ms'den uzun ve 10 ms'den uzun MP tahsis edilmesi ile mümkündür.

5.10 Modelin Hücresel Şebekeye Uyarlanması

Çalışma kapsamında ele alınan modelde, önbellekleme yapabilen ve yük boşaltmaya doğrudan katkı sağlayan YK'ler ile sıradan kullanıcıların şebekedeki konumu genel olarak benzer olup bazı nüanslar vardır.

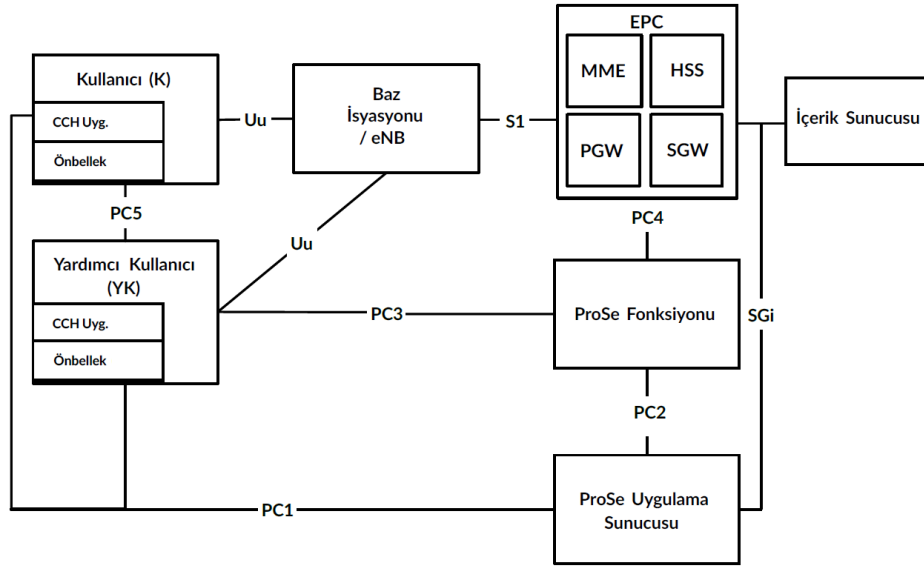
YK cihazının niteliği Şekil 5.20'de gösterilmiştir. CCH İçerik Uygulaması, Haberleşme Arayüzü ve Hafıza üzerinden Önbelleğe erişim sağlayabilmektedir. Bu sayede hem içeriklerin önbelleklenmesi hem de iletilmesi işlevini yürütmektedir. Ayrıca keşif ve duyuru işlemlerinde kullanıcı tercihleri de CCH İçerik Uygulaması üzerinden yönetilmektedir.



Şekil 5.20: YK cihazının yapısı.

Şekil 5.21'de ise kullanıcıların şebeke mimarisindeki konumu gösterilmektedir. Bütün kullanıcıların Bİ ile olan iletişimi (içerik iletimi de dâhil) **Uu** arayüzü üzerinden gerçekleşmekte olup tamamının **PC1** arayüzü ile ProSe uygulama sunucusuna erişimi vardır. Bu sayede CCH için şebekeye kayıt olma ve yetkilendirme işlemleri yapılabilmektedir. **PC5** arayüzü ise yan hat (İng. sidelink) CCH bağlantıyı belirtmekte olup hem sinyalleşme (Keşif ve Duyuru amaçlı) hem de veri iletimi (İçerik sağlanması) amacıyla kullanılmaktadır. YK'lerin standart kullanıcılardan farklı olarak **PC3** arayüzü üzerinden ProSe fonksiyonuna erişimi vardır. Önerilen modellerde öbelleme ve önbellekleme merkezi şekilde sağlandığından gerekli bilgilendirmenin (içerik popülerliği, CCH planlaması vb.) bu arayüz üzerinden gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Bütün YK'lerin potansiyel ÖB olmasından ötürü **PC3** arayüzü bütün YK'ler tarafından erişilebilirdir.

EPC; Hareketlilik Yönetim Birimi (MME), Yerleşik Abone Sunucusu (HSS), Paket Şebeke Ağ Geçidi (PGW) ve Servis Ağ Geçidi (SGW)'ni kapsamaktadır. MME'nin CCH'deki ana rolü HSS sorgularını yönetmesidir. HSS ise kullanıcıların CCH için



Şekil 5.21: CCH kullanıcılarının şebeke mimarisindeki konumu.

doğrulama ve yetkilendirme işlemlerinden sorumludur. SGW ve PGW ise sırasıyla kullanıcı veri paketlerinin iletilmesi ve el değiştirme (İng. handover) işlemlerini yönetmektedir.

6. SONUÇLAR ÖNERİLER

Kısım 1.2’de, CCH’de önbellekleme problemi tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, yanıt aranan sorular çalışma kapsamında incelenmiştir.

Matematiksel Programlama ile modellenen problemlerin en iyi çözümü GAMS yazılımı üzerinden CPLEX çözücüsü kullanılarak sağlanmıştır.

- En iyi çözüm farklı boyutlarda model ağlar ve değişken parametreler için hesaplandığında merkezi bir yaklaşım olduğu için özellikle kullanıcı sayısındaki artıştan olumsuz etkilendiği ve çözümün süresinin uzadığı, bu nedenle ölçeklenebilir olmadığı,
- HF yaklaşım için ise gecikmenin kullanıcı sayısı az olduğu durumlarda dahi çok daha uzun olduğu,
- Her ZD’de tekrarlı bir şekilde optimizasyon problemi çözmenin uygulanabilir olmadığı,
- En iyi çözümün anlık topoloji değişince temel önbellekleme yaklaşımlarından dahi kötü başarımlar sağladığı, yani kullanıcı hareketlerine göre hassas olduğu, yapılan benzetimler ile gösterilmiştir.

Modellere farklı Kısımlarda; Düzgün, Rastgele, Açgözlü, Popülarite Tabanlı, En Popüler ve Tek Kopya önbellekleme yaklaşımları uygulanmıştır. Sağlanan başarımlar ilgili kısımlarda sunulmuş ve yeterli olmadığı değerlendirilmiştir.

Önbellek yönetimi için literatürde kullanılan algoritmalarından, Stackelberg Oyunu ve Stokastik Öğrenme Algoritması modele uygulanmıştır. Lider-Takipçi oyunu yaklaşımında sağlanan başarımlar yeterli ölçüdeyken uzun yakınsama süresi (döngü sayısı) daha basit yöntemlerin uygulanması gerektiğini göstermiştir. Öğrenme Algoritması’nda ise elde edilen sonuçlar da başarılıdır fakat YK’lerin kullanıcılardan gelen talepleri beklemesi ve buna göre önbellekleme yapması gecikmeye sebep olmaktadır.

Bu sonuçlar, problem odaklı sezgisel yöntemlerin uygulanmasını gerekliliğini işaret etmiştir. Bu doğrultuda;

- Kısım 4.5’te kullanıcıların arasında işbirliği sağlayan 2’li ve 3’lü öbelleme yaklaşımları,
- Kısım 4.6’da öbelleme kazancının artırılması amacıyla katılımcı kısıtı olmayan "Mesafe Tabanlı Öbelleme Algoritması" ve içerik çeşitliliği sağlayan "Hiyerarşik Önbellekleme Algoritması",

- Kısım 4.7’de alternatif öbikleme algoritmaları ve kullanıcıların hareketli olduğu bir model,
- Kısım 4.8’de ise hareket farkında çözüm önerilmiştir.

Önerilen algoritmalar merkezi olarak uygulanmaktadır ayrıca Bİ tarafından sağlanan girdilere ihtiyaç duymaktadır. Fakat dağıtık olarak uygulanabilecek yapıdadır ve elde edilen sonuçlara göre ölçeklenebilir çözümlerdir.

Kullanıcı ve içerik keşfi konusu da ele alınmıştır. Keşfin otonom, iletimin ise merkezi planlandığı hibrit prosedürler olan "Duyuru Tabanlı CCH" ve "Keşif Tabanlı CCH" önerilmiş, uygulanmıştır ve ana hatlarıyla LTE şebekesine uyarlanmıştır.

Çalışmalar kapsamında, içerik popülerliğinin zamanla değişmediği, Bİ tarafından bilindiği ve ÖB’lere sağlandığı varsayılmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu bilginin, YK’ler tarafından da ölçülebilir hale getirilmesi planlanmaktadır. Bunun için, gelen içerik taleplerinin istatistiğinin YK’ler tarafından belirli aralıklarla ÖB’ye iletilmesi servis sağlanan bölgedeki kullanıcıların tercihleri hakkında bilgi sahibi olmak için yeterlidir. Kullanıcı tercihlerinin de coğrafi ve sosyal olarak değişken olabileceğinden dolayı merkezi bir yaklaşıma kıyasla daha pratik ve avantajlıdır. Böylelikle önbelleklenecek içerikler de daha verimli bir şekilde belirlenebilir. Kısım 4.5’te önerilen stokastik öğrenme yaklaşımı bu konuda fikir edinilmesini sağlamıştır. Ayrıca kullanıcıların tercihlerinin zamanla değişkenlik gösterdiği bir model de öbikleme problemini çözmek gelecek planlar arasındadır.

Önerilen KTCCH ve DTCCCH prosedürlerinin uygulanabilir olması adına özellikle kaynak tahsisi ve erişim modelinde LTE Direkt çerçevesine sadık kalınmıştır. 5G yakınlık servislerine ilişkin teknik raporlar ve tarif dokümanları henüz 3GPP tarafından erişime açılmamıştır. Bu doğrultuda, ilgili prosedürlerin yayınlanmasına müteakip keşif ve duyuru prosedürlerinin 5G teknolojisine uyumlu hale getirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] R. Möller. Ericsson Mobility Report, 2021. [Online].
- [2] Giv 2025 unfolding the industry blueprint of an intelligent world. Huawei Technologies Co., Ltd., 2018. [Online].
- [3] Cisco annual internet report. Cisco Systems, Inc., 2018. [Online].
- [4] F. Jameel, Z. Hamid, F. Jabeen, S. Zeadally, and M. A. Javed. A survey of device-to-device communications: Research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(3):2133–2168, 2018.
- [5] L. Song, D. Niyato, Z. Han, and E. Hossain. *Basics of D2D communications*, page 3–16. Cambridge University Press, 2015.
- [6] Ian F Akyildiz, Shuai Nie, Shih-Chun Lin, and Manoj Chandrasekaran. 5g roadmap: 10 key enabling technologies. *Computer Networks*, 106:17–48, 2016.
- [7] IPRAN O&M. Application of d2d in 5g networks. *ZTE White Paper*.
- [8] E. Bastug, M. Bennis, and M. Debbah. Living on the edge: The role of proactive caching in 5g wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(8):82–89, Aug 2014.
- [9] P. Sermpezis and T. Spyropoulos. Offloading on the edge: Performance and cost analysis of local data storage and offloading in hetnets. In *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pages 49–56, Feb 2017.
- [10] H. Hussein, H. Elsayed, and S. Abd El-Kader. Intensive benchmarking of d2d communication over 5g cellular networks: prototype, integrated features, challenges, and main applications. *Wireless Networks*, 26, 07 2020.
- [11] D. Wu, L. Zhou, Y. Cai, and Y. Qian. Collaborative caching and matching for d2d content sharing. *IEEE Wireless Communications*, 25(3):43–49, 2018.
- [12] Arash Asadi, Vincenzo Mancuso, and Peter Jacko. Floating band d2d: Exploring and exploiting the potentials of adaptive d2d-enabled networks. 07 2015.
- [13] Silicon Labs. Wi-Fi Direct Specification. Technical Specification (TS) Final, Wi-Fi Alliance, 10 2020. Version 1.8.
- [14] WiFi Alliance. Wi-Fi Direct Specification. Technical Specification (TS) Final, Wi-Fi Alliance, 10 2020. Version 1.8.

- [15] TS. Specification Group Services and System Aspects; Proximity-based services (ProSe); Stage 2 (Release 12). Technical Specification (TS) TS23.303, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 04 2014. Version 12.0.0.
- [16] TS. Specification Group Services and System Aspects; Proximity-based services (ProSe); Stage 2 (Release 16). Technical Specification (TS) TS23.303, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 07 2020. Version 16.0.0.
- [17] S.M. Sinha. Chapter 10 - linear programming problems. In S.M. Sinha, editor, *Mathematical Programming*, pages 117–131. Elsevier Science, Burlington, 2006.
- [18] R. Zhang, S. Jia, Y. Ma, and C. Xu. Social-aware d2d video delivery method based on mobility similarity measurement in 5g ultra-dense network. *IEEE Access*, 8:52413–52427, 2020.
- [19] Z. Tang, W. Chen, Y. Zeng, and J. Wu. A heuristic caching strategy in d2d-enabled cellular network. In *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, pages 5602–5605, Nov 2020.
- [20] W. Song. Analysis of a distance-based pairing scheme for collaborative content distribution via device-to-device communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(9):9245–9256, Sep. 2019.
- [21] J. Chuan, B. Bai, X. Wu, and H. Zhang. Optimizing content placement and delivery in wireless distributed cache systems through belief propagation. *IEEE Access*, 8:100684–100701, 2020.
- [22] GAMS Support Team. Gams cplex documentation, 2010.
- [23] H. He. Zipf’s law and friends. University Lecture, 2016.
- [24] H. Fan, T. Zhang, J. Loo, D. Liu, and L. Yang. Preference-aware caching based on cooperative game for d2d communication networks (invited paper). In *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, 2018.
- [25] W. Zhi, K. Zhu, Y. Zhang, and L. Zhang. Hierarchically social-aware incentivized caching for d2d communications. In *2016 IEEE 22nd International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, pages 316–323, 2016.
- [26] K. Zhu, W. Zhi, L. Zhang, X. Chen, and X. Fu. Social-aware incentivized caching for d2d communications. *IEEE Access*, 4:7585–7593, 2016.
- [27] T. Zhang, X. Fang, Y. Liu, G. Y. Li, and W. Xu. D2d-enabled mobile user edge caching: A multi-winner auction approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(12):12314–12328, 2019.
- [28] X. Fang, T. Zhang, Y. Liu, G. Y. Li, and Z. Zeng. Multi-winner auction based mobile user caching in d2d-enabled cellular networks. In *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, 2019.

- [29] X. Fang, T. Zhang, Y. Liu, and Z. Zeng. Multi-agent cooperative alternating q-learning caching in d2d-enabled cellular networks. In *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, 2019.
- [30] S. He and W. Wang. Price-driven economic cache content nash bargaining game in wireless multimedia resource allocation. In *2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pages 1–8, 2019.
- [31] R. Chai, Y. Li, and Q. Chen. Joint cache partitioning, content placement, and user association for d2d-enabled heterogeneous cellular networks. *IEEE Access*, 7:56642–56655, 2019.
- [32] H. Zhu, Y. Cao, B. Liu, and T. Jiang. Energy-aware incentive mechanism for content sharing through device-to-device communications. In *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–7, 2016.
- [33] S. Hosny, A. Eryilmaz, A. A. Abouzeid, and H. El Gamal. On the performance of mobility-aware D2D caching networks. *CoRR*, abs/1903.10071, 2019.
- [34] Z. Chen, Y. Liu, B. Zhou, and M. Tao. Caching incentive design in wireless d2d networks: A stackelberg game approach. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, May 2016.
- [35] F. Shen, K. Hamidouche, E. Baştuğ, and M. Debbah. A stackelberg game for incentive proactive caching mechanisms in wireless networks. *arXiv preprint arXiv:1609.02596*, 2016.
- [36] Q. Wang, W. Wang, S. Jin, H. Zhu, and N. T. Zhang. Quality-optimized joint source selection and power control for wireless multimedia d2d communication using stackelberg game. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(8):3755–3769, 2015.
- [37] L. Shi, L. Zhao, G. Zheng, Z. Han, and Y. Ye. Incentive design for cache-enabled d2d underlaid cellular networks using stackelberg game. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(1):765–779, 2019.
- [38] R. Wang, J. Zhang, and K. B. Letaief. Incentive mechanism design for cache-assisted d2d communications: A mobility-aware approach. In *2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pages 1–5, 2017.
- [39] T. Liu, J. Li, F. Shu, and S. Chu. D2d-enabled wireless caching using stackelberg game. In *2016 8th International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, pages 1–5, 2016.
- [40] Jiangbin Lyu, Yong Huat Chew, and Wai-Choong Wong. A stackelberg game model for overlay d2d transmission with heterogeneous rate requirements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(10):8461–8475, Oct 2016.
- [41] Y. Yuan, T. Yang, Y. Xu, and B. Hu. Cooperative spectrum sharing between d2d users and edge-users: A matching theory perspective, 2018.

- [42] Y. Liu, R. Wang, and Z. Han. Interference-constrained pricing for d2d networks, 2016.
- [43] D.J.C. MacKay. Fountain codes. *IEE Proceedings - Communications*, 152:1062–1068(6), December 2005.
- [44] A. C. Kazez. Oransız Kodlar Kullanılan Kablosuz Ağlarda Yol Atama. Master’s thesis, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü Cd. No:43, 06510 Ankara, Türkiye, 2013.
- [45] A. Ravanshid. *Rateless Coded Cooperative Communications for Wireless Networks*. PhD thesis, The technical faculty of Friedrich Alexander University, Nürnberg, 2013.
- [46] J. R. Hicks. Marktform und Gleichgewicht. *The Economic Journal*, 45(178):334–336, 06 1935.
- [47] Y. Zhang, F. Li, M. A. A. Al-qaness, and X. Luan. A resource allocation scheme for multi-d2d communications underlying cellular networks with multi-subcarrier reusing. *Applied Sciences*, 7:148, 02 2017.
- [48] C.F. Chiasserini. Content wanted: A different shade of d2d communications. In *2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pages 562–566. IEEE, 2015.
- [49] P. Cheng, C. Ma, M. Ding, Y. Hu, Z. Lin, Y. Li, and B. Vucetic. Localized small cell caching: A machine learning approach based on rating data. *IEEE Transactions on Communications*, 67(2):1663–1676, Feb 2019.
- [50] S. Zeng, Y. Ren, Y. Wang, T. Zhao, and Z. Qian. Caching strategy based on deep q-learning in device-to-device scenario. In *2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, volume 1, pages 175–179, Dec 2019.
- [51] A. Malik, J. Kim, K. S. Kim, and W. Shin. A personalized preference learning framework for caching in mobile networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pages 1–1, 2020.
- [52] X. Wang, R. Li, C. Wang, X. Li, T. Taleb, and V. C. M. Leung. Attention-weighted federated deep reinforcement learning for device-to-device assisted heterogeneous collaborative edge caching. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(1):154–169, Jan 2021.
- [53] W. Wang, R. Lan, J. Gu, A. Huang, H. Shan, and Z. Zhang. Edge caching at base stations with device-to-device offloading. *IEEE Access*, 5:6399–6410, 2017.
- [54] Y. Li, C. Zhong, M. C. Gursoy, and S. Velipasalar. Learning-based delay-aware caching in wireless d2d caching networks. *IEEE Access*, 6:77250–77264, 2018.
- [55] J. Yin, L. Li, Y. Xu, W. Liang, H. Zhang, and Z. Han. Joint content popularity prediction and content delivery policy for cache-enabled d2d networks: A deep reinforcement learning approach. In *2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, pages 609–613, Nov 2018.

- [56] J. Tang, H. Tang, X. Zhang, K. Cumanan, G. Chen, K. Wong, and J. A. Chambers. Energy minimization in d2d-assisted cache-enabled internet of things: A deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(8):5412–5423, Aug 2020.
- [57] S. Aslam, F. Alam, S. F. Hasan, and M. A. Rashid. A machine learning approach to enhance the performance of d2d-enabled clustered networks. *IEEE Access*, 9:16114–16132, 2021.
- [58] Y. Qi, J. Luo, L. Gao, F.C. Zheng, and L. Yu. User preference and activity aware content sharing in wireless d2d caching networks. pages 987–992, 08 2020.
- [59] S. K. Mishra, P. Pandey, P. Arya, and A. Jain. Efficient proactive caching in storage constrained 5g small cells. In *2018 10th International Conference on Communication Systems Networks (COMSNETS)*, pages 291–296, Jan 2018.
- [60] C. Ma, M. Ding, H. Chen, Z. Lin, G. Mao, Y. Liang, and B. Vucetic. Socially aware caching strategy in device-to-device communication networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(5):4615–4629, May 2018.
- [61] C. Ma, M. Ding, H. Chen, Z. Lin, G. Mao, and X. Li. Socially aware distributed caching in device-to-device communication networks. In *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6, Dec 2016.
- [62] Y. Yan, B. Zhang, C. Li, and C. Su. Cooperative caching and fetching in d2d communications - a fully decentralized multi-agent reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(12):16095–16109, Dec 2020.
- [63] R. Zhang, F. R. Yu, J. Liu, T. Huang, and Y. Liu. Deep reinforcement learning (drl)-based device-to-device (d2d) caching with blockchain and mobile edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(10):6469–6485, Oct 2020.
- [64] D. Wang, H. Qin, B. Song, X. Du, and M. Guizani. Resource allocation in information-centric wireless networking with d2d-enabled mec: A deep reinforcement learning approach. *IEEE Access*, 7:114935–114944, 2019.
- [65] Y. He, C. Liang, F. R. Yu, and V. C. M. Leung. Integrated computing, caching, and communication for trust-based social networks: A big data drl approach. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, Dec 2018.
- [66] W. Jiang, G. Feng, S. Qin, T. S. P. Yum, and G. Cao. Multi-agent reinforcement learning for efficient content caching in mobile d2d networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(3):1610–1622, March 2019.
- [67] H. Y. R. Im, K. Thar, and C. S. Hong. Q-learning based social community-aware energy efficient cooperative caching in 5g networks. In *2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 500–503, July 2019.

- [68] J. Tang, H. Tang, N. Zhao, K. Cumanan, S. Zhang, and Y. Zhou. A reinforcement learning approach for d2d-assisted cache-enabled hetnets. In *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, Dec 2019.
- [69] B. Chen, C. Yang, and A. F. Molisch. Cache-enabled device-to-device communications: Offloading gain and energy cost. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(7):4519–4536, 2017.
- [70] T. Zhang, H. Fan, J. Loo, and D. Liu. User preference aware caching deployment for device-to-device caching networks. *IEEE Systems Journal*, 13(1):226–237, 2017.
- [71] Y. Xu, S. Jiang, and J. Wu. Towards energy efficient device-to-device content dissemination in cellular networks. *IEEE Access*, 6:25816–25828, 2018.
- [72] N. Anjum, Z. Yang, H. Saki, M. Kiran, and M. Shikh-Bahaei. Device-to-device (d2d) communication as a bootstrapping system in a wireless cellular network. *IEEE Access*, 7:6661–6678, 2019.
- [73] Y. Lin, Z. Lin, P. Chen, Z. Chen, and L. Wu. On consideration of content and memory sizes in 5g d2d-assisted caching networks. *IEEE Access*, 8:52759–52773, 2020.
- [74] S. Soleimani and X. Tao. Caching and placement for in-network caching in device-to-device communications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018:1–9, 09 2018.
- [75] R. Sun, T. Yang, A. Wang, M. Qin, Z. Fei, and Y. Wang. Cost-oriented mobility-aware caching strategies in d2d networks with delay constraint. *IEEE Access*, 7:177023–177034, 2019.
- [76] A. S. Ali, K. M. Naguib, and K. R. Mahmoud. Optimized resource and power allocation for sum rate maximization in d2d- assisted caching networks. In *2019 14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, pages 438–444, Dec 2019.
- [77] Y. Liu, Y. Wang, R. Sun, S. Meng, and R. Su. Energy efficient downlink resource allocation for d2d-assisted cellular networks with mobile edge caching. *IEEE Access*, 7:2053–2067, 2019.
- [78] L. Zhong, X. Zheng, Y. Liu, M. Wang, and Y. Cao. Cache hit ratio maximization in device-to-device communications overlaying cellular networks. *China Communications*, 17(2):232–238, Feb 2020.
- [79] J. Liu, B. Bai, J. Zhang, K. B. Letaief, and Y. Li. Joint device caching and channel allocation for d2d-assisted wireless content delivery. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, May 2018.
- [80] X. Chen, C. Xu, M. Wang, T. Cao, L. Zhong, and G. Muntean. Optimal coded caching in 5g information-centric device-to-device communications. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–7, 2018.

- [81] H. Fan, T. Zhang, J. Loo, D. Liu, and L. Yang. Preference-aware caching based on cooperative game for d2d communication networks (invited paper). In *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, June 2018.
- [82] E. Baccour, A. Erbad, A. Mohamed, M. Guizani, and M. Hamdi. Ce-d2d: Collaborative and popularity-aware proactive chunks caching in edge networks. In *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pages 1770–1776, June 2020.
- [83] W. Jaafar, W. Ajib, and H. Elbiaze. Joint caching and resource allocation in d2d-assisted heterogeneous networks. In *2018 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 1–8, Oct 2018.
- [84] Z. Tan, X. Li, F. R. Yu, L. Chen, H. Ji, and V. C. M. Leung. Joint access selection and resource allocation in cache-enabled hcns with d2d communications. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6, March 2017.
- [85] N. Zhao, X. Liu, Y. Chen, S. Zhang, Z. Li, B. Chen, and M. Alouini. Caching d2d connections in small-cell networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12):12326–12338, 2018.
- [86] B. Chen, C. Yang, and G. Wang. High-throughput opportunistic cooperative device-to-device communications with caching. *IEEE transactions on vehicular technology*, 66(8):7527–7539, 2017.
- [87] Z. Chen, N. Pappas, and M. Kountouris. Probabilistic caching in wireless d2d networks: Cache hit optimal versus throughput optimal. *IEEE Communications Letters*, 21(3):584–587, 2017.
- [88] M.C. Lee and A. F. Molisch. Caching policy and cooperation distance design for base station-assisted wireless d2d caching networks: Throughput and energy efficiency optimization and tradeoff. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(11):7500–7514, 2018.
- [89] R. Amer, H. Elsayy, M. M. Butt, E. A. Jorswieck, M. Bennis, and N. Marchetti. Optimized caching and spectrum partitioning for d2d enabled cellular systems with clustered devices. *IEEE Transactions on Communications*, 68(7):4358–4374, 2020.
- [90] B. Chen, C. Yang, and Z. Xiong. Optimal caching and scheduling for cache-enabled d2d communications. *IEEE Communications Letters*, 21(5):1155–1158, 2017.
- [91] K. M. Naguib, A. S. Ali, and K. R. Mahmoud. Group mobility-based optimization of cache content in wireless device-to-device networks. In *2018 14th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*, pages 260–265, Dec 2018.

- [92] E. Yaacoub, H. Ghazzai, M.S. Alouini, and A. Abu-Dayya. Achieving energy efficiency in lte with joint d2d communications and green networking techniques. In *2013 9th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)*, pages 270–275. IEEE, 2013.
- [93] A. Asadi and V. Mancuso. Network-assisted outband d2d-clustering in 5g cellular networks: theory and practice. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 16(8):2246–2259, 2017.
- [94] S. Doumiati, H. Artail, and K. Kabalan. A framework for clustering lte devices for implementing group d2d communication and multicast capability. In *2017 8th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, pages 216–221. IEEE, 2017.
- [95] Z. Zhang, L. Wang, D. Liu, and Y. Zhang. Peer discovery for d2d communications based on social attribute and service attribute. *Journal of Network and Computer Applications*, 86:82–91, 2017.
- [96] L. Feng, P. Zhao, F. Zhou, M. Yin, P. Yu, W. Li, and X. Qiu. Resource allocation for 5g d2d multicast content sharing in social-aware cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(3):112–118, 2018.
- [97] L. Yang, D. Wu, S. Xu, G. Zhang, and Y. Cai. Social-energy-aware user clustering for content sharing based on d2d multicast communications. *IEEE Access*, 6:36092–36104, 2018.
- [98] S. K. Gupta, J. Y. Khan, and D. T. Ngo. Cluster-based d2d architecture for safety services in vehicular ad hoc networks. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pages 43–48. IEEE, 2018.
- [99] S. . Swain and C. S. R. Murthy. A novel collision aware network assisted device discovery scheme empowering massive d2d communications in 3gpp lte-a networks. *Computer Networks*, 169:107071, 2020.
- [100] A. Asheralieva and D. Niyato. Combining contract theory and lyapunov optimization for content sharing with edge caching and device-to-device communications. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 28(3):1213–1226, 2020.
- [101] A. Asadi and V. Mancuso. Wifi direct and lte d2d in action. In *Wireless Days (WD), 2013 IFIP*, pages 1–8. IEEE, 2013.
- [102] C. Casetti, C. F. Chiasserini, L. C. Pelle, C. Del Valle, Y. Duan, and P. Giaccone. Content-centric routing in wi-fi direct multi-group networks. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2015 IEEE 16th International Symposium on a*, pages 1–9. IEEE, 2015.
- [103] I. M. Bomze, M. Budinich, P. M. Pardalos, and M. Pelillo. The maximum clique problem. In *Handbook of combinatorial optimization*, pages 1–74. Springer, 1999.
- [104] Ashay Dharwadker. The clique algorithm, 2006.

- [105] K. Biswas, V. Muthukkumarasamy, and E. Sithirasanen. Maximal clique based clustering scheme for wireless sensor networks. In *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2013 IEEE Eighth International Conference on*, pages 237–241. IEEE, 2013.
- [106] N. Padmavathy and Sanjay K. Chaturvedi. Reliability evaluation of mobile ad hoc network: With and without mobility considerations. *Procedia Computer Science*, 46:1126–1139, 2015. Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technologies, ICICT 2014, 3-5 December 2014 at Bolgatty Palace & Island Resort, Kochi, India.
- [107] Ranida H., Zibouda A., A. M. Gueroui, A. A. A. Ari, and L. Louail. Classical and bio-inspired mobility in sensor networks for iot applications. *Journal of Network and Computer Applications*, 121:70–88, 2018.
- [108] M. Waqas, Y. Niu, Y. Li, M. Ahmed, D. Jin, S. Chen, and Z. Han. A comprehensive survey on mobility-aware d2d communications: Principles, practice and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 22(3):1863–1886, 2020.
- [109] R. I. Ansari, C. Chrysostomou, S. A. Hassan, M. Guizani, S. Mumtaz, J. Rodriguez, and J. J. P. C. Rodrigues. 5g d2d networks: Techniques, challenges, and future prospects. *IEEE Systems Journal*, 12(4):3970–3984, 2018.
- [110] M. H. Adnan and Z. Ahmad Zukarnain. Device-to-device communication in 5g environment: Issues, solutions, and challenges. *Symmetry*, 12(11), 2020.
- [111] M. Naslcheraghi, L. Marandi, and S. A. Ghorashi. A novel device-to-device discovery scheme for underlay cellular networks. *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, May 2017.
- [112] D. Xenakis, M. Kountouris, L. Merakos, N. Passas, and C. Verikoukis. Performance analysis of network-assisted d2d discovery in random spatial networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(8):5695–5707, Aug 2016.
- [113] K. W. Choi and Z. Han. Device-to-device discovery for proximity-based service in lte-advanced system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(1):55–66, Jan 2015.
- [114] S. Jung and S. Chang. A discovery scheme for device-to-device communications in synchronous distributed networks. In *16th International Conference on Advanced Communication Technology*, pages 815–819, Feb 2014.
- [115] S. Jaffry, S. F. Hasan, X. Gui, and Y. W. Kuo. Distributed device discovery in prose environments. In *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference*, pages 614–618, Nov 2017.
- [116] T. T. Gunes, Steve T. Kwong U., and H. Afifi. Hybrid model for lte network-assisted d2d communications. *Lecture Notes in Computer Science*, page 100–113, 2014.

- [117] M. Li and H. Tsai. Design and evaluation of a hybrid d2d discovery mechanism in 5g cellular networks. In *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 641–643, 2018.
- [118] A. Prasad, A. Kunz, G. Velev, K. Samdanis, and J. Song. Energy-efficient d2d discovery for proximity services in 3gpp lte-advanced networks: Prose discovery mechanisms. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(4):40–50, 2014.
- [119] J. Hong, S. Park, H. Kim, S. Choi, and K. B. Lee. Analysis of device-to-device discovery and link setup in lte networks. In *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 2856–2860, 2013.
- [120] A. Thanos, S. Shalmashi, and G. Miao. Network-assisted discovery for device-to-device communications. In *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 660–664, 2013.
- [121] K. Park, Young-Bin Chang, Dong-Woo Kim, Jong-Han Kim, and Woon-Haing Hur. Opportunistic discovery scheme for device-to-device communication. In *2017 IEEE 22nd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pages 1–5, 2017.
- [122] T. Xu, J. Jiao, X. Chen, and Y. Chen. Social-aware d2d caching content deployment strategy over edge computing wireless networks. In *2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pages 1–6, 2018.
- [123] A. Pyattaev, K. Johnsson, S. Andreev, and Y. Koucheryavy. Proximity-based data offloading via network assisted device-to-device communications. In *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, 2013.
- [124] TR. Study on LTE Device to Device Proximity Services; Radio Aspects (Release 12). Technical Report (TR) TR36.843, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 03 2014. Version 12.0.1.
- [125] A. Chiumento, M. Bennis, C. Desset, L. Van Der Perre, and S. Pollin. Adaptive csi and feedback estimation in lte and beyond: a gaussian process regression approach. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015, 12 2015.
- [126] P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentila, X. Zhao, T. Jämsä, C. Schneider, M. Narandzic, M. Milojevic, A. Hong, J. Ylitalo, V.M. Holappa, M. Alatossava, R.J.C. Bultitude, Y. Jong, and T. Rautiainen. Ist-4-027756 winner ii d1.1.2 v1.2 winner ii channel models. *Inf. Soc. Technol*, 11, 02 2008.
- [127] TR. LTE Device to Device (D2D) Proximity Services (ProSe); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 12) . Technical Report (TR) TR36.877, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 03 2015. Version 12.0.0.

- [128] G. Berardinelli, L.A. Temino, S. Frattasi, M. Rahman, and P. Mogensen. Ofdma vs. sc-fdma: performance comparison in local area imt-a scenarios. *Wireless Communications, IEEE*, 15:64 – 72, 11 2008.
- [129] M. Manzano, F. Espinosa, A. Bravo-Santos, and A. Gardel. Cognitive self-scheduled mechanism for access control in noisy vehicular ad hoc networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 06 2015.



EKLER

EK 1 : GAMS-MATLAB arayüzü örnek kod parçası



EK 1

%MATLAB Örnek Kodlar (GDX):

```
%Değişkenler
m=linspace(1,c,c)';
i=linspace(1,u,u)';
n=linspace(1,h,h)';

contindex.name='c';
contindex.val=m;
contindex.type='set';

nodeindex.name='u';
nodeindex.val=i;
nodeindex.type='set';

helperindex.name='h';
helperindex.val=n;
helperindex.type='set';

csize.name = 'cachesize';
csize.type = 'parameter';
csize.val = CS;
csize.form = 'full';
csize.dim = 0;

h2u.name='ahu';
h2u.type = 'parameter';
h2u.val = Ahu;
h2u.form = 'full';
h2u.dim = 2;

pu2c.name='puc';
pu2c.type = 'parameter';
pu2c.val = Puc;
pu2c.form = 'full';
pu2c.dim = 2;

%% GDX'e yaz
wgdx ('tstdat',contindex, nodeindex, helperindex,
csize, h2u, pu2c);
```

```
%% GAMS koştur
gams('GamsCaching');
```

```
%% Sonuçlar
% Hangi YK hangi K'ya hangi içeriği gönderiyor
rs1.name = 'yhuc';
rs1.form='full';
r1 = rgdx('tstsol', rs1);
```

```
% Öbekleme sonucu
rs2.name = 'xhc';
rs2.form='full';
r2 = rgdx('tstsol', rs2);
```

```
% Amaç fonksiyonu
rs3.name = 'maxOffloading';
rs3.form='full';
r3 = rgdx('tstsol', rs3);
```

```
%GAMS Örnek Kodlar (GDX):
```

```
OPTION MIP=CPLEX
```

```
Sets
```

```
c contentindex
```

```
u nodeindex
```

```
h helperindex;
```

```
Scalar
```

```
cachesize from Matlab;
```

```
Parameter
```

```
ahu(h,u) tx aval. between h-u
```

```
puc(u,c) Zipf dist.;
```

```
$gdxin tstdat
```

```
$load c u h cachesize ahu puc
```

```
$gdxin
```

```
Variables
```

```
maxOffload;
```

```
Binary Variables
```

```
yhuc(h,u,c)
```

```
xhc(h,c) ;
```

```
% MP Modeli:
```

```
Equations
```

```
objective maximize offloading  
firstconst(h) first constraintupper  
secondconst(u,c) second constraintlower  
thirdconst(h,u,c) thirdconstraint;
```

```
objective .. maxOffloading =e= sum(u,sum(c,puc(u,c)*  
sum(h,yhuc(h,u,c)))) ;  
firstconst(h) .. cachesize =g= sum(c,xhc(h,c)) ;  
secondconst(u,c) .. 1 =g= sum(h,yhuc(h,u,c)) ;  
thirdconst(h,u,c) .. yhuc(h,u,c) =l= ahu(h,u)*xhc(h,c) ;
```

```
Model offloadingmodel /all/ ;
```

```
OPTION reslim=200000;
```

```
Solve offloadingmodel using mip maximizing maxOffload
```

```
execute_unload 'tstsol', yhuc, xhc, maxOffload;
```

```
display yhuc.l, xhc.l, maxOffloading.l;
```


ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet Cihat KAZEZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2013, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- **Doktora** : 2021, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2011 - 2012	TOBB ETÜ	Bölüm Asistanı
2011 - 2013	TÜBİTAK	Proje Bursiyeri
2012 - 2015	TÜBİTAK	Elektronik Yük. Müh.
2015 - 2016	Turkcell	Şebeke Mühendisi
2016 - Halen	Kamu	Elektronik Yük. Müh.

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **A. C. Kazez** and T. Girici, “Interference-aware distributed device-to-device caching”, *2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 1–5. doi:10.1109/BlackSeaCom.2017.8277676.
- **A. C. Kazez** and T. Girici, “Clustering-based device-to-device cache placement,” *Ad Hoc Networks*, vol. 84, pp. 170–177, 2019.
- **A. C. Kazez** and T. Girici, “Robustness of clustered D2D cache placement against mobility,” *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2019.8904161.
- **A. C. Kazez**, T. Girici, M. Yüksel, Y. Bayramlı, “Kablosuz erişim ağlarında cihazdan cihaza önbellekleme”, Patent Başvuru Tarihi: Aralık 2020.
- **A. C. Kazez** and T. Girici, “Clustering-Based Device-to-Device Discovery and Content Delivery in Wireless Networks,” *ITU Journal on Future and Evolving Technologies (ITU J-FET)*, 2021 [Kabul edildi].

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **A. C. Kazez** and T. Girici, "Energy efficient routing with mutual information accumulation," *2012 10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 2012, pp. 425-430.
- **A. C. Kazez** and T. Girici, “OFDMA-based multicast with multiple base stations,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 23, pp. 1372–1383, 2015.