



Yoğunluk-Uyarlı Kablosuz Şebekeler (DAWN)

PROJE SONUÇ RAPORU

Program Kodu: 1001

Proje No: 215E127

Proje Yürütücüsü: Ertan Onur

Bursiyerler:

Alperen Eroğlu

Shahram Mollahasani

Nina Razi Moftakhar

Abdullah Ömer Yamaç

Farnaz Hassanzadeh

KASIM 2018

ANKARA

ÖNSÖZ

Kapsama alanı ve kapasiteyi arttırmak amacıyla hareketli küçük hücrenin kullanılması şebeke altyapılarını da son kullanıcılar gibi hareketli hale getirmektedir. Ayrıca, baz istasyonlarının açılıp kapatılması, küçük hücrelerin kullanıcılar tarafından kontrol edilebilmesi ve uçtan uca dilimleme gibi yenilikçi yaklaşımlar ağı oldukça dinamikleştirmektedir. Dinamik ağların baz istasyon yoğunluğu zaman ve uzayda değişebilmektedir. Ağ işlev, protokol ve parametrelerini ağ yoğunluğuna uyarlamak için yeni tekniklerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yoğunluk bir optimizasyon parametresi olarak ele alınmazsa, statik yapılandırmalar sonucunda spektrum ya da enerji gibi değerli kaynaklar boşa harcanacaktır.

TÜBİTAK tarafından, 1001 programı kapsamında desteklenmiş olan bu projede, yeni yoğunluk kestiricileri geliştirilmiştir. Yoğunluğun kapsama alanı üzerine etkisini analiz edilmiş ve yenilikçi yoğunluk-uyarlı kapsama alanı kontrolü teknikleri geliştirilmiştir. Proje kapsamında, üç adet çalıştay uluslararası prestijli konferanslar altında organize edilmiş, beş bildiriyi ek olarak bir kitap bölümü yayınlamıştır. Üç makale ve beş lisansüstü tez çalışması devam etmektedir.

Ertan Onur

Ankara, Kasım 2018

İçindekiler

ÖNSÖZ	i
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1 Büyük-ölçekli Küçük-hücreli Şebekeler	3
2.2 Neden Yoğunluk-uyarlı Ağlar?	4
2.3 Mobil İletişimde Paradigma Değişiklikleri	5
2.4 Altyapı Neden Dinamik Olur?	7
2.5 Günümüz Mimarileri Neden Başarısız Olacak?	8
2.6 Ağ Yoğunluğu ve Yoğunluk Kestirimi	8
2.7 Baz İstasyon Yoğunluğunun Başarıma Etkisi	10
2.8 Yoğunluk-uyarlı Kapsama Alanı Kontrolü	12
2.9 Yoğunluk-uyarlı Girişim Yönetimi	13
2.10 Dinamik Ağlarda Fırsatlar	15
2.11 Dinamik Ağlarda Açık Araştırma Problemleri	16
2.12 Sonuç	20
3 GEREÇ VE YÖNTEM	21
3.1 WINS 4/5G Test Ortamı	21
3.1.1 İşlem Merkezi Kurulumu	22
3.1.2 Operatör Çekirdek Şebeke Yazılımlarının Kurulumu	22
3.1.3 Baz İstasyonu (eNodeB) Kurulumu, USRP B210	22
3.1.4 Baz İstasyonu (eNodeB) Kurulumu, USRP X310	22
3.1.5 SIM Kart Kullanımı	23
3.1.6 SDR Uygulamaları Test Ortamı	23
3.2 5G Simülatörleri, Sınama Ortamları ve Prototipleri	23
3.2.1 5G Simülatörleri ve Emülatörleri	23
3.2.2 Simülatörlerin Karşılaştırılması	28
3.2.3 5G Deneysel Sınama Ortamları (Testbed) ve Örnekleri	29
3.2.4 Sınama Ortamı Federasyonları	33
3.2.5 5G Sınama Ortamlarının Karşılaştırılması	35
4 BULGULAR	37
4.1 Yoğunluk-farkında Hücre Yakınlaştırma	37
4.1.1 Giriş	37
4.1.2 Yoğunluk-farkında Hücre Yakınlaştırma	38
4.1.3 Hücre Yakınlaştırma Mekanizması	39
4.1.4 Uç Hesaplama Tabanlı İşbirlikli Yoğunluk Tahmini	40

4.1.5	Sonuçlar ve Değerlendirmeler	41
4.1.6	İşbirlikçi Tahmincinin Doğrulanması	41
4.1.7	Yoğunluğun Kesinti Üzerine Etkisi	43
4.1.8	Yoğunluk-farkında Hücre Yakınlaştırma	46
4.1.9	İlgili Çalışmalar	50
4.1.10	Sonuç	51
4.2	Yoğunluk-uyarlı Hücre Hizalama ve Kullanıcı İlişkilendirme	52
4.2.1	Giriş	52
4.2.2	JOCell: Problem Tanımı	53
4.2.3	Metodoloji	57
4.2.4	Sonuçlar ve Değerlendirme	58
4.2.5	Sonuç	59
4.3	Uç Hesaplama Kullanarak Mobil Ağlarda Yoğunluk Algılama	59
4.3.1	Giriş	60
4.3.2	İlgili Çalışmalar	61
4.3.3	Hibrit Güç Tahsisi	62
4.3.4	Kapsam ve Kanal Kalite Karakterizasyonu	62
4.3.5	Güç Tahsisi	64
4.3.6	Doğrulama ve Değerlendirme	65
4.3.7	Sonuç	67
4.4	Yoğunluk, Enerji ve Spektrum-farkında Baz İstasyonu Hizalama	68
4.4.1	Giriş	68
4.4.2	Yoğunluk, Enerji ve Spektrum-farkında Baz İstasyonu Çizelgeleme (DE-SAS)	71
4.4.3	BS Yoğunluk Uyarlama (BDA) Problemi	73
4.4.4	Güç Uyarlama (PA) Problemi	74
4.4.5	BS Yoğunluk ve Güç Uyarlama (BDPA) Algoritması	75
4.4.6	Senaryolar	76
4.4.7	Dağıtık, Merkezi veya Merkezi Olmayan Çözüm?	78
4.4.8	BS Yoğunluk Uyarlama (BDA) Algoritması	79
4.4.9	Güç Uyarlaması (PA) Algoritması	81
4.4.10	Sonuçlar ve Değerlendirme	81
4.4.11	İlgili Çalışmalar	87
4.4.12	Sonuç	92
4.5	Kümelenmiş Tasarsız Ağlarda Yoğunluk-farkındalıklı Kesinti	93
4.5.1	Giriş	93
4.5.2	Yoğunluk-farkındalıklı Kesinti Olasılığı ve İletim Gücü Uyarlaması	94
4.5.3	Küme Yoğunluğu Tahmincisi	96
4.5.4	Mesafe Tahmini ve Hataları	97
4.5.5	Algoritmanın Karmaşıklığı	98
4.5.6	Diğer Tahminciler	98
4.5.7	RSS Tabanlı Kolektif Mesafe Tahmincisi	98

4.5.8	Kendall Mesafe Tahmincisi	99
4.5.9	Sonuçlar ve Değerlendirmeler	99
4.5.10	Tahmincinin Performansı	99
4.5.11	Yoğunluk-farkındalıklı Kesinti Olasılık Doğrulaması	100
4.5.12	Yoğunluğun Kesinti Olasılığı Üzerine Etkisi	101
4.5.13	İletim Gücü Uyarlamasına Yoğunluğun Etkisi	101
4.5.14	Sonuç	103
4.6	Yoğunluk-uyarlı Öbekleme	103
4.6.1	Olasılıksal Öbekleme Algoritması	104
4.6.2	Benzetim Tasarımı	105
4.6.3	Sabit Topoloji	106
4.6.4	Dinamik Topoloji	108
4.6.5	Sonuç	108
5	SONUÇ	110
5.1	Önemli Bulgular ve Açık Araştırma Konuları	110
5.2	Çıktılar	111

Şekiller

1	Gelecekteki ağlarda mobil BS'lerin iki uygulama senaryosu sunulmaktadır. Kanatlar veya tekerlekler üzerindeki hücrelerin mobil ağların altyapısını nasıl değiştirebileceğini gösteriyoruz. Hareketlilik ve bu raporda sunduğumuz birçok faktör nedeniyle, mobil ağların altyapısı, tasarsız ağlara dinamizm açısından benzetilmektedir. Sonuç olarak, BS'lerin yoğunluğu öngörülemeyen bir şekilde değişmektedir.	6
2	Dinamik ağlarda çeşitli girişim kaynakları olacaktır. Önemli olan, gelecek ağlarda hareketli hücrelerden kaynaklanan girişim olacaktır.	14
3	Mobil şebeke operatörleri, bazı küçük hücrelerin dağıtım ve yaşam döngüsü üzerindeki kontrollerini kaybedebilirler. Burada, ev halkının evin içine yerleştirilmiş bir femto-hücrenin yerini değiştirebileceği bir senaryoyu gösteriyoruz.	15
4	Bir mobil ağın kapsamını genişletmek için ad hoc ağ teknolojileri kullanılabilir. Mobil veya sabit BS'ler, çekirdek ağı giden trafiği geri çekmek için özel bir altyapı oluşturabilir. Bu dinamik altyapılar da talep üzerine kurulabilir; örneğin, burada örneklerle gösterdiğimiz gibi sabit bir BS başarısız olduğu zaman. Bu özellik aynı zamanda kamu güvenliği ve felaket kurtarmada kritik rol oynayabilir.	17
5	Simülatör çeşitleri.	24
6	SystemVue simülasyon ortamı (Keysight, 2016).	26
7	Wireless Insite'in kullanıcı arayüzü (Remcom, 2016).	27
8	OpenAirInterface ile deneysel fırsatlar (Marina vd., 2014).	28
9	LTE-CORNET mimarisi (Tech, 2016).	29
10	NITOS sinama ortamı mimarisi (NITOS, 2016).	30
11	PhantomNet iş akış yöntemi (PhantomNet, 2016).	31
12	Çeşitli parametreler için yoğunluğun kesinti olasılığı üzerine etkisi.	44
13	Çeşitli parametreler için iletim gücünün kesinti olasılığına etkisi.	45
14	Çeşitli dağıtım yoğunlukları için yol kaybı üssünün kesinti olasılığı üzerindeki etkisi.	46
15	Çeşitli parametreler için eşik değerlerin kesinti olasılığı üzerine etkisi.	47
16	Pt-outage-lambda	48
17	actvsABPV-nodes-bar	48
18	Sorunlu formülasyonda dikkate alınan mobil ağ topolojisi.	54
19	UE ve BS yoğunlukları için güç tüketimi değerleri.	58
20	%95 güven aralığında 1, 3, 5, 8 ve 10 BS için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri.	59
21	5, 8 ve 10 BS için güç koruma yüzdesi değerleri.	60
22	Farklı UE'ler için ortalama aktif BSs yüzdesi.	61
23	Bizim algoritmamız için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri ve 5 BSs için (Lateef vd., 2015) algoritması.	62
24	Algoritma için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri ve 10 BS için (Lateef vd., 2015) algoritması	63
25	Yönetim görevleri bir uç bulutta çalışır.	64
26	Çeşitli SINR değerleri için kapsama olasılığı (15).	66
27	Önerilen algoritma ile elde edilen ortalama çıktı ve (Yassin vd., 2014a).	67

28	Modelimiz ile ECDF arasındaki üretiminin karşılaştırılması.	67
29	Algoritmamızın toplam ağ güç tüketiminin, temel model olan (Yassin vd., 2014a) ve önerilen modelle karşılaştırılması.	67
30	Ağ mimarisi.	71
31	HetNet'te (solda) karşılaşılabileceğimiz dört farklı senaryo (S1, S2, S3, S4) ve bu senaryolar üzerinde BDPA algoritmasının etkisi (sağda).	76
32	HetNet'te (solda) karşılaşılabileceğimiz dört farklı senaryo (S1, S2, S3, S4) ve bu senaryolar üzerinde BDPA algoritmasının etkisi (sağda).	77
33	Farklı SINR değerleri için kapsama olasılığı.	84
34	BDPA algoritmasının, farklı BS yoğunlukları için 100 UE ile seyrek bir ağda ağ verimi üzerine uygulanmasının etkisi.	86
35	BDPA algoritmasının farklı BS yoğunlukları için 1000 UE ile yoğun bir ağda ağ verimi üzerine uygulanmasının etkisi.	87
36	BDPA algoritmasının, farklı BS'lerin yoğunlukları için spektral etkinlik üzerinde 100 UE ile seyrek bir ağda uygulanmasının etkisi.	88
37	BDPA algoritmasının, farklı BS'lerin yoğunlukları için spektral etkinlik üzerinde 1000 UE ile yoğun bir ağda uygulanmasının etkisi.	89
38	BDPA algoritmasının, UE'ler ve farklı BS'lerin yoğunlukları için 100 UE ile seyrek bir şebekede enerji tüketimi üzerine etkisi.	89
39	BDPA algoritmasının, yoğun bir ağda 1000 UE ve farklı BS'lerin yoğunlukları için yoğun trafiğe sahip enerji şebekesi üzerine etkisi.	90
40	Trafik yükü farklı BS yoğunluğu için yüksek olduğunda, yoğun bir ağda enerji tüketimi üzerinden BDPA algoritmasının etkisi.	90
41	BS'lerin yoğunluğu 50 BS/km^2 'da sabitlendiğinde ve UE'lerin yoğunluğu 100 ile 500 arasında değiştiğinde, BDPA algoritmasının ağ verimi üzerine etkisi.	91
42	BS'lerin yoğunluğu 50 BS/km^2 'da sabitlendiğinde ve UE'lerin yoğunluğu 100 ile 500 arasında değiştiğinde, BDPA'nın spektral verim üzerine etkisi.	91
43	BS'lerin yoğunluğu 50 BS/km^2 'da sabitlendiğinde ve UE'lerin yoğunluğu 100 ile 500 arasında değiştiğinde BDPA'nın güç tüketimi üzerine etkisi.	92
44	Önerilen algoritmanın, farklı hızlar için 100 UE ile seyrek bir ağda ağ verimi üzerine etkisi.	93
45	Önerilen yoğunluk tahmincisinin gösterimi. Rastgele dağıtılan bir tasarsız ağda üç düğüm, yani, lider düğüm olarak L , B lidere en uzak düğüm ve C B 'ye olan en uzak düğüm. Etkin alanı hesaplamak için mesafeler kullanılmaktadır ve liderin kümedeki (cluster) toplam düğüm sayısını bildiği varsayılmaktadır.	95
46	Yoğunluk tahmincisi.	97
47	Ölçümlerde hata payının $\sigma = 0$ sıfır olduğu anda çeşitli küme yoğunlukları için tahmin edicinin nispi standart sapması bulguları (%)	99
48	Gerçek yoğunluk $\lambda = 0.05 \text{ nodes/m}^2$ iken tahmin edicilerin ortalama mutlak yüzde sapmasına dayalı olarak karşılaştırılması.	100
49	Yoğunluğun kesinti olasılığına etkisi.	102
50	Tahmini sonuçlara ($\hat{\lambda}$) göre iletim gücü uyarlaması.	102

51	$\lambda = 0.000875$ düğüm/m ² ve 250×250 m ² alanda 10^6 benzetimin ortalaması olarak sunulan sonuçlar.	105
52	Sabit topolojilerde artan düğüm yoğunluğunun paket teslim oranı, öbek sayısı ve verimlilik üzerinde etkileri.	107
53	Dinamik topolojilerde artan düğüm hızlarının paket teslim oranı, öbek sayısı ve verimlilik üzerinde etkileri.	109

Tablolar

1	Yoğunluk sisteminin ağ performansı üzerindeki etkisinin niteliksel karşılaştırılması.	10
2	Dinamik mobil ağların ve bu zorlukların üstesinden gelmek için kullanılabilecek mevcut bazı uygun teknolojilerin zorlukları.	19
3	5G simülatörlerinin karşılaştırması (Mollahasani vd., 2017).	29
4	Sınama ortamlarının karşılaştırılması.	36
5	3-boyutlu simülasyon parametreleri.	41
6	Farklı yol kaybı üssü değerleri için (γ) gerçek dağıtım yoğunluğu, $\lambda = 5 \times 10^{-4}$ nodes/m ³ iken elde edilen ortalama mutlak yüzde sapma sonuçları (AAPD = $100 \hat{\lambda} - \lambda /\lambda$ %).	42
7	Farklı gerçek dağıtım yoğunluk değerler için λ where $\gamma = 3$ ortalama mutlak yüzde sapma sonuçları (AAPD = $100 \hat{\lambda} - \lambda /\lambda$ %).	42
8	$\gamma = 3$ iken çeşitli yoğunluklar ve kesinti olasılığı gereksinimleri için uyarlanmış iletim gücü seviyeleri (P_O^*).	49
9	Makro ve mikro hücreli radyo erişim ekipmanlarında güç tüketimi dağıtımı (Kyriazis ve Rouskas, 2016).	54
10	Simülasyon değerleri ve parametreler.	56
11	Genetik algoritma parametreleri.	57
12	Parametrelerin değerleri.	65
13	SNR-CQI tablosu.	66
14	Sembollerin listesi.	70
15	DESAS sorununa tamamen dağıtılmış, merkezi olmayan veya merkezi bir çözümün uygulanmasının karşılaştırılması.	80
16	Simülasyon parametreleri ve değerleri.	83
17	OFDMA tabanlı ağlarda trafik türleri (Karagiannis vd., 2014).	84
18	Farklı P_O^* değerleri için iletim gücü adaptasyon tekniğinin (30) doğrulanması.	101
19	Parametreler ve değerleri.	107

ÖZET

Yüksek veri iletim ihtiyacı olan uygulamaların sayısı artıkça, mobil haberleşme talebi de artmaktadır. Artan gereksinimi karşılamak için hücrelerin küçültülerek kısıtlı olan kablosuz bant genişliğinin verimli kullanılması gerekmektedir. Çok sayıda dinamik küçük hücrenin ortaya çıkmasıyla gezgin ağlar da tasarsız şebekelere benzemektedir ve bir paradigma değişimi yaşanmaktadır. Küçük hücrelerin rastlantısal şekilde şebekeye dahil olması ve ayrılması, şebeke yoğunluğunun önceden kestirilemeyecek şekilde değişmesine neden olacaktır. Yoğunluk değişimleri ise servis ve tecrübe kalitesini etkileyecek ve yerel kapsama alanı kontrolü, sinyal girişimi kontrolü gibi yeni sorunlara neden olacaktır. NP-Hard eniyileme problem çözümü gerektiren merkezi ve statik yapılandırmalar, şebekenin çok büyük olması nedeniyle uygulanabilir olmayacaktır. Dağıtık özdüzenleme teknikleriyle, yoğunluk-uyarlı yığıt (stack) ve mimari geliştirilmesi gerekecektir. Bu projenin amacı büyük-ölçekli küçük-hücreli özdüzenlemeli şebekeleri yoğunluk-uyarlı ve yoğunluk-farkında yapmaktır. Yeni şebeke yoğunluğu kestirim teknikleri önerilmiş ve yoğunluk-uyarlı kapsama alanı kontrolü teknikleri geliştirilmiştir. Geliştirilen teknikler benzetim deneyleri ile doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Hücresel Şebekeler, Mobil İletişim, Long Term Evolution, LTE; Özdüzenlemeli Şebeke; Yoğunluk Kestirimi; Yoğunluk-uyarlı Kablosuz Şebekeler

ABSTRACT

As the number of bandwidth-hungry applications and consequently the demand for mobile communications increases, cells have to become smaller to efficiently use the scarce spectrum. This phenomenon causes a paradigm change in mobile communications with the emergence of small-cell networks that are large in scale and highly dynamic resembling ad hoc networks. The churn in the presence of small cells, which causes sporadic density changes, impacts the quality of service and experience and introduces many novel challenges including distributed coverage preservation and interference management through local cooperation. Centralized management and static configuration, which require solving NP-hard optimization problems, are not feasible any more due to the scale of the network. Distributed self-organization techniques, density-adaptive protocols and architectures have to be developed. This project partially addressed this challenge with the goal of making the large-scale small-cell networks density-aware and -adaptive. We proposed novel density estimators and density-aware coverage preservation techniques using the estimators, and validated the expected results by simulations.

Keywords: Cellular Networks, Mobile Communications, Long Term Evolution, LTE, Self Organizing Networks, Density Estimation, Density-adaptive Wireless Networks

1 GİRİŞ

Geçtiğimiz on yıl içinde, mobil iletişim teknolojileri hayatımızın ayrılmaz bir parçası olmuştur. Her ne kadar mobil iletişim, sesli haberleşme sağlayan bir teknoloji olarak doğmuşsa da, teknoloji ve uygulamalardaki gelişmeler sayesinde çoklu ortam (multimedia) verisi haberleşmesini destekler hale gelmiştir. Yeni uygulamalar ve akıllı cihazlardaki gelişmeler sayesinde trafik miktarı da çok hızlı bir artış göstermiştir. Hücresel mimari, şebeke kapasitesini artırmak ve kablosuz bant genişliğini verimli kullanmak için tasarlanmıştır. Mobil iletişim arzı arttıkça, bant genişliğini verimli kullanabilmek için hücrelerin küçülmesi gerekmektedir. Hücresel şebekeler birçok sayıda kullanıcıya servis verebilmek için teletrafik teorisine dayanır. Kapsanacak alan çok sayıda hücreye bölünerek, bu hücrelerdeki müşterilere farklı baz istasyonlarınca servis verilmektedir. Bu sayede uzamsal çoklama (spatial multiplexing) mümkün olmaktadır. Kent dışında onlarca kilometre olan hücre çapları, kent içinde yoğun popülasyona sahip bölgelerde mikro (ve piko) ölçeklidir ve bir kaç kilometre çapındadır. Son zamanlarda çapı birkaç 10 metre olan femto hücreler de kullanılmaktadır. Mikro, piko ve femto hücreler genellikle küçük hücre olarak adlandırılmaktadır. Baz istasyonların kapsama alanlarının azaltılması, kullanıcı sayısını ve hücre başına düşen trafik miktarını azaltmakta ve baz istasyonları ile akıllı telefonlar arası mesafeler kısalmaktadır. Bu sayede hücre içinde sinyal girişimi (interference) azalır, gürültü-eklentili-sinyal-girişim oranı(SINR, signal-to-interference-plus-noise) artar, ve sonuç olarak da daha hızlı veri aktarımı mümkün olur.

Projenin amacı büyük-ölçekli küçük-hücreli özdüzenlemeli şebekeleri, şebeke yoğunluğunda olabilecek değişikliklere uyarlamaktır. Büyük-ölçekli küçük-hücreli özdüzenlemeli şebekelerde, baz istasyon yoğunluğunun rastlantısal değişmesi nedeniyle verimli kaynak ve kapasite planlaması statik yapılandırılamayacaktır. Baz istasyonları dağıtık şekilde şebeke yoğunluğunu kestirmeli ve iletişim yığıtında çalışan protokolleri yoğunluk değişimlerine uyarlamalıdır. Merkezi yönetim büyük ölçekli şebekelerde ilingenin (topolojinin) rastlantısal değişmesi, bu değişimlerin kısa bir süre içinde merkeze iletilmesinin mümkün olmaması, bu mümkün olsa bile eniyileme işlemlerinin NP-hard problemlerden oluşması (Guo vd., 2013) ve uzun sürmesi nedenleriyle mümkün değildir. Bu nedenle, dağıtık, kendi-kendini yönetebilen, yoğunluk-uyarlı bir haberleşme yığıtı ve şebeke mimarisi gerekmektedir ve baz istasyonları bölgesel olarak kendi-kendilerini yapılandırmalıdır.

Projenin birinci hedefi, çok boyutlu uzayda, şebeke yoğunluğu kestirimi teknikleri geliştirmektir ve beklenen çıktı GPS gibi yardımcı birimler gerektirmeyen hassas şebeke yoğunluğu kestirim teknikleridir. Küçük hücre baz istasyonları müşteri kontrolünde rastlantısal şekilde şebekeye dahil olup devre dışında bırakılabileceğinden, ve hareketli baz istasyonları ilingenin çok hızlı ve rastlantısal değişmesine neden olacağından, hızlı ve hassas bir yoğunluk kestirim algoritması gerekmektedir. Merkezi yaklaşımların hantal olması nedeniyle, yoğunluk kestirim tekniklerinin dağıtık ve yerel olması gerekmektedir. Literatürde bu alanda eksiklik, 3-boyutlu uzayda şebeke yoğunluğu kestirimi yapacak hassas bir tekniktir. Bu proje kapsamında, Bölüm 4'te sunduğumuz, yenilikçi yoğunluk kestirimi teknikleri geliştirilmiştir.

Projenin ikinci hedefi, yoğunluk-uyarlı katmanlar-arası (cross-layer) yığıt (stack) tasarlamak ve birinci hedefin beklenen çıktıların doğru olabilceği kontrollü sinama ortamı kurmaktır. Proje kapsamında kullanılan Vienna benzetim aracında (Rupp vd., 2016b) yoğunluk-uyarlı kapsama alanı kontrolü yöntemi geliştirilmiştir. Hareketlilik yönetimi, hücreler arası sinyal girişimi (interference) yönetimi, kaynak yönetimi gibi fonksiyonlar da yoğunluk uyarlı olmak zorundadır. Bu nedenle haberleşme yığıtına eklenecek yoğunluk kestirimi özelliğinin bu fonksiyonları da desteklemesi gerekecektir. Birinci hedef kapsamında geliştirilen yoğunluk kestiricinin her hangi bir kablosuz iletişim şebekesine entegrasyonu katmanlar-arası (cross-layer) tasarım gerektirmektedir.

Projenin son hedefi kapsamında ise, yoğunluk-uyarlı kapsama alanı yönetimi teknikleri ve iletim gücü uyarlama teknikleri geliştirmiştir. Bu teknikleri Bölüm 4'te sunuyoruz.

Bölüm 2'de proje konusundaki literatür özeti genel hatlarıyla verilmektedir. Projede uygulanan genel yöntemi Bölüm 3'te tartıştıktan sonra, bulgularımızı Bölüm 4'te sunacağız. Bulgu bazlı yöntem ve literatür taraması Bölüm 4'ün alt bölümlerinde ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Bu proje kapsamında yoğunluk kestirimi, yoğunluk-uyarlı kapsama alanı kontrolü yöntemlerini ele aldık. Bu konuların açık literatürdeki yeri ve projenin literatüre katkılarını bu bölümde, bulgu bazlı ayrıntılı literatürü ise Bölüm 4'te sunacağız.

2.1 Büyük-ölçekli Küçük-hücreli Şebekeler

Mobil (gezgin) trafiğin büyük bir kısmının küçük hücreler üzerinden kablolu şebekelere aktarılması planlanmaktadır. Küçük hücreler yalnızca evlerde değil, aynı zamanda cadde, AVM gibi yerlerde de kurulacaktır. Bu akımın ihtiyaçlarına yanıt verebilmek adına, şebeke yoğunluğunun 56 kat artacağını kestiren 3GPP (3GPP, 2012) Sürüm 9'da ev baz istasyonlarını (eNodeB) ve Sürüm 10'da (Mart 2011) küçük hücre kavramı ve Sürüm 12'de röle istasyon kavramı ve cihazdan-cihaza haberleşme (device-to-device communications) özelliklerini standartlaştırmıştır ve yeni sürümlerde bu özellikleri geliştirmektedir.

Küçük hücrelerin kullanımı yaygınlaştıkça, şebeke büyüyecek ve büyük-ölçekli küçük-hücre şebekesi ortaya çıkacaktır. Şebekenin tümü hakkında bilgi kısa süre içinde merkezi bir birimde toplanamayacağı için, bakım işlemlerinin karmaşıklığı artacaktır. Bu işlemler, bilgi girdi miktarı arttıkça, karmaşıklık üstel artış gösterecek ve NP-hard bir problem çözümü gerekecektir (Guo vd., 2013). Bu nedenle, dağıtık şekilde özdüzenleme (self-organization) yapabilen ve kendini eniyileyen yeni bir hücresel mimari gerekmektedir. Bu kavram özdüzenlemeli şebekeler (Self-Organizing Network (SON)) olarak adlandırılmaktadır (Peng vd., 2013). Özdüzenlemeli şebekelerde yeni bir paradigma değişimi de altyapıda olacaktır. Eskiden akıllı telefonların hareketli ve baz istasyonların hareketsiz olduğu varsayımıyla şebeke altyapısının sabit olduğu kabul edilirdi. Özdüzenlemeli şebekelerde baz istasyonları rastlantısal altyapı oluşturacaklardır. Bir başka deyişle, yalnızca akıllı telefonlar değil aynı zamanda baz istasyonları da hareketli olabilecek ve rastlantısal ilingeler (topoloji) oluşturabilecektir. Bu vizyon, eski çözümlerin özdüzenlemeli şebekelerde uygulanamayacağının göstergesidir. Bu akımlar dikkatlice incelenirse, mobil iletişim altyapıları yavaş yavaş tasarsız şebeke (ad-hoc networks) yapılarına benzemektedir.

Küçük-hücreli şebekelerin faydaları şunlardır:

- Daha iyi bina içi kapsama alanı ve servis kalitesinin iyileştirilmesi: 3G ve 4G bantlarında iletilen 6 GHz altı sinyaller bina içine girerken daha fazla zayıflamaktadır. Binalarda konumlandırılmış baz istasyonlar bina içinde daha verimli bir kapsama imkanı sunacaktır. Hem akıllı telefonlar hem de baz istasyonlar daha az enerji tüketeceklerdir. Böylece radyasyon yayılımı azalacaktır. Ev, iş yeri, AVM ağlarında lisanslı bantların kullanımını sağlanabilecektir.
- Daha az sinyal iletim gücü ve yeşil şebekeler: 4G şebekelerde, çok taşıyıcılı iletim kullanılmaktadır. Dikey taşıyıcılar üzerinden aynı anda iletim yapılması, sinyal gücünde ani değişikliklere neden olmakta, ve güç yükselticileri doğrusal olmayan bölgeye iterek negatif etki yaratmaktadır. Bu olgu daha fazla enerji harcanmasına ve güç yükselticilerin

maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle sinyal iletim gücünün azaltılması gerekmektedir. Küçük hücrelerde akıllı telefonlar ile baz istasyonları arasındaki mesafeler kısa olduğundan iletim gücü azaltılabilmektedir.

- Yüksek veri iletim kapasitesi: Kablosuz iletişim spektrumu kısıtlı bir kaynak olduğu için verimli kullanılmalıdır. Hücreleri küçültmek daha büyük SNIR elde etmeyi sağlar ve böylece veri iletim hızı artar. Veri iletim hızı modülasyon indeksini artırarak da elde edilebilir. Yüksek modülasyon indeksleri kullanmak için SNIR'ın büyük olması gerekir. Bant genişliği kısıtlı rejimde çalışan küçük hücreler büyük SNIR değerleri elde etmek için uygun ortam sağlar.
- Frekans seçicilik: Veri hızını artırmanın bir başka yöntemi ise bant genişliğini artırmaktır. Bant genişliğinin büyütülmesi, frekans seçiciliği denen farklı frekansların farklı sönümlenmesine neden olur. Bu olgunun temel nedeni çoklu-patika sönümlenmesi nedeniyle zaman dağılımıdır (time dispersion). Farklı frekansların farklı ölçülerde sönümlenmesi simge hatalarını artıracak ve kanal kalitesi bozulacaktır. Ayrıca, simgeler arası ve taşıyıcılar arası girişim ortaya çıkabilir. Çoklu-patika sönümlenmesi ortama, özellikle de engel ve yansıtıcılara bağlıdır. Bu nedenle hücreleri küçültmek mesafeleri küçülttüğünden, sinyal sönümlenmesine neden olan engel sayısını da azaltır, zaman dağılımı azalır, daha kısa ön ek (prefix) kullanılabilir ve veri hızı artar (Dahlman vd., 2013).
- Çoğa gönderim (multicast): hücre sınırlarında yer alan akıllı telefonlara birden fazla baz istasyonu tarafından sinyal iletimi yapılabilir. Böylece, çeşitli patikalardan gelen sinyaller birleştirilerek daha büyük SNIR elde edilebilir. X2 arayüzü üzerinden birbirleriyle iletişim halinde bulunan baz istasyonları, eş zamanlı olarak aynı sinyali aynı anda akıllı telefonlara iletebilir. Tek frekans kullanımı hücreler arası sinyal girişiminin faydalı şekilde kullanılmasına olanak verir.
- Makro hücrelerin yükü küçük hücrelere aktarılarak mobil operatörlerin yükü azaltılabilecektir.
- Sermaye masrafları ve operasyonel masraflar azaltılabilecektir.
- Yerleşim yeri satın alma ya da kiralama masrafları azaltılabilecektir.
- Baz istasyonlarının merkeze bağlantı (backhaul) masrafları azaltılabilecektir.
- Bina içi kapsama alanı iyileştirmesinin kazanımı olarak müşteri memnuniyetsizlikleri azaltılabilecektir.
- Kablolu-kablosuz şebeke entegrasyonu sağlanabilecektir.

2.2 Neden Yoğunluk-uyarlı Ağlar?

Bir mobil hücresel ağıdaki teknolojinin yakın geçmişteki durumu, merkezi olarak yönetilen ve göreceli olarak esnek olmayan ama günümüze kadar iyi çözümler sunabilmiş bir mimaridir, ancak günümüz hareketli baz istasyonlarının beklentisi ile beraber ölçeklenemez hale gelmiş durumdadır. Günümüzün ağları, spektrum sınırlamalarına çoktan ulaşmış durumdadır. Kapasite sınırlamalarının üstesinden gelmek için mekansal çoğullama yoluyla hücresel ağların yoğunlaştırılması kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Baz istasyonlarının (BS) sayısının artırılması, şiddetli girişime ve yetersiz kapsamaya neden olarak enerji israfına yol açabilir. Merkezi konfigüras-

yon veya gerçek zamanlı merkezi izleme, ağ ile ilgili genel bilgi edinme zorlukları ve görevlerin hesaplama karmaşıklığı nedeniyle etkin bir biçimde uygulanamaz. Yönetim, koordinasyon ve optimizasyon görevleri genellikle NP-hard problemleri çözme gerektirir.

Şebeke büyüdükçe, yönetim ve kontrol işlemlerinin masrafı artmakta ve önemli bir problem haline gelmektedir. Özdüzenlemeli şebeke mimarisi kullanarak operatörlerin yüklerini azaltmaya çalışmak açık ve önemli bir araştırma alanıdır. Hücresel şebekelerin karakteri de değişmektedir: altyapı dinamik hale gelmekte ve şebekede işlevsel olan hücre yoğunluğu rastlantısal şekilde değişmektedir. Şebeke protokollerinin yoğunluğa uyarlanması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Günümüz şebekelerinin merkezi yönetim yaklaşımları yerine, dağıtık ve yerel işbirliğini destekleyen protokoller geliştirilmelidir ve bu protokollerin yoğunluk değişimlerine uyarlı olmaları gerekmektedir.

Özdüzenlemeli şebekelerde servis kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri şebeke yoğunluğudur. Kapsama alanı eniyileme, baz istasyon el-değiştirme (hand-over) yönetimi, sinyal girişimi yönetimi, kaynak ve kapasite planlama büyük-ölçekli küçük-hücreli şebekelerde gürbüz ve kesin bir şebeke yoğunluk kestirimi gerektirmektedir. Örneğin, bir küçük hücrenin kapatılması durumunda, komşu hücrelerin sinyal iletim güçlerini ayarlayarak kapsama alanında oluşan boşluğu kapatması gerekir. Diğer taraftan, aynı alanda işleme alınan yeni bir küçük hücre, sinyal girişimi (interference) oluşturacağından komşu hücrelerin iletim güçlerinin ayarlanması da gerekir (Deb vd., 2014). Bu örnekten de görüldüğü gibi, şebeke yoğunluğu servis kalitesini ve kapsama alanını önemli şekilde etkilemektedir.

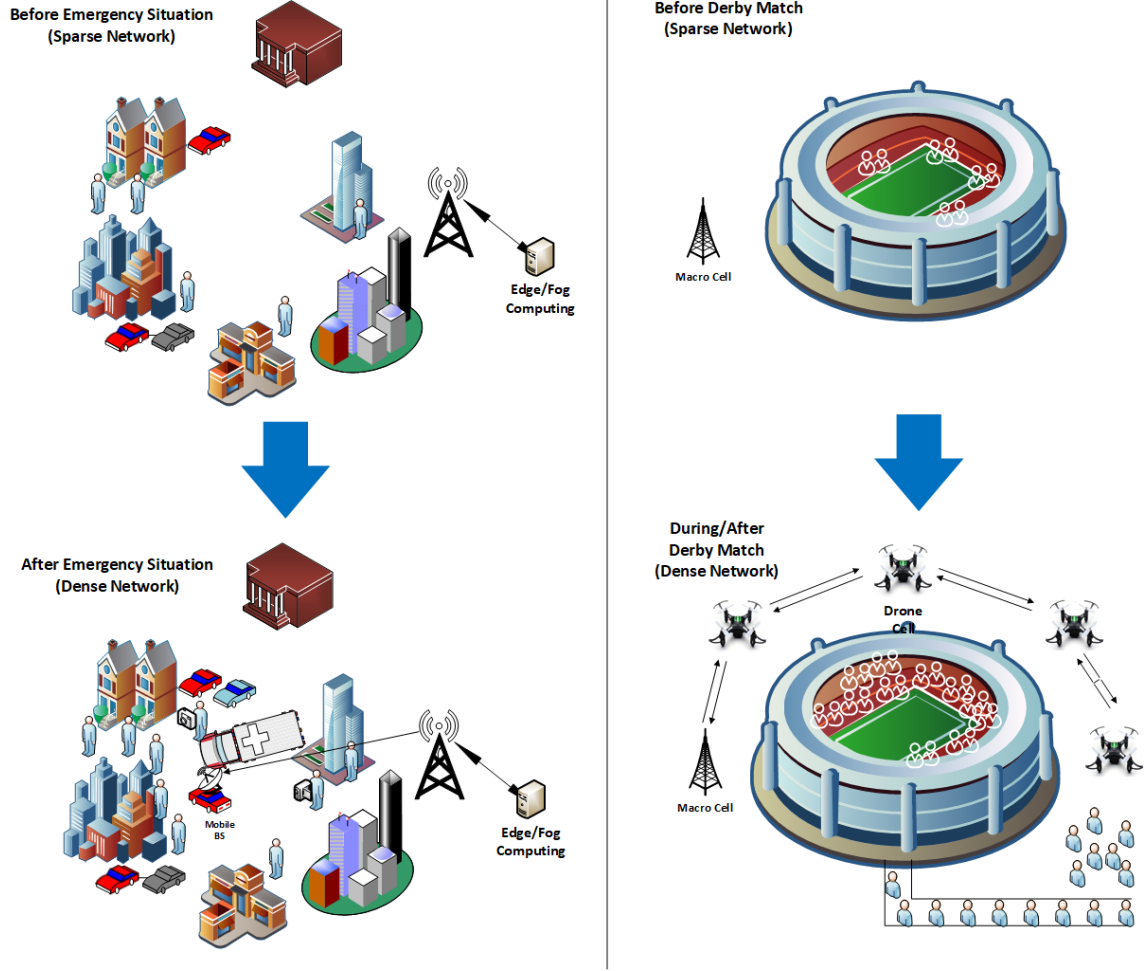
Büyük-ölçekli küçük-hücreli şebekeleri yoğunluğa uyarlamanın faydaları şöyledir:

- Kapsama alanı ve kapasite iyileştirilebilecek,
- Servis kalitesi artacak ve müşteri memnuniyeti sağlanacak,
- Sinyal girişimi (interference) problemleri azaltılacak,
- Şebeke rastlantısal ilinge değişikliklerine dayanıklı hale getirilecek,
- İlinge (topoloji) kontrolü kolaylaştırılacak, ve
- Hata ayıklamak ve şebeke yönetimi kolaylaştırılacaktır.

2.3 Mobil İletişimde Paradigma Değişiklikleri

Önemli paradigma değişimlerinden biri, operatörlerin kontrol alanında gerçekleşmektedir. Geçmişte, hücreleri planlamak, boyutlandırmak ve kurmak şebeke operatörleri tarafından gerçekleştirilmekteydi. BS'lerin aktivasyonundan önce ve sonra, eniyileme yapılmasının gerekliliği de kaçınılmaz bir durumdu. Performans izleme, arıza azaltma ve düzeltme baz istasyonunun kullanımı süresi boyunca şebeke operatörü tarafından gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu yaklaşım gelecekteki mobil ağlarda büyük ölçüde değişecektir ve bu çalışmada açıklayacağımız gibi operatörler hücre konuşturmanın üzerindeki kontrollerini kısmen kaybetmiş olacaklardır.

Diğer bir paradigma değişikliği, mobil ağların altyapısındadır. Geçmişte, kullanıcı ekipmanı (UE) konumlarının stokastik olduğu ve ağ altyapısının durağan olduğu varsayılmıştır. Gelecekte,



Şekil 1. Gelecekteki ağlarda mobil BS'lerin iki uygulama senaryosu sunulmaktadır. Kanatlar veya tekerlekler üzerindeki hücrelerin mobil ağların altyapısını nasıl değiştirebileceğini gösteriyoruz. Hareketlilik ve bu raporda sunduğumuz birçok faktör nedeniyle, mobil ağların altyapısı, tasarsız ağlara dinamizm açısından benzemektedir. Sonuç olarak, BS'lerin yoğunluğu öngörülemez bir şekilde değişmektedir.

BS'ler aynı zamanda rastgele bir altyapı sağlayan hareketli birer unsur olabilirler; örneğin, uçan-gözler (drones) kör noktalara hizmet verebilirler (Naqvi vd., 2018; Bor-Yaliniz ve Yanikomeroglu, 2016a). Şekil 1'de UE'lerin ve aynı zamanda BS'lerin yoğunluğunun dinamik bir şekilde değişebileceği bazı örnek senaryolar sunulmaktadır. Bu senaryolarda görüldüğü gibi, trafik kazası veya yüksek katılımlı spor olayı gibi bazı (acil) durumlar nedeniyle kullanıcıların yoğunluğu aniden artabilmektedir. Şekil 1'in sol tarafında görebileceğimiz gibi, alan başlangıçta seyrek görünüyor. Ancak, trafik kazasından sonra kullanıcıların yoğunluğu önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, hizmet kalitesini (QoS) kapsama alanı veya kapasite açısından korumak için alanda hareketli veya göçebe BS'ler konuşlandırılmaktadır. Acil durumlarda, dağıtım öncesi planlama yapılamaz. İletişim hizmetleri, halkı koruma ve felaketi önleme ya da felaketten kurtarma için kritik öneme sahiptir. İnsan kaynaklı nedenler ya da deprem gibi doğal afetler, halihazırda durağan altyapılar tarafından sağlanan iletişim hizmetlerini kullanılamaz ya da verimsiz hale getirebilir. Uçangöz baz istasyonlarını kullanmak, etkilenen bölgelerde bir iletişim altyapısı kurmak ve kör noktalarda kablosuz kapsama sağlamak için uygulanabilir bir yaklaşım olabilir. Uçangöz baz

istasyonları, iletişim altyapısının olmadığı kırsal alanlardan veri toplamak için de kullanılabilir. Örneğin, uçangöz hücreleri, nesnelerin İnternet'i uygulamalarında ve kitlesel makine tipi iletişim senaryolarında mobil toplanma noktası işlevini görebilirler.

Başka bir senaryo olarak, bir derbi futbol maçı verilebilir. Uçangöz baz istasyonları, Şekil 1'in sağ tarafında gösterildiği gibi etkinlik sırasında kapsama alanı sağlayabilir ve hizmet kalitesini geliştirebilir. Etkinlikten önce ve sonra, stadyumdaki kullanıcı yoğunluğu düşük olacaktır, ancak bu durum maç sırasında önemli ölçüde daha büyük olacaktır. Durağan hücrelerin içeride ya da göçebe hücrelerin stadyum etrafında konuşlandırılmasının (dağıtılmasının) maliyeti yerine, kullanıcı aygıtlarına yaklaşılarak kullanıcıların servis gereksinimlerini karşılamak için stadyum üzerinde bu kanatlı hücreler kullanılabilir. Kullanıcı yoğunluğuna bağlı olarak, ek baz istasyonlarının dinamik olarak dağıtılabilmesi ağ yoğunluğunun da dinamik bir biçimde değişmesi sonucunu ortaya çıkaracaktır.

2.4 Altyapı Neden Dinamik Olur?

Mobil hücrelerin kullanılmasıyla ve dolayısıyla da önceden planlanamayan küçük hücrelerin yerleri söz konusu olduğunda mobil ağ altyapısı rastgele bir hale gelecektir. Yukarıda açıklanan ve Şekil 1'de gösterilen senaryolar göz önünde bulundurulduğunda, hareketli veya göçebe hücrelerin kullanılmasının başlıca kazanımlarını aşağıdaki gibi listeleyebiliriz:

- Hareketli hücreler, alan elde etme maliyetleri uygulanmadan kapsama boşluklarını azaltmak için hızla yerleştirilebilirler.
- Uçangöz hücreleri kırsal alanlarda her yerde kapsama alanını kolaylaştırabilirler.
- Uçangöz hücrelerinin hareketliliği, grup hareketliliği için daha iyi bir yaklaşım sağlayarak ve de son kullanıcıların hareketliliği ile de eş zamanlı olması hareket yönetim maliyetlerini düşürecektir.
- Mobil hücreler, uç/sis bilgisiyle birlikte, son kullanıcılara daha yakın bir hale getirebilir ve de artırılmış işlem gücü sağlayarak, güç tüketimini azaltabilen ve yüksek derecede gürültü-eklentili-sinyal-girişim oranı (SINR) elde ederek daha yüksek veri hızı sağlayacaktır.
- Yayın veri hızları, özellikle hücre kenarlarında bulunan kullanıcılar için geliştirilebilecektir.

Bu kazanımları elde etmek için, mobil hücrelerin gelecekteki ağlarda potansiyel çözüm olarak kullanılması açıkça görülebilmektedir. Hücre hareketliliğine ek olarak (Bor-Yaliniz ve Yanikome-roglu, 2016a), bir ağ dinamiği oluşturan faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kullanıcı tarafından kontrol edilen BS'ler (örneğin, son kullanıcılar tarafından satın alınan ve kontrol edilen femtocell'ler): BS'ler müşterinin yaşam alanında (ev gibi) konuşlandırıldığında, kullanıcılar tüketim gereksinimlerine bağlı olarak bunları açabilirler veya kapatabilirler.
- Yeşil çalışma (örneğin BS'lerin uyku planlaması): BS'ler enerji tasarrufu için görev döngüsü kullanabilirler. Kullanılan görev döngüsü düzenine bağlı olarak, BS'lerin etkili yoğunluğu zaman dilimleri boyunca farklı olacaktır.
- BS'lerin kademeli olarak yerleştirilmesi, dağıtım süresince ağ yoğunluğunu değiştirecektir.

- Kontrolün kaybı ve topolojideki hatalar: Ön planlamalar ve önceden belirlenmiş yapılandırmalar artık mümkün değildir. İşletmeci, kentsel yapı tarafından getirilen kısıtlamalara sıkı sıkıya uymak zorunda kalabilir. Sonuç olarak, dağıtım rastgele olarak kabul edilebilir.
- Çeşitli dikey sektörler (örneğin: otomotiv, sağlık), şebeke dilimleme, çoklu kiracılık (multi-tenancy) ve çeşitli senaryolar (ör., kullanıcı başına düşük ortalama gelir (düşük ARPU) bölgeleri veya olimpiyatlar gibi ara sıra olan etkinlikler) için destek olarak öngörülmektedir.

2.5 Günümüz Mimarileri Neden Başarısız Olacak?

Halihazırda ki mobil iletişim ağlarının eksikliklerinden ve kısıtlamalarından dolayı bu paradigma değişikliklerine karşılık yeterli ve verimli çözüm olarak ele alınması mümkün değildir (Liyanage vd., 2015):

- Hareketli BS'ler için işlevlerin eksikliği: BS'lerin hareket yönetimi henüz standardizasyonda öngörülmemiştir.
- Esnek olmayan mimari, statik ve elle yapılan yapılandırmalar: Altyapı dinamik olduğunda, statik yapılandırmaların kaynakları boşa çıkaracağı açıktır. Elle yapılan yapılandırmalar ağı dinamikliğe karşı esnek olmayan bir şekle getirirken ciddi insan hatalarına da maruz bırakabilecektir. Yazılımsal ağlar bu sorunlara potansiyel bir çözüm olacaktır.
- Ortak kontrol fonksiyonlarının ve arayüzlerin eksikliği: gerçek zamanlı ve bütüncül yönetim, tedarikçiye bağımlılık ve eğitilmiş/uzman yöneticiler gerektiren tedarikçiye özel donanım ve yazılım bileşenleri nedeniyle neredeyse imkansızdır. Ağ sanallaştırma, bu sorunu çözmeye yardımcı olabilir.
- Gelişmekte olan ülkelerde sınırlı iletişim servis kapasitesi ve fiber altyapı eksikliği.

Sonuç olarak, hücresel ağların tasarsız ağlara benzemeye başladığını iddia edebiliriz. Dağıtılmış ve kendi kendini organize edebilen, düzeltebilen ve değiştirebilen bir ağ mimarisi gereklidir. Ağ yoğunluğu, Bölüm 2.6'da sunacağımız gibi ağ performansını önemli ölçüde etkileyen çok önemli bir parametredir. Ağ protokollerini, çalışma zamanında öngörülemez yoğunluk değişimlerine uyarılmanın zorluklarını Bölüm 2.10'da sunmaktayız. Bölüm 2.11'de kapsamlı bir araştırma güçlükleri listesi sunulmaktadır.

2.6 Ağ Yoğunluğu ve Yoğunluk Kestirimi

Dinamik ağlarda, ağ yoğunluğu sürekli olarak değişecektir. Bu bölümde, mevcut yoğunluk tahmin edicileri sınıflandırılarak tartışılmaktadır ve yoğunluğun performans üzerindeki etkisi niteliksel olarak analiz edilmektedir. Daha sonra, BS'lerin yoğunluğu başka bir optimizasyon parametresi olarak ele alınıp, dinamik ağlarda ki girişim yönetimi üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Ağ yoğunluğu, baz istasyonlarının konumu, komşuluk yapısı, diğer baz istasyonlarından alınan sinyal gücünün (RSS) kalitesi, kullanıcı aygıtları ve de ortamdaki kullanıcı yoğunluğu verileri ile yüksek oranda ilişkilidir. Literatürde yoğunluk kestirimi için var olan yöntemler incelendiğinde üç kategori ortaya çıkmaktadır. Bunlar: konum bazlı yöntemler, komşuluk bazlı yöntemler, ve

sinyal-gücü ölçümüne dayalı yöntemlerdir. Konum tabanlı kestiriciler, ek olarak enerji tüketen GPS gibi yardımcı konumlandırma sistemlerini kullanırlar. Ölçeklendirilemeyen ve hatalı sonuçlardan etkilenen komşuluk tabanlı kestiriciler, ağdaki paket trafiği üzerindeki bir sayımdan yoğunluğu çıkarırlar. RSS tabanlı kestiriciler -RSS güçlü bir uzaklık tahmincisi olmasa da- konum ve komşuluk tabanlı tahmin edicilerin özelliklerini birleştirir.

Konum bazlı yöntemler GPS gibi harici birimleri ve şebekede yer alan düğümlerin konumları kullanılarak yapılan şebeke yoğunluğu kestirim teknikleridir. Bu yöntemlerde düğümlerin bazılarında ya da hepsinde GPS gibi yardımcı birimler koordinat ölçümleri yaparak birbirleriyle paylaşır. Böylece birim alan ya da hacme düşen düğüm sayısı hesaplanabilmektedir. Bu yöntemlere örnek olarak node census (düğüm sayımı) (Raza vd., 2008), yoğunluk-uyarlı yönlendirme protokolü (DAR) (Li vd., 2008), ve öncelikli coğrafi yönlendirme protokolü (PSGR) (Xu vd., 2005) verilebilir. Bütün bu örneklerde, düğümlerde GPS birimi vardır ve yoğunluk kestirimi koordinat belirleme işlemi takip eder. GPS gibi yardımcı birimler ekstra enerji kullanımına neden olmaktadır. Ayrıca birimlerin hassasiyeti de yoğunluk kestirimi başarımını önemli ölçüde etkilemektedir.

Komşuluk bazlı yoğunluk kestirimi yöntemlerinde GPS gibi yardımcı birimler bulunmaz. Bir şebekenin parçasını oluşturan komşu düğümler yerel olarak oluşturulan trafik miktarını ölçer. Bu ölçünün şebeke yoğunluğu ile korelasyonu olduğu yadsınamaz. Ölçülen trafik miktarı kullanılarak yoğunluk kestirimi yapılır. Temel varsayım, yoğun bölgelerde daha çok veri trafiği oluşurken, az yoğun bölgelerde ise ölçülen veri haberleşme miktarının azalacağıdır. Veri trafiği analizi (TA) (Raza vd., 2008) ve NEST (Iyer vd., 2012) komşuluk bazlı yoğunluk kestirimine örnektir. Haberleşmede kullanılan paketlerin başlıklarında düğümlerin adresleri taşınır. TA ve NEST'te bu bilgiler sayılarak yoğunluk kestirimi yapılır. Bir düğüm yalnızca komşularının yönlendirdiği paketleri sayabildiği için, bu tip yöntemler yönlendirme protokolü ve trafik miktarına çok bağımlıdır; bu nedenle dinamik şebekelerde uygulanması zordur.

İlk iki yöntemin avantajlarını kullanan ve sinyal-gücü ölçümüne dayalı iki-boyutlu düzlemde şebeke yoğunluğu kestirimi tekniklerinin teorik çalışmalarını yaparak 2012 yılında yayınlamıştık (Onur vd., 2012). Bu yöntemin teorik geçerliliğini tasarsız şebeke (ad hoc network) senaryolarında gösterdik. Kablosuz iletişimde sinyal gücü alıcı ve verici arasındaki mesafe arttıkça üstel azalan bir değerdir. Mesafe kestirimi ve yer saptaması için uzun süredir kullanılmaktadır. Bu yöntemde şebekenin bütün düğümlerinde GPS alıcısı bulunması gerekmemektedir. GPS alıcısı olan düğümler kendi aralarında kanal modelini belirledikten sonra bu bilgi diğer tüm düğümler ile paylaşılmakta ve sinyal gücü ölçümleri kullanılarak mesafe kestirimi yapılmaktadır. Kestirilen mesafeler başka bir teknik kullanılarak şebeke yoğunluğunun saptanması için kullanılmaktadır. Bu model 2-boyutlu uzayda birörnek (uniform) konuşlandırılmış şebekelerde çalışmaktadır ve şebeke dağılımı birörnek değilse mutlak hata artmaktadır. Ayrıca kullanılan kanal modelinde yalnızca sinyal gücünün yol kaybı düşünülmüştür. Teorik olarak çalışsa da pratikte gölgeleme (shadowing), çoklu-patika sönümlenme (multi-path fading) gibi diğer rastlantısal etkenler bu modelde düşünülmemiştir.

Bu teknik basittir, maliyeti düşüktür ve herhangi bir kablosuz iletişim biriminde kolayca geliş-

Tablo 1. Yoğunluk sisteminin ağ performansı üzerindeki etkisinin niteliksel karşılaştırılması.

	Kaotik (Çok yoğun)	Optimal	Statik (Az yoğun)
Veri iletim hızı	Az	Çok	Az
Sinyal girişimi	Çok	Kontrol edilmeli	Az
Kapsama alanı	Gereğinden fazla	Optimal	Parçalı
Dirençlilik	Yüksek	Optimal	Az
Topoloji kontrolü	Mümkün	Mümkün	Mümkün değil
Özet ödünleşim	Düşük başarımlı	İşlevsel	Yetersiz kapsama

tirilebilir. Sinyal gücü ortamdan çok etkilendiği için mesafe kestirim başarımlı yüksek olmasa da yoğunluk kestirimin başarımlı oldukça yüksektir; mutlak hata teorik olarak %5'in altındadır. Bu yöntemi kablosuz algılayıcı şebekeler kapsamında Fransa'da yer alan FIT IoT-Lab altyapısı kullanarak, kontrollü laboratuvar ortamında test ettiğimizde, mutlak hatanın %20'nin altında olduğunu gördük (Eroğlu, 2015). Sinyal gücüne dayalı çalışan bu yöntem iki boyutlu bir uzayda sınanmıştır. Küçük-hücreli geniş-ölçekli şebekeler ise 3 boyutlu uzayda çalışacak bir yöntem gerektirmektedir. Küçük baz istasyonlarının AVM, ev, iş yeri gibi ortamlarda konuşlandırılacağı düşünülürse, çok katlı binaların modele katılması ve yoğunluk olarak birim hacimdeki düğüm sayısının saptanması gerekmektedir. Bu projenin hedeflerinden birincisi, sinyal gücüne dayalı yoğunluk kestirimi yönteminin geliştirilmesi ve m -boyutlu uzayda çalışır hale getirilmesidir. Geliştirdiğimiz yenilikçi yoğunluk kestirimi tekniklerini Bölüm 4'te sunuyoruz.

2.7 Baz İstasyon Yoğunluğunun Başarıma Etkisi

BS yoğunluğunun çeşitli mobil ağ parametreleri ve performans ölçümleri üzerindeki etkisinin analizi Tablo 1'de gösterilmiştir. Analiz şu şekilde bir senaryoya dayanmaktadır: Homojen BS'lerin bir alana artan ve rastgele dağıtılmış olduğunu varsayalım. BS'lerin başlangıçta seyrek olarak yerleştirildiğini ve hizmetin sadece yalıtılmış kapsama alanlarının bir kümesinde verilebileceğini varsayalım. BS'lerin yoğunluğu (λ) yavaş yavaş arttıkça (örneğin, daha fazla BS'ler dağıtıldıkça), yalıtılmış kümeler bir araya gelerek kritik yoğunlukta (λ_c) büyük bir küme üretecektir. Bu aşamada, ağın genel topolojisi (iri-ölçekli özellikleri) değişir ve bu yaklaşım faz geçişi olarak adlandırılır.

Sistemin kritik yoğunluk λ_c altındaki ve üzerindeki makro davranışları oldukça farklıdır. Ağda, $\lambda > \lambda_c$ olan yoğun ağ sisteminde aktif BS'lerden oluşan dev bir bileşen (kapsama alanı) bulunmaktadır. Oysa, $\lambda < \lambda_c$ ise kapsama alanında boşluklar söz konusudur. Ağın iri-ölçekli davranışı, yoğunluk arttıkça parçalı ağdan (yani, geniş kapasiteye sahip yalıtılmış kapsama alanlarından), azalan performansa (yüksek girişimli tam kapsamaya) doğru değişmektedir. Bu geçişte, λ_c 'den biraz daha büyük bir yoğunlukta, ağın verimli kaynak (örneğin, enerji) işlemi mümkündür. Bu nedenle, ağın performansı büyük ölçüde bir çizge (graph) olarak gösterilebilen topolojisine bağlıdır.

Çizgelerde faz geçişi, o çizgedeki bir özelliğin varlığının olasılık değerinin, kontrol edilebilir bir parametrenin bir eşik değerinde, sıfırdan bire bir anda geçtiği an olarak tanımlanabilir. Eşiğin

sol ve sağ tarafları statik ve kaotik bölgeler olarak düşünölebilir. Eşğin çevresindeki bölge, verimli kaynak yaklaşımı çerçevesi içerisinde, inovasyonların gerçekleştiği faz geçiş bölgesi olarak adlandırılır.

Örnek olarak iletim gücü uyarlamasını ele alalım. İletim gücünün kritik bir eşğinde, ağın bağlantısı kesik bir durumdan yüksek bağlı duruma geçer. Eşik değerinden daha düşük bir iletim gücü seviyesi, kesik bağlantılı bir ağa neden olur ve ağı işlevsiz kılar. Bununla birlikte, iletim gücünü eşğin ötesinde arttırmak, tam bağlantılı ancak girişimlerin ve kaynak israfının çok olduğu bir ağa neden olur. Kritik eşikte çalışmak, verimli kaynak kullanımı öncelikli bir ağı oluşturmayı kolaylaştıracaktır. Benzer faz geçişleri, uçangöz hücre yerleşimi gibi NP-hard olan birçok ağ tasarımı probleminde gözlemlenebilir. Bu tür problemlere sunulan merkezi çözümler büyük ağlarda ölçeklendirilemez.

Sistemin kritik yoğunluk λ_c altındaki ve üzerindeki davranışları, Tablo 1’de gösterildiği gibi oldukça farklıdır. Küçük hücrelerin yoğunluğu arttıkça, alan ve kapasite yüksek bir mekansal çoğullama seviyesi nedeniyle büyüyecektir. Bununla birlikte, bir ağın yoğunluğu büyüdükçe, kapasite, yoğun ağlardaki girişime bağlı olarak nihayetinde sıfıra yaklaşacaktır. Küresel ağ kapasitesi, kapsama boşlukları ve bölümlene nedeniyle seyrek ağlarda düşük olacaktır, bu arada hücre içi kapasite az miktarda girişim nedeniyle büyük olacaktır. Öte yandan, ağların yoğunlaştırılması daha fazla kullanılabilir kanal sağlayabilir ve verimliliği artırabilir. BS’lerin yoğunluğu λ_c ’ye ulaştığında, girişim nedeniyle ağın verimliliği önemli ölçüde azalacaktır. Hareketlilik yönetiminin maliyeti, çok sayıda geçiş nedeniyle yoğun ağlarda artmaktadır. Seyrek ağlarda ise, hareketlilik yönetimi düzensiz kapsama nedeniyle imkansız olacaktır. Eş-zamanlı çok yollu aktarım, çoklu hedefleme ve röle baz istasyonlarının kullanımı da seyrek şebekelerde kullanılamaz hale gelmiştir. Yoğun ağlarda fazlalıktan yararlanarak topoloji kontrolü mümkündür. Örneğin, ağdaki yük dikkate alınarak baz istasyonlarının uyku planlaması çözümü kullanılabilir. Aynı zamanda, topoloji kontrolü ağların yoğun ağlardaki arızalara direncini de artırır. Daha fazla baz istasyonu dağıtımıyla enerji tüketimi artacaktır. Spektral verim (SE), kritik yoğunluk λ_c ’ye kadar artacaktır ve baz istasyonlarının fazla dağıtımıyla (Liu vd., 2017) büyük ölçüde azalacaktır.

Dinamik yoğun ağlarda, rastgele erişim kanalları üzerindeki çarpışmalar, yüksek tıkanıklık seviyeleri ve tutarsız kapasiteler önemli zorluklar olabilirler; seyrek ağlarda ise, bölümlene temel zorluktur. Dinamik ağlar kapsama koruması, hareketlilik yönetimi, girişim kontrolü ve verimli kaynak tahsisi için yerel olarak işbirliği yapmak zorundadır. Bununla birlikte, son teknoloji mimarileri yerel işbirliğine dayanmaktadır. Bu görevleri yoğunluk-uyumlu bir şekilde gerçekleştirmek için, baz istasyonları kendi komşuluklarını keşfetmeli veya sürekli değişen bir topolojide yoğunluğu tahmin etmelidir. Uç hesaplama bu amaca yönelik değerli bir çözüm ortağı potansiyeli taşımaktadır.

Hücreler seyrekleştikçe ve boyutları değiştikçe, hareketlilik yönetimi daha zor hale gelecektir. Büyük hücreler kullanıldığında, hedef terminal daha az sayıda hücrede tarandığından, paging maliyetleri daha düşük olacaktır. Hücre boyutları küçük olduğunda, hedef terminal daha fazla sayıda hücrede aranacaktır. Bu nedenle, hücre boyutlarının ve kapsamının gerçek zamanlı olarak dağıtık yönetimi, hareketlilik yönetimi üzerinde olumsuz bir etki oluşturabilecektir.

2.8 Yoğunluk-uyarlı Kapsama Alanı Kontrolü

Özdüzenlemeli hücreşel şebekeler üzerine Aliu vd. (2013) tarafından yazılmış olan tarama makalesinde, özdüzenlemenin üç temel karakteristiğı şöyle tanımlanmıştır:

- yerel işbirliğine (local cooperation) dayalı teknikler kullanılarak ölçeklenebilirlik sağlamak,
- güvenilir (dependable) teknikler kullanılarak istikrarlı bir altyapı oluşturmak, ve
- gerçek-zamanlı düzenleme teknikleri kullanılarak çeviklik sağlamak.

Proje öncesinde, açık literatürde sunulan hiçbir yöntem yoğunluk-uyarlı değildi. Sunulan yöntemler genel olarak X2 arayüzü üzerinden baz istasyonların birbirleriyle koordine olması ve kaynak planlaması yapmasını öngörmektedir.

Yerel işbirliği, baz istasyonlarının birbirleriyle iletişim kurarak dağıtık şekilde parametrelerini eniyilemesini gerektirir. Yerel işbirliği ihtiyacına bir örnek verelim. 4G hücreşel mimaride kullanılan OFDM'de paylaşılan zaman-frekans kaynakları, kanal-kalitesine bağılı olarak planlanmalı ve terminallere atanmalıdır. Özdüzenlemeli şebekelerde, terminallere bir saniye ve 180 kHz genişliğindeki parçacıklar iletişim kalitesine bağılı olarak atanabilmektedir. Downlink kanalların kalitesi telefonlarca ölçülmekte, baz istasyonlara bildirilmekte ve baz istasyonlarınca değerlendirilip kanal ataması gerçekleştirilmektedir. Uplink kanallarda ise DFTS-OFDM kullanılmaktadır. Terminaller sabit güçte referans sinyali yayınlamadığı için uplink kanal kalitesini ölçmek kolay değildir. Baz istasyonları yerel olarak birbirleriyle iletişim kurarak kanal kalitesi ölçümü yapabilir ve kaynak atama kararlarını bu işbirliğinin sonucu ortaya çıkan kanal kalitesi ölçümlerine göre yapabilirler.

Büyük-ölçekli küçük-hücreli şebekelerde, komşu hücreler aynı anda aynı bantta iletişim kurabilirler. Bu özellik, hücreler arası sinyal girişimi kontrol (Inter-cell interference control, ICIC) mekanizmaları kullanılmadığı takdirde, SINR'da büyük dalgalanmalara neden olabilir (Deb vd., 2014). Hücre yoğunluğunun büyük olduğu bölgelerde girişim daha fazla olurken, az yoğun bölgelerde girişimin etkisi az olacaktır. Açık literatürde bu sorunun çözümü için genellikle komşu hücrelerin X2 arayüzü üzerinden birbirleriyle iletişim kurarak girişim kontrolü ve kaynak planlaması yapmasıdır. Baz istasyonların hareketli olduğu rastlantısal ilingelerde bu yöntem gerçek zamanlı uygulanamayabilir.

Büyük-ölçekli küçük-hücreli şebekelerde kapsama alanı kontrolü müşteri memnuniyeti sağlamak için elzemdir. Şebekenin ilingesi ve kapsama alanı kontrol edilebilen ve edilemeyecek birçok etkene bağılıdır (Ramanathan ve Rosales-Hain, 2000). Sinyal karışması, çevresel etkenlere bağılı sinyal gücü zayıflaması, gürültü ve çoklu-patika sönümlenme gibi kontrol edilemeyecek etkenler iletişim kanalı kalitesini ve dolayısıyla ilingeyi etkiler. Bu etkenler zaman ve uzamda önceden kestirilemeyen kalitede iletişim kanalları oluşmasına neden olur. Baz istasyonunun hareketli olması da kanal kalitesini etkiler. İletişim gücü ve anten yön seçiciliğı kontrol edilebilen etkenlerdir ve yoğunluk-uyarlı yığıt geliştirilirken ayarlanabilir. İlinge ve kapsama alanı kontrolü parametreleri, örneğin, iletim gücü, şebeke yoğunluk bilgisine göre belirlenebilir.

Geliştirmiş olduğumuz yoğunluk-uyarlı kapsama alanı kontrol ve iletim gücü uyarılama teknikle-

rini Bölüm 4'te sunuyoruz.

2.9 Yoğunluk-uyarlı Girişim Yönetimi

Ağ yoğunlaşması, uzamsal yeniden kullanım ve boşaltma ile daha az tıkanıklık yaparak daha yüksek kapasite sağlamaktadır. Ancak, girişim ele alınması gereken önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Yoğunluk-uyarlı girişim yönetimi, dinamik ağlarda bağlantı kapasitesini ve spektral verimliliği artıracaktır (Hong vd., 2014).

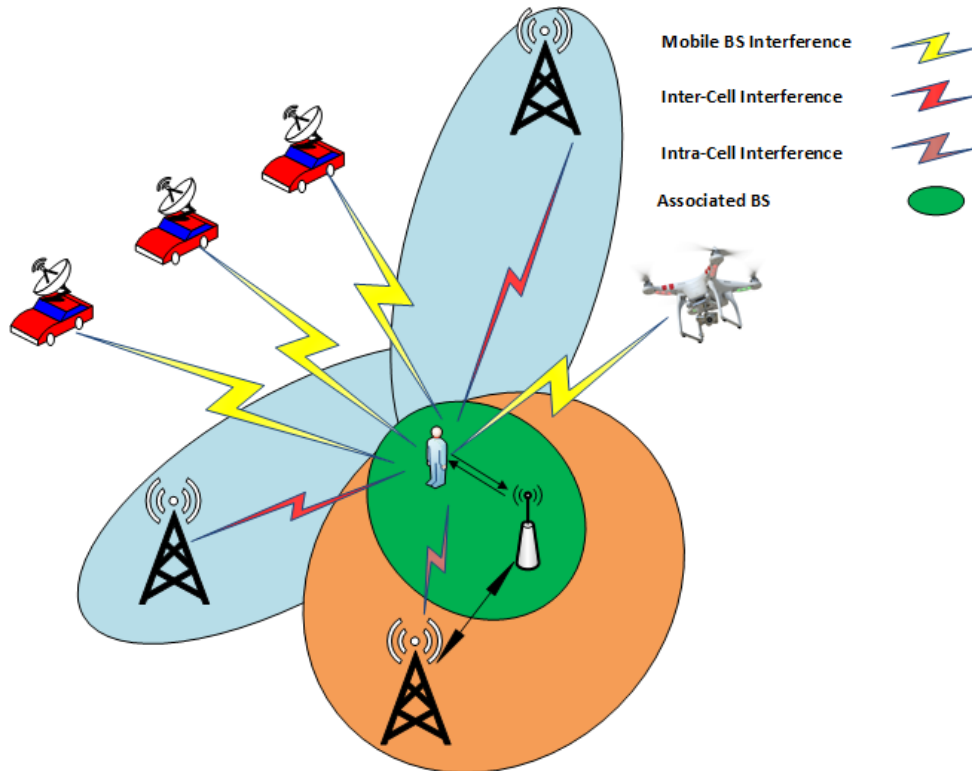
4G mobil şebekelerinde, bir kullanıcı aygıtı hücre kenarlarına yerleştirilmişse, çoklu bitişik hücrelerden sinyaller alabilir. Hücreler arası girişim çeşitli baz istasyonu tiplerinden kaynaklanabilir. Farklı kullanıcı aygıtları, Şekil 2'de gösterildiği gibi birbirini etki altına alabilirler. Göçebe veya hareketli hücrelerden de girişim yaratılacaktır. Şekil 2'de, hareketli bir hücrenin bir kullanıcı aygıtına girişim yarattığı bir senaryo sunulmaktadır. Merkezi çözümlerin kullanıldığı bir senaryoda bu tür girişime çözüm bulmak zor bir problem olarak karşımıza çıkacaktır.

Mobil operatörler girişimi üç seviyede kontrol edebilir: Radyo Erişim Ağında (RAN), RAN ve kullanıcı aygıtı arasında ve kullanıcı aygıtı içinde. Çeşitli girişim yönetimi yaklaşımları hem hücre içi hem de hücreler arası iletişim yöntemlerini kullanır. Girişim yönetimi yöntemleri aşağıdakileri içermektedir:

- dinamik ve statik güç kontrolü,
- hücrelerde kaynak boşluğuna dayalı zaman veya frekans boyutunda kaynak bölümleme teknikleri,
- dinamik ve statik fraksiyonel frekans yeniden kullanma,
- farklı bölgelerden çoklu alıcı ve verici anten kullanımı,
- huzmelemeye ek olarak uzay bölümlü çoklu erişim,
- çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO),
- ağ yükü ve çekişme temelli yöntemleri dikkate alan bazı akıllı ve fırsatçı programlama teknikleri,
- girişim engelleme teknikleri
- bulut radyo erişim şebekesi (Cloud-RAN, C-RAN): C-RAN, hücreler arası girişim sorunlarıyla mücadele edilmesini kolaylaştırır, gereksiz baz istasyonlarını kapatarak veya iletim gücünü kontrol ederek düşük gecikme süresini ve düşük güç tüketimini destekler (Soret vd., 2015).

Ağ yoğunluğu, (Feng ve Feng, 2017)'de gösterildiği gibi bir optimizasyon parametresi olarak kullanılabilir. Bu çalışmada, ağ kapasitesini arttırmak için, şebekelerdeki trafik yüküne ek olarak Poisson Noktası Süreci ve Markov Zincirine dayanan analitik modellere baz istasyonlarının yoğunluğu uygulanmaktadır. Feng ve Feng (2017) de bir ağ performansı parametresi olarak, hem kullanıcı birleşmesine hem de girişim dağılımına bağlı olan beklenen bağlantı oranını ağ yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak türetmiştir. Ayrıca BS'lerin yoğunluğu ile ağ verimliliği ve ağ girişimleri arasındaki dengeyi açıklığa kavuşturan BS'lerin yoğunluğunu temel alan ağ verimliliği ve ağ girişim modelleri önermektedirler. Yoğunlaştırma ile, BS'lerin yoğunluğu belirli bir eşik

değere ulaşana kadar ağ verimliliği artacaktır. Eşiği geçmek, girişimlerin çok miktarda artması nedeniyle verimi düşürür ve çok sayıda geçiş nedeniyle servis kesintisini artırır. Bu nedenle, yüksek bağlantı kapasitesi veya yüksek SINR, ağ için her zaman yüksek verimi garanti etmez. Baz istasyonunda bir tıkanıklık varsa, o zaman performans çok daha düşük olabilir. Bu yüzden bir kullanıcı aygıtı tam sinyal gücüne sahip olsa bile bir baz istasyonuna bağlanamayabilir. Ağ kapasitesinin en üst düzeye çıkarılması için sağlam ve optimize edilmiş bir ağ yoğunluğunun önemli bir gereklilik olduğu gösterilmektedir (Feng ve Feng, 2017). Ayrıca, femtocelller tarafından makro hücrelerin yaptığı gibi farklı veya aynı frekans bantları kullanılabilir. Bununla birlikte, eş kanallı femtocelllerin kullanılması, hücre kenarındaki kullanıcı aygıtlarının performansını azaltabilen bitişik makro hücreleri ile hücre içi etkileşime neden olur. Ayrıca, Juang vd. (2010) femtocelllerin neden olduğu uydu-yer bağı (downlink) girişimini azaltmak için uyarlanmış bir çözüm sunmaktadır; bu çözüm, telsiz kaynak tahsisi için femtocell BS yoğunluğu ve femtocell BS konum bilgisine dayanan ortogonal fraksiyonel frekanslı (FFR) kaynak atlamalı yönetiminin kullanımından yararlanmaktadır. Makro hücre yakınındaki femtocell baz istasyonlarının yoğunluğu yüksekse, femtocell baz istasyonları Juang vd. (2010) tarafından önerilen FFR yöntemi dikey alt kanalları kullanmaktadır. Femtocell BS'lerin yoğunluğu düşükse, femtocell BS'leri bir süreliğine rastgele bir alt-kanal seçmeli ve bu atlamalardan sonra diğer alt-kanallara gitmelidir, ki bu yüksek femtocell durumunda makro hücreler arası girişimi önlemek için yeterli bir çözüm değildir. Femtocell BS yoğunluğunun etkisi için yapılan analiz, girişimi başarılı bir şekilde düşürmek için, femtocell BS'lerin yoğunluğunun dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Juang vd., 2010).

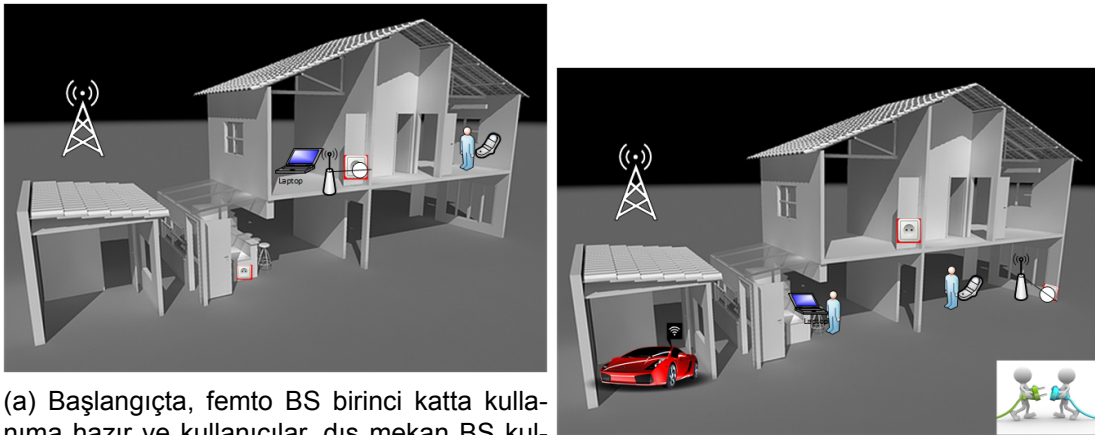


Şekil 2. Dinamik ağlarda çeşitli girişim kaynakları olacaktır. Önemli olan, gelecek ağlarda hareketli hücrelerden kaynaklanan girişim olacaktır.

2.10 Dinamik Ağlarda Fırsatlar

Küçük hücreler kullanılarak mobil ağların yoğunlaştırılmasıyla, girişim giderme ve kaçınma teknikleri uygun bir şekilde kullanıldığında daha yüksek gürültü-eklemeli-sinyal-girişim-oranları elde edilebilir (Song vd., 2017). Bununla birlikte, daha büyük bant genişliği kullanımı ve yüksek veri hızları elde etmek amacıyla sinyallerin iletilmesi, belirli bir değer için orantısız olarak yüksek SINR gerektirir. Modülasyon seviyesini arttırmak, gürültü ve girişimlere karşı sistemin dayanıklılığını azaltacaktır. Bu nedenle, sadece yüksek SINR elde edilebilecek senaryolarda modülasyon seviyesini arttırmak mümkündür. Düşük trafik seviyesine sahip bant genişliği sınırlı sistemde çalışan göçebe küçük hücreler, SINR'nin artırılması ve yüksek mertebeden modülasyonların kolaylaştırılması için yeterli olacaktır.

Eşgüdümlü çok noktalı haberleşmede (Coordinated Multi-point Communication, CoMP), BS'lerin aynı bilgileri uç terminallere iletmek için X2 arabirimi üzerinden senkronize olması gerekir. Bu durumda, hücreler arası girişim, çok yollu sönümlenme ile mücadele teknikleri kullanan terminaller tarafından kabul edilen ve işlenen üretken bir yaklaşım haline gelir (Yassin vd., 2017). Bu yaklaşımla, makro hücrelere kıyasla yayın oranları küçük hücrelerde daha fazla artmaktadır. Kanal kalitesi zaman ve frekans olarak değişebilir. Kullanıcı hareketliliğinin düşük olabildiği küçük hücrelerde, kanal kalitesi zaman içinde önemli ölçüde değişmezken frekansta dinamik bir kanal varsayılabilir. Bu durumda, farklı taşıyıcılar üzerinden kullanıcı çoğullaması, zaman alanlı kanal programlamasına kıyasla daha akıllı bir seçenektir. Fiziksel katman dinamiğine bağlı olarak, radyo bağlantısı kontrolünün, çerçevelerin bölümlendirilmesini ve birleştirilmesini desteklemesi gerekir. Bu, çapraz katman tasarımı için açık bir gerekliliktir. Programlayıcı aynı zamanda hücreler arası girişim yönetimi ile de uğraşmak zorundadır.



(a) Başlangıçta, femto BS birinci katta kullanıma hazır ve kullanıcılar, dış mekan BS kullanmak yerine, QoS'yi geliştirebilen ve enerji

(b) Ev halkı, erişim noktasını bir süreliğine kont-tasarıfı sağlayan femto BS aracılığıyla mobil rolsüz bir BS başarısızlığına neden olan zemin ağa bağlanırlar.

Şekil 3. Mobil şebeke operatörleri, bazı küçük hücrelerin dağıtım ve yaşam döngüsü üzerindeki kontrollerini kaybedebilirler. Burada, ev halkının evin içine yerleştirilmiş bir femto-hücrenin yerini değiştirebileceği bir senaryoyu gösteriyoruz.

Kablosuz sinyaller 3/4G mobil ağlarda binaların içine nüfuz ederken önemli ölçüde zayıflatılmıştır. Zayıflama, büyük ölçüde SINR'ı ve sonuçta veri hızlarını azaltır. Dış mekan dağıtımları

yerine, kapalı küçük hücreler daha düşük güç seviyelerini kullanabilir ve dış mekanda bulunan baz istasyonlarına kıyasla daha yüksek veri hızları sağlayabilir. Bu sistem enerji tüketimini azaltır, hizmet kalitesini (QoS) ve deneyimi (QoE) artırır, spektrumu verimli kullanır, ev ağı için lisanslı bantları kullanmayı kolaylaştırır, elektromanyetik radyasyon seviyesini düşürür, mobil operatör için maliyetleri en aza indirir ve her yerde bulunabilen ve aboneler için kapsama alanı sağlayan bir teknoloji haline alır. Bununla birlikte, operatörler BS dağıtımı üzerinde kontrollerini kaybederler. Örnek olarak, Şekil 3a'da gösterildiği gibi, bir evde femto baz istasyonu yerleştirilmiştir, burada femto baz istasyonunun yeri, kullanıcının kararına bağlı olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, bu dağıtım değişikliği, baz istasyonu yeni konumunda faaliyete geçtikten sonra komşu evlerde kontrol edilemez girişimlere neden olmaktadır.

Makro hücrelerde, uydu yer bağı yayın iletim güçleri, hücre sınırlarına yakın terminallere hizmet sağlayabilmek için kontrol edilmelidir. Yoğun ağlarda, yayın veri hızları, hücre sınırlarındaki terminallere olan mesafeleri azaltarak geliştirilebilir. Çok taşıyıcılı iletimde Doppler yayılması, taşıyıcılar arası girişime neden olan alt taşıyıcıların dikeyliğini tahrip edecektir. Frekans hataları ve faz gürültüsü aynı zamanda taşıyıcılar arası girişime de neden olur. Taşıyıcılar arası girişim mobil hücreler üzerinde sabit hücrelere kıyasla önemli bir etkiye sahiptir.

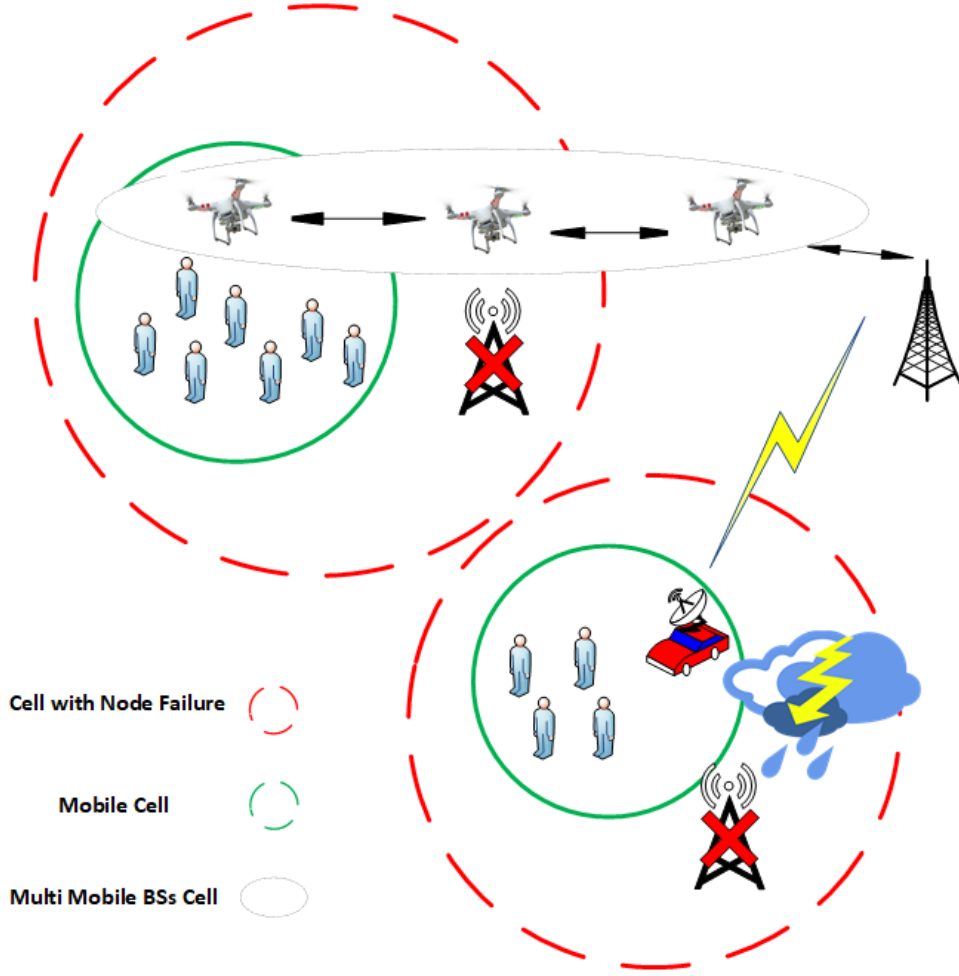
Sabit ağlarda, kapsama BS'lerin aralığı ile sınırlıdır. Her ne kadar uçangöz şebekelerinin uygulama maliyetleri, bakımı ve batarya gereksinimleri büyük bir zorluk olsa da, gelecekte ucuz donanımının kullanılabilirliği bu tür şebekelerin sağlanması için yeni bir yol sunmaktadır. Özellikle, Google'ın Sky Bender¹ ve Facebook'un İnternet uçangözünün² gelişimiyle, uçangöz küçük hücre ağları (Drone Small Cell Networks, DSCN) gelecekteki ağlarda bir çözüm olarak düşünülebilir. Düşük hesaplama gücü, hafif yük taşıma kapasitesi ve küçük ve makro BS'lerle karşılaştırıldığında BBU'nun gerekliliği olmadan, uçangöz hücrelerinin uygulanması, mobil operatörler için daha düşük bir sermaye harcaması (CAPEX) ve operasyonel harcama (OPEX) sağlayabilir. Cihazdan cihaza haberleşmenin ötesinde, baz istasyonları geçici bir ağ oluşturabilir ve iletişimin sürdürülmesi için ağ başarısızlığı durumunda Şekil 4'te gösterildiği gibi ağın çekirdeğini trafiğe çekmek için dinamik bir altyapı kurabilir ve ağdaki mobil BS'ler aracılığıyla güvenilirliği arttırabilir.

2.11 Dinamik Ağlarda Açık Araştırma Problemleri

Dinamik ağların topolojisi ve kapsamı, performansı, ağın düğüm ve bağlantı hataları altındaki kapasitesi, gecikmesi ve esnekliği açısından önemli ölçüde etkilediğinden kontrol edilmelidir. Topoloji, kontrol edilebilir birçok parametreye ve kontrol edilemeyen faktörlere bağlıdır. Engeller, çok yollu yayılma etkileri, sönümlenme ve gürültü gibi çevresel parametreler, girişim, zayıflama bağlantı kalitesini ve dolayısıyla topolojiyi etkileyen, kontrol edilemeyen faktörler olarak düşünülebilir. Bu kontrol edilemeyen faktörler, önceden tahmin edilemeyen, zaman ve uzayda değişebilen bağlar üretir. Hücre hareketliliği veya varlığı, kör noktalara veya yedek kapsamaya aralıklı olarak neden olabilen kontrol edilebilir bir parametre olabilir. İletim gücü, anten yöne-

¹<https://www.theguardian.com/technology/2016/jan/29/project-skybender-google-drone-tests-internet-spaceport-virgin-galactic>

²<https://www.theguardian.com/technology/2017/jul/02/facebook-drone-aquila-internet-test-flight-arizona>



Şekil 4. Bir mobil ağın kapsamını genişletmek için ad hoc ağ teknolojileri kullanılabilir. Mobil veya sabit BS'ler, çekirdek ağına giden trafiği geri çekmek için özel bir altyapı oluşturabilir. Bu dinamik altyapılar da talep üzerine kurulabilir; örneğin, burada örneklerle gösterdiğimiz gibi sabit bir BS başarısız olduğu zaman. Bu özellik aynı zamanda kamu güvenliği ve felaket kurtarmada kritik rol oynayabilir.

limi, eğitim veya anten sayımı, ağı yoğunluk değişimlerine uyum sağlaması için gereken şekilde ağ topolojisini değiştirmek için kullanılabilen kontrol edilebilir parametrelerdir. Topoloji ve kapsama kontrol kararları, BS'ler veya çok-erişimli kenar hesaplama (Multi-access Edge Computing, MEC) varlığı tarafından tahmin edilen yoğunluğa göre bağımsız olarak verilmelidir. MEC varlıkları, merkezi olmayan optimizasyonları kolaylaştıran BS'lere kıyasla ağ topolojisine göre daha büyük bir perspektife sahiptir.

Tek hücreli frekans yeniden kullanımında, aynı zaman frekansı kaynakları komşu hücrelerde yeniden kullanılabilir. Şebeke kapasitesini arttırmak için, operatörler, backhaul ve erişim iletişimlerini için aynı radyo teknolojisi standardının kullanıldığı entegre erişim ve backhaul (IAB) özelliğini kullanabilir (Oliva vd., 2015). Bu yaklaşım ağ dağıtımını kolaylaştırır ve spektral etkinliği artırır da, yüksek miktarda girişime bağlı olarak SINR'de büyük değişikliklere neden olabilir. Geliştirilmiş hücre içi girişim kontrolü (e-ICIC), dinamik ağlarda BS topolojisi değiştiğinden dolayı yoğunluğa uyum sağlamak zorunda olan bu soruna bir çözümdür.

Karasal olmayan ağlarda (NTN), iletim için havada veya uzaysal BS'ler kullanılır. NTN gecikmeye toleranslı ağ (DTN) protokolleri gerektirebilir. Backhauling mümkün olmadığında, mobil BS'ler çekirdek ağın işlevlerini kendileri yönetmek zorunda kalabilir. Hafif çekirdek şebeke (hafif EPC) ve DTN, tekerlekler veya kanatlar üzerindeki BS'ler için düşünülebilir.

BS'lerin hareketliliği nedeniyle, sadece kullanıcıların değil, aynı zamanda BS'lerin de izlenmesi ve konumlarının kaydedilmesi gerekmektedir. Hareket ve konuşlandırma planlaması, hareketliliğin kendi kendine kontrolü, devir yönetimi ve yeni (dinamik) konum alanı kavramları gereklidir ve açık araştırma zorlukları olarak düşünülebilirler. Kullanıcılar hareketsiz olsa bile, BS'ler hareket ettiğinde el çarkı gerekebilir. QoS'yi dinamik mobil ağlarda tutmanın ve handover'leri azaltmanın ümit verici çözümlerinden biri, UE'lerin birden fazla BS'ye bağlanabileceği sanal hücreler gibi kullanıcı merkezli bir mekanizma kullanmasıdır (Zhang vd., 2018). Yoğun dağıtımlarda, UE'ler aynı anda birden fazla baz istasyonuna bağlanabilir ve çift bağlantı, eş-zamanlı çok yollu aktarım veya çoklu besleme mümkün olabilir.

Ayrıca, altyapı dinamik hale geldiğinden, konum alanı planlaması artık durağan olamaz. Dahası, BS'lerin hareketliliği göz önüne alındığında, hücre yayılımı dinamik olarak BS'lerin hareketi ile değişeceğinden, mevcut girişim yönetimi modellerini etkileyebilecek zaman ve mekanda BS'lerin yoğunluğu değişecektir. Bu nedenle, aynı girişim kanalı aralığına sahip hücre kümesi sürekli olarak değiştirilecektir. Bu ağlarda, kanal yeniden kullanımının dinamikliği yüksektir ve mevcut girişim yönetimi modelleri tarafından ele alınamaz. Bu nedenle, mobil BS'lere sahip dinamik ağlar için uyarlamalı girişim yönetimi ve kaynak tahsisi modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Dinamik ağlarda gecikme göz önüne alınmalıdır. Örneğin, keşif gibi gecikmeye duyarlı uygulamalarda, paketlerin belirli bir sınır içinde teslim edilmesi gerekir. Kapsam sağlamak için birden fazla mobil BS (drone BS'ler gibi) birlikte kullanıldığında, bu BS'ler arasında iletişim gecikmesi, aralarında herhangi bir çarpışmayı önlemek için düşük olmalıdır. Ancak, hareketli tasarsız ağlar (MANET) için geliştirilen mevcut protokoller BS'lerin uçan tasarsız ağlara (FANET) uygulanmayabilir. Mobil BS'lere mevcut bant genişliğini tahsis ederken backhaul için dikkate almamız gereken bazı önemli zorluklar vardır. Örneğin, BS'lerin hareketliliği nedeniyle düğüm hataları ve dinamik topoloji, ulaşılan uçtan uca kapasiteyi etkileyecektir.

Mobil BS'ler dikkate alındığında, kanal modelleri gözden geçirilmelidir. Kanatlı hücreler için, havadan-yere, yerden havaya ve havadan havaya kanallar incelenmeli ve modellenmelidir. Hareket kabiliyeti, yeryüzünden yansımalar (drone hücreleri için), drone davranışının varyasyonları, rakımda hava koşullarındaki değişiklikler, çevresel gürültü, diğer BS'lerden üç boyutta (muhtemelen dördüncü boyut olan zaman dahil olmak üzere) parazit ve saldırganlar tarafından sıkışma nedeniyle kanal kapasitesi dinamik olacaktır. Bütün bu ek kısıtlamalar, BS'lerin geçici ağlarının kanal modellemesinde dikkate alınmalıdır. Yakınlaştırılmış erişim/ana taşıyıcı kablolu bağlantıları ve 6 GHz'nin üzerinde çalışma olasılığı göz önüne alındığında, kanal modelleme açık bir araştırma zorluğu olarak düşünülebilir. Mobil BS'lerin yardımıyla, röle BS'leri için büyük bir potansiyel var. Bant içi (yakınlaştırılmış erişim/ana taşıyıcı) veya bant dışı (radyo linkleri) aktarma kullanılabilir. Bu yaklaşımlar arasındaki dengeler değerlendirilmelidir.

Dinamik ağlar için anten tasarımı başka bir zorluktur. Çok yönlü antenler kullanıldığında mobilite

Tablo 2. Dinamik mobil ağların ve bu zorlukların üstesinden gelmek için kullanılabilecek mevcut bazı uygun teknolojilerin zorlukları.

Zorluklar	Olası Çözümler
Her yerde kapsama	Hareketli Hücreler, ağ yoğunluğu, cihazdan cihaza haberleşme (D2D), röle, tasarsız ağlar (MANET, FANET), Karasal olmayan ağlar (NTN)
Ölçeklenebilirlik	Yönetim ve kaynak dağıtımı, ağ işlevi sanallaştırması (NFV), yazılım tanımlı ağ (SDN), C-RAN, NTN dağıtımı
Hizmet kalitesi	Küçük hücreler, kullanıcı düzleminde çoklu hedefleme, yoğunlaştırma, uçta hesaplama (MEC), sis hesaplama, mMIMO, D2D, entegre erişim ve destek (IAB)
Girişim yönetimi	MEC, yoğunluk farkında protokoller
Hareketlilik yönetimi	Mobil hücreler, MEC, hafif evrimleşen paket çekirdeği (hafif EPC), hareket ve dağıtım planlaması, gecikme toleranslı ağ (DTN), sanal hücre tarafından çok hareketli,
Hücrelerin hareketlilik yönetimi	Hareketliliği yönetmek, rota planlaması ve enerji (pil) yönetimi için yeni işlevler gerektirir.
Düşük gecikme süresi	Dağıtılmış ve işbirliğine dayalı önbellekleme, D2D, mobil hücreler
Anten tipi seçimi	Uygulamaya dayalı Yönlü, Çok Yönlü, MIMO
Enerji verimliliği	Küçük hücreler, MEC, kullanıcı kontrollü baz istasyonları, uyku zaman planlaması, hücre yakınlaştırma
Sınırlı işlem kaynağı	Bulut-RAN, Uçta Hesaplama (MEC), CoMP, taşıyıcı birleşimi
Dinamik altyapı yönetimi	SDN ve NFV, dilimleme, orkestrasyon, kendi kendini organize eden fonksiyonlar, yoğunluk ve dinamik farkında protokoller, MEC
Dinamik (bant- içi) backhaul	Mobil veya göçebe hücreler, mMIMO

yönetimi ve komşu keşfi daha kolay olsa da, enerji boşa harcanabilir. Yönlü antenler kullanıldığında, enerji korunabilir veya kapsama genişletilebilir. BS'lerin geçici ağları için yönlü çalışma, yönlü antenlerle karşılaştırıldığında mekansal yeniden kullanımını artırır. Ayrıca, yönlü iletişim anten kazancı sayesinde atlama sayısını azaltabilir ve uçtan uca gecikmeyi azaltabilir.

Artan multimedya hizmetlerinin muazzam hızı nedeniyle, uçtan uca gecikmeyi azaltmak ve kıl bant genişliğini verimli bir şekilde kullanmak için önbellek gerekebilir. Bu amaca ulaşmak için, ağ operatörleri ara ağ elemanlarında içerik önbellekleme kullanır. Dinamik ağlarda önbellek yeri çok önemlidir. Ağ kenarlarına ve kullanıcılarına yakın içeriği önbelleğe alarak gecikme önemli ölçüde azaltılabilir (Wang vd., 2014). Buradaki zorluk, çeşitliliği, tazeliği, verilerin önceliğini ve dinamik bir ağdaki konumlarını göz önünde bulundurarak verileri önbelleğe almaktır.

Uçtan uca dilimleme, mevcut yaklaşımlardan daha karmaşık olacağı için sınırlı spektral kaynaklar ve bunların paylaşımı, gelecekteki ağların önemli zorluklarıdır. C-RAN, bir havuzdaki temel bant birimlerinin işlem kaynaklarını, yazılım tanımlı ağ iletişimi (SDN) ve ağ işlevi sanallaştırma (NFV) teknolojileri yardımı ile birleştirir (Kitindi vd., 2017). C-RAN, geleneksel BS'lerde mümkün olmayan kaynakların paylaşılmasını sağlar ve parazit yönetimini arttırmak ve güç tüketimini azaltmak için ağ koşullarını dikkate alarak radyo kaynak başlarını (RRH) dinamik olarak tah-

sis edebilir. C-RAN'lar, ortak kaynak kullanımını geliştirmek için CoMP ve taşıyıcı birleştirme işlemini de kolaylaştırır.

Kendi kendini organize eden ağlar (SON'ler), BS'lerin kendilerini ağ durumuna uyarlamalarını sağlayan enerji verimliliği (EE), kapsama alanı ve kapasite optimizasyonu (CCO), hareket yükü dengeleme (MLB) gibi birçok işleve sahiptir. Bununla birlikte, BS'lerin yoğunluğu dikkate alınmazsa, bu işlevler birbirleriyle çakışabilir. Örneğin, BS'lerin yoğunluğunu dikkate almadan EE'yi artırarak, ağdaki SE'nin azalması nedeniyle CCO işlevselliği olumsuz yönde etkilenebilir. SE'yi maksimum seviyesine yükseltmek için BS'lerin yoğunluğunun optimize edilmesi gerekir (Liu vd., 2017). Bu nedenle, BSE EE ve CCO yoğunluğunun optimize edilmesi eş-zamanlı olarak geliştirilebilir. Bir SON'da iletim gücünü kontrol etmek için enerji verimli bir mekanizma BS'lerin yoğunluğu göz önünde bulundurularak, (Björnson vd., 2016)'da sunulmuştur. SON işlevlerinde BS'lerin yoğunluğunu kullanarak, olası çatışmalar nlenebilir.

2.12 Sonuç

Tablo 2'de açık araştırma problemlerini ve olası çözümleri özetliyoruz. Uçangöz hücreleri gibi hareketli baz istasyonlarının icat edilmesiyle, sadece kullanıcının cihazlarının değil, aynı zamanda ağın altyapısındaki elemanlar da pek çok yeni ve ele alınmamış zorlukları ortaya çıkararak hareketli hale gelmiştir. Esnek ve yoğunluğa uyarlanabilir bir mobil iletişim mimarisi gereklidir. Bununla birlikte, gelecek nesil ağlarda kendi kendini organize eden, uyarlanabilir ve esnek bir ağ oluşturma mimarisine ulaşma hedefi kapsamında büyük bir araştırma açığı bulunmaktadır. Bu çalışmada, mobil iletişimdeki paradigma değişimlerini ve bunların sonuçlarını sunarak bu alandaki zorluklar ve olası çözüm yöntemlerini tartıştık. Mevcut mimariler sunulan paradigma değişikliklerini karşılayabilmek için ciddi kısıtlamalara ve eksikliklere sahiptir. Bu bölümde, yoğunluğun ağ performansına olan etkisinin nitel ve nicel bir analizini sunarak, yoğunluk-farkında ve yoğunluk-uyarlı ağların genel bir literatür özetini verdik. Bulgu bazlı ayrıntılı literatür taramalarını Bölüm 4'te sunacağız.

3 GEREÇ VE YÖNTEM

Proje kapsamında beklenen çıktıların doğrulanması için kurulan WINS 4/5G sinama ortamında çalışmalar doktora ve yüksek lisans tezleri olarak devam etmektedir. Bölüm 4'te sunduğumuz bulguların doğrulanması ve geçerlenmesi için kullanılan yöntemler her bir bulgu için farklı olduğundan, bulgulara ait spesifik yöntemler Bölüm 4'te her bir bulgu için ayrı ayrı sunulmaktadır.

Bölüm 3.1'de, projede kapsamında kurulmuş olan WINS 4/5G sinama ortamı sunulacaktır. Bu sinama ortamını kurmadan önce literatürde var olan simülasyon ve sinama ortamlarının özelliklerini araştırmış ve bir kitap bölümü (Mollahasani vd., 2017) yayınlamıştık. Bu kitap bölümünün kısa bir özeti olarak Bölüm 3.2'de, birleşmiş platformlar, simülatörler, projeler ve sinama ortamları gibi mevcut 4/5G çözümleri gözden geçirilmiştir. Esneklik, heterojenlik, deneylerin tekrarlanabilirliği, açık kaynak desteği gibi yaklaşımlar tartışılmıştır. Mevcut 5G simülatörleri, öğrenmenin zorluğu, geliştirme dili, açık kaynak desteği, grafiksel kullanıcı arabirim desteği, emülasyon desteği, simülatör desteği ve esneklik, kapasite ve spektrum gibi özellikler göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Mevcut projeler, sinama ortamları donanım (USRP cihazları, FPGA platformları, eNodeB'ler ve OpenFlow anahtarları gibi) ve yazılım (açık kaynaklı yazılımlar, SDR ve MIMO uygulamaları, OpenLTE, Open AirInterface gibi) bileşenleri ile sunulmuştur. Sinama ortamları hareketlilik modelleme desteği, kapsama alanı, sinama ortamının büyüklüğü, açık kaynaklı yazılım desteği, heterojenlik, protokoller, uygulamalar ve desteklenen spektrum ölçeklerinde karşılaştırılmıştır.

3.1 WINS 4/5G Test Ortamı

DAWN kontrollü sinama ortamı iki ayrı test ortamından oluşmaktadır. Bunlardan ilki 5G teknolojisi üzerinde çalışmalar yapma imkânı sağlamaktadır. Aynı zamanda bu sinama ortamı ticari olarak satılan cep telefonları (User Equipment, UE) ile çalışabilmekte ve bu sistemler üzerinde geliştirilen yeni teknolojilerin test edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

DAWN kontrollü sinama ortamı, 5G çalışmalarının yanında Yazılım-tanımlı Radyo (Software Defined Radio, SDR) uygulamalarını da desteklemektedir. Sinama ortamının kapasitesini ve kapsamını artırmak amacıyla birden fazla SDR cihazı temin edilip sisteme dahil edilmiştir.

5G Test ortamı, Open Air Interface (<http://www.openairinterface.org>) açık kaynaklı projesinin çalıştırılması ve bu proje üzerinde gerekli değişikliğin yapılmasıyla operatör kurulumu içermektedir. Bu test ortamı LTE Bant 7'de çalışmak üzere kurulmuştur.

Frekans aralıkları lisansa tabi olduğu için bu aşamada Bilişim Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) ile görüşmeler gerçekleşmiştir ve gerekli lisanslar alınmıştır. Test ortamı kurulumu birkaç bölümden oluşmaktadır. Bu aşamalar şu şekilde sıralanmaktadır:

- İşlem Merkezi Kurulumu (Sanal Makina Kurulumları, Ağ Bağlantılarının Kurulması)
- Operatör Çekirdek Kurulumu, EPC (Evolved Packet Core)
- USRP B210 Kullanılarak Baz İstasyonu (eNodeB) Kurulumu

- USRP X310 Kullanılarak Baz İstasyonu (eNodeB) Kurulumu
- SIM Kart Kullanımı

3.1.1 İşlem Merkezi Kurulumu

İşlem merkezinin kurulumu için sunucu alınmış ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü içerisinde bir sunucu odası kurulmuştur. Bu sunucunun içerisinde EPC ve eNodeB çalıştırmak üzere sanal makineler kurulmuştur. Bu sanal makinelere dışarıdan erişim sağlamak için gerekli ağ kurulumları yapılmıştır. Ayrıca kurulan laboratuvar içerisinde de bağlantı sağlanabilmektedir. Cep telefonunun kurulan baz istasyonu üzerinden İnternet'e çıkarılabilmesi için ağ paket büyüklüklerinin 1500 Byte'den 1600 Byte yapılması gerekmektedir. Bu sebeple sanal makinelerin MTU ayarları 1600 Byte olarak ayarlanmıştır.

3.1.2 Operatör Çekirdek Şebeke Yazılımlarının Kurulumu

Operatör Çekirdeği; MME (Mobility Management Entity), SGW (Serving Gateway), PGW (Packet Gateway) ve HSS (Home Subscriber Server)'den oluşmaktadır. İşlem merkezinde kurulan sanal makinalardan birine MME, SGW, PGW ve HSS kurulumları yapılmıştır. Ayrıca HSS'in kullanıcı bağlantısını kontrol edebileceği veri tabanları da kurulmuştur. Yapılan ayarlar sonucunda, sanal makineye atanan IP ile MME bağlantısı sağlanabilmektedir.

3.1.3 Baz İstasyonu (eNodeB) Kurulumu, USRP B210

Kurulan her baz istasyonu bir operatör çekirdeğine bağlanması gerekmektedir. Bu nedenle laboratuvarında kurulan operatör çekirdeği dışarıdan bağlanmaya olanak sağlamaktadır ve ilk baz istasyonu laboratuvar ağına dahil olan bir bilgisayarda kurulmuştur. Kullanılan frekans aralığı lisansa tabi olduğundan BTK'dan özel izin alınmış olup LTE Bant 7'de çalışılmaktadır. Baz istasyonunun daha önceden kurulan operatör çekirdeğine bağlanması için IP ayarları yapılmıştır. Bu aşamada baz istasyonunun yeterli bağlantı hızına ulaşabilmesi için USB 3.0 olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Gerekli bağlantı ayarları ve kod üzerinde düzenlemeler yapıldıktan sonra, MME kayıtlarına bakıldığında baz istasyonunun başarılı bir şekilde bağlandığı görülmektedir.

3.1.4 Baz İstasyonu (eNodeB) Kurulumu, USRP X310

USRP X310 kullanarak baz istasyonu kurma aşamaları B210 için uygulanan aşamalara benzerdir. Farklı olarak burada ayrı bir bilgisayar kullanmak yerine işlem merkezinde açılan sanal makinelerden birinin kullanılmasıdır. Kurulan sanal makinenin USRP'ye ulaşması USB üzerinden mümkün olmadığı için USRP X310 'un Ethernet desteğinden faydalanılmaktadır. İlk

aşamada USRP X310'un aygıt yazılımı işlem merkezinin IP aralığına göre düzenlenmiş ve üzerinde hazır gelen adaptör ile ağı dahil edilmiştir. USRP X310 10 Gbit ve 1 Gbit olmak üzere iki çeşit hat desteklemektedir. Cihazla birlikte gelen Ethernet desteği sağlayan SFP+ adaptör 1 Gbit desteklemektedir. Karşılaştığımız sorun burada ortaya çıkmaktadır. Çözüm olarak ise SFP+ adaptör 10 Gbit olanı ile değiştirilmelidir. Bunun için gerekli tedarik yapılmış ve sistem kurulmuştur.

3.1.5 SIM Kart Kullanımı

Baz istasyonu ve operatör çekirdeğinin kurulumundan sonra tüm bu sistemlerin üzerinde çalışacak SIM kart bastırılması gerekmektedir. Bu amaçla Sysmocom'dan test parametreleri ile 10 adet SIM kart satın alınmıştır. Sonraki aşamada bu SIM kart bilgileri HSS'e ait veri tabanına işlenmiştir. SIM kart bilgileri IMSI, Ki ve OPC den oluşmaktadır. Kurduğumuz sistem yalnızca veri akışına izin verdiği için IMEI gibi bilgilere ihtiyaç duymamaktayız. Ayrıca HSS veri tabanına erişim noktası adı ve SIM kart IMSI bilgisi de girilmelidir. Son aşama, cep telefonu LTE kullanılmaya zorlanmalı ve erişim noktası girildiğinde İnternet çıkışı sağlandığı görülmektedir.

3.1.6 SDR Uygulamaları Test Ortamı

SDR uygulamaları test ortamı, 8 tane bilgisayar ve bu bilgisayarlara bağlı USRP B210'lar ve BladeRF'lerden oluşmaktadır. Laboratuvara erişimi olan herkes bu bilgisayarlar üzerinde radyo uygulamaları geliştirebilmektedir.

3.2 5G Simülatörleri, Sınama Ortamları ve Prototipleri

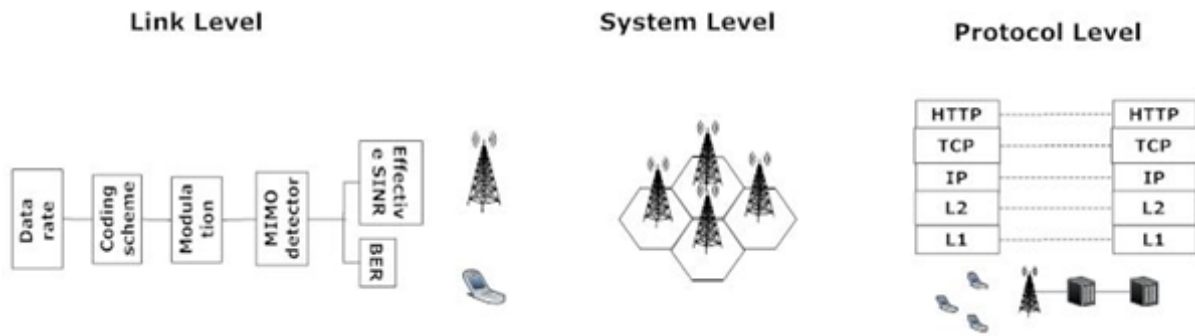
Önceki bölümde sunduğumuz sınama ortamı kurulumunu gerçekleştirmeden önce literatürde var olan benzetim (simülasyon) araçlarını ve sınama ortamlarını (test bed) inceledik. Bu bölümde incelediğimiz yaklaşımların bir özetini sunuyoruz. Bölüm 3.2.1, yaygın olarak kullanılan simülatörleri ve emülatörleri ele almaktadır. Simülatörler şu alanlarda karşılaştırılmaktadır: öğrenme zorluğu, geliştirme dili, açık kanak desteği, arayüz desteği, emülatör desteği, simülatör türü, esneklik, kapasite ve frekans spektrumu gibi diğer temel özellikler. Bölüm 3.2.3'te, mobil ağ sınama ortamları hareketlilik desteği, heterojenlik, kapsama alanı, büyüklük, desteklediği protokoller ve uygulamalar gibi konularda karşılaştırılmakta ve incelenmektedir. Sınama ortamlarına sistematik ve mimari bir bakış açısı sağlanmaktadır.

3.2.1 5G Simülatörleri ve Emülatörleri

Literatürde birçok farklı 5G simülasyon projesi mevcuttur (Redana vd., 2015; Keysight, 2016). Bu bölümde, NORMA (Çoklu servis adaptif ağ mimarisi), SystemVue, NYU (New York üniversitesi kablosuz 5G simülatörü), elektromanyetik yayılım yazılımı (EM), OpenAirInterface ve C-

RAN (bulut radyo erişim ağı) gibi bilinen bazı 5G simülasyon projeleri incelenmiştir. Bu bölümün sonunda simülatörler farklı yönleriyle birbiriyle karşılaştırılmaktadır.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, mobil ağ simülasyon ortamı; bağlantı seviyesinde, sistem seviyesinde ve protokol seviyesinde olmak üzere üç farklı yaklaşım ile geliştirilebilir. Bağlantı seviyesindeki simülatörler kablosuz kanalları simüle etmek için kullanılır ve genellikle çok hücreli senaryolar karmaşık yapıya sahip olduğu için içerisinde tek hücre bulunan senaryolara uygulanır. Bu tür simülatörlerde diğer hücrelerin etkileri göz ardı edilmelidir. Gürültü ve sönümlenme etkisi göz önünde bulundurulabilir. Sistem seviyesindeki simülasyonlar kapsama alanını, ağ dağıtımını ve güç kontrolü gibi sistem işlevlerini analiz etmek için kullanılır (Mohr vd., 2009). Bu simülasyonlar ayrıca mekansal işleme tekniklerini derinlemesine simüle etmek için uygundur. Sistem düzeyindeki simülatörlerde simülasyon zamanı mili-saniye mertebesinde gerçekleşmektedir. Protokol seviyesindeki simülatörler ise çok hücreli ve çok kullanıcıları şebekeleri 3. katman ve üzerinde analiz edebilmektedir (Mohr vd., 2009). Çeşitli protokoller bu tür simülasyonlarla modellenmektedir. Üst katmanların tepki süresi uzun olması nedeniyle simülasyon süresi dakikalara kadar çıkabilmektedir.



Şekil 5. Simülatör çeşitleri.

Var olan sinama ortamlarını kullanmak yerine simülasyon ortamı kullanmanın, sistemi derlemeye ihtiyaç duymadan analiz etme gibi avantajları mevcut. Bir deneyin maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Belirli donanım ihtiyaçlarını göz ardı edersek, simülatörler devreye girdiğinde deney maliyeti düşürülmektedir. Araştırmacılar her ne kadar simülasyonlarda çok önemli sonuçlar elde etse de pratikte beklenmedik şeylerle karşılaşabilirler. Bunun yanında gerçek modeli yorumlamanın ve değerlendirmenin, her zaman simüle edilmiş versiyon kadar kolay olmaması önemli bir noktadır.

İlerleyen başlıklarda 5G simülatörleri ve simülasyon platformları anlatılmakta ve özellikleri tartışılmaktadır. Var olan simülatörlere genel bakış açısı sunulmakla beraber birbirleri arasında kıyaslanmaktadır.

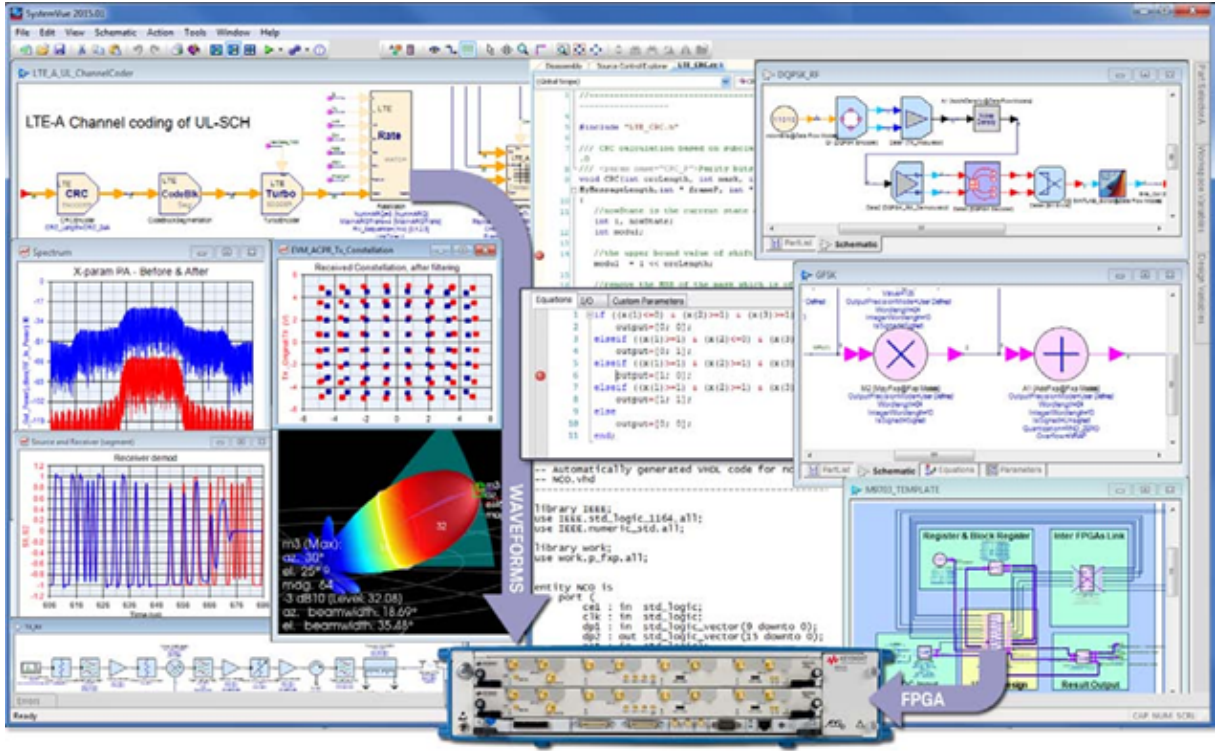
Norma NORMA, H2020 (Avrupa Ufuk 2020) projesi olarak, NOvel MObile Radio (NOMOR™) tarafından üretilen sistem seviyesinde bir simülatördür. NORMA gerçek zamanlı ağ simülatör platformu (RealNeS) üzerine bir simülatör olarak geliştirdi. Bu simülatörde, geliştiriciler, heterojen ağlarda kullanılabilen makro, piko ve femto hücreler gibi farklı mimarileri kullanabilmektedir.

NORMA'daki baz istasyonları esnek bir şekilde tasarlanabilir ve bu sayede araştırmacılar adaptif ağlar üzerinde çalışabilir. Bu simülatörde çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) gibi farklı tipte alıcı-verici kullanılması da mümkündür. Ayrıca NORMA, sönümlenme, güç kaybı ve kullanıcı hareketliliği sunarak kanal modelinin doğruluğunu artırır. Farklı tip parametreler kullanılarak huzme oluşturma, üç boyutlu anten modelleri gibi antenler eklenebilmektedir. NORMA'nın paralel hesaplama mimarisi sayesinde, işlemler oldukça yüksek hızda işlenebilmektedir.

SYSTEMVUE™ ESL Yazılımı SystemVue (Keysight, 2016) simülasyonu ağırlıklı olarak elektronik sistem seviyesinde (ESL) tasarım yaparak kablosuz haberleşme sistemlerinin fiziksel katmanını tasarlamayı sağlamaktadır. SystemVue platformu, dijital ve analog sistemler için genel amaçlı bir ortam olarak kullanılabilir. 2015.01 sürümünden sonra 5G sistemlerini de destekler ve referans kütüphaneleri MATLAB ile doğrudan entegre edilmiş durumdadır. SystemVue'da, temel bant tasarımcıları radyo frekansını (RF) sanallaştırabilir. Çoklu thread yöntemiyle geliştirilen yüksek sayıdaki iletişim yönelimli matematiksel fonksiyonları desteklemektedir. SystemVue'da karmaşık topoloji geliştirilmesine izin verilen gelişmiş programlayıcının yanı sıra, geliştiricilere ayrıca TCP/IP veri akış aracılığıyla ekipman tasarlama imkanı sağlamaktadır. Son olarak, SystemVue doğrulama prosedürünü hızlandırmak için model tabanlı tasarımların gerçek dünya sistemlerine entegrasyonunu kolaylaştırır. Şekil 6'da gösterilen SystemVue'un simülasyon ortamı, aynı anda sistemleri tasarlama ve simüle etme yeteneği göstermektedir.

Keysight Technologies, aktif elektronik taranan dizi (AESA) platformlarını analiz etmek, mesafeyi artırmak, paraziti ve güç tüketimini azaltmak için dinamik ve hassas sistem seviyesindeki bir simülatör olarak kullanılmak üzere SystemVue için yazılım modülü olan faz dizilimli huzmelenme geliştirilmiştir. Bu sayede sistem tasarımcıları ve geliştiriciler huzme şekillendirme algoritmaları üzerinde çalışabilmektedir. Bu yazılımı kullanarak, dijital ve melez huzme mimarilerinde 5G ağlarının performans düşüşü tahmin edilebilir. AESA sistemleri kullanılarak, mimariler 5G uygulamalarında 256 öğeye kadar erişebilir. Sistem geliştiricileri, masrafları ve SystemVue, MATLAB ve radyo araçlarının entegrasyonu sayesinde karmaşıklığı azaltabilen temel bant modellerinin performansını analiz edebilir. Bu yazılım, SystemVue ve araçlarını kullanan tasarımcıların adaptif huzme algoritmalarını ve çok işlevli dizileri kolaylıkla simüle etmeye yarayan bir eklenti modülüdür.

NYU Kablosuz 5G m-WAVE Araştırmacıların üç boyutlu mekansal kanal modeli verilerinin kullanılmasına imkan veren ilk açık kaynaklı simülatörlerden biri NYU'nun kablosuz simülatörüdür. Bu simülatörün temelleri 2011 ve 2014 yıllarında milimetrik dalgalar (mmWave) üzerinde yapılan deneylere dayanmaktadır. Araştırmacılar dış mekan senaryolarından elde edilen milimetrik dalgaların spektrumunun davranışlarını ve potansiyelini analiz edebilir. Veri tabanı 4 yıl içinde doldurulmuş ve istatistikler New York, Austin ve Texas'ta toplanmıştır. Araştırmacılar bu simülatörde, 2 ila 73 GHz arasında değişen frekansları kullanabilirler (Samimi ve Rappaport, 2016). Ayrıca çok yollu yayılımının modellenmesini de kolaylaştırmaktadır. Bir başka özelliği ise; araştırmacılar, alıcı tarafındaki sinyal iletim esnasında farklı gecikmelerde ve güçlerde oluşan kopyaların sebep olduğu gecikmeyi hesaplayabilirler. İlerleyen zamanlarda akıllı antenlerin



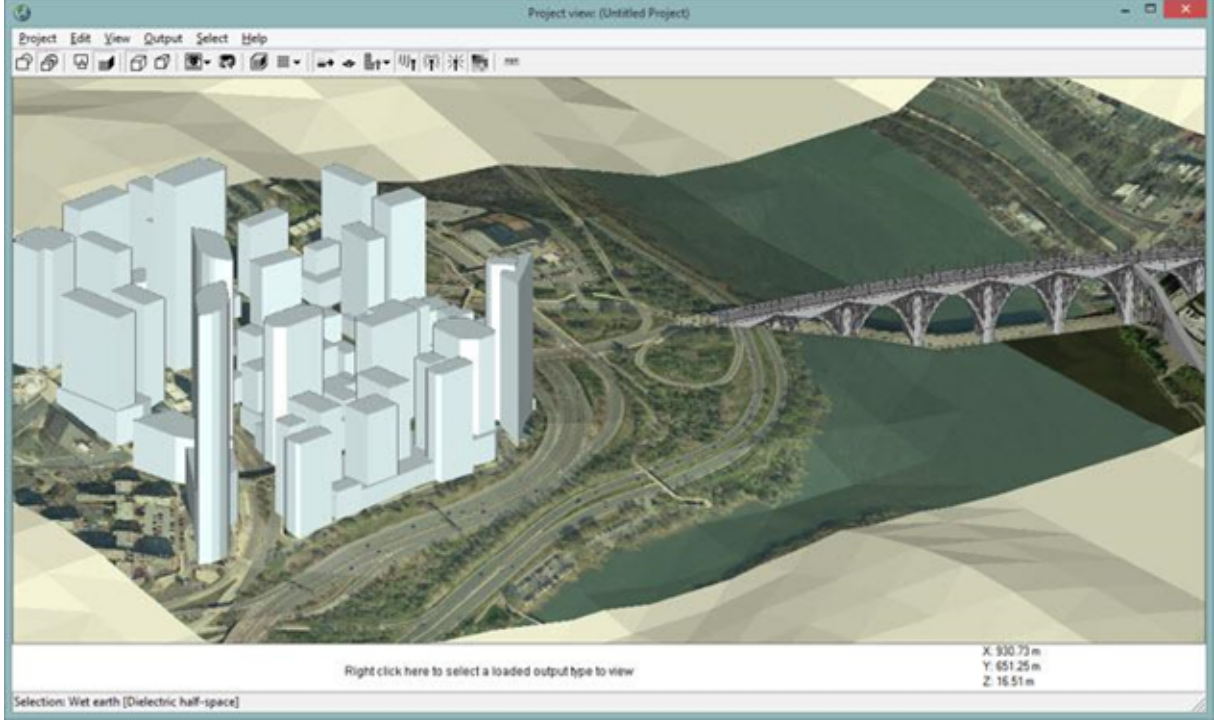
Şekil 6. SystemVue simülasyon ortamı (Keysight, 2016).

ön plana çıkmasıyla sinyal gücünü artırmak için en uygun varış ve kalkış açısı anten tarafından hesaplanabilmektedir. Bu sebeple alınan güç seviyesi ve sinyalin geliş açısı (AoA) gibi özellikler de desteklenmektedir. Dahası, istatistiksel kanal modeli ve simülasyon kodları MATLAB’da da desteklenmiştir.

Kablosuz EM Yayılım Yazılımı Remcom, yakın zamanlarda kablosuz kanalların ve radyo sistemlerinin analizi için kullanılan elektromanyetik (EM) yayılım yazılımını, Wireless InSite™ (Remcom, 2016), kullanarak yenilikçi bir MIMO simülatörleri üzerinde çalışmaktadır. Bu yazılımı kullanarak, araştırmacılar EM yayılımını doğru ve verimli şekilde tahmin edebilecek; iç mekan, kentsel ve kırsal alan gibi farklı ortamların iletişim kanallarını modelleyebilecekler. Remcom, 3 boyutlu yapılarla 5G kanal modellerini ve MIMO desteği verebilmektedir. Rosslyn’in açık alan kitlesel MIMO senaryosunun uygulanma esnasındaki kullanıcı arayüzü Şekil 7’de gösterilmektedir.

NS-3 5G mmWAVE Simülatörü NS-3 açık kaynaklı bir simülatördür. Son zamanlarda 5G milimetrik dalga modülü de NS-3 bünyesine dahil edildi (Dutta vd., 2015). Bu modüller 5G kanalları, fiziksel katmanı ve milimetrik dalgaların MAC katmanını modelleyebilmektedir. Modüller C++ programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Bu simülatörün genel özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Özelleştirilebilir zaman bölmeli duplex (TDD) yapısına sahiptir.
- MIMO’nun yanında küçük ölçekli ve büyük ölçekli kanallar modellenebilir.



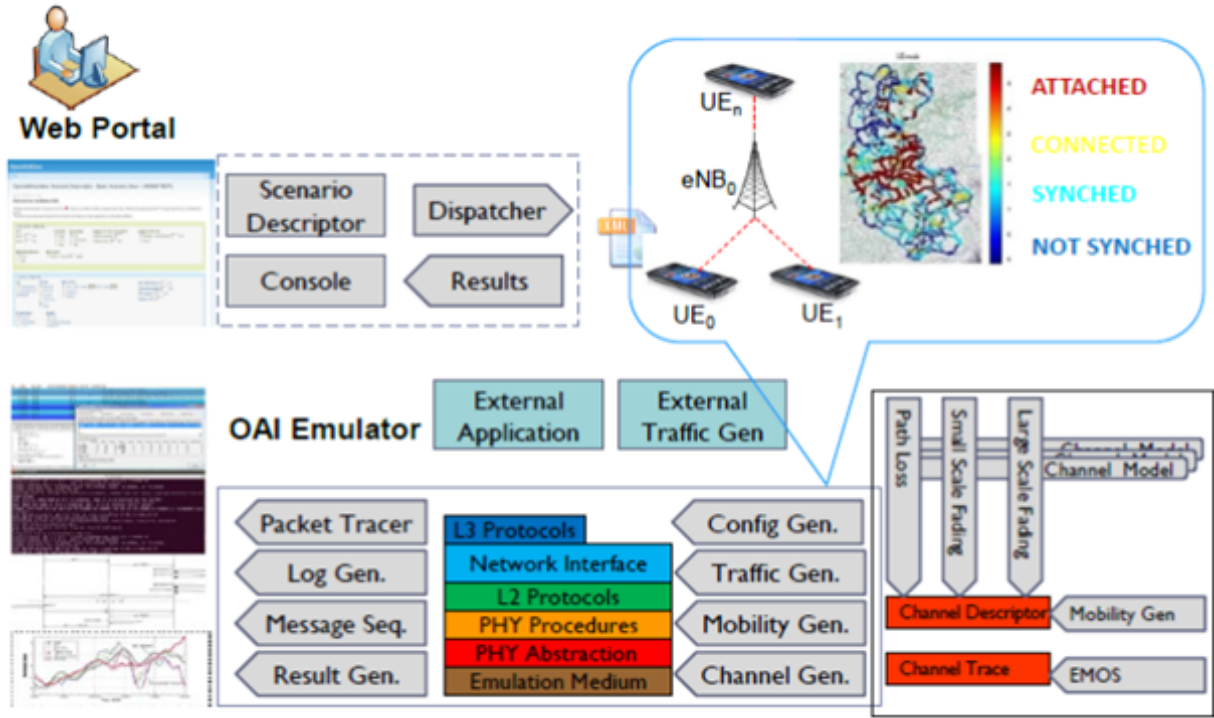
Şekil 7. Wireless Insite'in kullanıcı arayüzü (Remcom, 2016).

- Gereksiz paket tekrarlarını önlemek için hata tespit mekanizması mevcuttur.
- Geri besleme mekanizması ile yeniden tasarlanan kanal modeli sayesinde daha güvenilir bir iletişim sağlanabilmektedir.

Bu simülatör tüm araştırmacılar için kullanıma açıktır. Bu simülatör 5G ağlarının fiziksel katmanını analiz ve mmWave cihazlarını geliştirmek için özelleştirilebilir.

OpenAirInterface 5G Yazılımı OpenAirInterface Software Alliance (OSA) kar amacı gütmeyen bir konsorsiyumdur. OSA çekirdek şebeke (EPC), evrimsel evrensel karasal radyo erişim şebekesi (EUTRAN) ve 3GPP için açık kaynaklı yazılım ve donanım geliştirmektedir. Kablo-suz erişim teknolojilerinin davranışlarını gerçek yaşam verileriyle doğrulamak ve analiz etmek için, mevcut ve gelecekteki ağlara yönelik bir yazılım platformu sunar. Bulut radyo erişim ağları (C-RAN), yazılım ağları ve MIMO bu yazılım platform kullanılarak çalışılabilir. Bu platformda, 3GPP standartlarına uygun kullanıcı ekipmanı (UE) ve NodeB protokolleri geliştirilmektedir. Bu platformda her bir cihaz kendi adresine sahip olup, iletişim bu adres üzerinden yapılmaktadır. Ayrıca, bu emülatör, yol kaybı ve sönmülenme gibi kanal özelliklerini göz önünde bulundurarak 3GPP kanal modellerini desteklemektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, bu platform büyük ölçekli deneylere odaklanır. Ayrıca entegrasyon, performans değerlendirmesi ve gerçekçi sistemler test etmek için kullanılabilir. Çok çeşitli gerçek yaşam test şartlarıyla tüm protokol yığını kontrolü şeklinde çalıştırmak da mümkündür.

Bulut Radyo-Erişim Ağı Simülatörü C-RAN'ın geleneksel radyo erişim ağlarına (RAN) göre avantajları, kaynakların ve girişimin merkezi yönetimi, sistem çıkışını artırmak ve enerji tüke-



Şekil 8. OpenAirInterface ile deneysel fırsatlar (Marina vd., 2014).

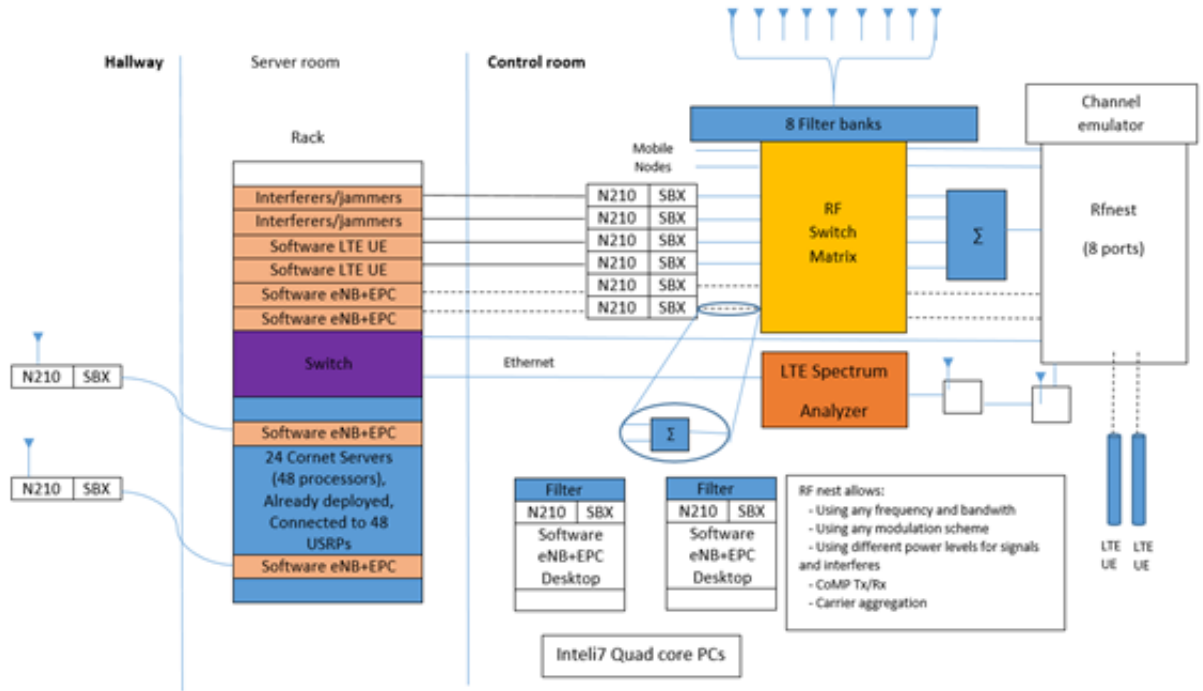
timini azaltmak için radyo erişim teknolojilerinin dinamik seçilebilmesidir. (Mohsen ve Hassan, 2015) 2015 yılında sunulan C-RAN sistem seviyesi simülatorü, anten başına merkezi kullanıcı zamanlaması ve global taşıyıcı birleştirme (carrier aggregation, CA) yeteneğine sahip ve kenar kullanıcı birleştirilmiş iletimi (joint transmission, JT) gerçekleştirebilir. Bu simülator, TU Vienna LTE sistem seviyesi simülatorünün basitleştirilmiş versiyonundan esinlenilerek gerçekçi bir kanal modeli ile desteklenmektedir (Rupp vd., 2016a). Bu simülator çok çeşitli hücre boyutlarının hem homojen olarak hem de heterojen olarak modellenmesinde kullanılabilir. Dahası, bu sistem altıgen şekilli karolar inşa edilebilen ve yönetilebilir çok hücreli sistem düzeyinde simülator olarak sınıflandırılabilir. Mobil ağlarda mikro ve makro uzak radyo başlığı (RRH) herhangi bir pozisyona yerleştirme imkanı sunulmaktadır. Bir ağdaki farklı RRH türleri birleştirilerek heterojen ağlar (HetNet) modellenenebilir. Ayrıca, simülator ayar parametresi eklenerek ağ tipleri yönetilebilir.

3.2.2 Simülatorlerin Karşılaştırılması

Aşağıdaki parametrelere göre bu araçlar karşılaştırılmaktadır:

- Öğrenme eğrisi: simülator karmaşıklığını gösterir.
- Programlama dili: araştırmacıların simülatorü kullanabilmesi için öğrenmesi gereken programlama dili.
- Simülatorün açık kaynaklı olup olmadığı.
- Simülator türü: sistem, bağlantı ve protokol seviyesinde.

Simülatorlerin genel özellikleri de belirtilmektedir. Tablo 3'te 5G simülatorlerinin özellikleri kısaca



Şekil 9. LTE-CORNET mimarisi (Tech, 2016).

özetlenmektedir. SystemVue ve Wireless InSite yayılma modellerini ve fiziksel kanal (PHY) üzerindeki iletişimi analiz edebilirken, C-RAN ve NYU simülatörleri ağ kapsama alanını ve uyarlamalı zamanlamayı analiz etmekte kullanılabilir. Bu simülatörlerden bazıları sadece analitik veri ile çalışmaktadır. Diğer bir kısmı ise gerçek yaşam deneylerinden elde edilen veri tabanını kullanarak modelleme yapmaktadır. Bir başka kısmı ise gerçek donanım ve altyapıları kullanarak modelleri pratik olarak analiz edebilen emülatörlerdir.

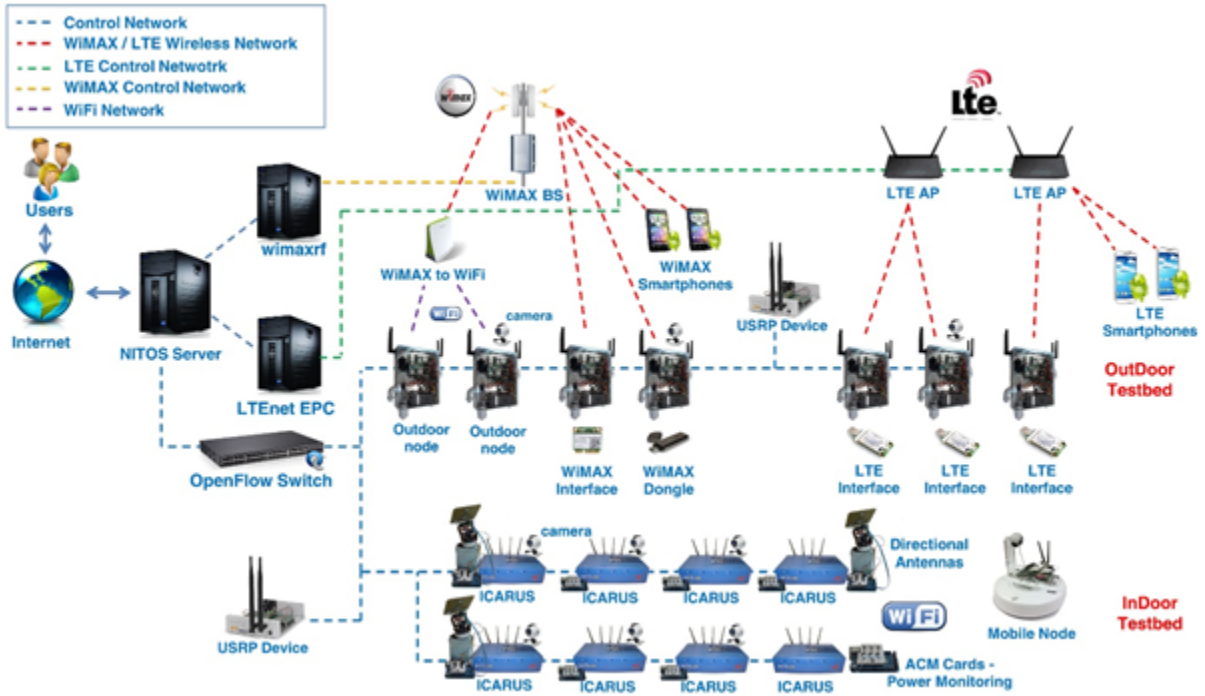
Tablo 3. 5G simülatörlerinin karşılaştırması (Mollahasani vd., 2017).

Simülatör	Öğrenme zorluğu	Dil	Açık kaynak	Arayüz	Emülasyon	Tip	Ana Özellikler	Kaynakça
NORMA™	Orta	RealNes	Hayır	Evet	Evet	Sistem	Esneklik	(Redana vd., 2015)
SystemVue™	Kolay	ESL/Matlab	Hayır	Evet	Hayır	Sistem/Bağ	PHY tasarımı, Matlab desteği	(Keysight, 2016)
NYU™	Orta	Matlab	Evet	Evet	Hayır	Sistem	Genel istatistiksel kanal modelleri	(Samimi ve Rappaport, 2016)
Wireless InSite™	Orta	InSite	Hayır	Evet	Hayır	Sistem	Işın tarama	(Remcom, 2016)
5G Module	Orta	NS3	Evet	Hayır	Hayır	Sistem	NS3 temelli değiştirilebilir simülasyon ortamı	(Dutta vd., 2015)
OpenAirInterface™	Kolay	RTAI	Evet	Evet	Evet	Sistem/Bağ	Gerçek zamanlı veri ile simülasyon	(Marina vd., 2014)
C-RAN simulator	Kolay	Matlab	Hayır	Evet	Evet	Sistem	Merkezi çizelgeleme	(Mohsen ve Hassan, 2015)

3.2.3 5G Deneysel Sınama Ortamları (Testbed) ve Örnekleri

Bu bölümde var olan sınama ortamları, ortak noktaları ve prototipleri sunulmaktadır. Sunum sırası rastgele olmakla beraber kapsamlı bir liste verilmeyecektir. Bu bölümünün sonunda sunulan sınama ortamlarının karşılaştırılması mevcuttur.

LTE-CORNET (Gelişmiş LTE Radyo Testbedi) Virginia Tech'in Bilişsel Radyo Ağı (CORNET), uzaktan erişilebilir 48 yazılım tabanlı radyo noktalarıyla geniş çaplı bir sınama ortamı

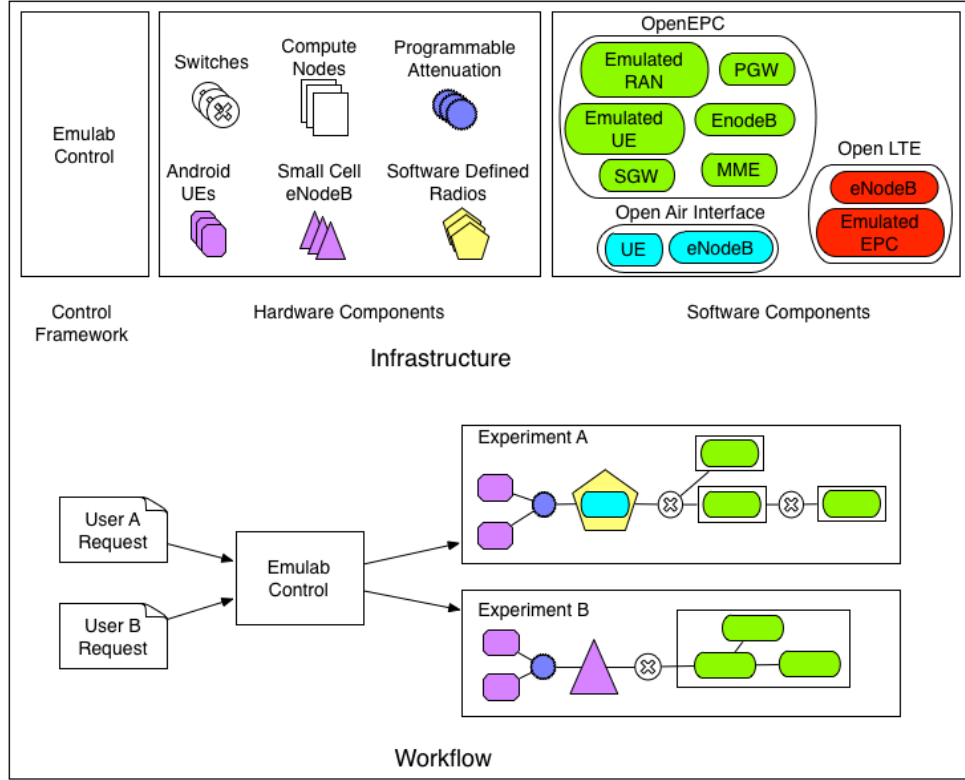


Şekil 10. NITOS sinama ortamı mimarisi (NITOS, 2016).

oluşturmaktadır (Tech, 2016). Sinama ortamı eğitim ve araştırma amaçlı kullanılmaktadır. Şekil 9'de LTE-CORNET mimarisi gösterilmektedir. Çeşitli frekans bantlarında FCC lisans sözleşmesiyle, CORNET geniş kapsamlı deneysel araçlar sağlamaktadır. Açık kaynaklı yazılımlar ve esnek donanımlar sayesinde, CORNET dinamik spektrum erişimi (DSA) ve bilişsel radyo (CR) destekleyebilmektedir (Tech, 2016).

Nitos NITOS, açık ve kapalı alan heterojen ağlardan koşullarındaki deneyleri desteklemektedir (NITOS, 2016). Kontrol edilebilir ve yönetilebilir bir sistem (OMF) kullanılarak açık kaynaklı bir platform sunulmaktadır. OMF ile birlikte NITOS zamanlayıcısı, frekans spektrumu gibi kaynakların dağılımını sağlamaktadır. Şekil 10'da Selanik Üniversitesi'ndeki NITOS sinama ortamının mimarisi gösterilmektedir (NITOS, 2016).

NITOS, Wi-Fi, Bluetooth ve ZigBee gibi çeşitli kablosuz haberleşme arayüzlerine sahiptir (NITOS, 2016). Sinama ortamı hareketli haberleşme noktalarını da desteklemektedir. Yazılım-tanımlı radyo (SDR) sinama ortamı, Universal Software Radio Peripheral (USRP) cihazlarından oluşmaktadır (NITOS, 2016). USRP cihazları NITOS kablosuz haberleşme noktalarına entegre edilmiştir. SDR dijital sinyal işleme (DSP) yapmak için, içerisinde FPGA, genel amaçlı işlemci (GPP), programlanabilir sistem çipi (SoC) gibi çeşitli işlemciler bulunan bir radyo haberleşme sistemidir (Wireless, 2016). USRP'ler, kişisel bilgisayarları kablosuz haberleşme sistemine dönüştürebilen alıcı-vericileridir (National, 2016). USRP'ler araştırmacıların çeşitli fiziksel katman özelliklerini programlamayı ve fiziksel katman araştırmaları yapmalarını sağlamaktadır (National, 2016). NITOS sinama ortamı, anahtarlama üzerindeki deneyleri ve ağ protokollerini kolaylaştıran çoklu OpenFlow anahtarları içerir (NITOS, 2016). OpenFlow anahtarı, kontrol ve veri akışını ayırmasıyla diğer anahtarlardan ayrılır (Braun ve Menth, 2014). NITOS sinama ortamı,



Şekil 11. PhantomNet iş akış yöntemi (PhantomNet, 2016).

gerçek dünyada deneylerin ve değerlendirme uygulamalarının ve protokollerinin tekrarlanabilirliğini sağlar (NITOS, 2016).

Phantomnet PhantomNet araçları ve altyapısı aracılığıyla mevcut ve yeni nesil mobil ağ teknolojilerinin analizi yapılabilir (PhantomNet, 2016). EPC servisleri (OpenEPC, OpenLTE, ve OpenAirInterface), cep telefonları, donanım erişim noktası (IP erişim ve SDR tabanlı eNodeB'ler) ve mobil kullanıcı cihazları gibi çeşitli kaynaklarla uçtan uca deneyler yapılabilir. PhantomNet donanım kaynakları, yönetilen RAN deneylerini aktif hale getirmek için programlanabilir zayıflatıcı matrisine bağlanır. PhantomNet, araştırmacıların hareketlilik deneylerini yürütmelerine yardımcı olacak scriptler sağlar.

Şekil 11 PhantomNet'in iş akış şemasını göstermektedir (PhantomNet, 2016). Erişim noktaları ve uç noktalar ile EPC kurulumu yapılabilir. eNodeB ve UE kullanılarak da EPC çekirdek yazılımı birleştirilebilir. RAN, OpenAirInterface ve SDR'ler gibi yazılım uygulamalarıyla deneyler için uygundur. PhantomNet, OpenEPC yazılım paketi ile gelen kimlik doğrulama, yetkilendirme ve hesap yönetimi (AAA), ev abone suncusu (HSS), politika ve ücretlendirme kaynak fonksiyonu (PCRF), ağ geçidi (SGW), hareketlilik yönetimi (MME), paket veri ağ geçidi (PGW) ve eNodeB ve UE yazılımlarını kullanmaktadır. PhantomNet açık kaynaklı EPC, OpenLTE ve OpenAirInterface yazılımlarını kullanır. Bu simülasyon ortamı geleneksel 3GPP gibi geleneksel platformları da desteklemektedir. PhantomNet, deneyler yapılırken kullanıcılara yardımcı olmak amacıyla yapılandırma script ve komutlarını da sunmaktadır (PhantomNet, 2016).

5G Kitleysel MIMO Sınama Ortamı 5G kitleysel MIMO sınama ortamı, hiper MIMO ve tüm boyutlu MIMO olarak adlandırılan geniş kapsamlı anten sistemidir (5G, 2016). 5G ağları kapasitelerini genişletmeli ve kapsama alanı, güvenilirlik, gecikme süresi ve enerji verimliliği gibi mevcut ağ sorunlarına çözüm getirmelidir. Bu sınama ortamı baz istasyonundaki anten sayısını artırarak bu sorunları çözmektedir. Bu çözüm, mevcut test teknolojilerinden farklıdır; çünkü bu sınama ortamı birbirine uyumlu ve yönetilebilen binlerce antenden oluşmaktadır. Enerji, ön kodlama yöntemleri kullanılarak belirli bir alanda mobil kullanıcılara yönlendirilir ve böylece enerji korunumu sağlanır. Mevcut LTE veya geliştirilmiş LTE veri ağlarının, baz istasyonundaki sayısı göz önünde bulundurularak pilot ek yüke ihtiyacı vardır (5G, 2016). 5G yığınsal MIMO, kanal karşılıklarını göz önünde bulundurarak bu sorunu çözmek için yukarı ve aşağı bağlantıda TDD kullanılabilir. Yukarı bağlantı pilot sinyallerinden gelen kanal durum bilgisi, aşağı bağlantının ön kodlayıcısı olarak kullanılabilir. Bunun yanında arayüzlerin ölçeklendirilebildiği, veri yolları ve geniş alanda bağımsız olarak dağıtılmış RF alıcı-verici senkronizasyonu gibi ek zorluklar da mevcuttur (5G, 2016). 5G yığınsal MIMO sınama ortamı LABVIEW sistem tasarımı ve SDR'leri modüler ve ölçeklendirilebilir şekilde kullanabilmektedir. Esnek donanımlar sayesinde, çok kanallı koordineli ağ veya tasarsız ağlarındaki dağıtık noktalar tekrar tekrar yapılandırılabilir. Ayrıca, 5G yığınsal MIMO çok sayıda düşük güç kullanan cihaz kullanır ve gecikmeyi azaltır. Prototipleme sistemi, 20MHz bant genişliğinde 2 ila 128 anten antene kadar desteklenmekte ve çeşitli UE ile kullanılabilmektedir (5G, 2016). 5G yığınsal MIMO sınama ortamı aşağıdaki önemli özelliklere sahiptir.

- RF sinyalleri alan ve gönderen esnek SDR'lere sahiptir.
- Radyo modülleri arasında frekans senkronizasyonu ve doğru zamanlamayı sağlar.
- Büyük miktardaki veriyi yönetmek için kayıpsız ve yüksek verimli veri yolu sağlar (5G, 2016).

5G yığınsal MIMO sınama ortamı, birden fazla kanalın kullanımını kolaylaştırmak için USRP RIO SDR ve çoklu USRP RIO bağlantısını teke düşüren kablolu PCI Express anahtar kutusu kullanmaktadır (5G, 2016). 5G yığınsal MIMO, MAC ve PHY katmanlarında yüksek performans sağlamak ve gerçek zamanlı sinyal işleyebilmek için yeniden yapılandırılabilir FPGA modülü kullanmaktadır. Bu sınama ortamı Nutaq, Lund Üniversitesi ve National Instruments tarafından geliştirilmektedir. Sistem prototipi, gecikmesiz ve yüksek çıkışlı uygulamalar sağlamak için LabVIEW olarak adlandırılan sistem tasarım yazılımı ve USRP RIO platformları kullanmaktadır (5G, 2016).

5G Playground 5G Playground, araştırmacıların her yerden erişebileceği ve ortak çalışma yürütebileceği bir sınama ortamı sağlamakla beraber (FOKUS, 2016) yenilikçi bir prototip üretmeyi de mümkün kılmaktadır. Araştırmacılar yeni prototipleri diğer ürünlerle beraber analiz ve kalibre edebilmektedir. Araştırmacılar ve geliştiriciler, 5G Playground'u kullanarak, yalnızca kavramları ispatlamakla kalmaz ayrıca güvenlik, performans ve güvenilirlik gibi farklı ağ parametrelerini değerlendirebilmektedir. 5G heterojen ağlarının özellikleri nedeniyle, 5G'de çok çeşitli gereksinimlerle karşılaşabilmekteyiz. Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla 5G Playground'un özelleştirilebilen fonksiyonları , yerleştirilmiş ve çoklu-ortam verisi hizmetleri, kablosuz endüstriyel

iletişim için düşük gecikme ve yüksek güvenirlik sağlama, kritik ortamlar için yüksek güvenlik ve kullanılabilirlik, backhaul için uydu imkanı için kullanılmaktadır. 5G Playground, mevcut bileşenlere göre tasarlanmış özelleştirilebilen araç kitleriyle donatılmıştır. Bu araç kitlerinden bazıları şu şekildedir. Çekirdek ağları için özelleştirilebilir ve ölçeklendirilebilir Open5GCore, Backhaul özelliklerini desteklemek için OpenSDNCore, sanallaştırma ve ağ yönetimi dağlamak için ağ adreslemesi yapan OpenBaton, çok sayıdaki cihazların bağlantı analizi için ise Open5GMTC kullanılmaktadır (FOKUS, 2016).

METIS Projesi METIS projesi (Kusume vd., 2015), hava arayüz teknolojileri, yeni dalga formları, çoklu erişim yöntemleri, çoklu anten ve kitlesel MIMO teknolojileri, çok sekmeli haberleşmeler, girişim yönetimi, kaynak tahsis şemaları, hareketlilik yönetimi, sağlamlık geliştirmeleri, içeriğe duyarlı yaklaşımlar, cihazdan cihaza haberleşme (D2D haberleşme), dinamik yeniden yapılandırma, spektrum yönetim teknolojileri gibi 140'tan fazla bileşenden oluşmaktadır. Bu projelerde D2D iletişimi, devasa makine tipi iletişimi ve yeni dalga formlarının tasarımı için çok çeşitli sına ortamları geliştirilmiştir.

WINS Testbed USRP B210 ve X310 SDR platformları kullanılarak, WINS sına ortamı 24MHz'den 6GHz'ye kadar geniş bir spektruma sahiptir (WINS, 2016). Sına ortamı kullanıcıları SDR'lerin g seviyelerini değiştirerek kapsama alanını manipüle edebilmektedir. Ayrıca, bu cihazlarla beraber MIMO kapasitesini genişletmektedir. Makineden makineye (M2M) iletişim ve IoT ile ilgili senaryoları uygulamak amaçlı algılayıcı ağı da entegre edilmiştir.

3.2.4 Sına Ortamı Federasyonları

Federatif sına ortamları, kendine özgü özellikleri olan otonom bir platformdur. Bununla birlikte, ortak bir ereve altında paydaş tüm sına ortamlarının kaynaklarını paylaşabilmektedir (Duerig vd., 2012). Bu sına ortamlarından  FIRE, GENI ve CREW'dir.

F.I.R.E. The Future Internet Research ve Experimentation (FIRE) federasyonu, Avrupa Komisyonu tarafından desteklenen kuruluşlar arasında ve 2010 yılında ilk çalışmalarına başlamıştır (FIRE, 2016). FIRE, araştırma ve geliştirme amaçlı kurulan Avrupa açık laboratuvarıdır. Bir ok Avrupalı katılımıyla FIRE'a en son test olanakları sağlanmıştır. FIRE, akıllı şehirler, 5G ağları ve e-sağlık gibi altyapılara ve gelecekteki ağlara yönelik çalışmalar yürütmektedir. Ayrıca, ağlar ve altyapılar için çok disiplinli eşsiz bir ortam sunar. Bu, yenilikçi fikirleri hızlı ve düşük maliyetle doğrulamak için hayati önem taşımaktadır.

En son nesil olan FIRE, Horizon 2020 vizyonunu baz alarak FIRE+ olarak ortaya çıkmıştır. FIRE+ bir sonraki ereve programına odaklanır (FIRE, 2016). FIRE+ projesi, sına ortamlarının tanımlanması ve etkinleştirilmesi ile ilgili olarak aşağıdaki beş temel teknoloji alanlarına bölünebilir.

- Federasyon: Standartların ve işlemlerin üzerinde anlaşma sağlanan bir grup sinama ortamları bilgisayar platformlarıdır. Ayrıca, sinama ortamlarına Web portalı sayesinde erişilebilmektedir.
- Veri Yönetimi: İki FIRE+ projesi, coğrafi haritalamaya ve çevrim-içi eğitime odaklanmaktadır.
- IoT: Sekiz FIRE+ projesi, sualtı M2M ve kablosuz algılayıcı ağı (WSN) gibi çeşitli IoT alanlarında çalışmaktadır.
- Akıllı şehirler: Dört FIRE+ projesi ağırlıklı olarak akıllı şehir hizmetleri, hareketlilik arka uç servisleri ve tüketici satın alma hizmetlerine odaklanmaktadır.
- Ağ: Optik ağlar, LTE, SDN ve 5G ağ alanında on adet FIRE+ projesi yer almaktadır.

Ağ bölmesinde, mevcut FIRE sistemlerini iyileştirmeye yarayan açık deneyler (FLEX) için FIRE LTE sinama ortamı tanımlanmıştır. Bu deney ortamı, makro, piko ve küçük hücreler gibi özelleştirilebilen ve uyarlanabilir cihazlarla donatılmıştır. Aynı zamanda hareketlilik çerçeve emülasyonu yeteneğine sahiptir. FLEX'in önemli özelliklerinden bazıları şöyle özetlenebilir:

- FLEX'in beş adet çevrimiçi sinama ortamı mevcut.
- FLEX, FIRE ekipmanlarını ve araçlarını kullanmak amacıyla FIRE ile entegre edilmiştir.
- FLEX sadece bir simülasyon aracı olarak kullanılmaz, aynı zaman hareketliliği emüle edebilir.
- İlk çağrısında, altı yeni ortak FLEX'e katıldı.
- İkinci çağrıda, dokuz son teknoloji ürün deneyleri FLEX üzerinden yapıldı.

GENI ABD Ulusal Bilim Vakfı (NSF) sponsorluğunda Global Environment for Networking Innovation (GENI), ağ bilimi, ağ güvenliği ve ağ alanında yapılan geliştirmeleri doğrulamak amacıyla kurulan dağıtık laboratuvarıdır. GENI, İnternet'in kalıplaşmış problemlerini çözmek için kullanılmaktadır (Berman vd., 2014). GENI, kullanıcıların protokol tasarımını ve değerlendirmesi, içerik yönetimi, sosyal ağ entegrasyonu, clean-slate ağı ve şebeke içi servis dağıtımı olmak üzere çeşitli deneyler yapılmasına izin verir (Berman vd., 2014). Son yıllarda, GENI, üniversite kampüsü ağ yönetimi ve uygulamasına destek olarak, yazılım tanımlı ağ (SDN) ve GENI rafları gibi teknolojilerin potansiyelini analiz etme şansı veriyor. GENI'nin temel bileşenleri GENI rafları, SDN'ler ve dünya çapında mikrodalga erişimi için birlikte çalışabilirlik (WiMAX). GENI rafları sanallaştırılmış hesaplama ve depolama kaynakları içerir. SDN'ler programlanabilir ve sanallaştırılmış ağ kaynakları sağlar. WiMAX, sanallaştırılmış hücresel kablosuz iletişim içerir (Berman vd., 2014).

Dilimlenebilirlik (mantıksal yapılar sağlayabilen) ve derin programlanabilirlik gibi bazı temel deneyci kavramları vardır. Dilimlenebilirlik kavramı PlanetLab sinama ortamından esinlenilmiştir (Berman vd., 2014). Dilimlenebilirlik sanallaştırma sağlar, bir başka deyişle bağlantı, depolama, işlemci gibi kaynakların eş zamanlı deneyler için bir dereceye kadar izolasyon ile ortak erişimini sağlar (Berman vd., 2014); (Peterson vd., 2003). Dilim bir deney için ayrılan sanallaştırılmış kaynaklardır ve dilim, bağımsız olarak yürütülen ve şerit olarak adlandırılan kaynaklardan oluşur (Peterson vd., 2003). GENI dilimleri hesaplama ve ağ kaynaklarından oluşur (Berman vd., 2014). Derin programlanabilirliğin temel kavramı kullanıcılara yönlendirme, depolama, bileşen-

lerin yönlendirilmesi ve sadece ağ sınırlarında hesaplama değil aynı zamanda ağın derinliklerinde de yapılmasına izin vermektir. GENI, bir ekiple ilişkili olmayan son kullanıcılara, GENI deneysel bir dilimi tarafından desteklenen hizmetlere girme yeteneği sağlar. GENI, ağ, güvenlik ve ağ hizmetleri ile uğraşan kullanıcılara esnek ve deneylere uygun bir ortam sağlar.

CREW Cognitive Radio Experimentation World (CREW)'in amacı ortak bir test platformu kurmaktır (CREW, 2016). CREW mevcut beş sinama ortamını birleştiren platformdur. Bunlardan ilki IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.1, IEEE 802.11 ve Universal Software Radio Peripheral (USRP) yazılım radyolarını içeren iMinds (Wilabt, 2016)'da bulunan sinama ortamıdır. İkincisi, yeniden yapılandırılabilir radyo platformu ve USRP'ye tabi olan TV bantlarını içeren lisanslı bilişsel radyo sinama ortamıdır (Iris, 2016). Üçüncüsü, farklı şirketlerin, spektrum analizcilerin, USRP ve FPGA yazılım geliştiricilerinin ürettiği bir takım algılayıcıları içeren, Berlin Teknik Üniversitesindeki (TUB) WSN sinama ortamıdır (Twist, 2016). Dördüncü sinama ortamı, LTE baz istasyonları, SDR'ler ve mobil UE'lerin bir araya getirilmesiyle Dresden Teknik Üniversitesi (TUD) tarafından oluşturulmuştur (Easyc, 2016). Sonuncusu ise ISM/TVWS heterojen sinama ortamıdır (Vsn, 2016). CREW kıyaslama ve kontrollü tekrarlanabilir deneyler için platform sunar. Bu platform, radyo algılama, ISM bandındaki heterojen ortamlar arasında yatay kaynak paylaşımı, heterojen ağlar için lisanslı bantlarda iş birliği ve parazitsiz bir ağ için güvenilir bilişsel algılayıcı gibi bilişsel radyo kavramlarının deneysel geçerliliğini sağlar.

3.2.5 5G Sinama Ortamlarının Karşılaştırılması

5G sinama ortamı, esnek, yeniden yapılandırılabilir, heterojen, eksiksiz olmalı ve açık kaynaklı çözümlere dayanarak tekrarlanabilir sonuçlar verebilmelidir (NetWorld2020, 2014). Sinama ortamları farklı PHY katmanları, frekans bantları ve ağ yığını üzerindeki bileşenler gibi birçok farklı seçenek içermeli ve esnek yapıya sahip olmalı. Ayrıca araştırmacıların çözümlerinin gereksinimlerine bağlı olarak sinama ortamlarını yeniden şekillendirmelerine yardımcı olmak için kolayca yapılandırılabilir olmalıdır. Ayrıca, algılayıcı, platform, cihaz ve protokol heterojenliği yönetilebilir olmalıdır. 5G sinama ortamındaki heterojenlik, istenen bileşenleri seçmede ve çevreyi deney koşullarına adapte etmekte kolaylık sağlamaktadır (Horneber ve Hergenröder, 2014). Diğer bir gereksinim ise 5G sinama ortamının, eski mobil operatörlerinden sanal operatörlere ve son kullanıcıdan M2M uygulamaları ve nesnelerin İnternet'i dahil olmak üzere tüm 5G bileşenlerinin katılımını sağlaması gerekmektedir. Bilimsel kalite, adil test ve çeşitli teknolojilerin karşılaştırılmasını sağlamak için 5G sinama ortamı tekrarlanabilir sonuçlar çıkarmalıdır. Ayrıca, eğer sinama ortamı açık kaynaklı çözüm sunuyorsa, yeteneklerini artırmalı ve potansiyel yeteneklerini bilimsel toplulukla paylaşacaktır. Fiziksel bir mevcudiyete ihtiyaç duymadan araştırmacılar farklı durumlarda teknolojileri kolaylıkla test edebilmelidir. 5G sinama ortamı, kablosuz topolojileri, küçük hücrelerden büyük hücrelere ve uydu teknolojilerine sahip çözümleri kapsamalıdır (NetWorld2020, 2014).

Sinama ortamlarının karşılaştırma kriterleri olarak birkaç önemli kavram kullanılabilir (Horneber ve Hergenröder, 2014). Tablo 4'te karşılaştırma için kullanılan parametrelerin bazıları, hareket-

lilik, kapsam ve boyut, açık kaynak desteği, frekans, ve heterojenlik desteğidir. Kablosuz ağlar için (özellikle 5G ağları) hareketlilik en önemli kavramlardan biridir (Horneber ve Hergenröder, 2014); (NetWorld2020, 2014). Kablosuz cihaz sayısı ve yerleşme alanının boyutu, küçük veya büyük ölçekli sinama ortamları için diğer önemli özelliklerdir (NetWorld2020, 2014). 5G sinama ortamları, açık kaynaklı çözümler ve yazılımlar sunarak yeteneklerini geliştirecek ve potansiyel yetenekleri bilimsel camia ile paylaşmalıdır (NetWorld2020, 2014). Cihaz, arayüz, protokol, algılayıcı ve platform heterojenitesi, akıllı ulaşım ve robotik gibi geniş çeşitlikteki heterojen uygulamaları kapsamalıdır (NetWorld2020, 2014); (Horneber ve Hergenröder, 2014).

Tablo 4. Sinama ortamlarının karşılaştırılması.

Sinama ortamı	Hareketlilik	Boyut	Açık kaynak	Heterojenlik	Temel özellikler	Kaynakça
LTE-CORNET	Evet	Büyük	Evet	Evet	Esnek modüler ortam	(Tech, 2016)
PhantomNet	Evet	Büyük	Evet	Evet	Sanallaştırma	(PhantomNet, 2016)
NITOS	Evet	Büyük	Evet	Evet	Uzaktan erişim, sanallaştırma, katmanlar-arası tasarım	(NITOS, 2016)
5G Massive MIMO Test bed	Evet	Büyük	Hayır	Evet	Kitlesel anten sistemi	(5G, 2016)
5G Playground	Yok	Küçük/Orta	Hayır	Evet	Tekrar uyarlanabilir, ticari ürün entegrasyonu	(FOKUS, 2016)

4 BULGULAR

Bu bölümde, proje kapsamında elde edilen bulgular, bu bulgulara ulaşılmasını sağlayan yöntem ve doğrulama sonuçları sunulmaktadır.

4.1 Yoğunluk-farkında Hücre Yakınlaştırma

Bu bölümde, 2018 yılında IFIP destekli Innovation in Clouds, Internet and Networks konferansında yayınladığımız bildiri sunulacaktır (Yaman vd., 2018).

Ultra-yoğun mobil şebekeler, hücresel ağ paradigmasını önemli ölçüde değiştirmiştir. Altyapı ve hücresel ağların topolojisi, altyapının durağan olduğu varsayılan sistemlerin aksine dinamik hale gelir. Topoloji değişirken, baz istasyonu veya kullanıcı yoğunluğu da kaynak kullanımı ve hizmet kalitesi açısından performansı etkilemektedir. Ağ kapasitesini arttırmak, kapsama alanını korumak ve bunların yanında enerjiyi korumak için, ağ yoğunluğunun farkında olunması ve ayarlanabilmesi için iletişim yığınlarında ağ yoğunluğunun göz önünde bulundurulması gerekir. Bu bölümde, hücresel ağlarda ki yoğunluğun ağ kesintisi üzerindeki etkisini analiz etmekteyiz. Üç boyutlu baz istasyonu yoğunluk tahmincisi ile birlikte ağ kesintisi (outage) ve yoğunluğu göz önünde bulunduran yeni bir hücre yakınlaştırma tekniği önermekteyiz.

4.1.1 Giriş

Hücresel ağlardaki, uygulamalardaki ve cihazlardaki son yenilikler, gelecekteki ağlar için yeni bir trend oluşturmaktadır. Hücresel ağlar, esnek olmayan ve merkezi olarak yönetilen altyapılardan, gittikçe artan kapasite ihtiyacını karşılamak için küçük ve mobil hücrelerin büyük ölçekli kolektiflerine dönüşmektedir. Göçebe ve mobil hücreler ile güçlendirilmiş ultra yoğun ağlar (UDNs), mobil baz istasyonları (BSs), dinamik altyapılar ve sürekli değişen topolojilerin yoğunlaştırılmış dağıtımlarına yönelik ağların özelliklerinde bir değişiklik sunmaktadırlar (Kamel vd., 2016; Bor-Yaliniz ve Yanikomeroglu, 2016b). Bu noktada dinamizm, çalışma zamanında yönetilmesi gerekli olan bazı yeni zorlukları da beraberinde getiren baz istasyonu (BS) veya kullanıcı ekipmanı (UE) yoğunluğunun öngörülemez şekilde değişmesi olarak ifade edilebilir. Topoloji değişikliklerinin çoğu önceden tahmin edilemez. Bu nedenle, kapsama kontrolü, girişim yönetimi, kapasite planlaması, hizmet sunumu kalitesi, enerji tasarrufu gibi işlevler, gelecekteki eğilimleri dikkate alarak uygun ve verimli bir çalışma için kapsamlı ve detaylı olarak yeniden gözden geçirilmelidir (Kamel vd., 2016; Bor-Yaliniz ve Yanikomeroglu, 2016b).

Dinamik ağları verimli hale getirme gereksinimi, hücre yakınlaştırma kavramını ortaya çıkarmıştır (Niu vd., 2010). Hücre yakınlaştırma tekniği, baz istasyonlarının iletim gücünü uyarlama, baz istasyonlarının geçişini veya uyku zaman planlamasını temel alan çoklu baz istasyonlarını kullanma gibi fiziksel parametrelerin yapılandırılması gibi farklı yaklaşımlarla ortaya çıkar (Niu vd., 2010). Hücre yakınlaştırma için iki temel algoritma kategorisi vardır: statik ve dinamik algoritmalar. Ağın yoğunluğunun ve iletim gücünün birlikte ele alınması hücre yakınlaştırma kavramı

içinde sunulan bir çözümdür. İletim gücünün kullanıcı ekipmanı yardımıyla optimizasyonu ve uyarlanması, baz istasyonlarının kapatılmadan enerji tüketiminin azaltılması, baz istasyonlarının anteninin en uygun yüksekliğinin belirlenmesi, bir yayılma modeliyle alınan sinyal gücünün (RSS) birlikte göz önünde bulundurularak kendi kendini iyileştirme (self-healing) yöntemi olarak sunulması hücre yakınlaştırma kavramı altında uygulanan yaklaşımlardandır. (Manegene vd., 2015) (Balasubramaniam vd., 2013). Bu çalışmada, hücre büyüklüğünü, yoğunluk farkında iletim mekanizmasının kullanımıyla, kesinti olasılığını (outage probability) dikkate alarak, dinamik olarak ayarlamaktayız. Ağ yoğunluğu ve kesinti, çalışma zamanında kendi kendini eniyileme parametreleri olarak ortaya çıkarken, kendi önerdiğimiz yöntemle karşılaştırmalı olarak Bölüm 4.1.9'da incelenen ilgili çalışmaların birçoğu ve kendi kendini düzenleyen ağlar ile ilgili çalışmalar, kendi kendini iyileştirme çözümlerine odaklanmaktadır (López-Pérez vd., 2015; Lee ve Huang, 2012; Mordachev ve Loyka, 2008; Samarakoon vd., 2016; Cao vd., 2012; Miorandi ve Altman, 2005; Panwar vd., 2016; Khan, 2013).

Bu çalışmada, hücre yakınlaştırma için baz istasyonlarının iletim gücünü uyarlamak amacıyla kesinti ve yoğunluğa odaklanmaktayız. Bu çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir. İlk katkı olarak, hücresel şebekelerde ki yoğunluğun kesinti olasılığı üzerindeki etkisini, simülasyon sonuçlarıyla doğrulan basit bir analitik model kullanarak analiz ediyoruz. Kısa ve basit bir analitik analiz, diğer çalışmalardan bu katkının ana farkıdır. İkinci katkı olarak, mobil ağlarda basit ve yeni bir üç boyutlu yoğunluk tahmincisi önermekteyiz. Onur vd. (2012) ve Eroğlu (2015) tarafından sunulan yaklaşımın aynısını takip ediyoruz. Literatürde önerilen yoğunluk tahmincilerinin çoğu sadece iki boyutlu Öklid uzayında işlevseldir. Mobil ağlarda üç boyutlu bir tahminciye sahip olmanın gerekliliklerini karşılamak, bu çalışmanın literatürde doldurduğu en önemli boşluktur. Üçüncü olarak ise, baz istasyonu yoğunluğuna dayanarak kesinti olasılığını hesaplamak ve Monte-Carlo simülasyonlarını kullanarak doğrulanmakta olan bir analitik model önermekteyiz. Bu modelin üç boyutta kesinti olasılık analizi olarak sunulması, çalışmanın yeniliği olarak görülmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, hücresel ağlarda yoğunluk farkındalığının, kapasiteyi arttırmak ve verimli bir ağ sağlamak için gerekli olduğunu ileri sürmektedir. İlk üçte katkının birleşmesi sonunda son katkı, olarak Monte-Carlo simülasyonları tarafından doğrulanmış yoğunluk duyarlı bir hücre yakınlaştırma tekniği önermekteyiz.

Bölüm 4.1.2'de, kesinti olasılığını hesaplayarak ve iletim gücünü hücresel ağlara uyarlayarak hücre yakınlaştırma için bir analitik model sunmaktayız. Bölüm 4.1.5, Monte Carlo simülasyonlarının sonuçlarını sunarken yoğunluğun kesintiye olan etkisini tartışmaktadır. Uygulanan tekniğin literatürdeki son durumunu Bölüm 4.1.9'da gözden geçirmekteyiz. Daha sonra bu bölüm, yoğunluk-farkında çalışmanın gerekliliğine dayanan önemli öğrenme noktalarını vurgulayarak sonuçlandırılmıştır.

4.1.2 Yoğunluk-farkında Hücre Yakınlaştırma

Bu bölümde, bu çalışmanın ana katkılarını sunmaktayız. Öncelikle yol kaybı göz önüne alınarak üç boyutlu alanda alınan sinyal gücü dağılımını tanımlayacağız. Daha sonra, şebeke yoğunluğunu baz istasyonları bazında dikkate alarak kesinti olasılığını modelleyeceğiz. Bu formülas-

yonu takiben, yoğunluk duyarlı iletim gücü adaptasyon yaklaşımını sunacağız. Son olarak, önerilen hücre yakınlaştırma mekanizmasında iletim gücünü uyarlamak için kullanılacak üç boyutlu bir baz istasyonu yoğunluk tahmincisi önereceğiz.

4.1.3 Hücre Yakınlaştırma Mekanizması

Baz istasyonlarının, üç boyutlu bir alanda λ nodes/m³ etkin yoğunluk rastgele dağıtıldığı bir hücresel mobil ağı düşünelim. Basit yol kaybı modelini göz önünde bulundurduğumuzda; r_k metre uzaklıkta k 'inci en yakın baz istasyonundan x_k olarak alınan sinyal gücü $x_k = CP_t (r_0/r_k)^\gamma$ şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, $2 \leq \gamma \leq 8$ yol kaybı üssüdür, P_t iletim gücüdür, C ise $r_0 = 1$ m uzaklıkta ölçülen zayıflama ve mesafeyle ilişkili olmayan faktörlerin etkisini içeren bir sabittir. Yoğunluk tahmini sırasında P_t 'nin sabitlendiğini varsayalım. Bu kanal modeli sadece yol kaybını dikkate alır; sönmelenme veya gölgeleme dahil değildir.

Şebeke alanı içerisinde yer alan rastgele seçilmiş bir konumda bulunan ve referans olarak kullanılacak olan bir kullanıcı aygıtını düşünelim, bu kullanıcıya en yakın k 'inci baz istasyonun uzaklığını $\mathbf{R}_k$ rastgele değişkenini kullanarak r_k ile gösterelim. Bu durumda olasılık yoğunluk işlevi (PDF) şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$f_{\mathbf{R}_k}(r_k) = e^{-\lambda \frac{4\pi}{3} r_k^3} \frac{3(\lambda \frac{4\pi}{3} \pi r_k^3)^k}{r \Gamma(k)}. \quad (1)$$

Yukarda belirtilen yok kayıp modeli göz önünde bulundurularak, $\mathbf{P}_k$ rastgele değişkenini $\mathbf{R}_k$ in bir fonksiyonu olduğunu dikkate alarak seçilen noktaya en yakın k 'inci baz istasyonundan ulaşan sinyal gücünü x_k olarak göstermekteyiz. Böylece kümülatif dağılım işlevi de eğer baz istasyonlarının ve kullanıcı aygıtlarının dağılımında bu 3 boyutlu model göz önünde bulundurulursa şu şekilde olacaktır:

$$F_{\mathbf{P}_k}(x_k) = \frac{\Gamma\left(k, \frac{4}{3}\pi x^{-3/\gamma} \lambda \left(\frac{1}{CP_t}\right)^{-3/\gamma}\right)}{\Gamma(k)}, \quad (2)$$

Bu çalışmada kesinti olasılığını, referans olarak seçilen aygıtı kendisine en yakın baz istasyonu tarafından ulaşan sinyal gücünün eşik değeri olarak seçilen alıcı duyarlılığı değerinden küçük olma olasılığı olarak tanımlamaktayız. Bu tanıma bağlı olarak kesinti olasılığı:

$$P_O(\lambda) = F_{\mathbf{P}_1}(T) = e^{-4/3\pi\lambda(CP_t/T)^{3/\gamma}}, \quad (3)$$

şeklinde hesaplanacaktır. Burada T , sinyalleri akıllı bir şekilde kodlamak için gerekli minimum sinyal gücü olan alıcı duyarlılığıdır (eşik değeri) (Liu vd., 2015). Bu formülasyonda, sistemde güçlü bir girişim iptal tekniği uygulandığını varsayıyoruz. Bu nedenle, sadece sinyal ve parazit oranı (SNIR) yerine alınan sinyal kuvvetini dikkate almaktayız.

Eğer bir hücresel ağıdaki baz istasyonları ağ yoğunluğunu dağınık bir şekilde tahmin edebileceklerse, belirli bir kesinti olasılık değerinin sağlanması ile iletim güç seviyeleri gibi iletişim pa-

rametrelerini (3) kullanarak uyarlamaları mümkün olacaktır. Minimum iletim gücü (3) kullanarak şu şekilde uyarlanabilir:

$$P_t^* \geq \frac{T}{C} \left(-\frac{3 \log(P_O^*)}{4\pi\hat{\lambda}} \right)^{\gamma/3}. \quad (4)$$

Gerekli kesinti olasılığı P_O^* , şebeke operatörü tarafından belirlenen bir ağ tasarım parametresidir. Bazı teknikler kullanarak, baz istasyonlarının ağın yoğunluğunu bireysel olarak tahmin edebileceğini varsayalım. Operatör, daha sonra, iletim gücünü ayarlamak için tahmini yoğunluğunu $\hat{\lambda}$ kullanır. Bu yöntemlerin doğrulanmasında, çalışmanın devamında sunduğumuz alınan sinyal gücüne dayalı ortak yoğunluk tahmincisi (kestiricisi, estimator) kullanılmaktadır.

Ulaşan sinyal gücünü etkileyen birçok olumsuzluk ve fenomen olmasına rağmen, bu model sadeliği göz önüne alındığında uygulamada çok pratiktir. Bir hücrede birçok kullanıcı olabilir; her kullanıcı ulaşan sinyal gücünü diğerlerinden bağımsız olarak ölçebilir. Toplanan ölçümler bir çok erişimli uç hesaplama (multi-access edge computing, MEC) birimine aktarılabilir ve gölgelenme ve solma etkilerini azaltmak için MEC ve baz istasyonları tarafından ortalama sonuçlar kullanılabilir. Sinyal güçlerinin ölçülmesi için kullanıcı ekipmanı yardımıyla, baz istasyonları, yoğunluk tahmininin süresi ile anlık olarak sınırlandırılmış iletim güçlerini belirleyebilecektir. Bu konu için hızlı ve basit yoğunluk tahmincisi çok faydalı olacaktır. Bu çalışmada verilen bilgilere dayanarak üç boyutlu bir yoğunluk tahmincisi sunmaktayız.

4.1.4 Uç Hesaplama Tabanlı İşbirlikli Yoğunluk Tahmini

Baz istasyonlarının yoğunluğunun, enerji tasarrufu, baz istasyonları arızaları veya uyku planlaması uygulamaları nedeniyle değişebileceğini varsayıyoruz. Bu varsayımlar altında statik bir yapılandırma uygulanamaz. Çalışma zamanında çalışan güçlü bir tahminci gereklidir. Bu nedenle, bu çalışmanın alt amacı üç boyutlu Öklid uzayındaki baz istasyonlarının yoğunluğunu tahmin etmektir.

Kullanıcı ekipmanlarının (UE) baz istasyonları tarafından iletilen pilot sinyallerde ulaşan sinyal gücünü (RSS) ölçtüğünü varsaymaktayız. Daha sonra, ölçüm sonuçları baz istasyonlarına geri gönderilir ve baz istasyonları bu ölçümleri bir MEC noktasına iletir. Daha sonra MEC, ağ yoğunluğunu tahmin etmek için bu ölçümleri kullanır. Bu boşluğu doldurmak için, üç boyutlu Öklid uzayına uygun bir şekilde, (Onur vd., 2012)'de önerilen iki boyutlu modeli değiştirip, gerçek yoğunluğun λ nodes/m³ olduğu bir şebekede, maksimum olasılık yoğunluk tahmincisinin $\hat{\lambda}$ teorik temelini bu çalışmada göstermekteyiz.

x_i 'nin şebekede bir kullanıcı aygıtına en yakın k_i 'inci baz istasyonundan gönderilmiş olduğunu düşünelim, bu durumda x_i 'ya ait kümülatif dağıtım fonksiyonu (2)'deki gibidir. Şimdi $x_1, x_2, \dots, x_n$ n adet kollektif bir yaklaşımla çakışmayan bölgelerden toplanan sinyal gücü (received signal strength, RSS) örnekleri olsun ve bunların yakın komşu indekslerinin de $k_1, k_2, \dots, k_n$ ile gösterildiğini varsayalım. Kullanıcı aygıtları bu ölçümleri baz istasyonları üzerinden MEC'e iletir ve sonra MEC maksimum olasılık tahmincisinin sonucunu $\hat{\lambda}$ hesaplayabilir. Bu yaklaşımda baz istasyonların düğüm dağılımlarının m -boyutlu uzayda homojen bir Poisson sürecini izlediğini

varsaymaktayız. Ayrıca, üst üste binmeyen, çakışmayan bölgelerden toplandıklarından RSS ölçümleri bağımsızdır. Bu noktada maksimum olasılık yoğunluk tahmincisi şu şekilde olacaktır:

$$\hat{\lambda} = \frac{K-1}{\frac{4\pi}{3} r_0^3 \sum_{j=1}^n \left(\frac{x_j}{P_t C}\right)^{-3/\gamma}} \quad (5)$$

Bu modelde $r_0 = 1$ metre çalışmanın en başında belirlenen referans uzaklık olarak ele alınırken $K = \sum_{j=1}^n k_j$ eşitliği de yakın komşuluk indekslerinin toplamı olarak işleme tabi tutulmaktadır. Yoğunluk birimi nodes/m³'dir. Ölçümler kullanıcı aygıtları tarafından topluca ve kolektif olarak toplandığından ve MEC kullanılarak harmanlandığından bu yoğunluk tahmincisi işbirlikçi tahminci olarak adlandırılmaktadır.

Bu yansız bir tahmincidir; $E[\hat{\lambda}] = \lambda$ ve varyansı

$$\text{var} [\hat{\lambda}] = \frac{\lambda^2}{K-2} \quad (6)$$

olur. Varyans örnek sayısı arttıkça sıfıra gidecektir. Bu nedenle toplanan örnek sayısı K , tahmincinin kesinliğini ciddi biçimde etkilemektedir.

Bu işbirlikçi tahminci (5) hücre yakınlaştırma tekniğinde baz istasyonunun iletim gücünü ayarlama (4) kullanılabilecektir.

4.1.5 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Önerilen analitik modeller sırasıyla işbirlikçi tahminci modeli, kesinti olasılığını belirleyebilmek için kullanılan model (3) ve de hücre yakınlaştırma tekniğinde kullanılan model (4) Monte Carlo simülasyonları ile MATLAB kullanılarak doğrulanmıştır. Bu bölümde, sonuçları sunacağız ve tartışacağız.

Tablo 5. 3-boyutlu simülasyon parametreleri.

Parameter	Value	Units
Sparse deployment (Az), λ_S	0.0005	nodes/m ³
Dense deployment (Yoğun), λ_D	0.0015	nodes/m ³
Ultra-dense deployment (çok yoğun), λ_U	0.003	nodes/m ³
Path-loss exp (Yol kaybı üsü), γ	3	
Transmit power (İletim gücü), P_t	100	mW
Receiver sensitivity (Algılayıcı hassasiyeti), T	5×10^{-13}	mW
C (Sabit)	10^{-5}	
Kübik hacim	$500 \times 500 \times 500$	m ³

4.1.6 İşbirlikçi Tahmincinin Doğrulanması

İşbirlikçi kestiriciyi doğrulamak için yapılan simülasyonlarda, bir dizi baz istasyonu ve bir başka kullanıcı aygıtı seti, Matlab'da üç boyutlu hacimde rastgele bir şekilde dağıtılmış olarak kabul

edilmektedir. Simülatörün her çalışmasında, baz istasyonlarının ve kullanıcı aygıtlarının yerleri rastgele değiştirilmektedir. Kullanıcı aygıtları, RSS'leri, birinci veya ikinci en yakın baz istasyonlarından, Bölüm 4.1.4'te açıklanan kanal modelini kullanarak hesaplar ve bu ölçümlerin bir MEC noktasında toplanıp harmanlandığı varsayılmaktadır. Bu nedenle, ilgili değerler sırasıyla şu şekilde hesaplanmaktadır: $j = 1, 2, \dots, n$ RSS arasından birinci en yakın $k_j = 1$ veya ikinci en yakın baz istasyonu yakın komşuluk indeksleri $k_j = 2$ ve $K = \sum_{j=1}^n k_j = n$, veya $K = 2n$ olarak hesaplanır ve ilgili tahminci değerlerine aktarılır, $\hat{\lambda}_1$ ve $\hat{\lambda}_2$ hesaplanır. Sonra bu sonuçların ortalamaları tahminci sonucu olarak sunulur: $\hat{\lambda} = (\hat{\lambda}_1 + \hat{\lambda}_2)/2$ nodes/m³. Bu simülasyonlarda ortalama değerler 10⁴ kez simülasyonun çalıştırılmasından elde edilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan bazı değerler Tablo 5'te sunulmaktadır.

İşbirlikçi tahmincinin sonuçları $\lambda = 5 \times 10^{-4}$ nodes/m³ iken farklı yol kayıp üstleri ile de denenmiştir ve alınan sonuçlar Tablo 6'da sunulmaktadır. Burada tahmincinin gerçek yoğunluk değerlerinden yüzde olarak ortalama mutlak sapması $AAPD = \frac{100|\hat{\lambda} - \lambda|}{\lambda}$ şeklinde tanımlanmaktadır. AAPD değerleri oldukça küçüktür ve her zaman yüzde beşten azdır.

Tablo 6. Farklı yol kaybı üssü değerleri için (γ) gerçek dağıtım yoğunluğu, $\lambda = 5 \times 10^{-4}$ nodes/m³ iken elde edilen ortalama mutlak yüzde sapma sonuçları ($AAPD = 100|\hat{\lambda} - \lambda|/\lambda$ %).

γ	$\hat{\lambda} \times 10^{-4}$ nodes/m ³	AAPD (%)
2	5.22	4.31
3	5.16	3.28
4	4.99	0.14
5	4.96	0.88
6	4.85	3.00

İşbirlikçi tahmin edicinin, çeşitli gerçek dağıtım yoğunlukları göz önüne alındığında ne kadar doğru olduğunun sonuçları da Tablo 7'te sunulmaktadır. Bu tablonun ilk sütunu gerçek yoğunluk ve ikinci sütun tahmin edicinin sonucudur. İşbirlikçi tahminci kabul edilebilir bir doğrulukla çalışır ve AAPD her zaman %9'dan daha azdır.

Tablo 7. Farklı gerçek dağıtım yoğunluk değerleri için λ where $\gamma = 3$ ortalama mutlak yüzde sapma sonuçları ($AAPD = 100|\hat{\lambda} - \lambda|/\lambda$ %).

$\lambda \times 10^{-4}$	$\hat{\lambda} \times 10^{-4}$ nodes/m ³	AAPD (%)
5	5.31	6.20
7	7.36	5.14
9	9.35	3.89
11	11.9	8.18
13	13.81	6.23
15	16.24	8.27
17	17.88	5.18
19	19.77	4.05

Bu çalışma esnasında önerilen yoğunluk tahmincisinin bazı eksiklikleri tespit edilmiştir. Her şeyden önce, sadece yol kaybını dikkate alınmaktadır, bu noktada gölgeleme ve solma etkilerinin modele dahil edilmesi gerekmektedir. İkincisi, kestirim yapmak için uzun zaman gerektirmektedir. UE'ler ölçümleri toplar ve bunları baz istasyonlarına geri gönderir. Baz istasyonları bu

ölçümleri şebekedeki MEC birimine iletir ve MEC yoğunluğu tahmin eder ve sonuçlarla ilgili baz istasyonlarını bilgilendirir. Üçüncü eksiklik olarak, önerilen işbirlikçi tahmin edicinin, ölçümler çakışan bölgelerden toplandığında, yanlış sonuçlar verebileceğini kısmen söyleyebiliriz. Olasılık tahminini kullandığımızdan, tahmin edici katı bir şekilde ölçümler arasındaki bağımsızlığın varsayımına bağlıdır. Ölçümler örtüşen bölgelerden toplandığında, ölçüm örneklerinde, tahminlerde bir yanlışlık yaratacak ve bu durumda büyük miktarda korelasyon olacaktır.

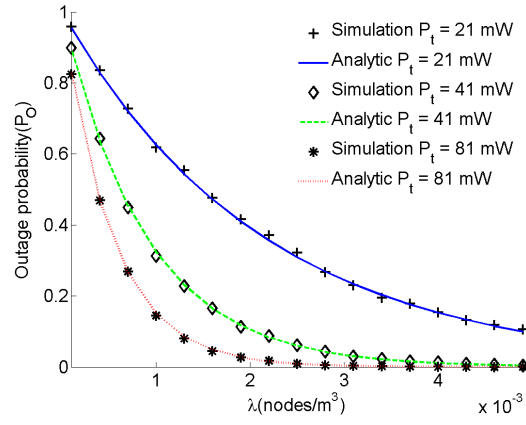
4.1.7 Yoğunluğun Kesinti Üzerine Etkisi

Kesinti simülasyonlarında, belirlenen bir alandaki baz istasyonlarının konumlarını, λ nodes/m³ gerçek dağıtım yoğunluğuyla rastgele belirlemektedir. Rastgele seçilen bir nokta referans kullanıcı aygıtının yeri olarak kabul edilmektedir. Yukarıda açıklanan basit yol kaybı modelini kullanarak, alınan sinyal gücünü en yakın baz istasyonundan hesaplamaktayız. Sinyal gücü eşik değerinden (alıcı duyarlılığından) daha büyükse, çalışmanın başarılı olduğu varsayılır ve kullanıcı aygıtının kapsam içerisinde olduğuna kanaat getirilir; aksi halde, bir kesinti meydana gelir. Simülatörün 10⁴ defa çalıştırılmasındaki kesintilerin oranı kesinti olasılığı olarak kaydedilmektedir. 100 mW'lık bir aktarım gücü ile 500 × 500 × 500 m³'lük hacmi simüle ettik, seyrek, yoğun ve ultra yoğun gibi farklı dağıtım yoğunluklarını göz önünde bulundurarak ve yol kaybı üssünü üç kabul ederek bu simülasyonları gerçekleştirdik. Simülasyonlarda kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Bu bölümde sunduğumuz şekillerde, simülasyonların sonuçlarını analitik modelin (3) sonuçlarıyla birlikte göstermekteyiz.

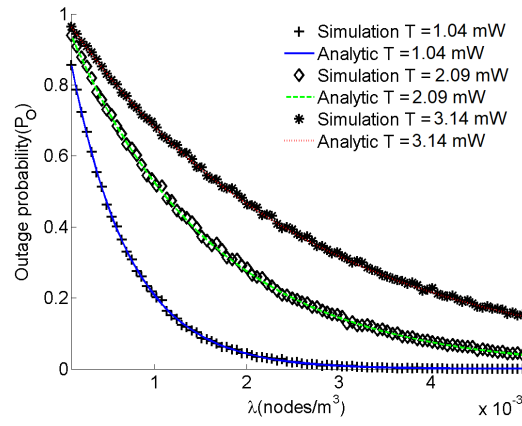
Yoğunluğun artması alanda konuşlandırılmış baz istasyonunun sayısının da artmış olması anlamına gelir. Benzetim alanında rastgele seçilmiş bir kullanıcı aygıtını düşünelim. Yoğunluğun fazla olduğu ağlarda en yakın baz istasyonuna olan mesafesinin daha küçük olması ve sonuç olarak yoğun ağlarda yol kaybının daha küçük olması olası bir durum olarak gözlemlenecektir. Şekil 12'de gösterildiği gibi, yoğun ağlardaki kesinti olasılığının (outage probability), diğer tüm parametrelerin sabit tutulduğu varsayıldığında, daha küçük olacağı gözlemlenmiştir. Baz istasyonlarının yoğunluğu, Şekil 12'de gösterildiği gibi servis kalitesini etkiler. İletim gücü, alınan sinyal gücü üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Daha fazla iletim gücü, yayılma modelinden anlaşılabileceği gibi aynı zamanda Şekil 12a'da sunulduğu üzere, daha fazla sinyal kuvveti alacağı anlamına gelir. Ağ yoğun olduğunda, kesinti olasılığı açıkça azalacaktır.

Aynı mesafe ve gürültü seviyesi için, iletişim kalitesini etkileyen önemli faktörler mevcuttur; örneğin algı eşik seviyesi bu çalışmada alıcı hassasiyeti olarak ifade edilmektedir. Başka bir deyişle, Şekil 12b'de gösterildiği gibi daha yüksek algı düzeyine (T) sahip bir kullanıcı aygıtı ile iletişim kurmak daha kolaydır. Alıcıların karmaşıklığını arttırarak, eşik değer azaltılabilir. Alıcıların karmaşıklığı ve maliyeti kapsama alanı ile bir ödünleşim ilişkisine sahiptir.

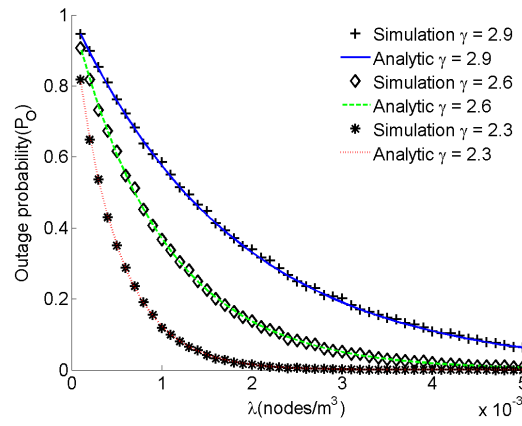
Şekil 12c'de, ağ kesintisi P_O ile yoğunluk (λ) ve yol kaybı üssü (γ) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yol kaybı üssü (γ) alınan sinyal gücünü olumsuz etkilemektedir. Kanal yüksek oranda yol kaybına eğilimli olduğunda, diğer bir deyişle, ortam koşulları sert olduğu zaman, rastgele seçilen referans düğümün kapsama alanı dışında olması kuvvetle muhtemel hale gelmektedir.



(a) P_t

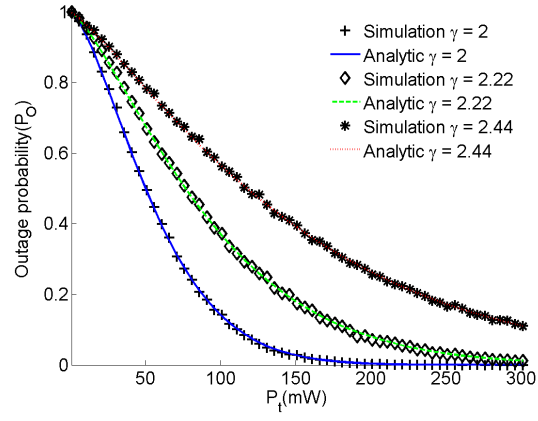


(b) T

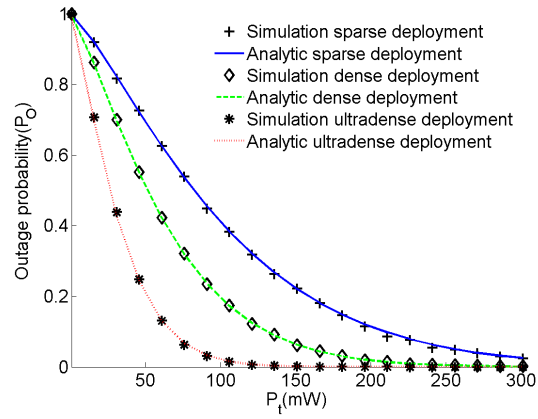


(c) γ

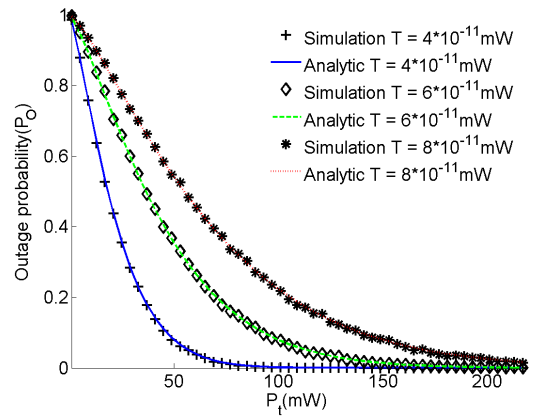
Şekil 12. Çeşitli parametreler için yoğunluğun kesinti olasılığı üzerine etkisi.



(a) γ



(b) λ

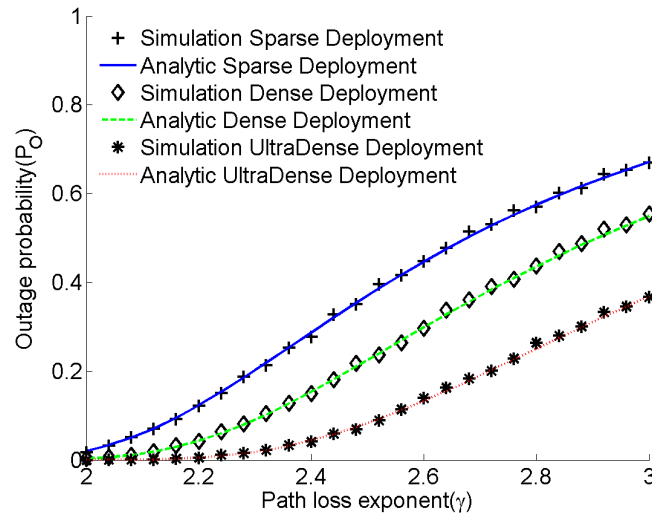


(c) T

Şekil 13. Çeşitli parametreler için iletim gücünün kesinti olasılığına etkisi.

Çok fazla iletim gücü, bir ağdaki hizmet kalitesi için çevre şartları için kötü olmasına rağmen ağ performansı açısından faydalıdır. Daha yüksek iletim gücü, diğer değişkenler sabit olduğunda daha fazla kapsama alanını ifade eder. Ancak daha büyük bir girişim miktarı anlamına da gelir. Bu nedenle bu çalışmada girişimin kapasiteye olumsuz etkisinin üstesinden gelebilecek sağlam bir girişim yönetimi planı olduğunu varsayıyoruz. Şebekenin yoğunluğu artarsa, örneğin ek (mobil) baz istasyonları kullanılırsa veya gereğinden fazla baz istasyonları hizmete açıldığında, kesilme olasılığı, Şekil 13c’de gösterildiği gibi sıfıra yaklaşır.

Yol kaybı üssü, kablosuz kanalı karakterize eden önemli bir faktördür. γ son derece yüksek olduğunda, Şekil 13a ve 14’te görülebildiği gibi kapsama dışında olması daha olasıdır. Aynı iletim gücünü ele alalım, yol kaybı üssü yüksek olduğunda ağ kapsama alanının azalacağı açıkça görülebilmektedir. Dolayısıyla, bir tahmin edicinin, yol kaybı üssü gibi kanal koşullarını belirlemesi de sağladığı sonuçların doğruluğu açısından önem taşımaktadır.

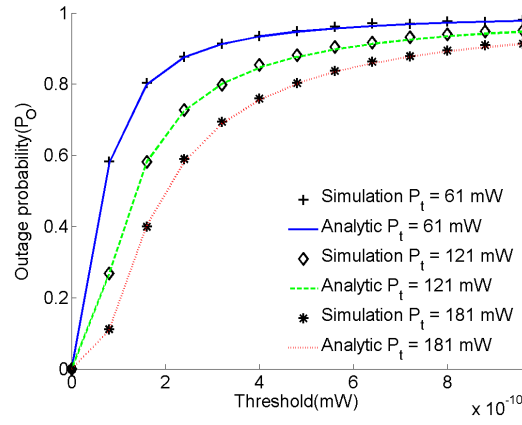


Şekil 14. Çeşitli dağıtım yoğunlukları için yol kaybı üssünün kesinti olasılığı üzerindeki etkisi.

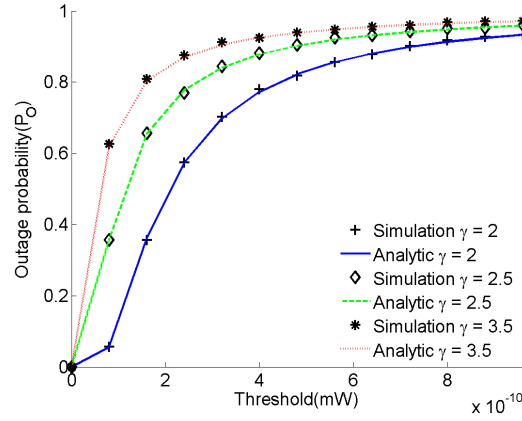
Alıcı duyarlılığını, sinyallerin kodunun çözülebilmesi için minimum gereksinim olan bir eşik değer olarak kabul etmekteyiz. Eşik değer artarsa, kesinti olasılığı Şekil 15a’da gösterildiği gibi artacaktır. İletim gücünü artırmak, kesinti oranının azalmasını sağlayacaktır. Şekil 15b’de görülebileceği gibi, hem eşik değer hem de yol kaybı üssü ağ kesintisini önemli ölçüde etkilemektedir.

4.1.8 Yoğunluk-farkında Hücre Yakınlaştırma

Alınan sonuçların ışığında, bir hücresel ağdaki baz istasyonlarının iletim gücünü ağ yoğunluğuna uyarlamaları gerektiğini iddia etmekteyiz. Baz istasyonları, ağ yoğunluğunu tahmin etmelerine yardımcı olacak araç ve tekniklerle donatılmalıdır. Önceden yapılandırılmış işlemler, özellikle de hareketli hücreler göz önüne alındığında, gelecekteki hücresel ağların oldukça dinamik olacağından yeterli olmayacaktır. Statik olarak yapılandırılan parametreler servis kalitesini düşürür ve birçok kapsama alanı kontrol problemine neden olur. Bu çalışmada, çalışma zama-



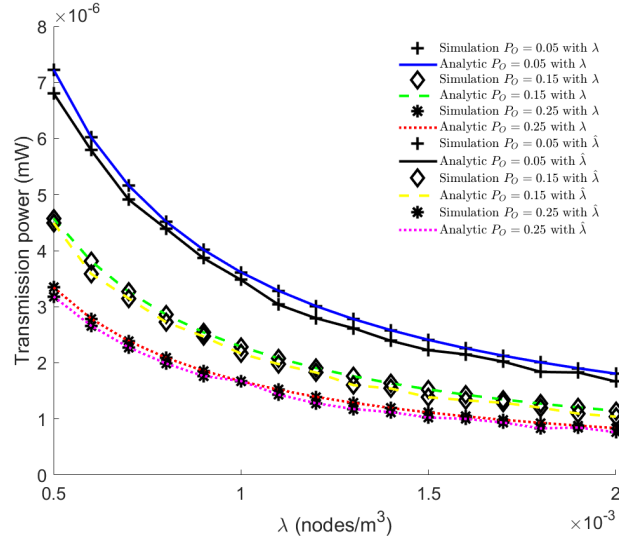
(a) P_t



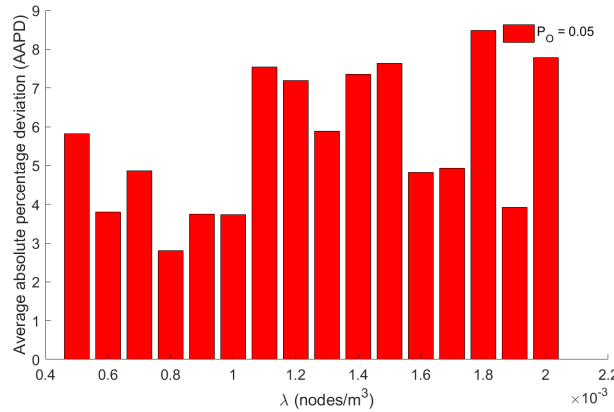
(b) γ

Şekil 15. Çeşitli parametreler için eşik değerlerin kesinti olasılığı üzerine etkisi.

nında (4) kullanarak yoğunluk duyarlı ve adaptif üç boyutlu bir hücre yakınlaştırma tekniği önermekteyiz. Bu adaptasyon, enerji tasarrufu için de çok önemlidir. Bu tekniği kullanarak bir baz istasyonunun minimum iletim gücü bütçesini belirledikten sonra, tek tek kullanıcılara veya kaynak blokların (Chen ve Baccelli, 2010) güç tahsis edilebilir olduğu görülmektedir ancak bahsedilen öneri bu çalışmanın kapsamı dışındadır.



Şekil 16. Tahmini ağ yoğunluğuna göre iletim gücü adaptasyonu.



Şekil 17. Kesinti olasılığı (P_O^*) 0.05 iken farklı λ ve $\hat{\lambda}$ değerlerinin (4) modeline uygulanmasıyla elde edilen AAPD sonuçları.

Bu çalışmada, MATLAB kullanılarak λ (nodes/m³) yoğunluğuna sahip rastgele dağıtılmış bir dizi baz istasyonu ve kullanıcı aygıtı simüle edilmektedir. Üç boyutlu bir hacimde bir dizi baz istasyonunun pozisyonu rasgele seçildikten sonra, referans bir kullanıcı aygıtının (UE) konumu olarak rastgele bir nokta seçilir. UE'nin en yakın baz istasyonuna olan uzaklığı, Bölüm 4.1.2'de sunulan kanal modeli kullanılarak, ulaşan sinyal gücü hesaplanmaktadır. Sinyal gücü önceden belirlenen eşik değerden (T) düşükse, simülasyon çalışmasının sonucu bir kesinti olarak kaydedilmektedir. Aynı simülasyon konfigürasyonunda, simülasyonlar 10^4 kere tekrarlanmakta ve kesintilerin oranı hesaplanmaktadır. Hesaplanan kesinti oranı beklenen kesinti olasılığına uymuyorsa, iletim gücü buna göre değiştirilmekte ve aynı simülasyon ayarı için tüm prosedür

Tablo 8. $\gamma = 3$ iken çeşitli yoğunluklar ve kesinti olasılığı gereksinimleri için uyarlanmış iletim gücü seviyeleri (P_O^*).

Density estimation		Transmit power levels when λ is used				Transmit power levels when $\hat{\lambda}$ is used				AAPD in transmit power levels			
$\lambda \times 10^{-4}$	$\hat{\lambda} \times 10^{-4}$	$P_{\lambda} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.05$	$P_{\lambda} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.15$	$P_{\lambda} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.25$	$P_{\lambda} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.05$	$P_{\lambda} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.15$	$P_{\lambda} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.25$	$P_{\hat{\lambda}} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.05$	$P_{\hat{\lambda}} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.15$	$P_{\hat{\lambda}} \times 10^{-6}, P_O^* = 0.25$	AAPD %, $P_O^* = 0.05$	AAPD %, $P_O^* = 0.15$	AAPD %, $P_O^* = 0.25$
6	6.24	6.02	3.81	2.79	5.79	3.59	2.66	5.91	1.78	5.91	4.53		
8	8.23	4.52	2.86	2.09	4.39	2.73	1.99	4.74	3.81	4.74	4.90		
10	10.39	3.61	2.29	1.67	3.48	2.16	1.68	5.42	4.53	5.42	0.19		
12	12.93	3.01	1.91	1.39	2.80	1.83	1.28	4.16	3.67	4.16	8.24		
14	15.11	2.58	1.63	1.19	2.39	1.54	1.12	5.72	2.80	5.72	6.25		
16	16.81	2.26	1.43	1.05	2.15	1.33	1.00	6.88	4.90	6.88	4.18		

tekrarlanmaktadır: hesaplanan kesinti oranı beklenen kesinti olasılığından yüksek olduğunda iletim gücü artırılmakta; aksi halde azaltılmaktadır. Bu yaklaşımı bir ikili arama problemi olarak formüle etmekteyiz. Bir dizi simülasyon çalışmasından sonra, deneysel iletim gücü belirlenmektedir.

Şekil 16'da, ağın yoğunluğu değiştikçe çeşitli kesinti olasılığı gereksinimleri için uyarlanmış iletim gücünü göstermektedir. Bu simülasyon sonuçları, (4)'te sunulan hücre yakınlaştırma için önerilen analitik modeli doğrulamaktadır. Bir şebeke operatörü, kullanıcıların kesintiye uğramaları nedeniyle yaşadıkları deneyimin kalitesine daha toleranslı hale geldiğinde, enerji tasarrufu miktarı artırılabilir. Ancak müşteri memnuniyeti, kesinti olasılığı ile önemli ölçüde ilişkilidir. Şebeke yoğunluğu arttıkça, kapsama alanını korumak, kesinti olasılığını kontrol altında tutmak ve enerji tasarrufu sağlamak için ağ yoğunluğu farkındalığında iletim gücünü azaltmak gerekecektir. Önerilen hücre yakınlaştırma tekniğinin ana avantajı, minimum iletişim yükü gerektirmesi, hızlı ve uygulanmasının basit olmasıdır. Bununla birlikte, tahmin edicinin eksiklikleri geliştirilmelidir. İlişkili örneklerle toleranslı çok daha hızlı bir yoğunluk tahmincisi gereklidir.

Tablo 8'de görülebileceği gibi, simülasyonlardaki gerçek dağıtım yoğunlukları (λ) olarak ele alınmıştır, $\hat{\lambda}$ cinsinden hesaplamak için ise (5) Monte Carlo simülasyonları ile sunulan işbirlikçi yoğunluk tahmincisini çeşitli kesinti olasılık değerleri altında kullanılmaktadır. Çeşitli kesinti oranları (P_O^*) ele alındığında ortaya çıkan gerçek yoğunluk λ ve $\hat{\lambda}$ işbirlikçi tahmin ediciden alınan yoğunluk sonuçları kullanılarak elde edilmiş iletim gücü seviyelerindeki AAPD sonuçları Tablo 8'da gösterilmiştir. Seyrek, yoğun ve çok yoğun ağlar için simülasyonlarda Bölüm 4.1.4'te önerilen ortak yoğunluk tahmincisini kullanılmıştır. Burada ($\hat{\lambda}$)'lar dikkate alınarak hücre yakınlaştırma doğrulanmıştır. Tabloda, çeşitli kesinti oranı gereksinimleri için AAPD değerlerinin her zaman %10'dan daha az olduğuna dikkat edilmelidir. Şekil 17'de gösterilen AAPD değerleri P_O^* 0.05 değeri dikkate alınarak elde edilmiştir.

4.1.9 İlgili Çalışmalar

Ultra yoğun ağların (UDN) yüksek kapasite sağlaması beklenmektedir. Daha yüksek frekans bantlarının potansiyeli (López-Pérez vd., 2015)'da analiz edilmiştir. Bu çalışmada, bir ağdaki UE ve BS yoğunluğu, UE dağılımı ve enerji verimliliği, daha iyi bir kapsama sağlamak için sinyal-parazit-artı-gürültü oranını (SINR) dikkate alarak iletim gücünü hesaplamak için kullanılmaktadır. Çok sayıda tekdüze rastgele yerleştirilmiş göçebe BS'den oluşan bir mobil ağda, kesinti olasılığı, mobil BS'lerin yoğunluğunun arttığı oranda (Lee ve Huang, 2012) azalacaktır. (Mordachev ve Loyka, 2008)'de ise rasgele dağıtılmış düğümlerden oluşan kablolu ağlar için bir girişim modeli, farklı türde popüler solma modelleri ile birleştirilmiştir. Bu model, en yakın girişimci toplam girişime hükmedebildiğinden, kısmi iptal yöntemini ve toplam girişim gücü yerine en yakın girişimciyi baz alarak hesaplanan kesinti olasılığını kullanarak girişim olasılığını hesaplamaktadır. Sabit bir alıcı belirli bir kullanıcı için bir baz istasyonu olarak kabul edilir ve aynı iletim gücü mobil üniteler için de düşünülür.

(Samarakoon vd., 2016)'de dinamik güç koşulları ve bilinmeyen trafik talepleri göz önünde bulundurularak ultra güç ağlar için ortak güç kontrolü ve kullanıcı zamanlaması önerilmiştir. Modelin amacı, BS'lerin kuyruk kapasitelerine bağlı olarak hizmet kalitesinin güvence altına alınması ve kesintili halde UE'lerin sayısının azaltılması için enerji verimliliğinin sağlanmasıdır. Şebeke kesintisi, amortisörlerin sıra kapasitesi kısıtlamaları nedeniyle kabul edilemeyen istenmeyen UE'lerin oranı olarak tanımlanır ve yoğunluk, büyük bir homojen UDN dağıtımı için ortalama ara-alan mesafesi (ISD) olarak belirlenir. Homojen hücresel ağlara ek olarak, heterojen bir ağ düşünülmekte ve QoS sınırlamalarını belirleyerek en uygun BS yoğunluğundan oluşan bir model incelenmektedir (Cao vd., 2012). Önerilen model ağda enerjiyi verimli hale getirmeyi ve ağ yoğunluğunun maliyet üzerindeki etkisini analiz etmeyi amaçlamaktadır. İlgili BS'nin yol kaybı ve iletim gücü kullanılarak elde edilen bir eşik değeri, kesinti olasılığını tanımlamak için kullanılmaktadır.

5G ağlarında, bağlantı ve kapsama alanı birbiriyle ilişkili iki önemli optimizasyon parametresidir ve tasarımcılar bunları ad hoc ağlarda olduğu gibi ortak olarak düşünmelidirler (Miorandi ve Altman, 2005; Panwar vd., 2016). Bu çalışmada, bağlantı probleminin, iki boyutlu simülasyonlar ve düğümlerin bağlantılarını uygulayan modeller, ad hoc şebekesi için iletim gücü ve yoğunluğu ile sonuçların sunulması yoluyla ağdaki iletim gücünün adapte edilmeden ele alınamayacağını altı çizilmektedir. Gelecekteki ağların mimarisinin dinamik ve dağıtık doğasının olacağı gerçeği, hareketli tasarsız ağlar (MANET) dağıtık ve kendi kendini organize eden bir yapıya sahiptir. MANET'lerin örnek uygulamalarından biri, taşıt amaçlı tasarsız ağlardır (VANET'ler). Khan (2013) çalışmasında bu gibi ağların, iletim performansını, ağ performansını artırmak için mobil düğümler, yoğunluk, anten tipi ve yayın tipi arasındaki mesafe gibi bazı parametreler ağına adapte etmeyi gerektiren bir dinamik yapıya sahip olduğunu belirtilmektedir. Yoğunluk ve mesafe, iletim gücünü uyarlamak için seçili parametrelerdir (Khan, 2013). Yoğunluk, birim alan başına bir ağdaki düğüm sayısını ifade eder. Yoğun ağlarda, düğümler arasındaki mesafe daha kısa olacaktır. Diğer yandan, ağ seyrek olduğunda düğümler arasındaki mesafeler daha büyük olacaktır. Bu nedenle, ağ seyrekse, iletim gücü düğümler arasındaki mesafeye bağlı olarak artırılmalıdır, ancak ağ yoğunsa, düğümler arasındaki mesafe daha küçük olduğundan daha az iletim gücüne ihtiyacımız vardır. Ancak, ağdaki kesintiyi ve girişimi dikkate almak durumundayız. Şebeke seyrek olduğunda, kesinti olasılığı daha yüksek olacaktır ve ağ yoğun olduğunda iletim gücü bu değişikliklere uyarlanmazsa düğümler arasındaki girişim daha yüksek olacaktır.

4.1.10 Sonuç

Mobil hücrelerin icadı ile, kapasiteyi, kapsama alanını ve performansı arttırmak için kendi kendini organize eden ağlara duyulan ihtiyaç daha belirgin hale gelmiştir. Yoğun ağlar gereksiz kapsama alanı sağlarken, seyrek ağlarda bağlantı kesintiye uğrayabilmektedir. Bu nedenle, baz istasyonlarının iletim gücü, kapasiteyi arttırmak için yoğunluğa bağlı olarak değiştirilmelidir. İletim gücü, alınan sinyal gücü eşiği, yol kaybı üssü ve yoğunluğun kesinti olasılığı üzerindeki etkisini analiz ettik. Beklendiği gibi, baz istasyonlarının iletim gücü ve ağ yoğunluğu, diğerlerinin aksine servis dostu parametrelerin kalite göstergesidir. Bununla birlikte, bunlar maliyet veya

çevre dostu değildir. Bu çalışmada üç önemli sonuç sunduk. Birincisi basit bir kesinti olasılık modelinin önerilmiş ve onaylanmış olmasıdır. İkinci sonuç olarak, en fazla %3-4 mutlak ortalama yüzde sapma ile doğru sonuçlar veren işbirlikçi yoğunluk tahmincisini geliştirdik ve kullandık. Son olarak, baz istasyonu iletim güçlerini dinamik bir şekilde ayarlayarak enerji tasarrufu ve hizmet kalitesinin artırılması için yoğunluk duyarlı bir hücre yakınlaştırma tekniği önerdik. Üç modelin tamamı üç boyutlu bir alan ve dağıtım göz önüne alınarak geliştirilmiştir.

4.2 Yoğunluk-uyarlı Hücre Hizalama ve Kullanıcı İlişkilendirme

Bu bölümde, Mert Çalık'ın proje kapsamında üretilmiş olan yüksek lisans tezinin (Çalık, 2018) çıktılarını ve IEEE'nin organize ettiği WCNC konferansı altında yapılan FlexNets çalıştayında bu tez kapsamında yayınladığımız bildiriye sunmaktayız (Çalık vd., 2018).

Mobil ağlarda, kapasite küçük hücreler kullanılarak artırılabilir. Bu yaklaşım ağ altyapısını genişletir ve enerji tüketimini artırır. Ayrıca, bir mobil ağdaki trafik talepleri zaman veya uzayda sabitlenmez ve önceden kesin olarak tahmin edilemez. Bu nedenle, baz istasyonu planlaması, hücre yakınlaştırma veya kullanıcı-tabanlı baz istasyonu bağlantısı gibi ağ işlevlerinin daha fazla enerji tasarrufu için dinamik olarak kontrol edilmesi gerekir. Literatürdeki ilgili çalışmaların çoğu bu zorlukları ayrı ayrı ele almaktadır. Bu çalışmada, enerji tüketimini azaltmak ve hizmet kalitesini arttırmak için ortak bir baz istasyonu hizalama, yakınlaştırma ve kullanıcı ilişkilendirme tekniği sunmaktayız. Bu çalışmanın en önemli katkısı, temel baz istasyonlarını kapatarak ve aktif ana istasyonların iletim gücünü ağ koşullarına uyarlayarak kullanıcıların yaşadığı hizmet kalitesini koruyarak güç tüketimini azaltmaktadır. MATLAB optimizasyon araç kutusunu kullanarak önerilen tekniği doğruladık. Bu çalışmada, alternatif bir çözüm ile karşılaştırıldığında enerji tüketimini % 47 oranında azalttık.

4.2.1 Giriş

Mobil şebekelerde, üstel olarak artan trafik yükünü taşıma kapasitesini artırmak için çok sayıda baz istasyonu (BS) ve büyük miktarda enerji gereklidir. BS'ler, bir hücresel şebekede enerji maliyetlerinin en büyük payını oluştururlar Wu vd. (2015). Mobil ağlar, BS'lerin hizmet kalitesini (QoS) ve kapsama gereksinimlerini karşılamak için sürekli olarak çalıştıkları uygulamada, aşırı trafik yük senaryoları (örneğin yoğun saatler) için ağırlıklı olarak boyutlandırılmaktadır. Bununla birlikte, gerçek trafik yükü normal günlük çalışma döngüsü sırasında değişir. Sonuç olarak, çoğu zaman için çok sayıda BS'ler yetersiz kullanılmaktadır. Sonuç olarak, muazzam miktarda enerji harcanmaktadır.

Bu fenomen doğrudan sera gazı emisyonlarında artışa neden olmakta ve bu da çevreye büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Chen vd., 2011). Dünyadaki enerjinin yaklaşık %3'ü, tüm dünyada CO₂ emisyonlarının yaklaşık %2'sine karşılık gelen bilgi ve iletişim teknolojileri (ICT) altyapıları tarafından tüketilmektedir (Huq vd., 2015). Bu nedenle, yüksek enerji verimliliği (EE) öncelikli bir konu haline gelmektedir ve tasarruf enerjisi beşinci nesil (5G) mobil ağların tasarımında ağırlıklı

olarak ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, enerji tüketimini optimize etmenin yanı sıra, yeni nesil ağlarda QoS ve ağ kapsamını da garanti etmeliyiz.

Enerjiyi korumak için, mobil ağın ağ koşullarına ve trafik yüküne uyarlanması gerekir. Örneğin, yedek baz istasyonları kapatılabilir ve kullanıcılar mümkün olan en iyi BS ile ilişkilendirilebilir. BS'lerin iletim gücü seviyeleri kullanıcı ve BS yoğunluğuna uyarlanabilir. İletim gücü adaptasyonu ve ağ kapsama alanının korunması, yüksek derecede ilişkili oldukları için birlikte optimize edilmelidir. Örneğin, baz istasyonları komşu baz istasyonlarının iletim gücünü arttırmak yerine kör noktalarda açılabilir.

Literatürde bu soruna hitap eden birkaç çözüm bulunmaktadır. Düşük bir karmaşıklığa sahip dağıtılmış bir sezgisel algoritma, Yassin vd. (2014b)'de önerilmiştir. Bu çözümde, BS'ler diğer hücrelerin farkında değildir. Bu nedenle, kapsam boşluklarına veya enerji israfına neden olabilir. (Komnakos vd., 2013)'da BS'ler trafik tahminlerine göre dağıtılmıştır. Bununla birlikte, ağ değişken olan kullanıcı yoğunluğuna veya trafik talebine uyarlayamaz. Baz istasyonları için uyku zamanlama algoritmaları (Kyriazis ve Rouskas, 2016) ve (Li vd., 2016) olarak önerilmiştir. Bununla birlikte, BS'ler güç adaptasyonu olmadan programlanır ve aktif BS'ler, ortamda birkaç kullanıcı ekipmanı (UE) olsa bile, tam güçleriyle çalışır. (Liu vd., 2016a)'da, küçük hücreler için bir uyku planlama tekniği önerilmiştir. BS'ler operasyonel, bekleme, uyku veya kapalı durumlarda olabilir. Uyku planlaması, BS'lerin kapsama olasılığı ve uyandırma zamanları göz önüne alınarak optimize edilmiştir. Bununla birlikte, bu işlem, diğer hücrelerin veya katmanların koşullarını dikkate almadan, tek bir küçük hücreye uygulanır. (Lateef vd., 2015)'da heterojen ağlar için dinamik bir hücre yakınlaştırma ve BS uyku optimizasyonu algoritması önerilmiştir. Problemi doğrusal programlama problemi olarak formüle edip, bazı kısıtlamalar tanımlayıp ve problemi bir optimizasyon aracıyla çözmüşlerdir. Ancak, kapsama olasılığını kendi formülasyonlarında doğrudan düşünmemektedirler.

Bu yazının ana katkısı, çoklu erişimli uç hesaplama (mobil uç hesaplama, MEC) kullanan bir ortak hücre yakınlaştırma, programlama ve kullanıcı ilişkilendirme tekniği olan JOCell'dir. Güç adaptasyonu ve uyku zamanlama tekniklerinin kullanılmadığı temel modele kıyasla güç tüketimi önemli ölçüde azalır. Güç, korunan BS'ler kapatıldığı ve aktif BS'lerin iletim gücünü JOCell'deki ağ koşullarına göre uyarladıkları için korunur. (Lateef vd., 2015)'da sunulan çalışma ile karşılaştırıldığında, JOCell, önerilen algoritmadaki BS-yoğunluk-bilinçli kesintiyi düşündüğümüzden, enerji tüketiminde %5'lik bir artışla %47'lik kullanıcı memnuniyetini arttırmaktadır.

JOCell ve ortak optimizasyon problemi Bölüm 4.2.2'de sunulmaktadır. Metodoloji ve sonuçlar sırasıyla 4.2.3 ve 4.2.4 bölümlerinde tartışılmaktadır. Sonrasında önemli vurgularla bu bölüm sonlandırılmaktadır.

4.2.2 JOCell: Problem Tanımı

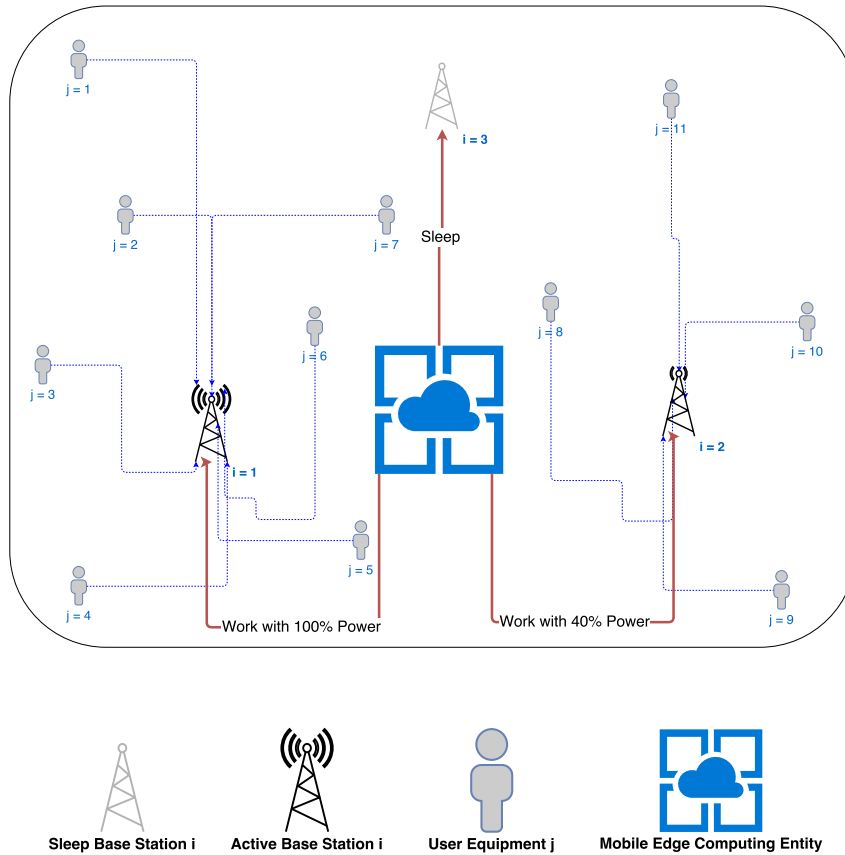
Günümüzün baz istasyonlarındaki klasik güç tüketimi dağılımı Tablo 9'da görülebilir. En büyük enerji, esas olarak güç amplifikatörleri (PA) ve klima sistemleri gibi ağ cihazlarında tüketilir. Enerjiyi korumak için, trafik yükünün zamansal ve uzamsal varyasyonlarını dikkate alan, enerji

ile ilgili yeni ağ boyutlandırma çözümleri önerilmelidir (Kyriazis ve Rouskas, 2016).

Tablo 9. Makro ve mikro hücreli radyo erişim ekipmanlarında güç tüketimi dağıtımı (Kyriazis ve Rouskas, 2016).

Ekipman	Güç tüketimi oranı
Güç tüketimi	50-80 % (~ 1200 W)
Klima	10-25 % (~ 300 W)
Sinyal İşleme (Analog / Dijital)	5-15 % (~ 200 W)
Güç kaynağı	5-10 % (~ 100 W)

Gereksiz BS'lerin kapatılacağı ve tüm aktif BS'lerin tam güçte çalışması gerektiği Şekil 18'de gösterilmektedir, burada $i = 1, 2, \dots, M$ ile endekslenen N kullanıcı aygıtı (UE) ve $j = 1, 2, \dots, N$ endekslenen M baz istasyonu (BS) olduğunu varsayıyoruz (Lateef vd., 2015). BS'ler bir MEC'e bağlıdır. Bu çalışmada, ortak uyku planlaması ve hücre yakınlaştırma problemi olan JOCell'i formüle ediyoruz. JOCell'in çözümü MEC üzerinde çalışacaktır. Bu mimaride, BS'ler MEC'ye bağlanır ve MEC çekirdek ağ ile etkileşime girebilir. JOCell hangi BS'lerin aktif olması gerektiğini, UE-BS ilişkilerini ve BS'lerin iletim gücünü belirler. JOCell'in sonuçları üretmesinden sonra, MEC'de çalışan diğer kendi kendine organizasyon işlevleri, BS'leri JOCell'in sonuçlarına göre dinamik olarak yapılandırabilir. UE'lerin pozisyonlarının bilineceğini ve kullanıcıların trafik taleplerinin, kullanıcıların trafik istatistikleri kullanılarak kabaca tahmin edilebileceğini varsayıyoruz.



Şekil 18. Sorunlu formülasyonda dikkate alınan mobil ağ topolojisi.

a_{ij} , BS i ve UE j arasındaki ilişkiyi temsil etsin. UE j , BS i 'a bağlanırsa $a_{ij} = 1$, aksi takdirde

sıfırdır. BS i ve UE j arasındaki (spektral) verimliliği

$$e_{ij} = \log_2(1 + \text{SINR}_{ij}) \text{ bits/Hz},$$

olarak tanımlarız, SINR_{ij} , UE j 'nin BS i 'den ölçtüğü SINR'dır. BS i tarafından UE j 'ya sağlanan hız r_{ij} Mbps olarak tanımlanır. Ardından, gerekli bant genişliği

$$w_{ij} = r_{ij}/e_{ij} \text{ MHz},$$

olur. Gruber vd. (2009)'a göre, güç tüketimi P_c ile BS i 'nin çıkış gücü seviyesi P_i^{out} arasındaki ilişki

$$P_c = P_0 + \delta_i P_i^{\text{out}} \text{ W},$$

olacaktır. Burada, $P_{t_{\min}} < P_i^{\text{out}} \leq P_i^{\text{max}}$ ve P_0 minimum güç tüketimidir. BS i çalışmıyorken δ_i güç amplifikatörü verimliliği, $P_{t_{\min}}$ minimum iletim gücü ve P_i^{max} bu BS'in maksimum RF çıkış gücüdür. BS i 'de kullanılacak bant genişliğini L_i olarak tanımlanması durumunda, BS i 'nin çıkış gücü $P_i^{\text{out}} = L_i \times P_i^{\text{max}}$ olur ve $0 \leq L_i \leq 1$ geçerlidir. Burada,

$$L_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \frac{w_{ij}}{W_i}$$

olur ve BS i 'ye ayrılan toplam bant genişliği W_i 'dir (Lateef vd., 2015).

Ağda servis kalitesini korumak için, kesinti olasılığı $\mathcal{P}_O$ her zaman $\mathcal{P}_O^*$ eşliğinden küçük olmalıdır. Baz istasyonların rastgele dağıtıldığını varsayalım, basit yol kaybı modeli göz önüne alındığında bir baz istasyonundan ağdaki rastgele seçilmiş bir UE'nin ölçtüğü güç

$$P_r = C P_t \left(\frac{d_0}{d} \right)^\gamma, \quad (7)$$

olacaktır. Burada C referans uzaklığı d_0 'da ölçülen toplam zayıflama faktörleri ve anten kazanımlarıdır (bu çalışmada $d_0 = 1$ m olarak aldık.), P_t iletim gücü, d UE BS arasındaki mesafe ve γ yol kaybı üssüdür. Kesinti olasılığı

$$\mathcal{P}_O = e^{-\pi \hat{\lambda} (C P_t / T)^{2/\gamma}}, \quad (8)$$

olur. Burada $\hat{\lambda}$ BSs/m² baz istasyonu yoğunluğu ve T alıcı duyarlılığıdır. BS i açık ve aktif olduğunda $o_i = 1$ değerini tanımlarız, aksi halde sıfırdır. Yüzey alanı A ile temsil edilmektedir. Ağın yoğunluğu

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^M o_i}{A}$$

BS sayısı/m² olacaktır. $\mathcal{P}_O^*$ değerini karşılayan minimum baz istasyonunun iletim gücü $P_{t_{\min}}$ (8) kullanılarak hesaplanır:

$$P_{t_{\min}} = \frac{T}{C} \left(\frac{-\log(\mathcal{P}_O^*)}{\pi \hat{\lambda}} \right)^{\gamma/2} \text{ W} \quad (9)$$

UE j , BS i ile ilişkilendirilmişse, o zaman UE j 'ye ayrılan oran r_{ij} , bu kapasiteyi aşmamalı ve aynı zamanda bu kullanıcının d_j (Mbps) olarak gösterdiğimiz veri hızı gereksinimini karşılamalıdır. Diğer bir deyişle, $a_{ij}e_{ij}W_i \geq r_{ij} \geq d_j$ olmalıdır. Burada, kullanıcı gereksinimlerinin önceden bilindiğini varsayıyoruz. UE j yalnızca açık olan BS'lere bağlanabilir: $a_{ij} \leq o_i \forall j$. UE j aynı anda en fazla bir BS ile ilişkilendirilebilir:

$$\sum_{i=1}^M a_{ij} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

UE j BS i ile yalnızca $SINR_{ij}$ değeri SINR eşik değerinden T_S büyük olduğunda, $a_{ij}SINR_{ij} \geq T_S$ ilişkilendirilebilir. Son olarak, bir UE diğer aktif BS'ler arasında en yüksek SINR değerini sağlayan BS'ye bağlanmalıdır. Yani,

$$SINR_{ij} \geq SINR_{kj} \quad (11)$$

$i, k = 1, 2, \dots, M$ ve $i \neq k$.

Bu modele ve bu kısıtlamalara dayanarak, optimizasyon probleminin amacı, ağdaki toplam güç tüketimini

$$\min \left(\sum_{i \in S} o_i \left(P_0(i) + \delta_i \times \left(\sum_{j \in U} \left(a_{ij} \frac{w_{ij}}{W_i} \right) \right) \times P_i^{max} \right) \right) \quad (12)$$

en aza indirmektir.

Bu problemin çözümü, bir baz istasyonunun aktif olup olmayacağını ve kullanıcının aktif olup olmayacağını gösteren $o_i \in \{0, 1\}$ ve $a_{ij} \in \{0, 1\}$ değişkenlerini hesaplamalıdır. $\mathbf{o}$ vektörü M elemandan oluşur ve $\mathbf{a}$ matrisi MN elemandan oluşur. $\mathbf{a}$ için $\mathbf{o}$ ve 2^{MN} farklı çözümler için 2^M farklı çözüm var. Bu nedenle, bu kombinatorik eniyileme probleminin arama uzayı $O(2^{MN+M})$ 'dir. BS'lerin ve UE'lerin sayısındaki artışla arama uzayı üssel olarak büyür.

Tablo 10. Simülasyon değerleri ve parametreler.

Parameter	Value	Unit	Reference
P_0	14.9	W	(Lateef vd., 2015)
P^{max}	125	mW	(Series, 2009)
Taşıyıcı frekans	3.4	GHz	(Series, 2009)
Bant genişliği	20	MHz	(Series, 2009)
δ	8		(Lateef vd., 2015)
Termal gürültü	-174	dBm/Hz	(Series, 2009)
C	-30	dBm	(Nagesh vd., 2013)
T	-90.86	dBm	(Nagesh vd., 2013)
γ	1.69		(Series, 2009)
A	250	m^2	
$\mathcal{P}_O^*$	0.02		
T_S	-18	dB	(Ahmed ve Yanikomeroğlu, 2004)

Tablo 11. Genetik algoritma parametreleri.

Parameter	Value
<i>CrossoverFraction</i>	0.8
<i>MaxGenerations</i>	$100 \times M \times N$
<i>MaxStallGenerations</i>	50
<i>MaxStallTime</i>	∞
<i>MaxTime</i>	∞
<i>MigrationDirection</i>	Both
<i>MigrationFraction</i>	0.2
<i>MigrationInterval</i>	20
<i>FunctionTolerance</i>	10^{-6}
<i>ConstraintTolerance</i>	10^{-3}

4.2.3 Metodoloji

MATLAB Global Optimization Toolbox'ta JOCell, (12) ve ilgili kısıtlamaları uyguladık. MATLAB Global Optimization Toolbox'ın genetik algoritma (GA) çözücüsü kullandık. Bu bölümde, sonuçları sunuyoruz ve değerlendiriyoruz. JOCell'in, tüm ana istasyonların her zaman açık olduğu ve UE'lerin sayısı ve yoğunluğuna bakılmaksızın tam güçle çalıştığı geleneksel model ile ve aynı zamanda (Lateef vd., 2015)'da önerilen çözümle karşılaştırıyoruz. Bu uygulamanın parametre değerleri ve genetik algoritma yapılandırması sırasıyla Tablo 10 ve Tablo 11'de gösterilmiştir.

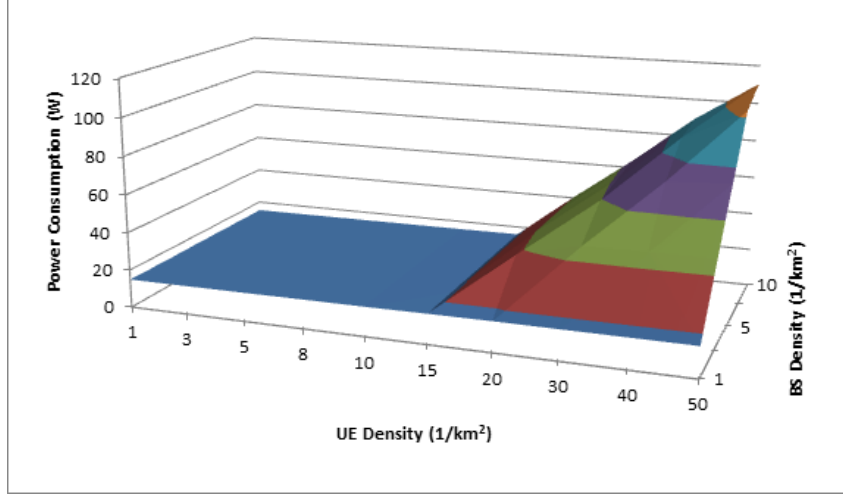
Deneylerimizi bir alışveriş merkezi gibi bir iç mekan senaryosu için MATLAB'da simüle ediyoruz. Kanal modelini ve sistem parametresi değerlerini bu senaryoya göre ayarladık. BS'ler ve UE'lerin konumları rasgele seçilir ve aktif BS'leri ve bunlara bağlı olan kullanıcıları belirlemek için genetik algoritma (GA) çalıştırıyoruz.

Güç tüketimi sonuçlarını kullanıcı memnuniyeti ölçümleriyle birlikte sunuyoruz. Bu çalışmada, kullanıcı memnuniyeti (S) yüzdesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$S = 100 \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij}}{N} \quad (13)$$

Bir kullanıcı bir baz istasyonu ile ilişkilendirilmişse, o kullanıcının veri oranı gereksiniminin karşılandığı ve ilişkili BS'den alınan $SINR$ değerinin eşik değerinden daha yüksek olduğu anlamına gelir. Bu koşullar altında, bir kullanıcı talebi karşılandığında bir baz istasyonu ile ilişkilendirilir. Bu nedenle, baz istasyonu ile ilişkilendirilen kullanıcı sayısının sistemdeki tüm kullanıcı sayısına oranı, kullanıcı memnuniyet oranını bize verir.

Sonuçlarımızı, temel model ve (Lateef vd., 2015)'da sunulan modelle karşılaştırıyoruz. Temel modelde, tüm baz istasyonları her zaman aktiftir ve mümkün olan en yüksek güç seviyelerine sahip sinyaller iletir. Genel kazanımları belirlemek için temel modeli kullanıyoruz. (Lateef vd., 2015)'da yazarlar benzer bir güç optimizasyonu algoritması sunar. Ancak, kesinti olasılığını dik-



Şekil 19. UE ve BS yoğunlukları için güç tüketimi değerleri.

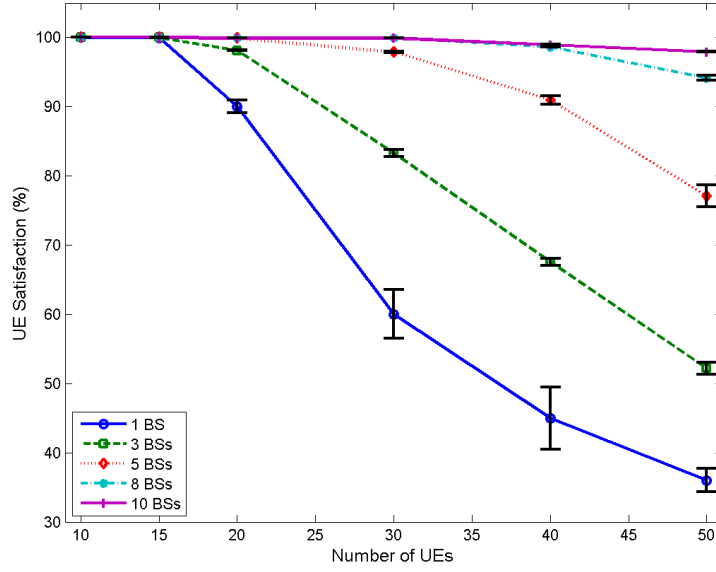
kate almamaktadırlar, BS-yoğunluğu farkında değildirler ve UE'ler alınan SINR miktarını dikkate alarak en iyi BS ile ilişkilendirme söz konusu değildir.

4.2.4 Sonuçlar ve Değerlendirme

Deneylerde, çeşitli sayıda UE ve BS bir alana rastgele dağıtılmıştır. Farklı UE ve BS yoğunlukları için güç tüketimi değerleri Şekil 19'da gösterilmiştir. UE sayısı 15'ten az olduğunda sadece 1 BS açık durumda ve güç tüketimi değeri yaklaşık olarak 15 W olacaktır. Ortamda 10 BS olsa bile, aktif UE'lerin sayısı 15'ten küçük olduğunda, (8) ve (11) gibi servis kalitesi gereksinimlerini karşılamak için yalnızca bir BS yeterlidir. Benzer şekilde, sistemdeki UE'lerin sayısı arttıkça ilave BS'lerin aktive edilmesi gerekecek ve bu da tüketilen güç miktarında bir artışa neden olacaktır. Örneğin, Şekil.19'da gösterildiği gibi, ortalama aktif BS'ler 20 UE için 2.62, 30 UE için 4.16, 40 UE için 5.82 ve 50 UE için 7.17'dir ve ortalama güç tüketimi değerleri sırasıyla 40.5, 64.1, 89.4 ve 110.3 W olacaktır.

Şekil 20'de, farklı BS ve UE sayıları için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri gösterilmiştir. UE'lerin sayısı arttıkça, genel UE memnuniyeti yüzdesinin azaldığını ve aktive edilmek için yeni BS'lere ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir.

Temel modelde, ağdaki genel enerji tüketimi UE'lerin yoğunluğundan etkilenmeyecektir çünkü tüm BS'ler her zaman açıktır ve maksimum iletim gücüyle çalışır. Güç tasarrufu miktarını ve JO-Cell'in aktif BS'lerinin ortalama yüzdesini, Şekil 21 ve Şekil 22'de Lateef vd. (2015)'in önerdiği teknik ile karşılaştırmaktayız. Lateef vd. (2015) bir güç optimizasyonu algoritması önermiştir. Ancak, kesinti olasılığını ve her UE için en iyi BS'yi seçmeye yönelik herhangi bir kısıtlamayı dikkate almamışlardır. Her ne kadar, bu rakip çalışma JOCell'e kıyasla %5 daha fazla güç tasarrufu sağlayabilse de, bu kazanım servis kalitesinden ödün vererek ve UE memnuniyetini (8)'deki kapsama sınırlamasını göz ardı ederek elde etmektedir. Rakip çalışmada UE'lerin, (11)'de gösterildiği gibi en iyi SINR değerini sağlayan hücreye bağlanması söz konusu değildir.



Şekil 20. %95 güven aralığında 1, 3, 5, 8 ve 10 BS için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri.

Şek. 23 ve Şekil. 24, JOCell'deki UE memnuniyetini, sırasıyla 5 ve 10 BS depolanma senaryosu için (Lateef vd., 2015) ile karşılaştırmaktayız. Gösterildiği gibi, tüm bu durumlarda, ek QoS kısıtlamalarımız (8) ve (11) nedeniyle, JOCell daha iyi kullanıcı memnuniyeti değerleri üretmektedir (Lateef vd., 2015). Kullanıcı memnuniyetini (Lateef vd., 2015)'e göre %47 kadar daha iyi bir sonuçla geliştirdik.

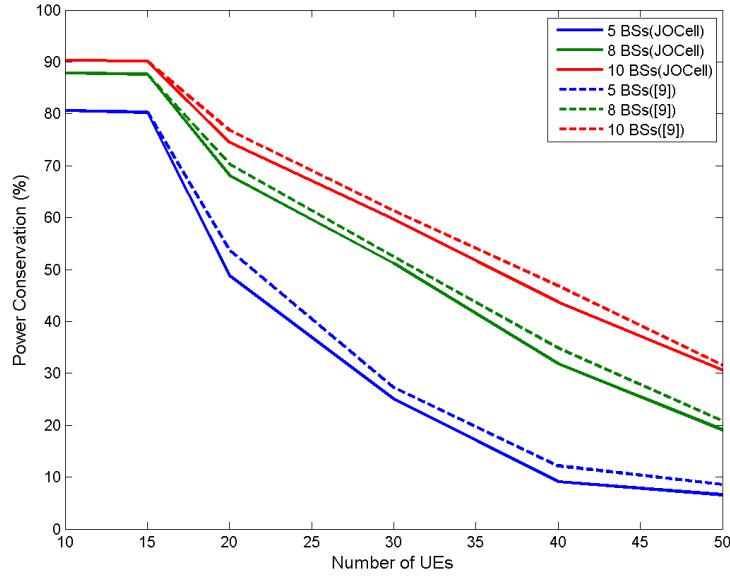
4.2.5 Sonuç

Bu çalışmada, enerji tüketimini azaltmak ve mobil ağdaki hizmet kalitesini arttırmak için kullanıcı memnuniyeti ve yoğunluk duyarlı bir hücre yakınlaştırma ve baz istasyonu çizelgeleme tekniği olan JOCell'i öneriyoruz. JOCell, aktif baz istasyonlarının şebeke koşullarına göre iletim gücünü uyarlar ve kullanıcı taleplerini karşılarken gereksiz baz istasyonlarını kapatır. Bu çalışmada bir optimizasyon problemi tanımlayıp, genetik algoritmalarla çözdük. Farklı baz istasyonu ve kullanıcı yoğunlukları için çözümümüzü test ettik ve alternatif bir çözümle karşılaştırdık. JOCell, optimize edilmemiş temel modele göre yüksek enerji tasarrufu sağlayabilir. Her ne kadar JOCell, hizmet kalitesinde, enerji tasarrufu daha yüksek bir öneme sahip olduğu için, alternatif çözümünden %5 geride kalsa da, kullanıcı memnuniyetini %47'ye kadar artırır.

4.3 Uç Hesaplama Kullanarak Mobil Ağlarda Yoğunluk Algılama

Bu bölümde, IEEE SIU konferansında yayınladığımız bildiriye sunuyoruz (Mollahasani ve Onur, 2018).

Mobil ağlardaki temel sorun, ağ kapasitesini ve geçmişte genişleyen kapsama alanını arttırmak olsa da, yeşil operasyon son zamanlarda önemli bir sorun haline gelmiştir. Mobil ağlarda



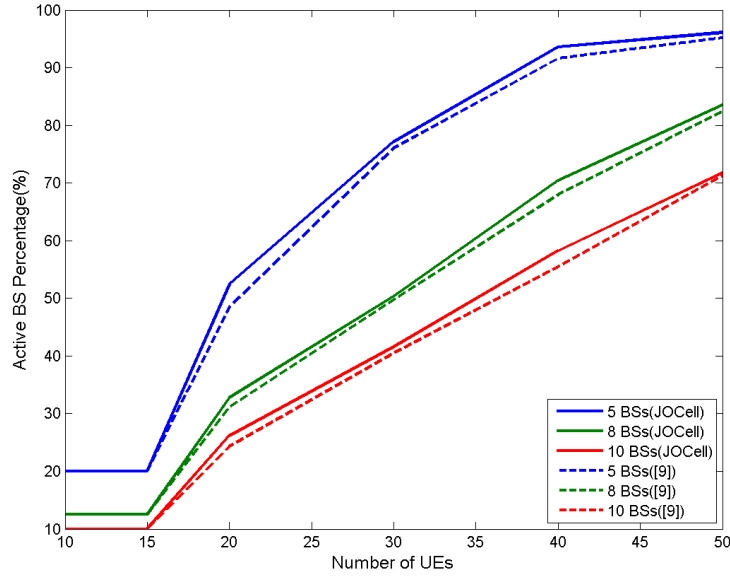
Şekil 21. 5, 8 ve 10 BS için güç koruma yüzdesi değerleri.

enerji tasarrufu sağlamak, karmaşıklığı ve gecikmeyi azaltmak için gerçek zamanlı veri ve boşaltma işlem görevlerine uçlara erişmek için mobil uç hesaplamayı kullanıyoruz. Uç bulut, bir ana istasyona göre ağın daha büyük bir görüntüsüne sahiptir. Bu nedenle, kapsama deliklerini önlerken genel sistem çıktısını arttırmak için baz istasyonlarının yoğunluğunu dikkate alarak kapsama olasılığını değerlendirebilir. Bu, kullanıcı deneyimini geliştirebilir ve ağdaki yanıt süresini azaltabilir. Bu çalışmada bir LTE ağındaki enerji tüketimini azaltan ve ortalama verimi artıran bir yoğunluk-uyarlamalı güç kontrol algoritması öneriyoruz. Güç tahsis ve girişimin sistem performansını nasıl etkileyebileceğini gösteriyoruz. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın, temel modele nazaran (güç tahsis modeli olmaksızın) %67'ye varan enerji israfını azalttığını ve son çalışmalara göre ise %28 azaltabildiğini aynı zamanda ortalama verimin %22 olduğunu göstermektedir.

4.3.1 Giriş

Son yıllarda, mobil ağlar muazzam bir şekilde büyümüş ve mobil iletişim hayatımızdan ayrılmaz bir teknoloji haline gelmiştir. Abonelerin sayısı arttıkça ve şebekeler büyüdükçe, enerji tüketimi mobil şebekelerde astronomik olarak artar. Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki (ICT) enerji israfı miktarının azaltılması önemlidir çünkü toplam karbondioksit-eşdeğer gaz emisyonlarının %2'si iletişim teknolojileri tarafından üretilmiştir ve yükselme eğilimi vardır. Enerji maliyetleri OPEX'teki en büyük payı oluşturmaktadır. En büyük enerji tüketimi, %57 civarında BS'ler tarafından tüketilirken, mobil anahtarlama, çekirdek iletim ve veri merkezleri sırasıyla %19, %15 ve %7 tüketir (Choi vd., 2015).

Downlink güç tahsis modelleri, güç tüketimini azaltırken sistem verimini ve kullanıcı deneyimini etkileyebilir. Aşırı güç dağılımları yüksek miktarda girişime neden olabilir. Düşük güç tahsis



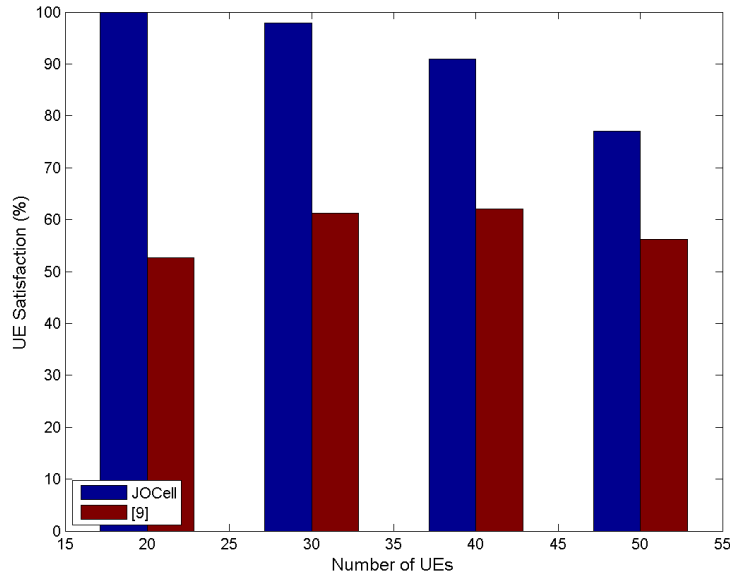
Şekil 22. Farklı UE'ler için ortalama aktif BSs yüzdesi.

kapsama boşluklarına neden olabilir. Bu aşırı vakaların her ikisi de performansı düşürmektedir.

Bu yazının ana katkısı olarak, sistemin genel karmaşıklığını azaltmak ve her BS'nin genel ağ durumuna göre gücünü uyarlamasını kolaylaştırmak için bir melez güç tahsisi algoritması önermekteyiz. Uç bulutunu kullanarak, kapsama olasılığını ve ağdaki kapsama boşluklarını azaltmak adına ilgili modülasyon ve kodlama şemasını belirlemek için BS'lerin ortalama yoğunluğunu dikkate almaktayız. Böylece, uç bulutları kullanarak, kullanıcı deneyimini iyileştirir ve güç kaynağını uyarlamak için genel ağ koşulu hakkında BS'leri bilgilendirmenin yanı sıra yanıt süresini azaltır.

4.3.2 İlgili Çalışmalar

Her bir alandaki gerekli QoS bazında sadece en iyi BS setini açarak enerji israfını azaltmak için farklı tip BS'lerin enerji tüketimi sunulmaktadır (Yu vd., 2016c). En iyi aktif BS sayısı hesaplanarak ve sistem çıkışında herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadan yedek BS'lerin kapatılmasıyla enerji korunabilir (Feng vd., 2017a; Yu vd., 2016a). Bununla birlikte, bu çalışmaların hepsinin, her bir müşterinin trafik yüküne ve tüm sistemin istatistiklerine erişmesi gerekir; bu, trafiğin öngörülebilir olmadığı gerçekçi koşullar altında uygulanamaz. Çok kullanıcıli OFDMA sistemlerinde hücreler arasındaki girişimin üstesinden gelmek için, işlem ana taşıyıcı tarafından paylaşılan bilgi miktarına dayalı olarak merkezi veya dağıtılmış bir şekilde yapılabilir. BS'ler arasında tutarlı ve ortak koordinasyon sayesinde, girişim ortadan kaldırılabilir. Su doldurma tekniğine dayanan merkezi bir çok hücreli şema, UE'ler arasındaki girişim miktarını azaltmak için koordineli bir baz istasyonu transmisionunda gücü dağıtmak için kullanılabilir (Gandotra vd., 2017). Bunlar, daha fazla senkronizasyon ve daha büyük ana taşıyıcı kapasitesi gereksinimleri karşılığında elde edilebilen optimal merkezi çözümlerdir. Bazı çalışmalarda, girişim aynı zamanda analiz edilmiş ve genel ağ koşulu göz önüne alınmaksızın, her bir hücrede CQI se-



Şekil 23. Bizim algoritmamız için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri ve 5 BSs için (Lateef vd., 2015) algoritması.

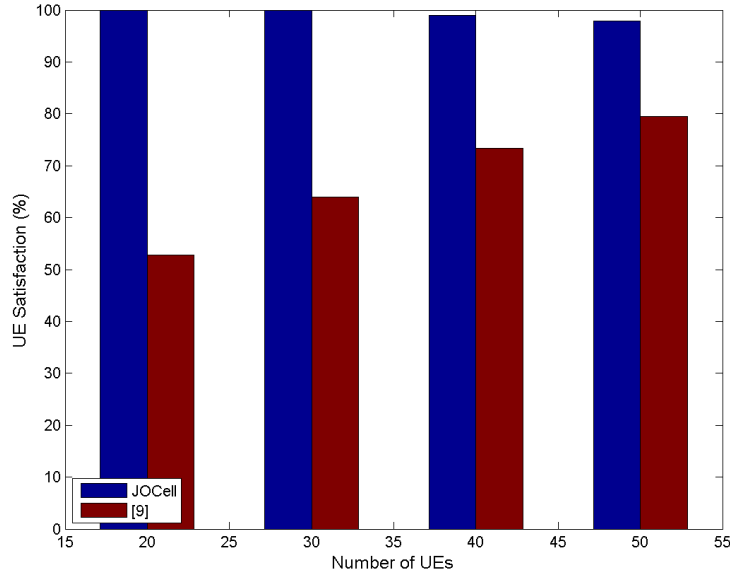
viyesinin ayrı tutulmasıyla dağıtılmış bir şekilde azaltılmaya çalışılmıştır (Yassin vd., 2014a). Merkezi çözümlerin temel dezavantajları, sistemin tek noktadaki başarısızlığına ve yüksek karmaşıklığına eğilimlidir. Dağıtılmış algoritmalarda, ağ yapılandırması, genel ağ kapsamı gibi diğer parametreler göz önünde bulundurulmadan her bir hücreye göre ayrı ayrı tanımlanır. Bu çalışmadaki çözümümüz, uç hesaplamayı kullanarak, merkezi ve dağıtılmış çözümlerin avantajlarını birleştirmektedir.

4.3.3 Hibrit Güç Tahsisi

Bu çalışmada, melez modeli, yerel bir şekilde uç bulutu aracılığıyla veriye erişmek ve süreci BS'ler arasında dağıtarak ağdaki hesaplama yükünü azaltmak için kullanıyoruz. Önerilen güç denetleyicisinin görevleri iki bölüme ayrılmıştır. İlk görev olarak, uç bulut, kanal kalitesi ve modülasyon/kodlama arasında yerel bir formatta yeterli bir eşleşmeyi belirlemek için mobil ağda kanal kalitesi ölçümleri gibi gerçek zamanlı verileri toplar ve işler. İkinci görev olarak, baz istasyonları, dağıtılmış bir şekilde, çok kısa aralıklarla her kullanıcıya güç tahsis eder.

4.3.4 Kapsam ve Kanal Kalite Karakterizasyonu

İlk adımda, ölçülen SNIR'ye dayalı kapsama olasılığı, gösterildiği gibi uç bulutunda hesaplanır (bakınız Şekil 25). SNIR'ye dayalı ağ kapsamını tahmin etmek, üzerinde yaygın çalışılmış bir konudur (Keeler vd., 2013; Andrews vd., 2016). Benzer kapsama olasılığını elde etmek için Monte-Carlo simülasyonları kullanıyoruz (Keeler vd., 2013). İki boyutlu bir alanda rastgele dağıtılmış ana istasyonları λ ($nodes/km^2$) etkin yoğunluğuyla değerlendiriyoruz. Yol kaybı fonk-



Şekil 24. Algoritma için UE memnuniyeti yüzdesi değerleri ve 10 BS için (Lateef vd., 2015) algoritması

siyonu $l(d) = Kd^\gamma$, olarak tanımlanır $K > 0$ yol kaybı sabitini, $\gamma > 2$ yol kaybı üssünü ve d mesafeyi temsil etmektedir. Kapsama olasılığını $P_C(T)$ en yakın baz istasyonu tarafından iletilen sinyallerin rastgele bir pozisyonda bir UE tarafından ölçülen SNIR'nin bir T eşik değerinden daha az olacak şekilde ölçülmesi olasılığı olarak tanımlarız; yani, $P_C(T) = \text{Prob}(SINR > T)$. Bu çalışmada, kapsama olasılığı $P_C(T)$ olarak Keeler vd. (2013) tarafından önerilen şu,

$$P_C(T) = \frac{2}{\gamma} \int_0^\infty t^{\frac{2}{\gamma}-1} e^{-tTN_0\alpha^{-\frac{2}{\gamma}}} e^{-t^{\frac{2}{\gamma}}} \times \left(-\frac{2Tt^{\frac{2}{\gamma}} F(1, 1 - \frac{2}{\gamma}; 2 - \frac{2}{\gamma}; -T)}{\gamma (1 - \frac{2}{\gamma})} \right) dt, \quad (14)$$

ifadeyi kullanıyoruz. Burada,

$$\alpha = \frac{\lambda \pi \mathbf{E}[(P_d S_d)^{\frac{2}{\gamma}}]}{K^2}, \quad (15)$$

ve gölgeleme olarak S_d dağılımı keyfi olarak kabul edilir. $E[S^{\frac{2}{\gamma}}] < \infty$, ve $F(a, b; c; z)$ hipergeometrik fonksiyonudur (Keeler vd., 2013).

Gerekli bir kesinti olasılığı için, uygun bir eşik T bulmak adına (15) kullanarak farklı SINR değerleri için kapsama olasılığını hesaplayabiliriz. Belirlenen SINR eşiğine dayanarak, kapsama alanını korurken ağ verimini artırmak için modülasyon ve kodlama şemasına (MCS) eşişin yeterli bir eşlemesini bulmamız gerekir. Uygun MCS, kanal kalite göstergesi (channel quality indicator CQI) değerine bağlı olan taşıma bloğu boyutuna bağlı olarak elde edilebilir.

CQI geri bildirimi kullanılarak, BS'ler her bir UE'nin kanal durumundan haberdar olabilir ve her bir UE için ayrı ayrı servis kalitesi sağlamak için kullanılabilir. Kanal durumuna ve alıcının tipine



Şekil 25. Yönetim görevleri bir uç bulutta çalışır.

bağlı olarak, ilgili SINR farklı CQI seviyesine eşlenebilir. Daha yüksek CQI değerleri elde etmek için, ya iyi bir kanala sahip olmanız ya da daha iyi bir alıcıya sahip olmanız gerekir, örneğin, girişim iptalini destekleyen bir alıcı. Bu adımda, MEC, her bir CQI değeri için blok hata oranını (BLER) hesaplar ve MCS'ye karşılık gelen SINR değerini BLER %10'dan küçük veya eşit olacak şekilde eşler.

Son adımda, MEC, şebeke kapsama gereksinimini karşılamak ve çıktıyı eş-zamanlı olarak geliştirmek için uygun bir CQI değerini belirlemelidir. Yüksek bir CQI değeri seçmek ve ağ kapsamını korumak arasında bir fark vardır. Ağ kapsamını korumak için, alınan sinyalin kötü kanal koşulları altında (düşük alınan SINR değeri) bile alıcılar tarafından yorumlanabildiğinden emin olmak için daha düşük bir modülasyon ve kodlama şeması kullanmamız gerekmektedir. MCS'yi azaltarak, taşıma bloğunun büyüklüğü ve sembol başına bit sayısı azaltılarak ağ verimini önemli ölçüde düşürebilir. Bu nedenle, MEC uygun bir eşik değeri seçer ve BS'leri, önceki adımlardan elde edilen SINR-CQI haritası ve kapsama olasılığını dikkate alarak modülasyon ve kodlama şemalarını yeni eşik değerine göre uyarlama konusunda bilgilendirir. Ağ topolojisi değiştiğinde, yani maksimum iletim gücü miktarı, eNodeB'lerin tipi, eNodeB'lerin yoğunluğu veya çevresel koşullar değiştiği zaman bu prosedür tekrarlanmalıdır. Uç bulutunda yürütülen görevler Şekil 25'te yer almaktadır.

4.3.5 Güç Tahsisi

Tüm temel istasyonlar, uç bulutunun bir önceki adımında elde edilen eşik CQI değeri hakkında bilgilendirilir. Her baz istasyonu, UE'lerden alınan CQI geri bildirimlerine dayanan güç tahsisi algoritmasını kullanır. BS'ler, kullanıcı-spesifik referans sinyallerinin CQI ölçümlerini, her bir UE'ye her bir iletim zaman aralığı (1 ms) için ayrı ayrı güç tahsisini arttırmak veya azaltmak için eşik CQI değeriyle karşılaştırır (Yassin vd., 2014a). Gücün her bir UE'ye homojen olarak tahsis edildiği temel güç tahsisi modelinde, uçlarda bulunan UE'ler, komşu baz istasyonlarından yüksek miktarda girişime maruz kalmaktadırlar. Hücre merkezinde bulunan UE'lere tahsis edilen güç miktarı, algoritmamızdaki uçlarda bulunan UE'lere olan girişimin üstesinden gelmek için azaltılır. Her baz istasyonu, bağımsız UE'lerden gelen geri bildirimleri bağımsız olarak izler. Alınan CQI değeri, eşikten yüksek olduğunda, BS, tahsis edilen gücün mümkün olan en düşük iletim

Tablo 12. Parametrelerin değerleri.

Parametreler	Değer
Frekans	2.14 GHz
K	6910 km^{-1}
γ	3.8
N_0	$10^{-15.82}$
Alt Taşıyıcı Frekansı	15 kHz
eNodeB Max Gücü	10 W
TTI	1 ms
Yol Kaybı Modeli	$128.1 + 37.6 \log_{10}^R$, R in km
Gürültü Gücü Spektral Yoğunluğu	-174 dBm/Hz
Alıcı Gürültü Şekil	9 dB
BS'lerin yoğunluğu	14 BSs/Km^2
Aktif UE'ler	70
Zamanlayıcı	Round Robin, Best CQI, Proportional Fair
Monte-Carlo Koşusu Sayısı	1000
Simülasyon uzunluğu	1000 TTI

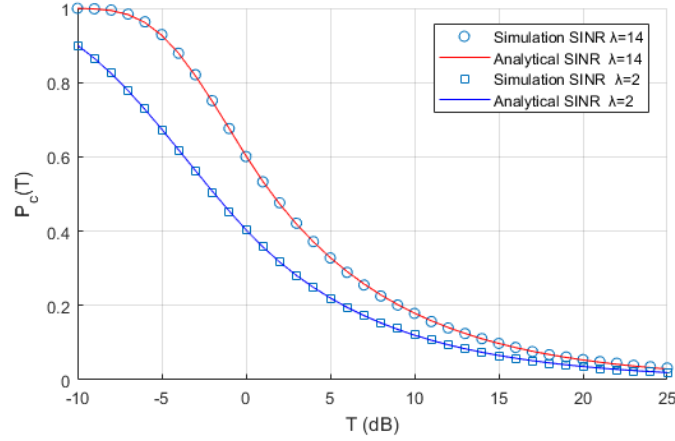
gücünden daha yüksek ve yeni alınan CQI değerinin hala eşik değere eşit veya daha yüksek olmasını sağlayana kadar gücü sürekli olarak azaltacaktır. Ağ verimini artırmak için BS'lerin, diğer UE'lere kıyasla uçlarda bulunan UE'lere daha fazla güç ayırması gerekir. Bu nedenle, bir UE'den alınan geri besleme miktarı eşikten azsa, BS'ler bunu kenar UE olarak kabul edecektir. Bu durumda, BS'lerin yeni CQI geribildiriminin eşikten daha yüksek olmasını ve tahsis edilen gücün miktarının hala maksimum iletim gücünün altında kalmasını sağlayıncaya kadar tahsis edilen gücü yükseltmesi gerekir.

4.3.6 Doğrulama ve Değerlendirme

Değerlendirme için, kapsama olasılığını hesaplamak adına MATLAB kullanılmaktadır. Ayrıca, downlink kanal modelini ve LTE gibi çok kullanıcılı bir OFDMA sisteminin ağ ortamını uygulamak için sistem düzeyinde Viyana simülatörünü kullanıyoruz (Rupp vd., 2016b).

Önerilen algoritmayı, $14 \text{ BS sayısl/km}^2$ yoğunluğuna sahip küçük bir hücre senaryosunda uyguladık. Sahaya 70 UE rastgele olarak dağıtıldı. Algoritmayı doğrulamak için üç farklı çizelgeleme tekniği kullanıyoruz. Simülasyon parametrelerinin değerleri Tablo 12'de sunulmuştur. Hücre merkezinde UE'lere tahsis edilen RB'lerin iletim gücünü azaltarak enerji tüketimi miktarını azaltmayı amaçlıyoruz. Bu, ağda kapsama delikleri oluşturabilir ve ağ verimini azaltabilir. Yeterli eşik CQI değerini seçmek için, kapsama olasılığı, mevcut ağ yapılandırmasına dayalı olarak, (15) kullanılarak hesaplanır. Örneğin, $\lambda = 2 \text{ BSs/Km}^2$ veya 14 BSs/Km^2 olan bir ağda, SNIR eşiği yaklaşık -4 dB ve 0 olduğunda Şekil 26'da görüldüğü gibi kapsama olasılığı %60'tan daha azdır. Uygun $P_C(T)$ 'ı kullanmak ağ operatörleri için her zaman hayati bir öneme sahiptir çünkü kapsama alanı ve trafik miktarı arasında bir denge vardır. Uygun bir eşik değeri seçmek için, kapsama alanı ve çıktı gereksinimlerini aynı anda karşılayacak uygun bir modülasyon ve kodlama şeması kullanmamız gerekir.

Ağın anlık görüntü koşulunu kullanarak uç bulutunda bulunan SNIR eşiği, temel istasyonlar dört kanal kullanarak kanalların kalitesini karakterize ettiğinden, bir CQI eşik değerine eşlenmelidir. CQI değerlerinin modülasyon ve kodlama şeması standartlaştırılmıştır. CQI seviyesi ile SNIR değerleri arasındaki ilişkiyi, Viyana simülatöründe CQI seviyesinin her bir MCS'si için %10'dan



Şekil 26. Çeşitli SINR değerleri için kapsama olasılığı (15).

Tablo 13. SNR-CQI tablosu.

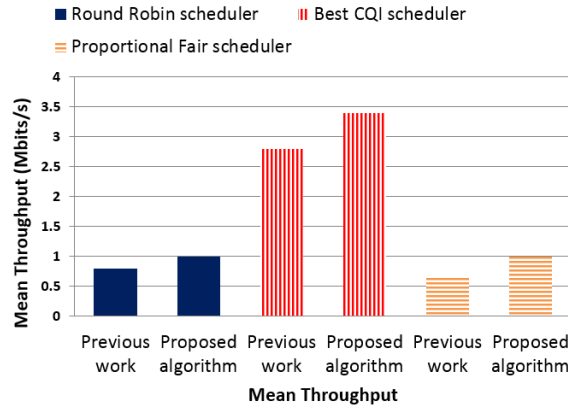
CQI	SNR	CQI	SNR	CQI	SNR
1	-6.93	6	2.69	11	12.28
2	-5.14	7	4.69	12	14.17
3	-3.18	8	6.52	13	15.88
4	-1.25	9	8.57	14	17.81
5	0.76	10	10.36	15	19.82

daha az bir BLER sağlayan SNIR’de hesaplayarak belirliyoruz. BLER’in %10’dan daha düşük değerlerini karşılayan SNIR değeri, belirli CQI’nın SNIR seviyesi olarak kabul edilir. Daha sonra, gerekli kapsama alanını sağlayan SINR eşiği, ilgili CQI seviyesine eşleştirilir. SINR-CQI haritası Tablo 13’te gösterilmiştir.

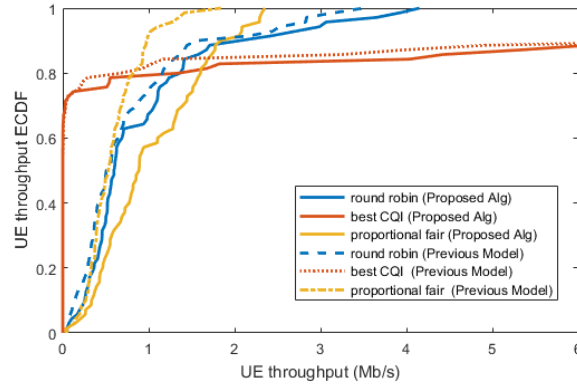
Modelin (Yassin vd., 2014a) içindeki ortalama verimi, üç farklı programlama tekniği kullanılarak algoritmamızla karşılaştırılmıştır ve sonuçlar, Şekil 27’de gösterilmiştir. Sistemin genel performansı korunmakta ve Best CQI zamanlayıcısı kullanılarak ortalama trafik hacmi %25 civarında artırılmaktadır.

Her iki modelde de UE’nin veriminin ampirik kümülatif dağılım fonksiyonu (ECDF) Şekil 28’de gösterilmiştir. UE’lerin, en iyi CQI ve orantılı programlayıcılarının verimi sırasıyla %25, %22 ve %53 olarak geliştirildi. Maksimum UE verimi, en iyi CQI zamanlayıcısı ile elde edilir ve yaklaşık 3.4 Mbps’dir.

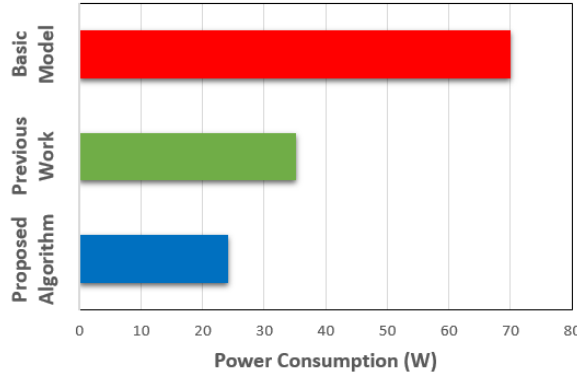
Yassin vd. (2014a)’ın sunduğunun aksine, algoritmamız kapsama alanını korurken koşullarına göre her UE’ye güç ayırır. Sonuç olarak, UE’lerin kanal kalitesi geliştirilecek ve UE’ler (Yassin vd., 2014a) ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir verim elde edeceklerdir. Son olarak, önerilen algoritmayı kullanarak ağıdaki güç tüketimi miktarı, Şekil 29’da gösterilmektedir. Önerilen algoritma toplam uydu-yer hattı iletim gücünü önemli ölçüde azaltır. Korunan enerjinin miktarı (Yassin vd., 2014a) ve temel modele kıyasla %28 ve %67 daha büyüktür.



Şekil 27. Önerilen algoritma ile elde edilen ortalama çıktı ve (Yassin vd., 2014a).



Şekil 28. Modelimiz ile ECDF arasındaki üretiminin karşılaştırılması.



Şekil 29. Algoritmamızın toplam ağ güç tüketiminin, temel model olan (Yassin vd., 2014a) ve önerilen modelle karşılaştırılması.

4.3.7 Sonuç

Bu çalışmada, yoğunluk uyarlamalı bir güç tahsisi algoritması önerdik. Önerilen algoritma, sadece enerji tüketimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kapsama gereksinimlerini karşılarken, sistem çıkışını da geliştirir. Önerilen algoritma, çeşitli kaynak çizelgeleme tekniğine entegre edilebilir. Önerilen algoritmada, uç bulut verileri kullanılarak veriler ağın büyük bir kısmından toplanabilir ve kararlar dağıtık modellere göre daha doğru yapılabilir. Önerilen teknik Monte-Carlo simülasyonları ve bir sistem seviyesi Viyana LTE simülatörü ile doğrulanmıştır.

4.4 Yoğunluk, Enerji ve Spektrum-farkında Baz İstasyonu Hizalama

Gelecekteki mobil ağlar, trafik yükündeki yükselişin üstesinden gelmek için küçük hücreler kullanılarak yoğunlaştırılmalıdır. Her küçük hücrenin tükettiği enerji miktarı düşük olsa da, büyük ölçekli bir ağın toplam enerji tüketimi makro hücrelerden daha büyük olabilir. Enerji verimliliğini artırmak için, aktif baz istasyonlarının sayısını sunulan trafik yüküne uyarlamalıyız. Baz istasyonları devre dışı bırakılması, kapsama deliklerine neden olabilir, servis ve üretim kalitesinin düşmesine neden olur. Fazladan çalışan baz istasyonlar ise gereksiz enerji harcar. Bu yazıda, baz istasyonlarının yoğunluğunu talebe göre uyarlamak için en uygun çözümü elde etmenin NP-hard olduğunu gösteriyoruz. İki sezgisel algoritmadan oluşan bir çözüm önermekteyiz. Ağ durumunun anlık görüntüsünü daha geniş bir bakış açısıyla elde etmek için çoklu erişim uç bulutu (MEC) kullanıyoruz. Önerilen algoritmanın enerjisi %12'ye varan oranda koruduğunu, buna karşılık spektral verim ve ağ çıkışının, yakın zamanda yapılan bir çalışmaya göre %30 ve %26'ya kadar artırılabilirliğini gösteriyoruz.

4.4.1 Giriş

Çevrimiçi oyunlar, video akışı ve sosyal ağlar gibi çoklu ortam uygulamalarının ortaya çıkmasıyla, kullanıcılar daha yüksek trafik hacmine sahip daha hızlı bir ağ beklemektedir. Kullanıcıların artan sayısı ve onların artan trafik taleplerini karşılamak için, önümüzdeki 15 yılda ağ üretimini 1000 katına çıkarmamız gerekiyor (Björnson vd., 2016). Bu amaçla çeşitli çözümler arasında, spektral verimliliğin artırılması tavsiye edilir (Sciancalepore vd., 2016). Baz istasyonları (BS) yoğunluğunun artmasıyla spektral verim ve kapasite geliştirilebilmesine rağmen, enerji tüketimi de artacaktır (Abrol ve Jha, 2016). Enerji tüketimini aynı seviyede tutmak için, gelecekteki mobil ağlarda enerji verimliliğinin de 1000 kat artırılması gerekmektedir. Bu çatışan hedefleri müştereken sağlamak, gelecekteki ağların en önemli zorluklarından biridir.

2016 yılına kadar, 4G ağlarında 14 milyondan fazla küçük hücre dağıtılmış ve bu sayı 2017'de yaklaşık yüzde 270 artmış durumdadır (Ding vd., 2018). Heterojen ağlarda (HetNet), makro hücrelere ek olarak küçük hücreler kullanarak, spektral ve enerji verimliliği (EE) aynı anda geliştirilebilir (Kanwal vd., 2017). Küçük hücrelerin yoğunluğunu arttırarak, baz istasyonları ve kullanıcı ekipmanı arasındaki mesafe azaltılabilir, bu da ağ alanı verimini arttırabilir ve iletim gücünü azaltabilir. Bununla birlikte, küçük hücrelerin artan yoğunluğu, ağdaki genel devre enerji tüketimini artıran daha fazla altyapı ve donanım dağıtımına anlamına gelir (Liu vd., 2016b).

Drone hücreleri, kullanıcı kontrol temelli BS'ler (kapalı küçük hücreler) ve BS'lerin uyku zamanlaması gibi mobil BS'ler nedeniyle, ağ yoğunluğu zaman ve mekan içinde dinamik olarak değişebilir. Bir yandan, küçük hücrelerin yoğunluğunu arttırarak, ağdaki enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için BS yoğunluğunu ağ durumuna uyarlamalıyız. Öte yandan, BS'lerin yoğunluğu dinamik olarak değiştiğinde, çeşitli koşullar altında hizmet kalitesini (QoS) korumak için kendilerini BS yoğunluğuna adapte etmek gerekir. Örneğin, bir HetNet'de BS kapatıldığında, devre dışı bırakılan BS'nin trafik yükünün diğer hücrelere aktarılması gerekir. Heterojenite nedeniyle talep her hücrede farklı olabilir. Bu nedenle, bir BS'yi komşu hücreler üzerinde kapatma

etkisinin adaptif bir şekilde ele alınması gerekir. Bir BS'nin kapatılması ayrıca kör noktalara servis sağlamak için komşu hücrelerin yardımını gerektiren kapsama boşluğuna da neden olabilir. BS'lerin sayısı (yoğunluğu) kalıcı veya geçici olarak değişebilir. İnsan müdahalesi geniş ölçekli bir HetNet'te mümkün olmayabilir. Bu nedenle, gelecekteki ağların, kapsama veya iletim gücü gibi ağ parametrelerini, BS'lerin yoğunluğuna, ağ durumundaki herhangi bir değişiklik üzerinde dinamik olarak tepki vermek için uyarlayabilen esnek algoritmalar ile donatılması gerekir.

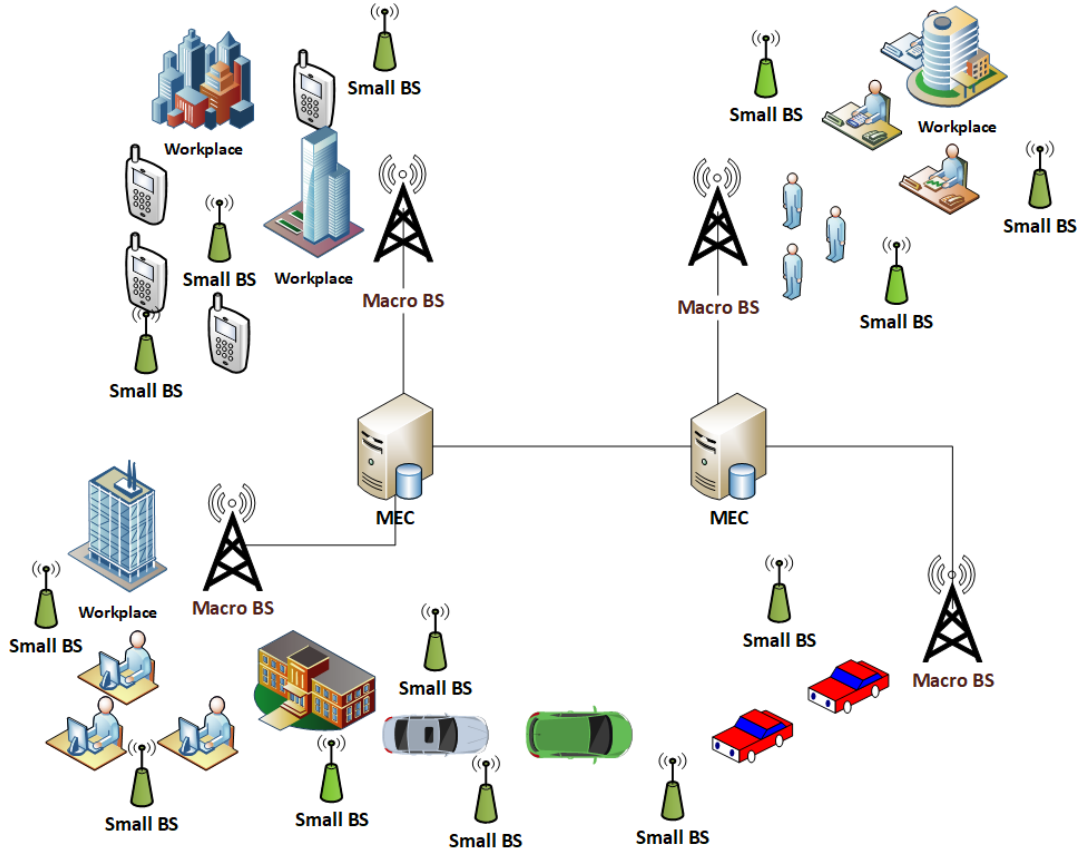
Bölüm 4.4.11'te incelediğimiz mevcut uyku zamanlama mekanizmaları yoğunluk-uyarlı değildir. Yaklaşımımızın ardındaki temel fikir, enerji ve spektral verimliliği artıran ve QoS'yi farklı koşullar için tüm ağda sürekli olarak koruyabilen yüksek esneklikte bir programlama modeli sağlamak için BS'lerin kapsama ve iletim gücü gibi ağ parametrelerine yoğunluğunu uyarlamaktır. Her bir UE tarafından istenen bant genişliği ve beklenen verim ağ tarafından karşılanabiliyorsa QoS'nin korunabileceğini varsayıyoruz. Bu çalışmada, kullanıcıların iş yapma gereksinimlerini karşılarken ve BS'lerin yoğunluğu göz önünde bulundurularak ve çoklu erişim uç bulutu (MEC) kullanılarak dinamik heterojen ağlardaki kapsama alanı korunurken enerji tasarrufu için ortak bir sezgisel uyku zamanlaması ve güç tahsis algoritması tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın genel katkıları aşağıdaki gibidir.

- Yoğunluk, enerji ve spektrum-farkında baz istasyonu çizelgeleme problemini (DESAS) Bölüm 4.4.2'de formüle ediyoruz ve bu problem için BS'lerin yoğunluğunun kapsama alanı gibi ağ parametrelerine adapte edilmesi için optimal bir çözüm sağladığını gösteriyoruz. Enerji tüketimini azaltmak ve ağdaki spektral etkinliği artırmak NP-hard bir problemdir.
- BS yoğunluk ve güç adaptasyon algoritması (BDPA) tarafından BS yoğunluğu adaptasyonu (BDA) ve güç adaptasyonu (PA) tarafından adlandırılan iki alt algoritmadan oluşan bir sezgisel çözüm önermekteyiz. Bu algoritmalar, hücrelerin yüküne göre aktif BS'lerin sayısını en aza indirerek ağdaki güç tüketimini azaltabilir ve her hücrede bir hücre yakınlığı tekniğini uygulayarak ağdaki verimi ve kapsama alanını artırabilir. Kanal koşullarına bağlı olarak BS'lerin iletim gücünü uyarlayarak dağıtık bir yaklaşım önermekteyiz.
- Geçiş süresini azaltmayı ve yönetim ve kontrol amaçları için ağın durumu hakkında daha fazla veriye erişmeyi kolaylaştıran Çok Erişimli Uç Bulutlar (MEC'ler) kullanan gelecekteki ağ altyapıları için bir çerçeve tanımlamaktayız. Bir tarafta, DESAS NP-zor bir problem olduğundan merkezi bir optimizasyon neredeyse imkansız. Diğer taraftan, baz istasyonlar tarafından tek tek yürütülen çözümler, optimal bir çözüm elde etmek için gerekli bilgileri barındırmamaktadır. Bu nedenle, MEC'ler üzerinde tasarlanan çözümlerin böl ve yönet yaklaşımı kullanarak, Bölüm 4.4.7'de tartıştığımız gibi uygun adaylar olduğunu iddia ediyoruz.

BDPA algoritmasını doğrulanmasını sunarak, Bölüm 4.4.10'da sunulan düşük güçlü uyandırma radyo (LP-WUR) modeli ile karşılaştırıyoruz. BDPA algoritmasının kendileri ile ilgili avantajlarını vurgulamak için diğer güç yönetimi ve enerji verimliliği modellerini Bölüm 4.4.11'te değerlendirip sınıflandırdık.

Tablo 14. Sembollerin listesi.

sembol	Tanım	birim
α	Bir eğri üzerinde fit ayarı	
α_P	Güç tahsisi için normalleştirilmiş bir katsayı	
α_S	Spektral için normalleştirilmiş bir katsayı efficiency	
β	Zirve süresini ayarlamak için bir değişim	
Δ	İletim gücünü ayarlama	W
δ_j	BS yük faktörü j	%
λ_b	BS'lerin yoğunluğu	BS/Km^2
σ^2	Gürültü gücü	dBm
τ_j	BS j cinsinden toplam kullanılabilir RB sayısı	
τ_{ij}^*	BS j 'dan UE i tutarında gerekli RB sayısı	
ϕ	Spektrum verimliliği	b/s/Hz
A_j	Hücresinin aktivite faktörü	%
A_{mj}	BS j için sorumlu makro hücrenin etkinlik oranı	%
b_τ	Bir RB'nin bant genişliği	Hz
b_j	BS j bant genişliği	Hz
B_{ij}^*	Min BW gerekliliği, BS j UE i	Hz
B_j^*	Min gerekli BW BS j	Hz
C-RAN	Bulut radyo erişim ağı	
CQI	Channel quality indicator	
D	UE'talebi	Mbps
D_{avg}	Önceden tanımlanmış zaman aralığında ortalama bit hızı	Mbps
g_{ij}	UE i ile onun ilişkili BS j arasındaki kanal kazancı	dBm
i	UE Endeksi	
ICI	Inter hücre girişim	
I_{ik}	BS k den UE i tarafından alınan girişim	dB
j	BS Dizini	
MCS	Modülasyon ve kodlama şeması	
MEC	Çoklu erişim kenarı bulut	
N_{macro}	Makro hücrelerin sayısı	
N_{small}	Küçük hücrelerin sayısı	
P	Bir BS tarafından mevcut tahsis gücü	W
P_{avg}	BS'ye ayrılan gücün ortalaması	W
P_{macro}	Bir makro BS tarafından tüketilen güç	W
P_{min}	BS tarafından gereken minimum iletim gücü	W
P_{max}	Bir BS'nin maksimum iletim gücü	W
P_{small}	Küçük bir BS tarafından tüketilen güç	W
P_{ij}	Downlink iletim gücü BS j ile UE i için atanmıştır	dBm
P_{ij}^*	BS j UE i tarafından gereken minimum güç	W
P_{tau_j}	BS j tarafından bir kaynak bloğuna ayrılan güç	dBm
P_j	BS j 'nın maksimum iletim gücü	dBm
P_j	Dinamik güç tüketimi BS j	W
P_0	Sabit operasyonel güç	W



Şekil 30. Ağ mimarisi.

4.4.2 Yoğunluk, Enerji ve Spektrum-farkında Baz İstasyonu Çizelgeleme (DESAS)

Bu bölümde bu sistem modeline dayanarak sistem modelini ve yoğunluk, enerji ve spektrum-farkında baz istasyonu çizelgeleme problemini (DESAS) tanımlamaktayız. Bu çalışmada kullanılan değişkenler Tablo 14’de sunulmuştur.

$\mathbb{M} = \{1, 2, \dots, T, \dots, M\}$ T adet makro BS ve S adet küçük hücreyi içeren toplam M adet BS’i içeren kümeyi temsil etsin. $\mathbb{N}$ kümesi N adet UEyi temsil eder. BS’ler ve UE’ler, Şekil 30’da gösterildiği gibi iki kademeli LTE benzeri bir ortamda rastgele dağıtılmıştır. Sistemde hiçbir güç kontrolünün kullanılmadığını ve yalnızca aşağı bağlantı aktarımına odaklandığımızı varsayıyoruz. LTE sistemlerinde (Sciancalepore vd., 2016), BS’ler kullanıcılarını 1 ms alt çerçevelerinde planlar. Bir UE, en güçlü gürültü-eklentili-girişim oranı (SINR) aldığı BS’e bağlanır. UE i ’ye hizmet veren BS j ’den deneyimlenen SINR:

$$SINR_{ij} = \frac{g_{ij} \times P_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^M g_{ik} P_{ik}} \text{ dB}, \quad (16)$$

olarak tanımlanabilir. P_{ij} ve g_{ij} sırasıyla, BS j tarafından UE i için atanmış downlink iletim gücü ve kanal kazancıdır. Gürültü gücü miktarı σ^2 ve $\sum_{k=1, k \neq j}^M g_{ik} P_{ik} = \sum_{k \neq j} I_{ik}$, diğer BS’lerden UE i tarafından alınan toplam girişimdir.

Güç, kaynak blokları (resource block, RB) (Sokun vd., 2017) arasında eşit olarak dağıtıldığı-

dan, her bir RB'ye W cinsinden tahsis edilen güç miktarı aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$P_{\tau_j} = \frac{P_j}{\tau_j}, \quad (17)$$

Burada P_j ve τ_j maksimum aktarım gücü ve toplam kullanılabilir RB sayısıdır. Kullanıcının istenen veri iletim hızı R_{ij}^* değerini karşılamak için BS j 'dan UE i 'ya tahsis edilmesi gereken RB sayısı:

$$\tau_{ij}^* = \frac{R_{ij}^*}{b_\tau \log_2(1 + \text{SINR}_{ij})}, \quad (18)$$

olur. Burada payda, ulaşılabilen maksimum veri hızını sağlar ve b_τ , ağdaki bir RB'nin bant genişliğidir, bu da LTE'de (Yu vd., 2016b) 180 kHz 'dir. BS j tarafından UE i 'ye ayrılan güç

$$P_{ij}^* = P_{\tau_j} \tau_{ij}^*. \quad (19)$$

olur. Böylelikle, BS j 'nin dinamik güç tüketimi

$$P_j = \beta \sum_{i \in \mathbb{N}} P_{ij} + P_0, \quad (20)$$

olacaktır. Burada, $\beta \geq 1$ sabitinin amplifikatör kayıplarını değerlendirmek için güç amplifikatörü verimliliğinin tersidir. P_0 ise backhaul sinyalizasyonu ve kayıplar dahil olmak üzere soğutma için harcanan sabit operasyonel güçtür. Genel olarak, P_0 , makro ve küçük hücreler için sırasıyla 500 W ve 15 W civarındadır (Yu vd., 2016b).

Girişim miktarının düşürülmesi durumunda kullanıcılara verilen QoS artırılabilir. Bu nedenle, DESAS'ı, alınan SINR'yi gerekli bir eşığe T_{SINR} ulaşmak için iyileştirmek gerekir:

$$\frac{g_{ij} P_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{k \neq j} I_{ik}} \geq T_{\text{SINR}}.$$

UE-BS eşleştirmesinin bir şekilde belirlenmiş olduğunu varsayarak DESAS problemini şu şekilde tanımlıyoruz:

$$\begin{aligned}
& \text{finding} && x_{ij}, P_{ij}, z_j \\
& \text{to minimize} && \sum_{i \in \mathbb{N}} \sum_{j \in \mathbb{M}} x_{ij} ((\alpha_P P_{ij} + \alpha_S \tau_{ij})) && (21a) \\
& \text{subject to} && \sum_{j \in \mathbb{M}} x_{ij} = 1, \forall i \in \mathbb{N}, && (21b) \\
& && \sum_{i \in \mathbb{N}} x_{ij} \tau_{ij} \leq \tau_j, \forall j \in \mathbb{M}, && (21c) \\
& && \tau_{ij} \geq \tau_{ij}^*, \forall i \in \mathbb{N}, \forall j \in \mathbb{M}, && (21d) \\
& && x_{ij} < z_j, && (21e) \\
& \text{where} && x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if UE } i \text{ is assigned to BS } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}
\end{aligned}$$

DESAS'ın amacı, enerji tüketimini en aza indirmek ve iş hacmini koruyarak ve UE'lerin ihtiyaçlarını karşılarken gerekli RB sayısını azaltmaktır. α_P ve α_S (21a) enerji ve spektral verimliliğin normalleştirme katsayılarıdır (Grodzevich ve Romanko, 2006). Her bir UE'nin sadece bir BS'ye bağlıdır (21b). BS'ye bir UE atayabildiğimizden emin olmak için, ilgili BS, UE tarafından talep edilen RB'leri karşılamak için yeterli kapasiteye sahip olmalıdır (21c) ve gerekli minimum kullanıcı RB'lerinin sağlanması gerekir (21d). Bir BS'e bir UE yalnızca BS aktifken atanabilir (21e).

DESAS probleminin arama uzayı $O(2^{N \times M} + 2^{N \times M} + 2^M)$ 'dir ve genelleştirilmiş atama probleme indirgenebilir (Mesodiakaki vd., 2017). DESAS NP-hard bir problem olduğundan, DESAS'a merkezi bir çözüm uygulanabilir değildir. Sonuç olarak, DESAS'ı sonraki iki bölümde sunacağımız iki ayrı probleme bölüyoruz.

4.4.3 BS Yoğunluk Uyarlama (BDA) Problemi

UE i için BS j tarafından ayrılması gereken minimum RB sayısı, τ_{ij}^* olsun. Baz istasyonu ile ilişkilendirilmiş UE'lerin ihtiyaçlarını karşılamak için BS j 'ye gereken minimum bant genişliği

$$B_j^* = \sum_{i \in \mathbb{N}} B_{ij}^* = \sum_{i \in \mathbb{N}} \tau_{ij}^* R_{ij}^*. \quad (22)$$

olur. BS'lerin yoğunluğunu ayarlayarak, ağ kaynakları, hücreler arasında yük dengeleme yoluyla daha verimli bir şekilde kullanılabilir ve yedek BS'ler kapatılabilir. Verimi korurken enerji verimliliğini artırmak için BS yoğunluğunu kontrol etmeliyiz. Aktif BS'lerin sayısı, bir BS'nin QoS kısıtlamalarına tabi olup olmadığının saptanmasıyla en aza indirilebilir. Bu nedenle, BDA prob-

lemine şu şekilde tanımlıyoruz:

$$\begin{aligned} &\text{finding} \quad x_{ij}, z_j \\ &\text{to minimize} \quad \sum_{j \in \mathbb{M}} z_j \end{aligned} \quad (23a)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i \in \mathbb{N}} x_{ij} B_{ij} \leq B_j, \forall j \in \mathbb{M}, \quad (23b)$$

$$x_{ij} B_{ij} \geq B_{ij}^*, \forall j \in \mathbb{M}, \quad (23c)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{M}} x_{ij} = 1, \forall i \in \mathbb{N}, \quad (23d)$$

$$\text{given} \quad x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if UE } i \text{ is assigned to BS } j \\ \text{and } z_j = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23e)$$

BDA probleminde, UE'ye tahsis edilen bant genişliği miktarının her zaman BS'lere ayrılan bant genişliğinden (23a) daha küçük olduğundan emin olarak aktif BS'lerin sayısını (23b) en aza indirmeye çalışırız. Diğer bir deyişle, her bir UE tarafından gereken minimum bant genişliği, ilgili BS (23c) tarafından karşılanmalıdır. BS j tarafından gönderilen sinyallerin UE i tarafından ölçülen SINR değerinin, komşu hücrelerine göre en yüksek olduğu durumda $x_{ij} = 1$ olacaktır.

BDA problemi, $O(2^{N \times M} + 2^M)$ uzay karmaşıklığına sahiptir ve NP-hard olan bir ikili tamsayı doğrusal programdır (BILP) (Balas ve Padberg, 1976; Kaddour vd., 2013). Bu problemi çözmek için, farklı koşullar altında bir BS'nin aktivasyonu ve deaktivasyonu durumunda ağ davranışını tahmin etmek için her bir hücre için bir kullanım faktörü tanımlamamız gerekir. İlgili kullanım faktörü bir sonraki bölümde tanıtılacaktır.

4.4.4 Güç Uyarlama (PA) Problemi

PA probleminde, UE'lerin taleplerini yerine getirirken şebeke kapsamını korumak ve kapsama deliklerini önlemek için BS yoğunluğunu dikkate alarak iletim gücünü uyarlamak istiyoruz. Bu problem, BS j ile ilişkili UE'lere tahsis edilen genel gücün en aza indirilmesi olarak formüle edilebilir.

BS'lerin genel yoğunluğunun ve ağdaki UE'lerin yoğunluğunun, sırasıyla λ_b ve λ_u olarak gösterildiğinde, genellikle $\lambda_u \geq \lambda_b$ olduğu varsayılır. UE'lerin en yüksek SINR değerini sağlayan BS'e bağlandığını varsayıyoruz. Kullanıcı başına bant genişliği UE'lerin yoğunluğuna (λ_u) ve hücrelerin büyüklüğüne bağlıdır. Tüm bant genişliğinin (B) UE'ler arasında homojen olarak ayrıldığını varsayalım. Yani, $B_u = B \frac{\lambda_b}{\lambda_u}$. UE i başına ortalama hız:

$$R_{ij} = B_u \mathbb{E} [\log_2(1 + \text{SINR}_{ij})]. \quad (24)$$

olur.

Kapsama olasılığını en yakın BS j 'dan alınan $SINR_{ij}$ 'nin eşik T_{SINR} değerinden büyük olması olarak tanımlayalım:

$$P_c(T_{SINR}) = \text{Prob}(SINR_{ij} > T_{SINR}).$$

PA probleminde, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarırken, kapsama alanı ve UE'lerin verimi açısından sağlanan QoS seviyesini düşürmeden spektrum verimliliğini (ϕ) arttırmak için bir çözüm bulmak istiyoruz. PA problemini şu şekilde tanımlıyoruz:

$$\begin{aligned} &\text{finding } x_{ij}, P_{ij} \\ &\text{to minimize } \sum_{i \in \mathbb{N}} \sum_{j \in \mathbb{M}} x_{ij} ((P_{ij} + P_0)) \end{aligned} \quad (25a)$$

$$\text{subject to } P_c(P_{ij}) \geq (1 - \epsilon) P_c^{max}, \quad (25b)$$

$$R_{ij}(P_{ij}) \geq \min \{R, \phi^{max} B_u(\lambda_b)\}, \quad (25c)$$

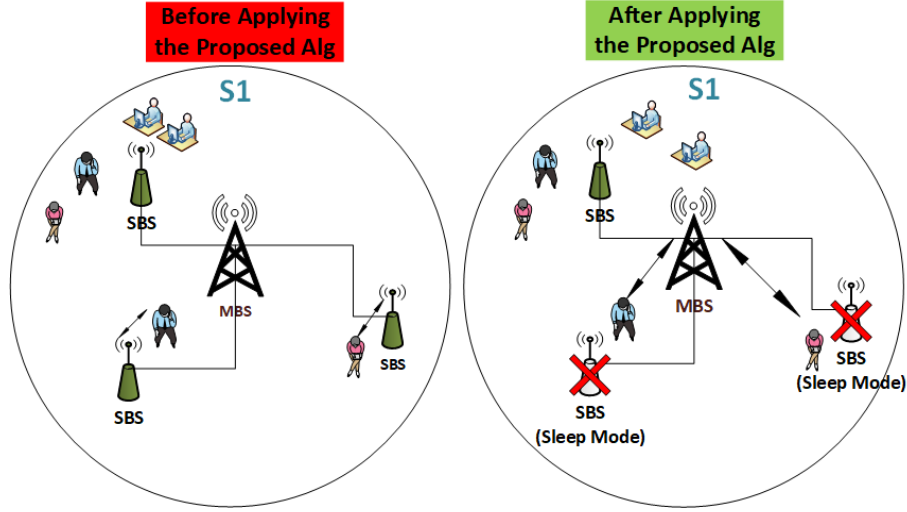
$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathbb{N}, \forall j \in \mathbb{M}, \quad (25d)$$

$$\sum_{j \in \mathbb{M}} x_{ij} = 1, \forall i \in \mathbb{N}, \quad (25e)$$

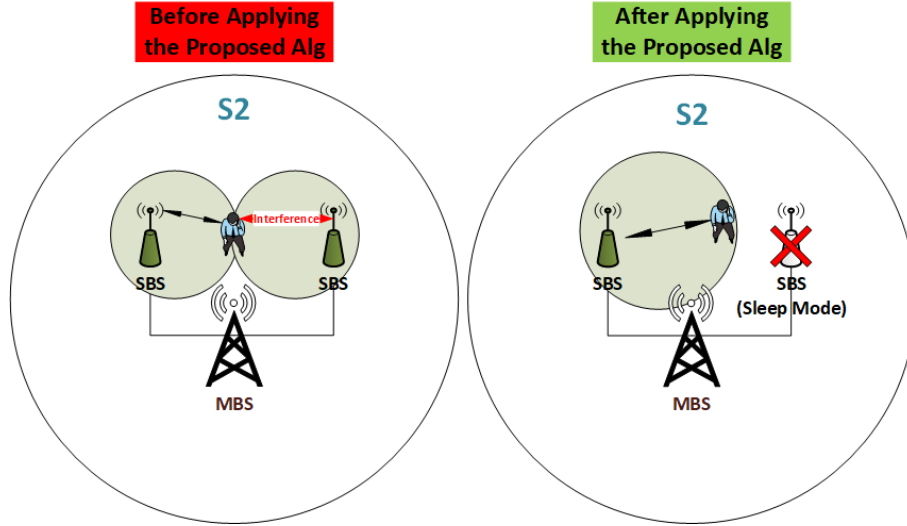
UE i BS j ile bağlanmışsa $x_{ij} = 1$, aksi takdirde sıfırdır (25d). Her UE sadece bir BS'ye bağlanabilir (25e). BS j ile UE i için ayrılan güç P_{ij} olarak ayarlanmışsa, tüm UE'lerin kapsama olasılığının her zaman kabul edilebilir bir kesinti değerinden daha yüksek olmasını sağlamalıyız. Girişim olmadığında teminat tutarı olarak P_c^{max} düşünüldüğünde $P_c(P_{ij})$ (uygulamada kapsama olasılığı) ϵ 'dan daha büyük olmasını isteriz. Girişim sınırlı bir ortam göz önüne alındığında, ulaşılabilen maksimum spektral verimliliğin ϕ^{max} olduğunu varsayıyoruz. Bir ağda UE'ye ayrılan bant genişliği $B_u(\lambda_b)$ ise, elde edilen maksimum veri hızı $\phi^{max} B_u(\lambda_b)$ olur. Bu, UE'lerin talep oranı olan R 'nin üst sınırıdır. BS'nin iletim gücü P_j 'a eşit olduğunda, ilişkili BS j tarafından UE i 'ye sağlanan veril iletim hızı $R_i(P_j)$ her zaman UE'lerin talep oranı R 'ye (25c) eşit veya daha büyük olmalıdır. PA problemi, NP-hard bir problem olduğu bilinen $O(2^{N \text{ times } M} + 2^M)$ 'nin uzay karmaşıklığı ile genelleştirilmiş atama problemine indirgenebilir (Martello ve Toth, 1992).

4.4.5 BS Yoğunluk ve Güç Uyarılama (BDPA) Algoritması

Öncelikle, BS yoğunluk ve güç adaptasyon (BDPA) algoritmasını doğrulamak için dinamik bir ağda karşılaşılabileceğimiz çeşitli senaryoları değerlendirmemiz ve BS'lerin ağ durumuna yoğunluğunu ve iletim gücünü uyarlayarak bu sorunları nasıl çözebileceğimizi göstermeliyiz.



(a) Yüğü küçük hücreden makro BS'ye taşıyarak enerji tasarrufu.



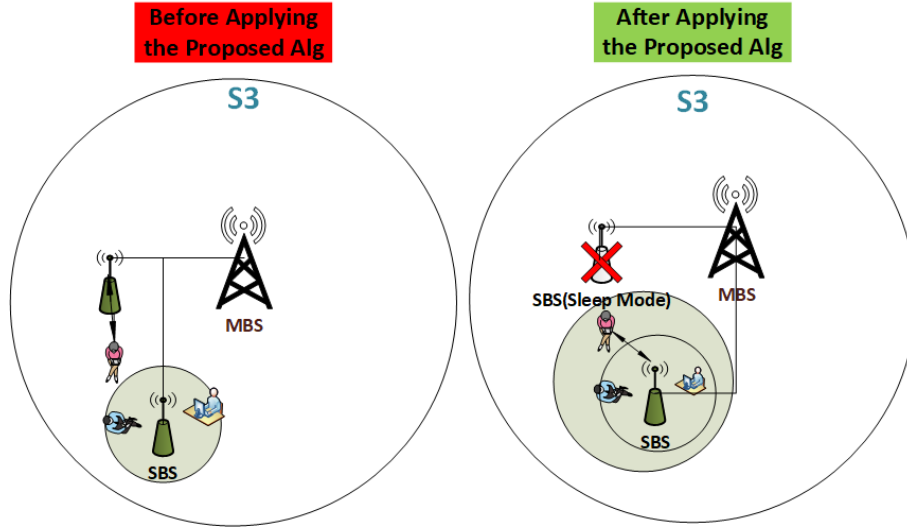
(b) BS yoğunluğunu ayarlayarak girişimi azaltma.

Şekil 31. HetNet'te (solda) karşılaşılabileğimiz dört farklı senaryo (S1, S2, S3, S4) ve bu senaryolar üzerinde BDPA algoritmasının etkisi (sağda).

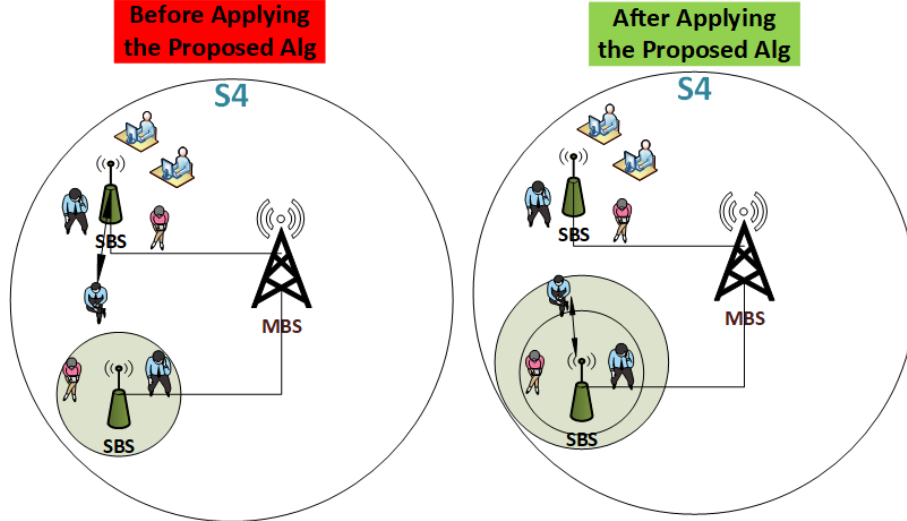
4.4.6 Senaryolar

Algoritmamızı küçük hücreler arasında çalıştırırken karşılaşılabileceğimiz dört farklı senaryo olarak tanımlamaktayız. Bu dört senaryo (S1, S2, S3, S4) ve BS yoğunluk ve güç adaptasyon (BDPA) algoritmasının uygulanmasının etkisi sırasıyla Şekil 31'in sol ve sağ tarafında gösterilmiştir. Rakamlarda makro BS'lerin bir MEC'ye bağlı olduğunu varsaydık. Ayrıntıdaki detayları sunuyoruz.

- *Senaryo 1:* Şekil 31a'de görüldüğü gibi, küçük hücredeki trafik yükü düşük olduğunda ve atanmış UE'ler ilişkili makro hücreye aktarıldığında, makro BS'in (Bölüm 4.4.8'da tanımladığımız) kullanım oranı eşik değeri altında kalacaksa küçük hücreyi kapatabilir ve yükü makro hücreye aktarabiliriz.
- *Senaryo 2:* Küçük hücreler, UE memnuniyetini azaltabilecek şekilde birbirine girişim ya-



(a) Enerji tasarrufu için hücre yakınlaştırma.



(b) Kullanıcı memnuniyeti için hücre yakınlaştırma.

Şekil 32. HetNet'te (solda) karşılaşılabileceğimiz dört farklı senaryo (S1, S2, S3, S4) ve bu senaryolar üzerinde BDPA algoritmasının etkisi (sağda).

ratabilirler (Şekil 31b). Servis kalitesini artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak için, girişim yaratan BS'leri kapatabilir ve komşu BS'nin kullanım oranı hala beklenen eşik altında kalırsa UE'lerini daha düşük bir SINR değerine sahip bir komşu BS'ye transfer edebiliriz.

- **Senaryo 3:** Üçüncü senaryoda (Şekil.32a), küçük bir hücrenin yükü eşik altında ve komşu küçük hücreleri kapsama alanında ve üretimde herhangi bir bozulmaya neden olmadan ilgili UE'lerin ihtiyaçlarını karşılayabilirse ve makro hücre aşırı yüklenmişse, o zaman küçük hücreler kapatılabilir ve komşuları, tüm UE'ler için gerekli olan alınan SINR elde edilinceye kadar iletim güçlerini arttırarak kapsama alanlarını genişletebilir.
- **Senaryo 4:** Servis kalitesi, enerji tasarrufuna kıyasla daha yüksek bir önceliğe sahip olabilir. Bir BS'deki alınan SINR, UE'lerin ihtiyaçlarını karşılamak için gereken minimum SINR değerinin altındaysa, servis kalitesi seviyesini artırmak için trafik yükünün komşu hücrelere aktarılması gerekir. Şekil 32b gösterildiği gibi, diğer hücreler, kenarlarında bulunan ihtiyaçları karşılanamayan UE'lere hizmet sağlamak için kapsama alanlarını genişletmek için iletim gücünü artırabilirler. Sistem, yükü dengelemek için bu UE'leri komşu hücrelere aktarmak gerekebilir.

4.4.7 Dağıtık, Merkezi veya Merkezi Olmayan Çözüm?

DESAS'ı çözmek için temel olarak üç yaklaşım vardır. Birincisi, problemin girdi büyüklüğünün BS sayısı olduğu merkezi bir yaklaşım tasarlamaktır. Diğer yaklaşım, her BS'nin sorunu tek tek çözmeye çalıştığı dağıtık yaklaşımdır. DESAS NP-hard bir problem olduğundan, bir yandan da pratikte merkezi bir çözüm uygulanabilir değildir. BS'lerin sayısı arttığında, çözüm uzayı katlanarak büyür. Diğer taraftan, enerji tasarrufu için BS'lerin çizelgelenmesi, dağıtık bir şekilde her bir BS tarafından ayrı ayrı yapıldıysa, genel şebeke verimini etkileyebilir. Tamamen merkezi veya dağıtık bir çözüm önermek mümkün olmadığından, hibrit bir çözüm tasarlıyoruz. BS'lerin yeteneklerini artırmak için çoklu erişim uç bulutu (MEC) kullanıyoruz. Çekirdek kontrolü ve kapsama alanı denetimi gibi bazı yönetim ve kontrol görevlerini çekirdek ağdan ağın kenarlarına aktarıyoruz.

MEC'ler, birden çok BS'ye erişerek ve birbirleriyle iletişim kurarak, dağıtılmış modellere kıyasla ağ durumu üzerinde daha büyük bir perspektife sahip olurlar. Bir MEC için şebeke durumunu toplamının toplam maliyeti, böl ve yönet yaklaşımı kullanıldığı için merkezi bir modelden daha düşüktür. Merkezi modeller, MEC ve tamamen dağıtılmış modellere kıyasla ağ durumuna göre en büyük perspektife sahip olsalar da, ölçeklendirilemezler. Ağ büyüdükçe problem zorlaşır. MEC'ler ağın kenarına yerleştirilmiş ve BS'lere yakın oldukları için, tam olarak dağıtık modeller kadar hızlı hücrelerden bilgi toplayabilirken, çekirdek ağa bilgileri taşımak için gecikme çok büyüktür. Benzer bir argümantasyonla, merkezi modellerin ihtiyaç duyduğu işlem gücü ve enerji miktarının MEC'lere kıyasla büyük olduğunu iddia edebiliriz. Sonuç olarak, merkezi modeller kaynakları en iyi şekilde tahsis etmelerine rağmen, ağ boyutu çok büyükse, optimum sonuca ulaşmak her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, MEC kullanarak daha düşük bir enerji ve işlem gücü ile daha düşük bir optimal çözüme ulaşabiliriz. Merkezi olmayan MEC tipi yaklaşımlar

ve tamamen merkezi topolojiler arasındaki genel karşılaştırmayı Tablo 15’de özetledik.

Makro BS’nin kapsama alanı altında bir dizi küçük hücrenin olduğu iki katmanlı bir HetNet varsayılmaktadır. BS Yoğunluk ve Güç Uyarlama Algoritması’da (BDPA), makro BS’ler her zaman çalışır durumda olacak ve ağ kapsama alanını korumak için önerilen zamanlama modeli küçük hücreler üzerinde yürütülecektir. BDPA algoritması, DESAS problemini çözmek için BS yoğunluk adaptasyonu (BDA) ve güç adaptasyonu (PA) algoritmalarından oluşmaktadır (23a-25a).

4.4.8 BS Yoğunluk Uyarlama (BDA) Algoritması

Farzedelim ki, T zaman aralığında BS j ’de kullanılabilen toplam RB sayısı $\tau_j(T)$ olsun. BS j ’nin **kaynak kullanım oranı**, BS’nin tanımlandığı şekilde gerekli minimum trafik hacmini karşılamak için tahsis edilen kaynak bloklarının (RB) yüzdesi olarak tanımlanabilir.

$$A_j = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{ij}}{\tau_j(T)} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_{ij}^*}{b_r \log_2(1 + SINR_{ij})}}{\frac{b_r}{b_j} \times T}, \quad (26)$$

Burada, b_j , BS j ’nin toplam kullanılabilir bant genişliğidir. Kaynak kullanım oranı tanımını kullanarak $SINR$ değerini

$$SINR_{ij} = \frac{g_{ij}P_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^M A_j g_{ik}P_{ik}}, \quad (27)$$

olarak yeniden tanımlayabiliriz. BS’ler kapatıldığında kapsama boşluklarını önlememiz gerekir. MEC kullanılarak, farklı SINR değerleri için şebeke kapsama olasılığını BS’lerin yoğunluğu (λ_b) göz önüne alarak hesaplayabiliriz. Bu yazıda, sonuçlarımızı (Keeler vd., 2013)’de önerildiği gibi, $P_C(T_{SINR})$ ’lı kapsama olasılığını kullanarak doğrulamaktayız:

$$P_C(T_{SINR}) = \frac{2}{\gamma} \int_0^\infty t^{\frac{2}{\gamma}-1} e^{-tN_0\alpha^{-\frac{2}{\gamma}}} e^{-t^{\frac{2}{\gamma}}} \left(-\frac{2}{\gamma} \frac{Tt^{\frac{2}{\gamma}} F(1, 1 - \frac{2}{\gamma}; 2 - \frac{2}{\gamma}; -T)}{1 - \frac{2}{\gamma}} \right) dt. \quad (28)$$

Burada

$$\alpha = \frac{\lambda_b \pi \mathbf{E}[(P_d S_d)^{\frac{2}{\gamma}}]}{K^2}$$

ve $E[S^{\frac{2}{\gamma}}] < \infty$, dışında keyfi kabul edilen S_d gölgesinin dağılımıdır. $F(a, b; c; z)$ hiper-geometrik bir işlevdir (Keeler vd., 2013). $P_C \geq T_{SINR}$ ’ı (28) sağlamak için karşılık gelen $SINR$ değerini bulabiliriz. (27), $SINR$, hücrelerin aktivite oranına bağlıdır. Bu nedenle, her bir BS’nin, gerekli minimum $SINR$ değerini bilerek P_C değerini ağ eşiğinin üzerinde tutması için tolere edebileceği maksimum aktivite oranını belirleyebiliriz.

Küçük BS’lerin yoğunluğunu uyarlamak için, kullanıcının trafik gereksinimlerinin karşılandığından ve kapsama alanının korunabileceğinden emin olmamız gerekir. Küçük bir hücre devre dışı bırakıldığında trafiğin boşaltılması için, komşu küçük hücrelerin ve makro BS’nin kapasitelerini, boşaltılan trafiği idare edip etmeyeceklerini öğrenmek için değerlendirmemiz gerekir. Ayrıca,

Tablo 15. DESAS sorununa tamamen dağıtılmış, merkezi olmayan veya merkezi bir çözümün uygulanmasının karşılaştırılması.

	Dağıtık	Merkezi olmayan (MEC)	Merkezi
Dİğer hücrelerin durumları hakkında farkındalık	Bilinmeyen	farkında	farkında
Bilgi toplama maliyeti	Çok düşük	Düşük	Çok yüksek
Ölçeklenebilirlik	Ölçeklenebilir	Ölçeklenebilir	Ölçeklenebilir değil
Ağ perspektifi	BS başına	BS'lerin denetimi altında	Tüm ağ için
Zaman çözünürlüğü	Çok hızlı	hızlı	Çok yavaş
Hesaplama gücü	Düşük	Yüksek	Çok yüksek ama mümkün değil
Kaynak tahsisi	Optimal değil	Suboptimal	Optimal

kapsama deliklerini önlemek için çizelgeleme algoritmasının ağ kapsama alanı üzerinden uygulanmasının etkisini de analiz etmemiz gerekir.

Önerilen BDPA algoritmasının iskelet kodu Algoritma 1’de sunulmuştur. Ağın heterojenliği ve BS yoğunluğunun değişmesi nedeniyle, her bir çalışmada (satır 2-4) ağ kapsama alanını ve minimum hücre kullanım faktörünü (A_{min}) korumak için bir eşik SINR değeri hesaplamamız gerekir. Her küçük hücrede (R_{ij}^*) gereken minimum iş hacmini, *basit model* (yoğunluk ve güç adaptasyonunun kullanılmadığı bir ağda) ile elde edilebilen verimi karşılaştırarak ve BDPA algoritmasında R_{ij}^* olarak belirlendi. Daha sonra, her bir BS’nin kullanım faktörünü, A_{min} (5. satır) ile karşılaştırmak için kontrol etmekteyiz. Eğer BS j ’nin kullanım faktörü eşik üzerinde ise ve onun ilgili makro BS’nin BS j yük (hat 6) işlemek için yeterli kapasitesi varsa, bu baz istasyonunu kapatabilir ve trafik yükünü ilgili makro BS’ye aktarabiliriz. Eğer makro BS aşırı yüklenirse, mümkünse BS j ’lık yükünü komşularından birine transfer edebiliriz (satır 12-19). Bununla birlikte, komşusu BS j ’nin trafik yükünü kaldıramazsa, bu BS’yi açık tutmalı ve bir sonraki bölümde açıklanacak olan güç adaptasyon algoritmamızı ($PA()$) kullanmalıyız. BS j ’nin kullanım faktörü eşik altında iken güç adaptasyon algoritmamızı kullanıldığında BS j ’nin kullanım faktörü hala eşik altında kalırsa, yedekli BS’leri açabilir ve A_{min} değerini yeniden hesaplayabiliriz.

Ortak BS yoğunluk ve güç adaptasyonu (BDPA) algoritmasının hesaplama karmaşıklığı $O((N_{macro} + N_{small}) \times \tau_{tot})$. MEC’ler arasında hesaplama görevlerinin dağılımından dolayı, her MEC sadece BS’ler ve BDPA algoritmasının bir parçası için polinom zamanında çalışır.

4.4.9 Güç Uyarlaması (PA) Algoritması

Güç uyarlama algoritmasının ayrıntıları Bölüm 4.3’te sunulmuştur.

4.4.10 Sonuçlar ve Değerlendirme

Doğrulama için, Vienna-LTE simülatörü (Rupp vd., 2016b) kullanılmıştır.

Simülasyon Modeli ve Parametreler Zamanlama algoritmasının, yeteneklerini dinamik ağlarda göstermek için seyrek ve yoğun küçük hücre senaryoları için uyguladık. İki farklı ağ senaryosunu simüle ettik:

- Seyrek ağ: BS’lerin yoğunluğunun 5 ile 20 BS/km² arasında değiştiği ve 100 UE’nin ilgili bölgeye rasgele üniform dağıtılmış olduğu yerler.
- Yoğun ağ: BS’lerin yoğunluğu, 20 ile 100 BS/km² arasında değişir ve 1000 UE’ler, ilgili bölgeye rastgele üniforma dağıtılmıştır.

BDPA algoritması ve LP-WUR arasında adil bir karşılaştırma sağlamak için, simülasyonumuzda gerçek yaşam LTE ağlarına dayalı modellenen farklı türdeki yoğun trafik yüklerini kullandık. Simülasyon parametreleri ve trafik modelleri sırasıyla Tablo 16 ve Tablo 17 olarak özetlenmiştir.

Algorithm 1: Baz istasyonu yoğunluğu ve güç uyarlama algoritması (BS Density and Power Adaptation Algorithm, BDPA).

```

1 for  $j = 1$ :All BSs connected to MEC do
2    $\lambda \leftarrow$  density of BSs
3    $T_{SINR} \leftarrow$  find  $T_{SINR}$  that  $P(T_{SINR}, \lambda) \geq T_{cov}$ 
4    $A_{min} \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_{ij}^*}{b_{\tau} \log_2(1+SINR_{ij})}}{\frac{b_{\tau}}{b_j} \times T}$ 
5   if  $A_{min} \leq A_j$  then
6     if  $A_{min} \leq A_j + A_{mj} \leq 1$  then
7       Turn off BS  $j$ 
8        $\lambda \leftarrow \frac{N_{small}-1}{Area}$ 
9        $DeactivatedBSs + 1$ 
10    end
11    else
12      Find a neighbor small cell  $k$ 
13      with the highest received SINR
14      if  $A_{min} \leq A_j + A_k \leq 1$  then
15        if  $SINR_k \geq T_{SINR}$  then
16          Turn off BS  $j$ 
17           $\lambda \leftarrow \frac{N_{small}-1}{Area}$ 
18           $DeactivatedBSs + 1$ 
19        end
20        else
21          #Our heuristic cell-zooming #algorithm needs to be run to #maintain
22          QoS in the network
23           $PA()$ 
24        end
25      end
26    end
27  else
28     $PA()$ 
29    if  $A_j < A_{min}$  &&
30     $DeactivatedBSs > 0$  then
31      while  $A_j \geq A_{min}$  or  $DeactivatedBSs > 0$  do
32        Turn on a BS
33         $\lambda \leftarrow \frac{N_{small}+1}{Area}$ 
34         $DeactivatedBSs - 1$ 
35         $T_{SINR} \leftarrow$  recalculate  $T_{SINR}$ 
36         $A_{min} \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_{ij}^*}{b_{\tau} \log_2(1+SINR_{ij})}}{\frac{b_{\tau}}{b_j} \times T}$ 
37      end
38    end
39  end
40 end

```

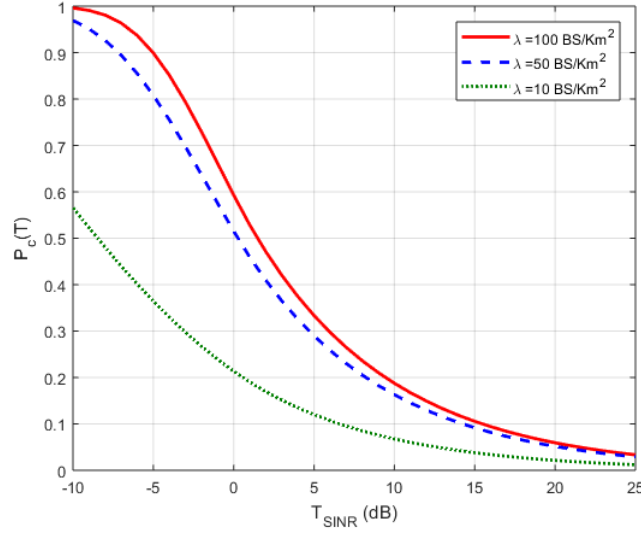
Vienna Simulatörü, Uygulama Ayrıntıları Viyena LTE sistem seviyesi simülatörü, antenler, kanal modelleri, ağ oluşturma, zamanlayıcılar, trafik modelleri, yürüyüş modelleri vb. gibi farklı

Tablo 16. Simülasyon parametreleri ve değerleri.

Parametreler	Değer	Referans
Frekansı	2.14 GHz	(3rd Generation Partnership Project , 3GPP)
K	$6910 \text{ } KM^{-1}$	(Keeler vd., 2013)
γ	4	(Keeler vd., 2013)
N_0	$10^{-15.82}$	(Keeler vd., 2013)
Alt taşıyıcı frekansı	15 kHz	(3rd Generation Partnership Project , 3GPP)
Makro BS'ler maksimum güç	10 W	(3rd Generation Partnership Project , 3GPP)
Küçük BS'ler maksimum güç	100 mW	(Xu vd., 2018)
Küçük BS'ler uyku gücü	15 mW	(Xu vd., 2018)
LP-WUR gücü	$10 \text{ } \mu W$	(Xu vd., 2018)
TTI	1 ms	
Simülasyon alanı	$2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$	
RHR anten kazancı	Omni-directional	(Clerckx vd., 2008)
Yol kaybı modeli	$128.1 + 37.6 \log_{10}^R R$ in km	(3rd Generation Partnership Project , 3GPP)
Gürültü gücü spektral yoğunluğu	-174 dBm/Hz	(3rd Generation Partnership Project , 3GPP)
Alıcı gürültü	9 dB	(3rd Generation Partnership Project , 3GPP)
BS'lerin yoğunluğu (BS/km ²)	5, 10, 15, 20, 35, 50, 75, 100	
Aktif UE'ler	20, 50, 100, 1000	
UE Hız	5, 20, 40 km/h	
Geri bildirim	CQI	(Clerckx vd., 2008)
Geribildirim gecikmesi	3 TTI	
Zamanlayıcı	Proportional Fair	
Monte-Carlo tekrar sayısı	30	
Simülasyon uzunluğu	100 TTI	

Tablo 17. OFDMA tabanlı ağlarda trafik türleri (Karagiannis vd., 2014).

Trafik Türü	İletim Kategorisi	Yoğun trafik
FTP	En iyi çaba	10%
HTTP	İnteraktif	20%
Video akışı	Yayın Akışı	20%
VoIP	Gerçek zaman	30%
Kumar	İnteraktif & Gerçek zaman	20%



Şekil 33. Farklı SINR değerleri için kapsama olasılığı.

modüller içerir. Her BS üç sektör içerir ve her sektörde küçük hücreler kullanır. UE'ler ve BS'ler ilgili bölgeye rasgele bir şekilde dağılmışlardır.

Neden Veriyi Uçta Topluyoruz? Temel amacımız, ağ üzerinde sezgisel yoğunluk uyarlamalı çizelgeleme (zamanlama) modelini uygulamak için MEC'de bilgi toplayarak ağdaki enerji tüketiminin azaltılmasıdır.

Şekil 33'te, çeşitli SINR değerleri için kapsama olasılığı sunulmuştur. Ayrıca, T_{SINR} 'ın çeşitli koşullar altında nasıl değiştirilebileceğini göstermek için üç farklı BS yoğunluğunu (10, 50, 100 BS/km²) inceliyoruz. Görebileceğimiz gibi, BS yoğunluğu düşük olduğunda (10 BS/km²), eğer T_{SINR} -10 dB değerini belirlersek kapsama olasılığı %57 civarında olacaktır. Bununla birlikte, BS'lerin yoğunluğunu 50 BS/km² ve 100 BS/km²'ye çıkararak, kapsama olasılığı sırasıyla %98 ve %100'e yükseltilecektir. Şekil 33'ü değerlendirerek, BS yoğunluğunun çok düşük olup olmadığını bulabiliriz, ağda QoS'yi bozabilecek çok fazla kapsama deliği ile karşılaşabiliriz. Dahası, BS'lerin yoğunluğunun artırılmasıyla, alınan girişim miktarı da artacaktır, fakat BS yoğunluğu optimum seviyesine ulaştığında bu gelişme göz ardı edilebilir olacaktır. Bu nedenle, QoS'yi geliştirmek ve ağda kaynak israfını önlemek için BS'lerin yoğunluğunu ağ durumuna uyarlamalıyız.

Uç bulutunda hesaplanan SNIR eşiği (T_{SINR}), BDA algoritması tarafından kullanılacak ve ağ durumunun anlık görüntüsünü kullanarak, BS'lerin kanalları karakterize eden 4 bitlik bir CQI

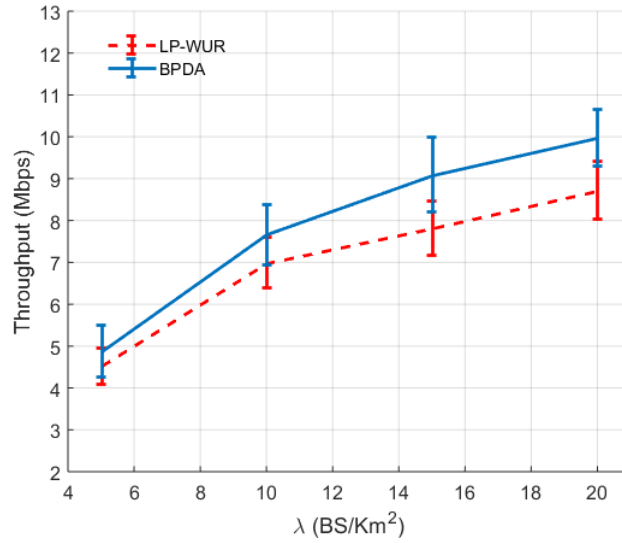
değerine eşlenecektir. Bu nedenle, BLER'i ağda değerlendirerek, önceki adımdan elde edilen SINR değerine karşılık gelen CQI seviyesine eşleştirilebilir. Ayrıca, ilgili bilgi MEC'ler aracılığıyla alındığında ağ kaynaklarının optimize edilmesi için BDPA algoritması çalıştırılacaktır.

BDPA Algoritmasının Doğrulanması ve Değerlendirilmesi Bu bölümdeki BDPA algoritmasını doğrulayıp ve düşük güç uyandırma alıcıları (Xu vd., 2018)'i kullanan LP-WUR tekniği olarak adlandırdığımız uyku zamanlama tekniği ile karşılaştırmaktayız. Bu bölümde BDPA algoritmasının performansına etki eden parametrelerin yani çıktı, spektral verim, enerji verimliliği, mobilite ve kullanıcı yoğunluğunun etkisini değerlendirmekteyiz.

LP-WUR Uyku Planlaması Tekniği Düşümleri (BS, UE) uyandırma alıcıları ile donatmak suretiyle, isteğe bağlı enerji tasarruflu UE kontrollü bir uyku zamanlayıcısı (Xu vd., 2018)'te sunulmuştur. Uyandırma radyo modülleri düşük güç tüketimleri nedeniyle ($10 \mu W$), kanalı dinlemek için her zaman aktif olabilirler. Bu nedenle, bir uyandırma sinyali başarılı bir şekilde alındığında iletim için bir BS'yi tetikleyebilir ve iletim sonlandırıldığında küçük hücreler uyku moduna geçebilir. LP-WUR'u uygulamak için, UE'ler ve BS'ler arasındaki iletişimi izleyip aynı zamanda UE'ler ve BS'ler arasında bir paket iletildiğinde, bu algoritma için enerji tüketimi, çıktı ve spektral verimi hesaplayabiliriz.

Verim Şekil.34 ve Şekil.35'te, sıralı ve yoğun ağ senaryolarında, BDPA algoritmasının LP-WUR tekniği ile ortalama verimini karşılaştırdık. Ağdaki yüksek iletim oranları nedeniyle, çıktı ağdaki UE'lerin ve BS'lerin artan yoğunluğundan etkilenebilir. Görebildiğimiz gibi, BS yoğunluğu düşük olduğunda (Şekil 34), BDPA ve LP-WUR algoritmalarının elde edilebilen maksimum verimi, sırasıyla $10 Mbps$ ve $8.5 Mbps$ civarındadır. Bu değerler, BS yoğunluğu artırıldığında $15 Mbps$ ve $11 Mbps$ 'ye kadar yükseltilir (Şekil 35). Her iki senaryoda da BDPA algoritmasını kullanarak farklı koşullarda daha yüksek ağ verimine ulaşabiliriz. Çünkü, BPDA algoritmasında, her bir hücrenin kapasitesini göz önünde bulundurarak ve aktif BS'lerin sayısını azaltarak, UE'ler tarafından alınan toplam girişim miktarı azaltılarak, kanal kalitesini artırır ve genel ağ verimini geliştirir. BDPA algoritmasının güç adaptasyonu özelliği ile, hücre sınırlarında bulunan UE'ler için alınan SINR, LP-WUR tekniğine kıyasla ağ üretimini geliştirecek şekilde geliştirilecektir. Önerilen algoritma, yoğun ağlarda daha geniş bir ağ verimi sağlayabilir ve LP-WUR tekniğine kıyasla %26'ya varan oranlarda servis kalitesini iyileştirebilir.

Spektral Verim BDPA algoritmasının spektral verim üzerine etkilerini Şekil 36 ve Şekil 37'de gösteriyoruz. Spektral verim, ağdaki girişim düşük olduğunda ve ağ trafik yükünün üstesinden gelmek için yeterli kapasiteye sahip olduğunda mümkün olan en yüksek seviye modülasyon ve kodlama yöntemi (MCS'si) kullanılarak geliştirilebilir. Her iki durumda da (seyrek ve yoğun) spektral verim, yüksek miktarda girişim nedeniyle azalacaktır. Seyrek ağlarda (BS yoğunluğunun $5 BS/km^2$ olduğunda) spektral verim yaklaşık $11 bps/Hz$ olur (Şekil 36). BDPA algoritması



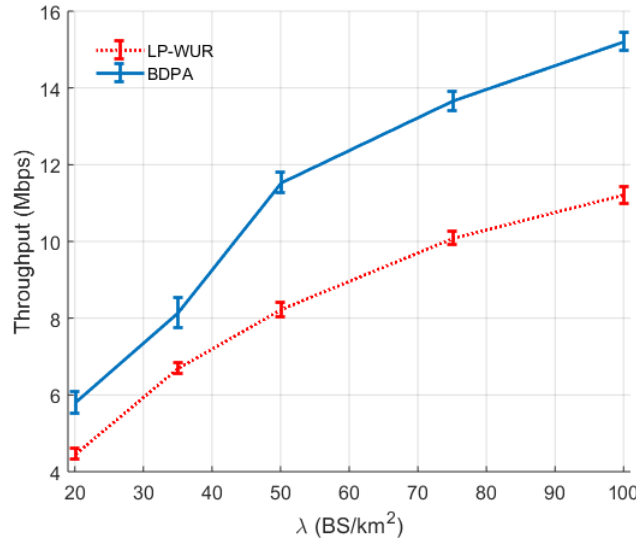
Şekil 34. BDPA algoritmasının, farklı BS yoğunlukları için 100 UE ile seyrek bir ağda ağ verimi üzerine uygulanmasının etkisi.

tarafından daha fazla sayıda BS'in devre dışı bırakılması nedeniyle, hücre başına ortalama spektral verim %30'a kadar arttırılabilir.

Enerji Tüketimi BDPA algoritmasının enerji verimliliğini değerlendirmek için, farklı sayıdaki UE'ler ve BS'ler için enerji tüketim miktarını Şekil 38 ve Şekil 39'da gösteriyoruz. BS yoğunluğunun arttırılmasıyla, her iki senaryoda da enerji tüketim miktarı artacaktır. Ağ seyrek (Şekil38) ve BS yoğunluğu 20 BS/km² olduğunda, simülasyon süresince BDPA ve LP-WUR algoritmaları yaklaşık 12100 W ve 12400 W harcamaktadır. Yoğun ağda bu değerler (Şekil 39) (BS yoğunluğu 100 BS/km² olduğunda) 13500 W ve 15520 W olmaktadır. BDPA algoritması, yoğun ağlarda daha yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir. LP-WUR tekniğine göre %5 daha fazla enerji tasarrufu sağlayabilir.

Ayrıca, LP-WUR tekniğinde, sürekli bir trafik yükümüz olduğunda, tüm BS'lerin, ilgili UE'lerine hizmet sağlamak için aktif modda olmaları gerekmektedir. Ancak, BDPA algoritması ağ kaynaklarını, düşük yük BS'lerinin trafiğini komşu hücrelere aktararak ve daha fazla enerji tasarrufu için daha fazla BS devre dışı bırakarak verimli bir şekilde kullanılacaktır. Şekil 40'ta görebileceğimiz gibi, önerilen algoritma, trafik yükü yüksek olduğunda % 12'ye kadar daha fazla enerji tasarrufu sağlayabilir.

Kullanıcı Yoğunluğu Dinamik ağlarda, BS'lerin yoğunluğunda varyasyonun yanı sıra, UE yoğunluğu da gün içinde değişecektir. BS'lerin yoğunluğunu sabit tutarak (50 BS/km²), UE yoğunluğunun verim, spektral verim ve güç tüketimi üzerindeki etkisini Şekil 41, Şekil 42 ve Şekil 43'te gösteriyoruz. BDPA algoritması, LP-WUR tekniğine kıyasla daha yüksek performansa ulaşabilir. UE'lerin yoğunluğu düşük olduğunda, her iki teknik de neredeyse aynı performansa sahiptir. Görebildiğimiz gibi, UE'lerin çok olduğu bölgelerde BDPA algoritması daha iyi sonuçlar



Şekil 35. BDPA algoritmasının farklı BS yoğunlukları için 1000 UE ile yoğun bir ağda ağ verimi üzerine uygulanmasının etkisi.

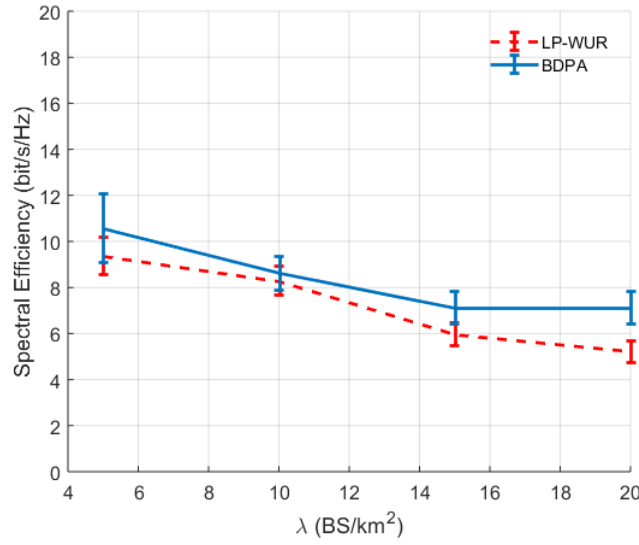
üretmektedir.

Hareketlilik Deneylerde gerçek yaşam koşulunu sağlamak için, UE'lerin farklı hızlarda hareketliliği de düşünülmektedir. UE'lerin yoğunluğu ve BS'lerin yoğunluğu 100 UE/km^2 ve 20 BS/km^2 olsun. UE'ler yayaları, bisiklet kullananları ve sürücülerini simüle etmek için 5 km/h , 20 km/h ve 40 km/h olarak 3 farklı hızda hareket etmektedir. Şekil 44'te gösterildiği gibi, önerilen algoritma tüm durumlarda LP-WUR tekniğine kıyasla daha yüksek bir ağ verimi elde edebilmektedir. BDPA algoritması MEC ile donatılmış olduğundan ve ağ durumuna göre daha büyük bir perspektife sahip olduğundan, BDPA LP-WUR tekniğinden daha iyi performans göstermektedir. Bu nedenle, BDPA algoritması, bir BS'nin kapatılması gerekliliğini daha hızlı ve daha doğru tahmin edebilir.

4.4.11 İlgili Çalışmalar

Bir mobil ağda, enerji yükünün miktarına bağlı olarak BS'ler tarafından enerjinin bir kısmı dinamik olarak tüketilirken, diğer bir kısmı, soğutma sistemleri, güç kaynakları veya sinyal işleme gibi bazı bileşenlerde statik olarak tüketilir. Bu yazıda, ana odak BS'lerde dinamik güç tüketimi üzerindedir. BS'lerde güç tüketimi BS'lerin yoğunluğunun şebeke koşullarına uyarlanması ile yönetilebilir.

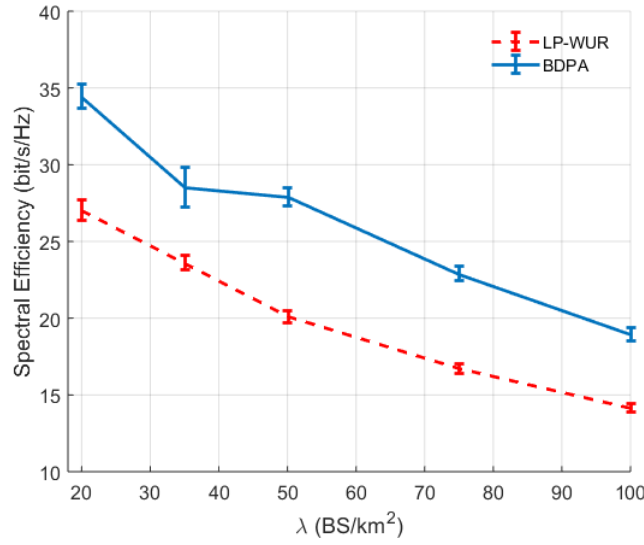
BS'lerin alıcı vericilerini boş zamanlarda kapatarak BS'lerde enerji tüketimini azaltmak için, ağ mimarisinde (Andersson vd., 2016; Feng vd., 2017b) sürekli olmayan iletim (DTX) modelleri kullanılabilir. DTX tabanlı modellerde Tekli Frekans Ağı (MBSFN) alt çerçeveleri ağdaki trafik yükü (Migliorini vd., 2013) dikkate alınarak tahsis edilir. DTX şemaları uygulamak enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilmesine rağmen, DTX, boş alt çerçevelerin eksikliğinden dolayı maks-



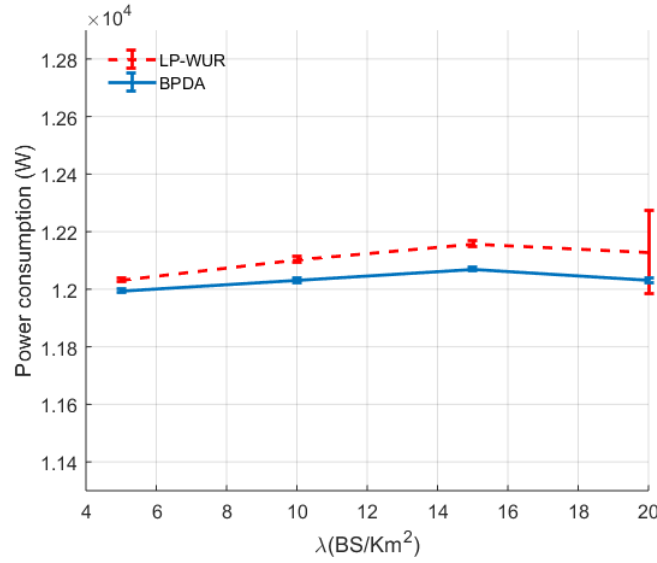
Şekil 36. BDPA algoritmasının, farklı BS'lerin yoğunlukları için spektral etkinlik üzerinde 100 UE ile seyrek bir ağda uygulanmasının etkisi.

mum yük sırasında kullanışlı değildir ve paket teslimatı için gecikmeye neden olur (Kanwal vd., 2017). Üstelik, UE'leri ve BS'leri LP-WUR'la donatarak, BS'lerin aktivasyonu ve deaktivasyonu için gecikme azaltılabilir ve BS'ler boşa kalma süreleri (Xu vd., 2018) sırasında kapatılabilir. Enerji verimliliğini arttırmak için başka bir yöntem de RB'lerin (Tung vd., 2012) toplanmasıdır. Taşıyıcı toplama şemaları kullanılarak, iletişimdeki genel giderlerin miktarı azalacak ve bu da ağdaki enerji korunumunu arttıracaktır. Ağdaki güç tüketimini azaltmaya yönelik başka bir şema, ağdaki (Mor ve Kumar, 2018) blok hata oranını (BLER) en aza indirerek BS'lerin iletim gücünü QoS kısıtlamalarına karşın uyarlamaktır. Ayrıca, OFDMA tabanlı ağlarda (Zhou vd., 2016; Kaddour vd., 2015) kaynak tahsisi optimize edilerek enerji verimliliği artırılabilir. BDPA algoritmasında, uyarlama BS'leri iletim gücüne ek olarak, ağ kaynaklarının daha verimli bir şekilde optimize edilmesi için BS'lerin yoğunluğunu çıkı ve kapsama alanı gibi ağ parametrelerine uyarlıyoruz. Ayrıca, kaynak ayırma, hücrelerin kullanım faktörünü artırarak ve yedekli BS'leri aynı anda devre dışı bırakarak optimize edilir. Bu çalışmada, BS'lerin yoğunluğunu ve iletim gücünü adapte ederek ve ağ kaynağını kullanarak, aynı anda farklı perspektiflerden ağdaki kaynak yönetimini, verimi ve kapsama alanını geliştirdik.

Dahası, enerji ağ yapısı (Bousia vd., 2012; Huang vd., 2017)'de mesafe-duyarlı modeller gibi yük dengeleme düzenleri uygulanarak enerji korunabilir. Enerji verimliliği, şebekedeki zamana göre trafik değişimlerini dikkate alarak enerji tüketimini uyarlamak için trafiğe duyarlı modeller uygulanarak da geliştirilebilir (Hossain vd., 2013). Enerji verimliliği, dağıtık veya merkezileştirilmiş şekilde (Rawat ve Reddy, 2017) uygulanabilen düşük trafik yüküne sahip aktif BS'lerin sayısını azaltmak için UE göç teknikleri uygulanarak da elde edilebilir. Merkezi modellerde, BS'ler arasında trafik yükü analiz edilerek, en yüksek yüke sahip bir BS belirlenecektir. Bundan sonra, seçilen BS'nin komşu UE'lerini karşılamak için yeterli bant genişliğine sahip olması durumunda, hafif trafik yükü olan bir BS'den UE'ler geçirilecek ve seçilen BS kapatılacaktır. Dağıtık modellerde, göç edilecek BS'nin, daha düşük bir trafik yüküne sahip olması bulunması gerekir. UE göç teknikleri uygulanarak enerji tasarrufu miktarı ağda önemli ölçüde artırılacaktır

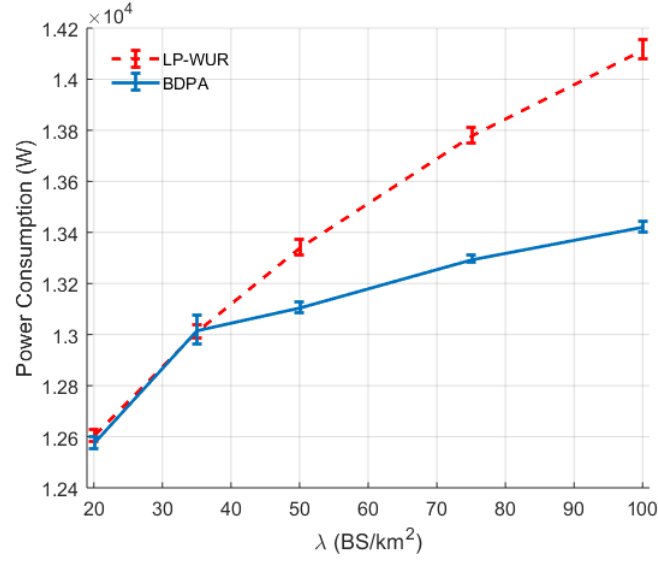


Şekil 37. BDPA algoritmasının, farklı BS'lerin yoğunlukları için spektral etkinlik üzerinde 1000 UE ile yoğun bir ağda uygulanmasının etkisi.

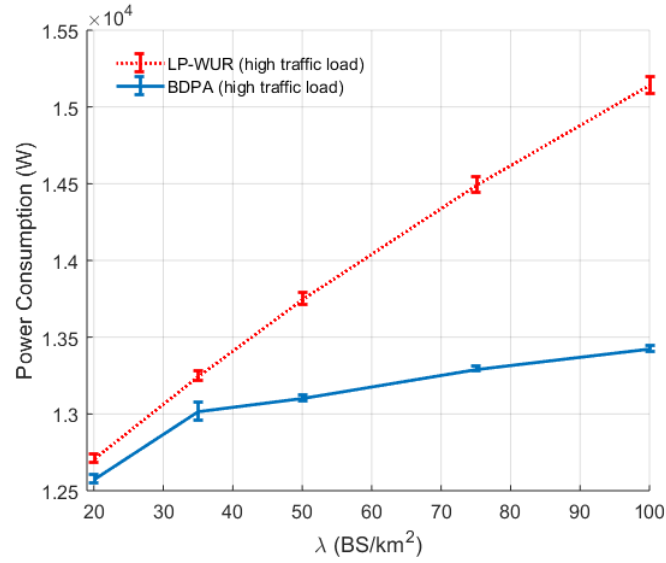


Şekil 38. BDPA algoritmasının, UE'ler ve farklı BS'lerin yoğunlukları için 100 UE ile seyrek bir şebekede enerji tüketimi üzerine etkisi.

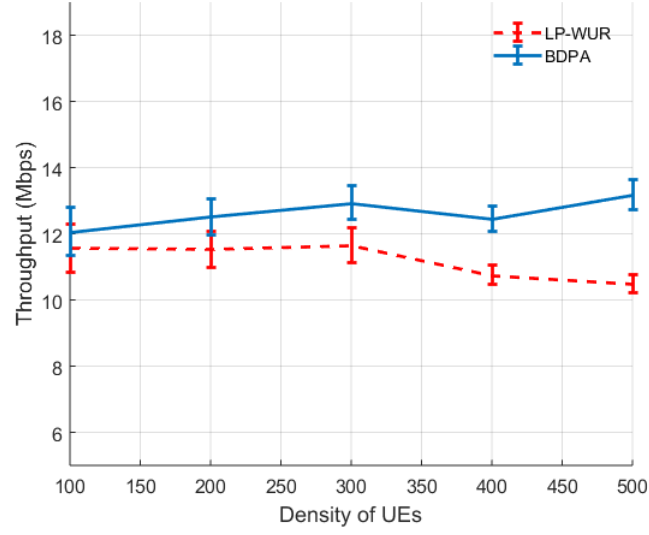
(Ahmad ve Datla, 2015; Nguyen ve Hwang, 2015). Bu çalışmada, ağ performansını arttırmak için bu yöntemleri bir araya getirerek sezgisel ve hızlı bir çözüm sunduk. Çizelgeleme modelimizde, ağda yük dengelemesi sağlamak için algoritmamızı bir UE azaltma tekniği ile donattık. Ancak, (Bousia vd., 2012) ve (Huang vd., 2017)'den farklı olarak, UE'ler komşu BS'lerine olan mesafeyi dikkate alarak başka hücrelere aktarılmazlar. Göç kararını verirken, UE'leri hafifleten BS'ler arasında en iyi adayı bulmak için SINR değerini aldık. Verimi korumak ve ağdaki herhangi bir kapsama deliğini önlemek için hücre yakınlaştırma tekniği de kullanıyoruz. Ayrıca, (Hossain vd., 2013)'den farklı olarak BDPA algoritması trafik yükü yüksek olduğunda bile ağ performansını ve enerji korumasını artırabilir. Son fakat en önemlisi, daha düşük karmaşıklığı ve MEC'in merkezi bir çözüm yerine kullanılması nedeniyle çizelgeleme modelimiz (Rawat ve



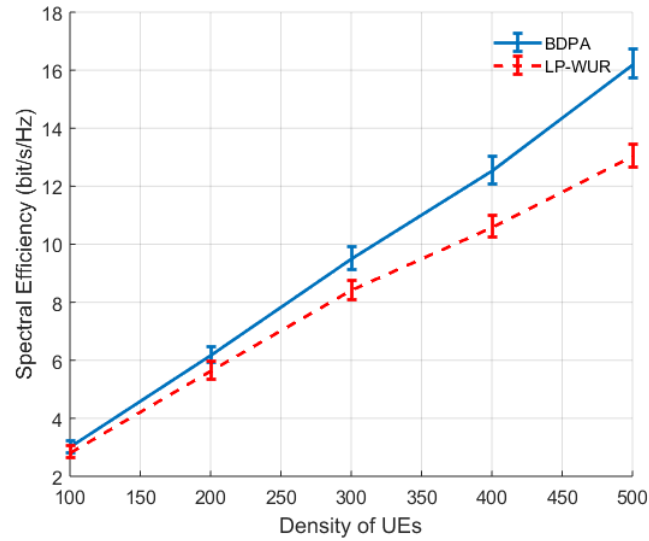
Şekil 39. BDPA algoritmasının, yoğun bir ağda 1000 UE ve farklı BS'lerin yoğunlukları için yoğun trafiğe sahip enerji şebekesi üzerine etkisi.



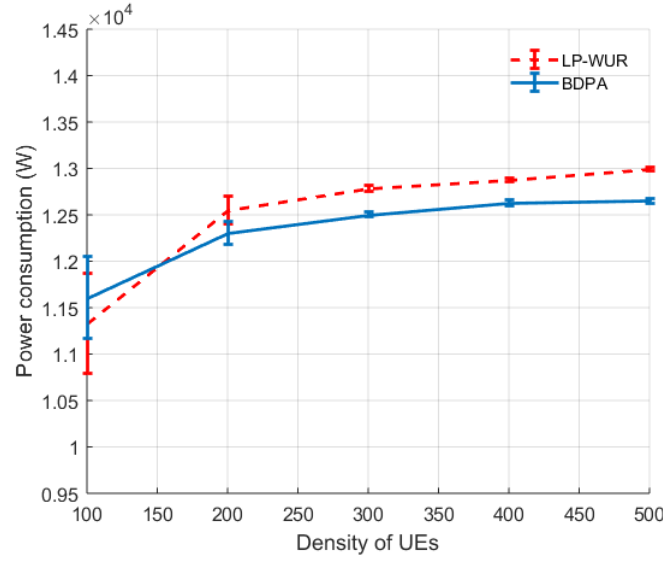
Şekil 40. Trafik yükü farklı BS yoğunluğu için yüksek olduğunda, yoğun bir ağda enerji tüketimi üzerinden BDPA algoritmasının etkisi.



Şekil 41. BS'lerin yoğunluğu $50 BS/km^2$ 'da sabitlendiğinde ve UE'lerin yoğunluğu 100 ile 500 arasında değiştiğinde, BDPA algoritmasının ağ verimi üzerine etkisi.



Şekil 42. BS'lerin yoğunluğu $50 BS/km^2$ 'da sabitlendiğinde ve UE'lerin yoğunluğu 100 ile 500 arasında değiştiğinde, BDPA'nın spektral verim üzerine etkisi.



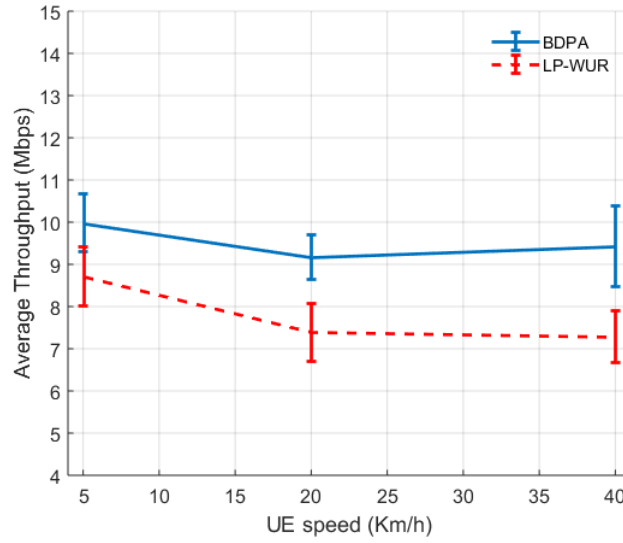
Şekil 43. BS'lerin yoğunluğu $50 \text{ BS}/\text{km}^2$ 'da sabitlendiğinde ve UE'lerin yoğunluğu 100 ile 500 arasında değiştiğinde BDPA'nın güç tüketimi üzerine etkisi.

Reddy, 2017)'den daha hızlıdır.

Bant genişliği genişletme modelleri, (Li vd., 2012) (Almowuena vd., 2016) ağındaki enerji verimliliğini artırmak için de kullanılabilir. Örneğin, zaman sıkıştırma modu (Tcom) algoritmasında, iletim sırasında kontrol sinyallerinin neden olduğu yükü azaltarak enerji korunur. Dahası, Tcom'da yüksek mertebeden modülasyon ve kodlama şemaları uygulayarak, RB'ler ağılarda bant genişliğini arttırabilen frekans ve zaman boyutunun her ikisinde de sıkıştırılır. Bu nedenle, BS'ler yüklerini daha hızlı işleyebilir ve sinyal yükü azalır, bu da ağda enerji korunmasına neden olabilir (Abdelhady vd., 2017). (Li vd., 2012) ve (Almowuena vd., 2016)'de, hücrelerin kenarında bulunan UE'ler için genişleyen bant genişliği, komşu hücrelerinden aldıkları yüksek miktarda girişim nedeniyle mümkün olmayabilir. Bu çalışmada, bir hücre yakınlaştırma tekniği kullanılarak, diğer hücrelerin girişimi en aza indirerek ve ağ koşulunu göz önünde bulundurarak her bir hücrede bant genişliğini arttırabilen yüksek mertebe MCS sağlayarak kenarlarda bulunan UE'ler için iletişimi güçlendirebiliriz.

4.4.12 Sonuç

Bu çalışmada, enerjiyi korumak ve hizmet kalitesini arttırmak için iki sezgisel algoritma uygulayarak yoğunluk-farkında, enerji verimli ve spektrum-verimli bir uyku planlama tekniğini önerdik. Baz istasyonu yoğunluğu, hücre kapasiteleri göz önüne alınarak ve hücreler arasındaki trafik yükünün dengelenmesiyle adapte edilir. Bir hücre yakınlaştırma tekniği geliştirdik. SINR'ı hücre sınırlarında artırarak kapsama deliklerini önler ve ağ verimliliğini arttırabiliriz. Şebekeyi çoklu erişim uç bulut ile donatmak suretiyle, daha yüksek işlem gücü ve daha yüksek perspektif sağlıyoruz. Önerilen model, güvenilir sonuçlar sağlamak için sistem seviyesi simülatörü ile incelendi. Sonuç olarak, ağılarda BS yoğunluğunu değerlendirerek gelecekteki ağların daha akıllı ve daha verimli hale getirebileceği açıkça görülmektedir.



Şekil 44. Önerilen algoritmanın, farklı hızlar için 100 UE ile seyrek bir ağda ağ verimi üzerine etkisi.

4.5 Kümelenmiş Tasarsız Ağlarda Yoğunluk-farkındalıklı Kesinti

Bu bölümde, IEEE ve IFIP tarafından desteklenen onuncusu düzenlenen New Technologies, Mobility and Security (NTMS) konferansında yayınladığımız bildiriye sunuyoruz (Eroglu vd., 2018).

Tasarsız ağların yoğunluğu mobil istasyonlar, uyku zamanlaması veya düğümlerin bozulmaları nedeniyle zamanla ve bulundukları alana göre değişebilir. Şebeke yoğunluğa duyarlı ve adaptif değilse, spektrum gibi kaynaklar boşa harcanacaktır. Bu amaca yönelik olarak, dağıtık ve güvenilir derecede doğru bilgi veren ağ yoğunluğu tahmin edicileri gereklidir. Bu çalışmada, rastgele tasarsız ağlarda mesafe matrisi kullanılarak yeni bir küme yoğunluğu tahmincisi önermekteyiz. Monte-Carlo simülasyon sonuçları ile önerilen tahminleyiciyi doğrulamaktayız. Tahmin edicinin doğruluğu, yüksek miktarda mesafe ölçüm hatası altında bile etkileyici sonuçlar göstermektedir. Ayrıca, yoğunluğu farkında olan bir ağ kesintisi modeli ve bir iletim gücü uyarlama tekniği önermekteyiz. Sonuçlar ağ performansının kapasite, kapsam ve enerji tasarrufu açısından daha iyi hale getirilmesi için yoğunluğa duyarlı çözümlerin gerekliliğini göstermektedir.

4.5.1 Giriş

Tasarsız ağlarda, hareketlilik yönetimi, lokalizasyon, uyku planlaması, verimli tüketim için enerji uyarlamalı uygulamalar, kümelenme, girişim yönetimi, kapasite ve kapsama gibi birçok zorlu konu göz önüne alındığında ağ performansını daha iyi hale getirmek için dinamik, kendi kendini yapılandırabilen ve güvenilir dağıtık çözümler gerektiği anlaşılmaktadır (Merkel vd., 2012; Lee vd., 2010; Ganti ve Haenggi, 2009). Tasarsız ağların yoğunluklarındaki değişiklikler performansı etkiler ve birçok zorluğu ortaya çıkarır. Örnek olarak en basit rastgele erişim protokolü olan slot-ted Aloha'yı ele alalım. Yoğun ağlarda, çarpışmalar ağın performansını büyük ölçüde bozar. Oysa, kanal erişim olasılığı seyrek ağlarda yoğunluğa uyarlanmamışsa slotlar gereksiz yere

kullanılmayacaktır. Kaynakların verimli kullanımı için iletişim yığınlarında yoğunluk farkındalığı gereklidir. Bu nedenle, hızlı ve sağlam yoğunluk tahminleyicilerine ihtiyacımız olduğunu söylemekteyiz. Kümelenmiş tasarsız ağları için bu boşluğu bu çalışmada doldurmaktayız. Yoğunluğu bilen bir iletim gücü adaptasyon tekniği önererek önerilen tahmin edicinin nasıl uygulanacağını da göstermekteyiz.

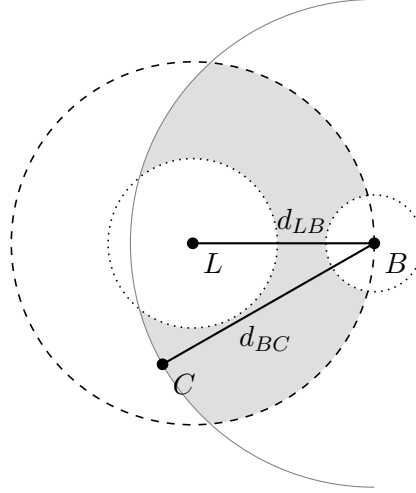
Düğümle GPS gibi yardımcı konumlandırma sistemleri ile donatılmışsa yoğunluk tahmini kolaydır. Konuma dayalı teknik olarak önerilen örnek bir uygulama node sayımı çalışmasıdır (NC) (Eroğlu, 2015). Ancak yardımcı sistemler, cihazların bataryayla çalıştırıldığı ve enerjini verimli kullanılması gereken geçici ağlar için ekstra enerji tüketimine sebep olmaktadır. Ayrıca, yardımcı sistemler, sıkışmaya karşı toleransları nedeniyle güvenilir sonuçlar vermeyebilmektedirler. Yoğunluk tahmini için, yoğunluk ile ilişkili olan bazı parametreler ölçülmelidir. Örneğin, bir düğüm üzerinde akan trafik miktarı, civardaki diğer düğümlerin yoğunluğunun göstergesi olabilir. NEST (Eroğlu, 2015), bu gibi komşu keşif tabanlı yaklaşımların bir örneğidir. Hassasiyeti ölçülen parametreye bağlı olarak düşük ve çok fazla olabilir. Yoğunluk tahmini, örnek olarak gönderilen paket sayısına göre belirlendiğinde, tahmin edicinin doğruluğu, komşuların trafik oluşturma oranındaki değişikliklere eğilimlidir.

Yoğunluğu tahmin etmenin bir başka yolu, alınan sinyal gücü (RSS) gibi düğümler arasındaki mesafelerle yakından ilişkili olan bazı parametrelerin kullanılmasıdır. Bir düğümün komşularından gelen paketlerin sinyal güçleri, düğümler arasındaki yakınlığı göstermektedir. Bununla birlikte, kablosuz sinyaller, solma veya gölgeleme gibi birçok kontrol edilemeyen faktöre eğilimlidir. Sinyal gücüne dayanan bu tür tahminler hızlı olabilir, ancak bunların doğruluğu çevresel faktörlere bağlıdır. Görüş çizgisinin var olup olmadığı, tahmin edicilerin kalitesini etkilemektedir. Geçici olarak kullanılan ağ güçleri için sinyal gücü tabanlı bir tahmin edicinin bir örneği (Eroğlu, 2015) çalışmada sunulmuştur. Ancak bu tahmin ediciyi kooperatif bir şekilde hesaplamak, çok hareketli tasarsız ağlarda sonuca ulaşmak uzun süreceğinden bu ağlarda uygulanabilirliği düşüktür.

Bu çalışmada, ana katkı olarak, kümelenmiş tasarsız ağlarda mesafe matrisine dayanan basit, hızlı ve doğru yoğunluk tahmincisi sunulmaktadır. Ayrıca, iki boyutlu alanlarda kesinti olasılığını dikkate alan yoğunluğa duyarlı bir iletim gücü adaptasyon tekniği sunuyoruz. İlgili çalışmaların aksine, basit, hızlı ve dağıtık bir teknik önermekteyiz. Önerilen yoğunluk duyarlı ağ kesintisi modeli ve iletim gücü adaptasyon tekniği Bölüm 4.5.2’de açıklanmıştır. Önerilen düğüm yoğunluğu tahmincisinin ve diğer tahmin edicilerin ayrıntılarını Bölüm 4.5.3’te sunmaktayız. Önerilen teknikler Monte-Carlo simülasyonları tarafından doğrulanmıştır. Sonuçları, Bölüm 4.5.9’da ele alıyoruz.

4.5.2 Yoğunluk-farkındalıklı Kesinti Olasılığı ve İletim Gücü Uyarlaması

Rastgele olarak ve λ nodes/m² etkin yoğunluk dikkate alınarak uniform dağıtılmış düğümlerin bulunduğu iki boyutlu bir kümelenmiş tasarsız ağı varsayalım. x_k ’in r_k metre uzaklıkta bulunan ve rastgele seçilen bir referans düğüm olan k^{th} ’inci en yakın komşusundan ölçülen bir pakete ait



Şekil 45. Önerilen yoğunluk tahmincisinin gösterimi. Rastgele dağıtılan bir tasarsız ağda üç düğüm, yani, lider düğüm olarak L , B lidere en uzak düğüm ve C B 'ye olan en uzak düğüm. Etkin alanı hesaplamak için mesafeler kullanılmaktadır ve liderin kümedeki (cluster) toplam düğüm sayısını bildiği varsayılmaktadır.

RSS değeri olduğunu düşünelim. Basit yol kaybı modelini göz önünde bulundurularak RSS $x_k = KP_t \left(\frac{r_0}{r_k}\right)^\gamma$ formülü ile hesaplanabilecektir. Burada K $r_0 = 1$ metre uzaklıktan kaynaklanan ve ayrıca uzaklıkla ilişkisi olmayan diğer faktörlerden kaynaklanan sönme faktörünü simgelerken, P_t iletim gücünü ve de $2 \leq \gamma \leq 8$ yol kaybı üssünü göstermektedir.

Kümelenmiş bir tasarsız ağda rastgele seçilen bir referans düğümü göz önünde bulunduralım, bu noktada r_k bu düğümüne ait k^{th} ’inci komşu ile aralarındaki mesafeyi $\mathbf{R}_k$ rastgele bir değişken ile birlikte göstermektedir. $\mathbf{R}_k$ ’in bir fonksiyonu olan ve $\mathbf{P}_{\mathbf{I}_k}$ rastgele değişkenliği ile ifade edilen x_k ise rastgele seçilen düğümüne en yakın komşudan alınan RSS’in değerini göstermektedir. Gölgeleme ve sönmenin hesaplamalara katılmadığı bir kanal modeli kullanılmaktadır. Bu durumda kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) $\mathbf{P}_{\mathbf{I}_k}$ (Onur vd., 2012)

$$F_{\mathbf{P}_{\mathbf{I}_k}}(x_k) = \Gamma \left(k, \pi \lambda \left(\frac{KP_t}{x_k} \right)^{2/\gamma} \right) / \Gamma(k),$$

şeklinde olacaktır. Bu çalışmada kesinti olasılığını bir düğümüne ulaşan sinyal gücünün önceden belirlenen bir eşik değerden küçük olma olasılığı olarak kabul etmekteyiz. Bu durumda kesinti olasılığı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_O(\lambda) = F_{\mathbf{P}_{\mathbf{I}_1}}(T) = e^{-\pi \lambda (KP_t/T)^{2/\gamma}}, \quad (29)$$

Ağ tasarımcısının gerekli kesinti olasılığını, tasarım parametresi olarak P_O^* belirtmiş olduğunu düşünelim. Her bir düğümün kümenin yoğunluğunu dağıttık olarak tahmin edebileceğini varsayalım, bu durumda (29)’deki hesaplama yönteminde bu bilgiyi kullanabildiğini farzedelim. Düğümler, enerji tüketimini ve kapsama sorunlarını aşmak için iletim gücünü dinamik bir modda $\hat{\lambda}$

olan yoğunluğa göre uyarlayabilmektedirler:

$$P_t^* \geq \frac{T}{K} \left(\frac{-\log(P_O^*)}{\pi \hat{\lambda}} \right)^{\gamma/2}. \quad (30)$$

Tahmincinin çalışması süresi içerisinde iletim gücünün değişmediğini varsaymaktayız.

4.5.3 Küme Yoğunluğu Tahmincisi

Hareketli tasarsız ağda N adet düğümün serbestçe hareket ettiğini ve düğümlerin hareketlilik modellerinin (yön, hız, hızlanma) önceden bilinmediğini varsayalım. Düğümler arasındaki alıcı-verici mesafelerini tahmin etmek için bazı kontrol paketlerinin değiştirilerek alınan sinyal kuvvetleri (RSS) veya yayılma gecikmesi değerlerinin ölçülmesi söz konusu olabilmektedir. $\mathbf{D}_{N \times N}$ matrisinin d_{ij} elemanı $i = 1, 2, \dots, N$ ve $j = 1, 2, \dots, N$ düğümleri arasındaki mesafe olsun. N adet düğüm arasından Şekil 45'de gösterildiği gibi L 'nin lider olarak seçildiğini farzedelim. $\hat{\lambda}$ nodes/m² kümenin yoğunluğunu belirtmektedir.

Lider olarak seçilen düğümün Bölüm 4.5.4'te bahsedilen yöntemlerden birini kullanarak $\mathbf{D}_{N \times N}$ matrisini inşa edebileceğini farzediyoruz. Burada aslında kullanılacak olan bu matrisin sadece iki satırı, dolayısı ile tüm matrise ihtiyaç duyulmamaktadır. Sırasıyla d_{ij} ve $\tilde{d}_{ij}$ i ve j düğümleri arasındaki gerçek ve tahmin edilen uzaklık olsun. Ölçüm hataları ϵ_{ij} sıfır ortalamalı ve σ standart sapmalı Gaussian dağılıma sahip olsunlar, böylelikle $\tilde{d}_{ij} = d_{ij} + \epsilon_{ij}$ olacaktır.

Örnek olarak, rastgele dağıtılmış bir tasarsız ağda L , B ve C olmak üzere Şekil 45'deki N adet düğümden üçünü göstermekteyiz. Yoğunluk tahmincisi şu şekilde çalışır: L düğümü uzaklık matrisini kullanarak en uzaktaki komşusuna olan mesafeyi belirler, bu düğüm de B olduğunu düşünelim ve aralarındaki mesafeyi de d_{LB} olarak belirleyelim. Bu noktada tüm düğümlerin L düğümünü konuma ve d_{LB} yarı çapına göre merkezde bulunan daire içinde yer aldığı anlamına gelmektedir Şekil 45'da gösterildiği gibi. Ardından, B 'nin en uzaktaki komşusunun C olarak belirlendiğini ve bu durumda da C ile B arasındaki mesafenin d_{BC} olduğunu belirlenmiş olsun. Diğer tüm düğümlerin, en uzak düğümler olduğu için L ve B düğümleri arasında d_{LB} ve d_{BC} yarı çapları ile ortalanmış kesişim alanlarında olması gerektiği öngörülmektedir. Ölçüm hataları bu argümanı etkileyebilir; bu yüzden bu çalışmada bu etkiyi de analiz etmekteyiz. Bu iki hesaplama adımından sonra, tüm düğümlerin içinde bulunduğu etkin alan hesaplanmakta ve kümenin toplam düğüm sayısını bildiğinden, liderin küme yoğunluğunu tahmin edebileceğini varsaymaktayız. Düğümler hareketli olabilirler bu yüzden, düğümlerin birbirlerine göre nispi pozisyonlarının hesaplama periyodu boyunca değişmediğini varsaymaktayız.

(Weisstein, 2003) eşitliğinde iki dairenin kesişim noktası olan $A(d, r, R)$ alan, merkezler arasındaki mesafe, iki dairenin yarıçapı sırasıyla d, r ve R ile temsil edilmektedir:

Algorithm 1 Density estimator

Let L represent the node index of the leader
 $[d_{LB}, B] = \max(\mathbf{D}(L, :))$ $\triangleright$ max function returns the distance to the farthest node and its index
 $[d_{BC}, C] = \max(\mathbf{D}(B, :))$
 $D(i, i) = \infty$, for $i = 1, 2, \dots, N$ $\triangleright$ Distance of nodes to themselves are set to infinity to compute min next
 $[d_{LU}, U] = \min(\mathbf{D}(L, :))$ $\triangleright$ min function returns the distance to the closest node and its index
 $[d_{BV}, V] = \min(\mathbf{D}(B, :))$
if $d_{LB} + d_{LU} > d_{BC}$ **then**
 Compute $A_T = A(d_{LB}, d_{LB}, d_{BC}) - A(d_{LB}, d_{LU}, d_{BC}) - A(d_{LB}, d_{LB}, d_{BV})$ $\triangleright$ where $A(., ., .)$ is as defined in (3).
else
 Compute $A_T = A(d_{LB}, d_{LB}, d_{BC}) - \pi d_{LU}^2 - A(d_{LB}, d_{LB}, d_{BV})$
end if
Compute $\hat{\lambda} = \frac{N-2}{A_T}$ nodes/m²

Şekil 46. Yoğunluk tahmincisi.

$$A(d, r, R) = r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dr} \right) + R^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 - r^2 + R^2}{2dR} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{(d+r-R)(d-r+R)(-d+r+R)(d+r+R)} \quad (31)$$

Ayrıca bu modele katkı sağlayacak başka iki gerçekte şu şekildedir: L ve B , kendilerine en yakın komşularına olan mesafeyi hesaplayabilirler, bunların U ve V olduğunu farzedelim. En yakın düğümlere olan mesafeyi hesaplamak, sırasıyla yarıçapları d_{LU} ve d_{BV} olan ve L ve B 'ye göre konumlanmış merkezdeki dairenin içerisinde başka düğümlerin olmadığı öngörülmektedir. Etkili alanın çözünürlüğünü ve sonuç olarak bu dairelerin alanlarını yukarıda açıklanan birinci alandan çıkararak tahmin edicinin doğruluğunu artırabiliriz. Algoritmanın son adımında, bu iki düğümün (L ve B) bulunduğu alanlar etkin alan hesaplamasına dahil edilmediğinden, kümedeki toplam düğüm sayısından 2 çıkarmaktayız. Önerilen yoğunluk tahmincisinin genel prosedürü Şekil 46'da sunulmuştur. Bir sonraki bölümde bu tahmin edicinin sadece basit değil aynı zamanda çok doğru sonuçlara sahip olduğunu da göstereceğiz.

4.5.4 Mesafe Tahmini ve Hataları

Kablosuz ağlarda mesafelerin tahmini çeşitli yollarla gerçekleştirilebilir. Mevcut yaklaşımlar, alınan sinyal gücünü (RSS), varış zamanı (ToA) veya atlama sayısı gibi sinyal gecikmelerini kullanmaktır. Bu yöntemlerin çoğu, koordinatlarını bilen ya da GPS ile belirleyebilen bazı yardımcı düğümlere güvenir (Merkel vd., 2012; Kendall ve Moran, 1963). RSS, alıcı-verici mesafesinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, kablosuz ağlarda mesafeleri tahmin etmek için RSS, vasat

bir tahminci olsa da kullanılabilir. Gölgeleme, çok yollu solma ve diğer birçok çevresel faktör, sinyallerin kalitesini etkiler. Sonuç olarak, bağlantı kalitesindeki konumsal-zamansal değişiklikler, mesafe tahmini üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Gölgelemenin mesafe tahmini üzerindeki etkisi (Chitte vd., 2009) çalışmasında sunulmaktadır. Chitte ve diğerleri uzaklığın maksimum ihtimal tahmininin verimsiz bir problem olduğu ve varyansın gürültü gücü ile üssel olarak arttığı benzersiz ve yansız tahmin edici olduğu sonucuna varmıştır. Dikey frekans bölmeli çoğullama kullanıldığında, kanal durum bilgisi (CSI), RSS'den daha büyük miktarda bilgi sağlamaktadır. CSI'nin yerelleştirmeye ve sıralamaya uygulanması, (Yang vd., 2013) çalışmasında sunulmuştur. Ayrıca sinyallerin zaman atlama esasına dayanan mesafe tahminlerinin kapsamlı bir araştırması da (Guvenç ve Chong, 2009)'da sunulmuştur. Ölçüm hataları, yoğunlukla, görüş alanı olmayan koşullar üreten alıcı-verici yolundaki engellerden kaynaklanmaktadır. Genellikle ekipmanın girişim ve kusurları da hata kaynakları arasında yer almaktadırlar.

4.5.5 Algoritmanın Karmaşıklığı

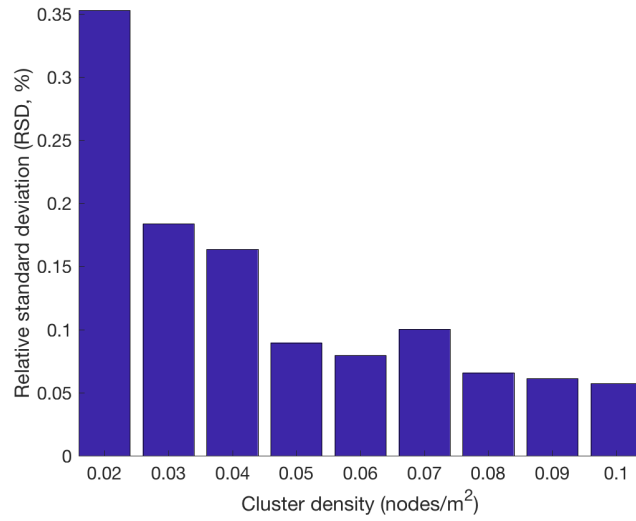
İlk olarak, algoritma lider düğüm L ile bu düğüme ait en uzak düğüm olan B ve B 'nin endeksine olan mesafeyi hesaplamayı gerektirmektedir. İkinci olarak, C (B 'ye en uzak düğüm) arasındaki mesafe gereklidir. Tüm mesafe matrisini D 'yi hesaplamamıza gerek yoktur. Herhangi bir tasarsız ağının iletişim yığınının bağlantı katmanında, düğümler yerel topolojilerini belirlemek için bazı komşu keşif tekniklerini kullanırlar. Bu aşamada, düğümlerin komşularına olan mesafeleri de hesaplayabileceğini düşünüyoruz. Tahmini mesafe vektörleri, ilgili kümenin liderine iletilmektedir. Daha sonra lider, küme yoğunluğunu sabit matematiksel işlemlerle, $\mathcal{O}(1)$ olarak tahmin edebilir. Mesajlaşma karmaşıklığını azaltmak için, lider ilk olarak B düğümünün belirleyebilir daha sonra mesafe vektörünü elde etmek için bir tek noktaya yayın mesajı gönderebilir.

4.5.6 Diğer Tahminciler

Bu çalışmada önerilen yöntem en yakın komşulara mesafelerin kullanıldığı RSS tabanlı (Eroğlu, 2015) tahminci ve (Kendall ve Moran, 1963) çalışmasında sunulan tahminci ile karşılaştırmaktayız.

4.5.7 RSS Tabanlı Kolektif Mesafe Tahmincisi

Eroğlu (2015) çalışmasında sunduğu tahminci her bir düğümün komşularından gelen RSS değerlerinin kolektif bir şekilde ölçülmesine dayanan bir yaklaşım kullanmaktadır. Mesafe tahmini, iki düğüm arasındaki çoklu gözlemler dahil olmak üzere bu ölçümler kullanılarak yapılır. Basit yol kaybı modelini kullanarak, bu RSS değerleriyle tahmini mesafelerin (d_j) değerleri hesaplanmaktadır. Her bir çift düğüm arasındaki mesafelerin değerleri (d_j) hesaplandıktan sonra, yoğunluğu bulmak için $\hat{\lambda}_C = T / (\pi \sum_{j=1}^n d_j^2)$ eşitliği gerçekleştirilir. T , bağlantı derecelerinin (k_j)'lerin toplamıdır ve $T = \sum_{j=1}^n k_j$ ile hesaplanmaktadır.



Şekil 47. Ölçümlerde hata payının $\sigma = 0$ sıfır olduğu anda çeşitli küme yoğunlukları için tahmin edicinin nispi standart sapması bulguları (%) .

4.5.8 Kendall Mesafe Tahmircisi

Kendall ve Moran (1963)'in Geometrik Olasılık kitabının 2. bölüm 26. sayfasında, tahmirci şöyle açıklanmaktadır: n adet en yakın komşulara olan mesafelerin karesinin $y_1, y_2, \dots, y_n$ olduğunu varsayalım. Uygulamada, ağdaki tüm düğümlerin en yakın komşularına olan mesafelerin karesini ölçtüğünü ve bu bilgiyi kümenin liderine ilettiğini varsayıyoruz. Bu ölçümleri kullanarak, lider Y değerini $\sum_{i=1}^n y_i/n$ olarak hesaplayabilir. $\mathbb{E}[Y] = 1/(\pi\lambda)$ değeri beklenen değeri gösterirken tahmirci sonucu $\hat{\lambda}_K = 1/(\pi Y)$ eşitliğinden elde edilebilmektedir.

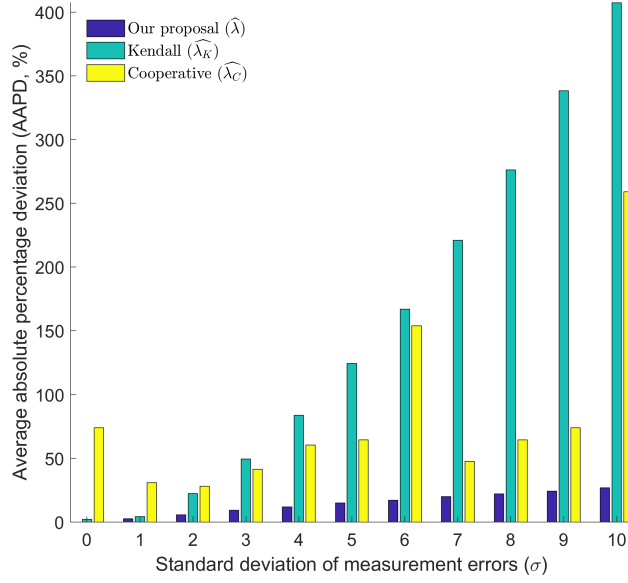
4.5.9 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Önerilen tahmin edici Monte-Carlo simülasyonları kullanılarak doğrulanmıştır. Dairesel bir alanda, dağıtım yoğunluğu λ nodes/m² 'yi takip eden bir dizi nokta rastgele ve de tekdüze olarak seçilir; yani, λ yoğunluğu baz alınarak uzamsal Poisson noktası süreci gerçekleştirilmiştir. Algoritma 46 uygulanmış ve $\hat{\lambda}$ olarak hesaplanmıştır. Simülasyonlar 50 kez tekrarlanmış ve ortalama sonuçlar sunulmuştur.

4.5.10 Tahmircinin Performansı

Nispi standart sapma ($RSD=100\sigma_{\hat{\lambda}}/\mu_{\hat{\lambda}}$) dikkate alınarak farklı yoğunluk değerleriyle elde edilen sonuçlar Şekil 47'de sunulmaktadır. Burada mesafe ölçümlerinde yapılan hataların sıfır ($\sigma = 0$) olduğu varsayılmaktadır. Yoğun kümelerde, hesaplayıcıda varyasyonu azaltan daha fazla sayıda düğüm bulunmaktadır. Bu nedenle, yoğunluk arttıkça, tahmin edicinin RSD'si Şekil 47'de görüldüğü gibi düşmektedir.

Çok yollu solma, gölgeleme ve ortamdaki engellerden dolayı daima mesafe ölçüm hataları ola-



Şekil 48. Gerçek yoğunluk $\lambda = 0.05$ nodes/m² iken tahmin edicilerin ortalama mutlak yüzde sapmasına dayalı olarak karşılaştırılması.

caktır. Bu çalışmada, ölçümlerde sıfır ortalama ve standart sapma σ ile normal olarak dağıtılmış bir hatanın olduğunu varsayıyoruz. σ 'ın ortalama mutlak yüzde sapması üzerindeki etkisi, $AAPD = (100\hat{\lambda} - \lambda)/\lambda$ Şekil 48'de sunulmaktadır. Mesafe tahmini için doğru bir yöntem kullanıldığında bu şekilde de görülebileceği gibi, önerilen yoğunluk tahmincisinin kalitesini ve doğruluğunu artıracaktır. Ancak mesafe ölçümlerindeki hatalar arttıkça, önerilen tahmin edicinin AAPD'si de artmaktadır.

Bu çalışmada önerilen tahminci sonuçlarını $\hat{\lambda}$, Kendall'in önermiş olduğu tahminci sonuçları $\hat{\lambda}_K$ ve de işbirlikçi tahminci sonuçları $\hat{\lambda}_C$ ile karşılaştırmaktayız ve bu sonuçlar Şekil 48'de sunulmaktadır. Tüm tahminciler için ölçüm hataları arttıkça AAPD'de artmaktadır. Ancak, $\hat{\lambda}_K$ sonuçlarındaki değişim bizim çalışmamızda önerilen $\hat{\lambda}$ sonuçlarından her zaman çok daha büyük olduğu görülmektedir. Önerilen yöntem, hatalar artmasına rağmen, daha kesin sonuçlar vermektedir. $\hat{\lambda}_C$, RSS'nin belirsizlikleri nedeniyle kesin olarak doğru sonuçlar vermeyebilir; Kendall'ın AAPD sonuçları, ölçüm hataları artarken daima yüksek oranda artmaktadır.

4.5.11 Yoğunluk-farkındalıklı Kesinti Olasılık Doğrulaması

λ nodes/m² değerinde gerçek dağıtım yoğunluğuna sahip tekdüze rastgele dağıtılmış düğümlerden oluşan 100 m yarıçaplı dairesel bir alanı simüle etmekteyiz. Her bir simülatör koşuturunda referans düğüm olarak kullanılacak rastgele bir nokta seçilmektedir. RSS'yi, referans düğümün en yakın komşusu olan Bölüm 4.5.2'de açıklanan basit yol-kayıp modeline dayanarak hesaplamaktayız; burada $T = 5 \times 10^{-13}$ mW, $K = 10^{-5}$ ve de $\gamma = 3$ değerindedir. Hesaplanan RSS, T eşik değerinden daha düşükse, bu koşuturma kesintili olarak sınıflandırılır, aksi halde kümelenmiş ağın kapsama alanı içinde kalır ve başarılı olarak değerlendirilir. Simülasyonları 10^4

Tablo 18. Farklı P_O^* değerleri için iletim gücü adaptasyon tekniğinin (30) doğrulanması.

Gerekli P_O^*	Bulunan P_O	Standard sapma
0.0100	0.0099	0.0018
0.0126	0.0137	0.0030
0.0152	0.0156	0.0038
0.0178	0.0189	0.0048
0.0204	0.0194	0.0044
0.0230	0.0245	0.0053
0.0256	0.0261	0.0036
0.0282	0.0284	0.0046
0.0308	0.0320	0.0032
0.0334	0.0354	0.0065
0.0360	0.0354	0.0067
0.0386	0.0409	0.0063
0.0412	0.0449	0.0080
0.0438	0.0433	0.0066
0.0464	0.0490	0.0064
0.0490	0.0488	0.0054

kez koşturmaktayız ve kesinti sayısının toplam simülasyon çalışması sayısına oranı, Tablo 18 içinde P_O olarak elde edilen kesinti oranı olarak belirlenmiştir. Kesinti modeli (29) ve (30) iletim gücü adaptasyon tekniği, Tablo 18’de görülebileceği gibi doğru sonuçlar vermektedir. Elde edilen kesinti, önerilen iletim gücü adaptasyon tekniğinin başarılı olduğunu gösteren gerekli kesintiye çok yakın değerlere ulaşmaktadır.

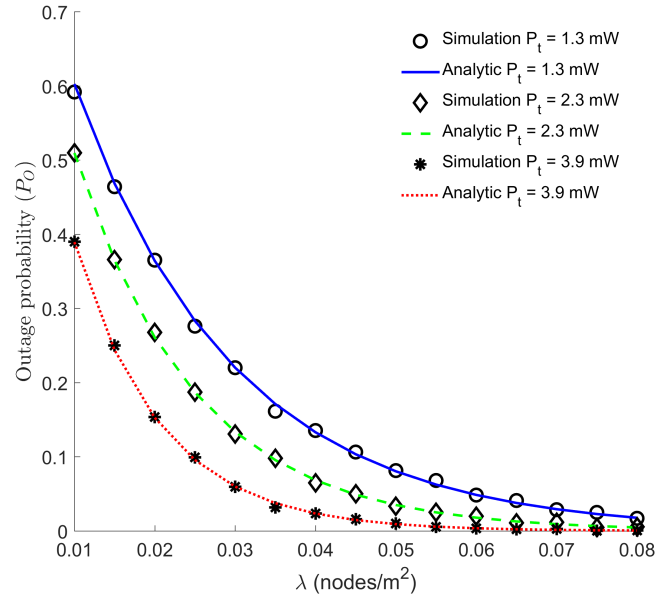
4.5.12 Yoğunluğun Kesinti Olasılığı Üzerine Etkisi

Yoğun tasarsız ağlardaki düğümler, birbirine daha yakın olacaktır ve komşuların ölçtüğü sinyallerin zayıflaması, seyrek ağlara kıyasla daha küçük olacaktır (yani, RSS’ler daha büyük değerlere sahiptir). Şekil 49’da gösterildiği gibi, bir ağın yoğunlaşması, P_t ve T gibi diğer parametreler sabit tutulduğunda kesinti olasılığını daha küçük hale getirecektir.

Şekil 49’da, önerilen tahmin edicimizi kullanarak $\hat{\lambda}$ hesaplanmıştır. Simülatörün her koşturulmasında, ağ yoğunluğu tahmin edilir ve ağ kesintisi, çeşitli P_t değerleri için (29) kullanılarak hesaplanır. Şekil 49 ağ yoğunluğunun servis kalitesini ve şebekenin kapsama alanını etkilediğini göstermektedir. Yoğun ağlarda, kesinti olasılıkları azalacak ve seyrek şebekelerin aksine iletim gücü daha küçük olacaktır.

4.5.13 İletim Gücü Uyarlamasına Yoğunluğun Etkisi

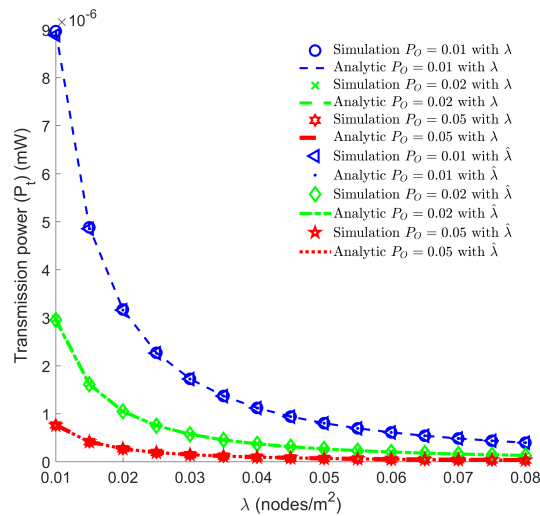
Geçici ağlar için önerilen aktarım gücü adaptasyon tekniğinin (30) onaylanmasında, söz konusu kesinti simülatörüne benzer bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bir simülasyon çalışmasında, hesaplanan kesinti gerekli kesinti olasılığına uymuyorsa (P_O^*), ikili arama yaparak iletim gücünü değiştirilmektedir: hesaplanan kesinti verilen P_O^* ’dan küçükse iletim gücü azaltılır, aksi takdirde



Şekil 49. Yoğunluğun kesinti olasılığına etkisi.

artırılır. Uyarlanan iletim gücü ve (P_t) değerleri Şekil 50’de gösterilmektedir. Bu şekilde, çeşitli kesinti gereksinimleri için gerçek (λ) ve tahmini ($\hat{\lambda}$) yoğunluklarını (30) eşitliğine girdi olarak kullanarak simülasyon sonuçlarını gösteriyoruz.

Bir ağ tasarımcısı, kesintiler nedeniyle düğümlerin bozulan deneyim kalitesine daha toleranslı hale geldiğinde, daha küçük iletim gücü seviyeleri kullanılabileceğinden, enerji tasarrufu miktarı arttırılabilir. Ancak, düğümlerin bağlantı açısından kalitesi, kesinti olasılığı ile önemli ölçüde ilişkilidir. Şebeke yoğunluğu daha yoğunlaştıkça, kapsama alanını korumak, kesinti olasılığını kontrol altında tutmak ve enerji tasarrufu sağlamak için iletim gücünün yoğunluk uyarlıklı bir şekilde azaltılması gerekecektir. Önerilen tekniğin ana avantajı, minimum iletişim yükü gerektirmesi, hızlı ve basit uygulanmasıdır.



Şekil 50. Tahmini sonuçlara ($\hat{\lambda}$) göre iletim gücü uyarlaması.

4.5.14 Sonuç

Bu çalışmada, kümelenmiş tasarsız ağlardaki mesafelere dayalı yeni bir yoğunluk tahmincisi önerildi. Önerilen yöntem Monte-Carlo simülasyonları tarafından doğrulandı ve diğer mesafe tabanlı yoğunluk tahmin edicileri ile karşılaştırıldı. Önerilen tahmincinin, mesafe ölçümlerinde önemli hatalar altında bile yüksek bir doğrulukla iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur. Yoğunluk değişikliklerinin çalışma zamanında tahmin edilmesi gerektiğini ve protokollerin ve parametrelerin statik yapılandırılmalarının dinamik tasarsız ağlarda yeterli olmayacağından protokollerin yoğunluk uyarlıklı ve -adaptif olması gerektiğini savunmaktayız. Sonuç olarak, bu çalışmada sunduğumuz simülasyon sonuçları, ağ performansının kapasite, kapsama alanı ve enerji tasarrufu bakış açılarından daha iyi hale getirilmesi için yoğunluğa duyarlı çözümlerin gerekliliğini göstermektedir.

4.6 Yoğunluk-uyarlı Öbekleme

Bu bölümde IEEE Blacksea konferansında yayınlanan bildirimizi sunuyoruz (Ergenç vd., 2018).

Öbekleme, kolay yönetilebilen yerel gruplar oluşturarak ağ ölçeklenebilirliği sağlar. Ancak, öbeklenmiş ağ topolojisi oluşturmak ve korumak ek bir denetim yükü getirir. Bu çalışmada, en az yük ile basit ve verimli bir öbekleme algoritması olan olasılıksal öbekleme algoritması (Probabilistic Clustering Algorithm (PCA)) sunulmuştur. Bu algoritmada, öbek başları dağıtık şekilde ve komşu sayılarına göre değişen bir olasılıkla belirlenmektedir. Çalışmada öbek başlarını belirlemek için kullanılan analitik model incelenip Monte-Carlo benzetimleri ile doğrulanmıştır. Ayrıca, ağ benzetim aracı OMNeT++ kullanılarak katmanlar-arası eniyilemeyle oluşturulan protokol yığını sabit ve dinamik topolojiler için gerçekleştirilmiştir. Ayrık olay benzetimi sonuçları, olasılıksal öbekleme algoritmasının önemli miktarda denetim yükünü ortadan kaldırdığını ve rakip algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Ölçeklenebilirlik yüksek performans isteyen tasarsız ağlar için önemli bir gerekliliktir (Khakpour vd., 2017). Öbekleme tasarsız ağlarda düğümlerin belli özelliklerine göre gruplandırılmalarına dayanan ve ölçeklendirilebilirlik sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde düğümler lider ya da sıradan düğüm olarak seçilmekte ve öbekler lider düğümler tarafından yönetilmektedir. İletişim, öbek başlarının kontrolünde sağlanmaktadır.

Tasarsız ağlar için gerçekleştirilmiş birçok öbekleme algoritması vardır. Lin ve Gerla düğümlerin belirteçlerine dayalı çok basit bir algoritma sunar (Lin ve Gerla, 1997). Bu algoritmada düğümler belirli aralıklarla belirteçlerini yayınlar ve en düşük belirteçli düğüm lider olarak seçilir. Heinzelman (Heinzelman vd., 2002) tarafından tasarlanan LEACH de kablosuz sensör ağlarında sıkça kullanılır ve öbek başlarının kısmi şekilde rastgele seçilmesine dayalıdır. Bu algoritmada öbek başları diğer sensör düğümlerinden veri toplamak ve merkeze bildirmekle görevlidir. Belli bir takım düğümlerin diğerlerinden çok daha fazla enerji harcamasını engellemek için öbek başları olasılıksal olarak sıkça değiştirilir. Khamiss (Khamiss vd., 2014) ise kablosuz sensör ağları için yoğunluk-farkındalıklı ve enerji-efektif bir algoritma sunar. Burada öbek başları düğümlerin

enerjilerine ve komşuluk sayılarına göre seçilir. Fazla sayıda düğümün olduğu geniş alanlarda uygulanmalarında bazı kısıtlamalar vardır. Diğer bir algoritma Younis ve Fahmy tarafından sunulmuştur. HEED (Younis ve Fahmy, 2004), düğümlerin güncel enerjilerine bağlı bir olasılıkla öbek başlarını seçer. Fakat bu süreç birkaç iterasyonda gerçekleşir ve vakit alır. Diğer bazı olasılıklar algoritmalar da sadece hareketsiz ağlar için tasarlanmıştır (Huang ve Wu, 2005; Choi ve Lee, 2011; Yang ve Sikdar, 2007; Gupta vd., 2005).

Bu çalışmada, olasılıksal öbekleme algoritması (PCA) özellikle hareketli ağlarda asgari denetim yükünü hedefleyerek tasarlanmıştır. PCA gerçekleşmesi kolay, kaynak dostu ve hızlı bir algoritma olması açısından dinamik topojiler için çok uygundur. Çalışmada PCA belirteç tabanlı öbekleme algoritması (ICA) (Lin ve Gerla, 1997) ile karşılaştırılmıştır. ICA, literatürdeki en düşük denetim yüküne sahip algoritmalarından biri olduğu için seçilmiştir. PCA'nın analitik modeli Monte-Carlo benzetimleriyle gösterilmiş, performansı ise ayrık olay benzetimi aracı OMNeT++ ile ortaya konmuştur. Sonuçlar PCA'nın ICA'dan daha az denetim yüküne ve daha yüksek paket iletimi başarımına sahip olduğunu göstermektedir.

4.6.1 Olasılıksal Öbekleme Algoritması

Gerla ve Lin'in yaklaşımına yakın olarak (Lin ve Gerla, 1997), öbek başlarının doğrudan birbirine bağlı olmadığı ve tüm öbek üyelerinin öbek başına doğrudan bağlı olduğu kabul edilmiştir. Öbek başları birbirleriyle aracı düğümler kullanarak haberleşmektedir.

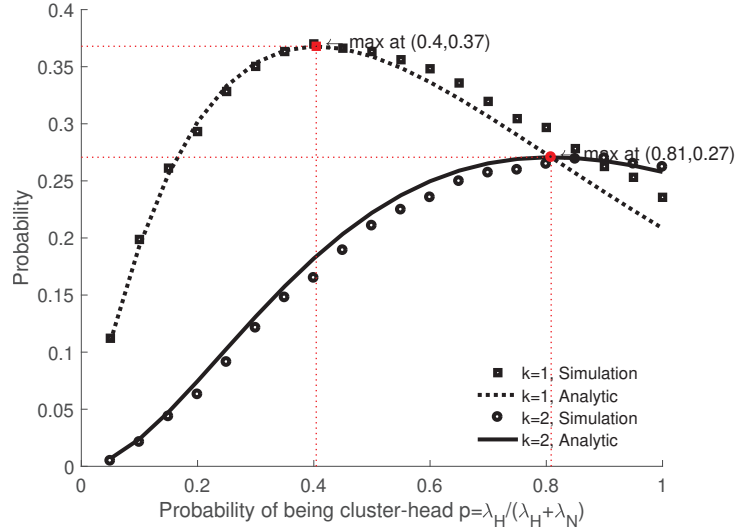
Çok sayıda düğüm iki boyutlu alana λ düğüm/m² yoğunlukla rastgele yerleştirilmiş ve her düğümün kendini öbek başı ilan etme olasılığı p olarak belirlenmiştir. Bu durumda öbek başlarının yoğunluğu $\lambda_h = p\lambda$ olmaktadır. Bu şartlar altında, r_i rastgele seçilmiş bir düğümlerle k^{th} en yakın öbek başı arasındaki mesafe olarak kabul edilir. r_i değerlerinin bileşik dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonunu (Pollard, 1971)

$$f(r_1, r_2, \dots, r_k) = e^{-\lambda_h \pi r_k^2} (2\lambda_h \pi)^k \prod_{i=1}^k r_i. \quad (32)$$

olmaktadır. İletişim mesafesinin d_c metre olduğu disk şeklindeki kapsama alanı düşünüldüğünde, herhangi bir düğümün ortalama k öbek başına yüksek olasılıkla erişebilmesini hedeflemek, güvenilir iletişimin sağlanması açısından önemlidir. İletişim mesafesine bağlı bu olasılık,

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_k &= \int_{d_c}^{\infty} \int_0^{d_c} \dots \int_0^{r_3} \int_0^{r_2} f(r_1, r_2, \dots, r_{k+1}) dr_1 dr_2 \dots dr_k dr_{k+1} \\ &= \frac{1}{k!} d_c^{2k} (\pi p \lambda)^k e^{-\pi d_c^2 p \lambda}. \end{aligned} \quad (33)$$

olarak hesaplanır. Olasılığın maksimum değerini veren k değişkenine bağlı optimum formül ise (türev alınarak) $p_k^* = \frac{k}{d_c^2 \pi \lambda}$ olarak bulunmuştur. k 'nın değeri sistem tasarlayıcısı tarafından be-



Şekil 51. $\lambda=0.000875$ düğüm/m² ve 250×250 m² alanda 10^6 benzetimin ortalaması olarak sunulan sonuçlar.

lirlenmektedir. p_k^* 'nin bulunması için iki temel yöntem vardır. Birincisi λ değerinin bir yoğunluk belirleyici algoritma tarafından anlaşılıp önceden belirlenen bir k değerine bağlı olarak formülün kullanılmasıdır. İkincisi ise doğrudan düğümlerin komşu sayılarını kullanmaktır. $d_c^2 \pi \lambda$ bir ağda düğüm başına düşen ortalama komşu sayısının tanımıdır ve bunun yerine öbekleme esnasındaki paket alışverişi ile bulunabilen gerçek komşu sayısı kullanılabilir. PCA, pratikliği ve öbekleme algoritmalarının doğasına doğrudan uygunluğu açısından ikinci yöntemi kullanmaktadır.

Analitik modeli doğrulamak için Matlab kullanılarak Monte-Carlo benzetimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 51 bu benzetimin sonuçlarını göstermektedir. x -ekseni bir düğümün kendini öbek başı seçme olasılığını gösterirken, y -ekseni iletişim alanı içinde bir ya da iki öbek başı olması olasılığını göstermektedir. Maksimum olasılıklar bir ve iki öbek başı için 0.37 and 0.27 olarak bulunmuştur ve p $\lambda=0.000875$ olduğu durumda $p_1^* = \frac{1}{d_c^2 \pi \lambda} = 0.4042$ ve $p_2^* = \frac{2}{d_c^2 \pi \lambda} = 0.8084$ olarak belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere analitik modelleme ve benzetim sonuçları birbirini doğrulamaktadır. Farklılıklar ise benzetim alanının sınırlı olmasından dolayı görülen sınır etkilerinden kaynaklanmaktadır.

4.6.2 Benzetim Tasarımı

Bu bölümde ayrık olay benzetimi sonuçları sunulmaktadır. Gerçekçi sonuçlar için OMNeT++ kullanarak 5 katmanlı İnternet referans modelini genişletilmiş ve katmanlar-arası eniyilemeye dayalı bir mimarı tasarlanıp, PCA ve ICA burada gerçekleştirilmiştir.

Düğüm Mimarisi: Tüm katmanlar tek bir katmanlar-arası yönetici tarafından kontrol edilecek şekilde genişletilmiştir. Yönlendirme ve öbekleme bu yönetici tarafından kontrol edilmektedir. Fiziksel katmanda yarı çift yönlü radyo kullanılmıştır. Bağlantı katmanında ideal MAC kullanılıp, iletim katmanı IPv4 üstünde çalışan UDP protokolü olarak belirlenmiştir. Yönlendirme için öbekli

yapıya uyarlanmış AODV kullanılmaktadır.

PCA'da komşuluk keşfi bağlantı katmanı paketleriyle yapılmaktadır. Bu paketler katmanlar-arası yönetici tarafından işlenerek öbek başı olma ihtimali hesaplanmaktadır. Yönetici aynı zamanda AODV'nin yönlendirme kararlarını öbek başlarıyla sınırlandırarak paketlerin öbek başlarıncaya belirlenen bir ağ iskeleti üstünden akmasını sağlamaktadır. Bu durum aynı zamanda paketlerin tüm ağa yayılmasını da engellemektedir.

Öbekleme Detayları: ICA ve PCA benzer düğüm mimarilerini kullansa da çalışma prensipleri farklıdır. ICA'da en düşük belirteçli düğümler öbek başı olarak seçilip, daha düşük belirteçli bir düğüm geldiğinde ilgili öbeğin yapısı bozulmaktadır. PCA'da ise belirteçler yerine komşuluk ilişkileri öbek başı seçiminde belirleyicidir. Aynı zamanda önceki bölümde sunulduğu üzere ağ yoğunluğu da bir parametre olarak kullanılabilir. Sistem parametresi k ile öbek başlarının yoğunluğu ayarlanabilmektedir. Daha fazla öbek başı daha fazla öbek ve kontrol maliyeti anlamına gelmektedir. Eğer bir düğümün katmanlar-arası yöneticisi k ve komşu sayısına bağlı olarak belirlendiği olasılıkla ilgili düğümü öbek başı olarak seçerse, düğüm tüm yayılım paketleriyle yeni rolünü komşularına bildirmektedir. Sonuç olarak, komşuluk keşfi bağlantı katmanı paketleriyle gerçekleşirken, yalnızca öbek başı seçilen düğümlerin öbekleme paketleri yayılmasıyla en az sayıda veri aktarımı yapılarak öbekli yapı kurulabilmektedir. Öbekli yapı kurulana kadarki toplam öbek denetim masrafının bit cinsinden miktarı ise

$$\alpha(n,h)=(nb_{frame})+(hb_{id}). \quad (34)$$

Denklemden n toplam düğüm sayısını, h öbek başı sayısını, b_{frame} bağlantı katmanı paketlerinin bit cinsinden büyüklüğünü b_{id} ise belirteç içeren öbek başı duyuru mesajlarının büyüklüğünü göstermektedir. OMNeT++ modüllerinde $b_{frame}=168$ olarak belirlenmiştir, b_{id} ise bunun en az 10 bit fazlasıdır. ICA'nın kontrol mesajlarının büyüklüğü ise sabit ve b_{id} kadardır.

Ayrık Olay Benzetimi: Benzetim iki farklı senaryoda, hareketli ve sabit düğümlerin olduğu iki farklı ağda yapılmıştır. Veri trafiği iki rastgele düğüm arasında her 0.5 saniyede gönderilen ve boyutu 256 bitsolan ping paketleriyle yaratılmıştır. Verimlilik (efficiency), ağda hedefine başarıyla ulaştırılan veri paketlerinin toplam boyutunun öbekleme denetim paketlerinin boyutuna oranı olup bir performans ölçütü olarak kullanılmıştır. Tablo 19'de benzetim için kullanılan önemli değişkenler listelenmiştir.

4.6.3 Sabit Topoloji

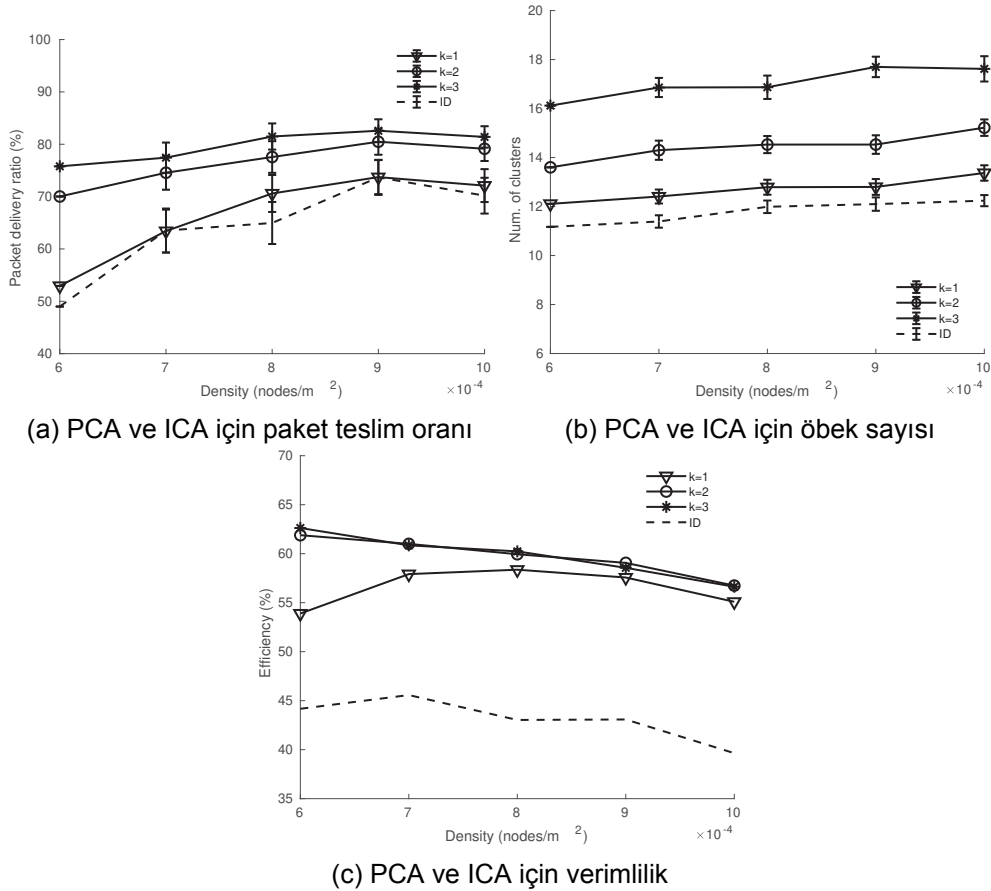
k ve düğüm yoğunluğu kontrol parametresi olarak kullanılarak ICA ve PCA sabit topolojide karşılaştırılmıştır.

Şekil 52a, artan düğüm yoğunluğunda ICA ve PCA'nın paket teslim oranını (packet delivery ratio

Tablo 19. Parametreler ve değerleri.

Değişken	Değer
Alan büyüklüğü	250×250m ²
Sinyal çapı	40m
Tekrar sayısı	200
Benzetim süresi	30s
Toplam veri trafiği süresi	50
Düğüm yoğunluğu	0.000875
Hareketli düğümlerin oranı	%30
Hareketlilik	RWP 1–3 m/s hız aralığında

(PDR)) göstermektedir. PCA'da k değeri arttıkça öbek başlarının sayısı arttığından, tasarsız ağda iletişim üzerindeki denetim de artar ve PDR yükselir. Öbek başı sayısındaki artış ayrıca Şekil 52b'den gözlenebilmektedir. $k=3$ için PCA'a yaklaşık %30 daha PDR sergilerken, öbek sayısı ve dolayısıyla öbek denetim yükü de benzer ölçüde artmaktadır. Fakat Şekil 52c, PDR ve öbek denetim paketlerindeki artışın genel etkisini daha iyi göstermektedir. Şekilde, yüksek k değerleri için verimlilik daha fazladır ve bu durum veri trafiğinin kalitesindeki iyileştirmenin denetim yükündeki artıştan daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu açılardan sabit topolojilerde PCA'nın üç k değeri için de ICA'dan daha iyi performans gösterdiği çıkarılabilmektedir.



Şekil 52. Sabit topolojilerde artan düğüm yoğunluğunun paket teslim oranı, öbek sayısı ve verimlilik üzerinde etkileri.

4.6.4 Dinamik Topoloji

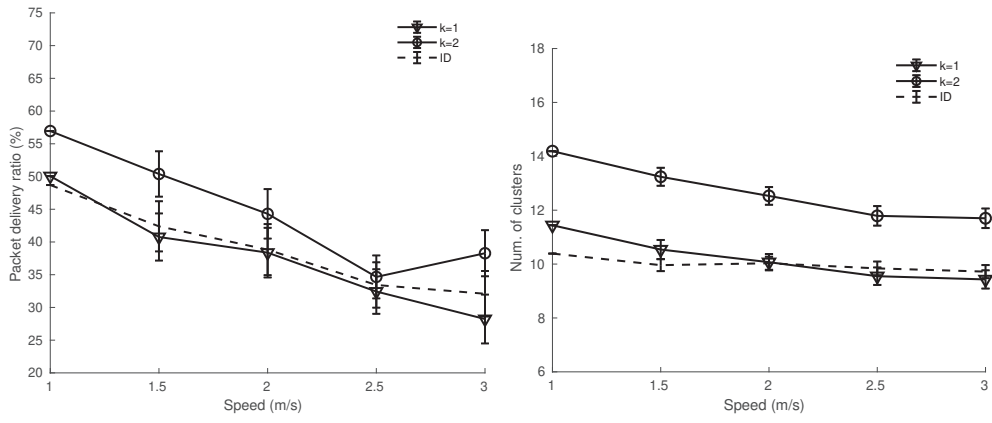
Dinamik topolojide benzetim 1-3m/s hızda rastgele hareketlilik modeli (Random Waypoint Model (RWP)) ile oluşturulmuştur (Bettstetter vd., 2003). Bu modelde düğümler her saniye rastgele bir yöne sabit hızla hareket eder. Senayolarda, düğümlerin rastgele seçilen %30'u hareketlidir.

Dinamik topojiler, düğümler hareketli olduğundan komşuluk bilgisine göre tasarlanan algoritmalarda zorluk yaratmaktadır. Öbekli yapı sıkça değişmekte ve hareketli düğümlerin dahil olduğu rotalar bozulduğundan uçtan uca trafik sekteye uğramaktadır. ICA, sabit ve dinamik topolojilerde benzer şekilde çalışıp herhangi bir iyileştirme sağlamamaktadır. PCA'da ise hareketli senaryolar için düşünülmüş bazı önlemler sunulmuştur. PCA'da bir düğümün olasılıksal öbek başı ilan sürecinin yürütülmesi için (a) düğümün öbek başı olması ve komşu sayısının artması (b) düğümün sıradan bir düğüm olması ve komşu sayısının azalması ya da (c) komşu sayısının değişmesi ve düğümün hiç bir öbeğe dahil olmaması gerekmektedir. Bu şartlar, yeniden öbeklenme sayısının asgari düzeye indirgenmesi ve algoritmanın hareketlilikten en düşük şekilde etkilenmesi için tasarlanmıştır.

Sabit topolojilerin aksine iki algoritma için de PDR değerleri Şekil 53a'de görüldüğü şekilde düşüktür ve bu hareketliliğin genel bir sonucudur. Yine de $k=1$ için PCA, ICA'dan daha yüksek performans göstermektedir. Şekil 53b'de öbek sayısı açısından sabit topolojilerdekine benzer sonuç alınmıştır. Hareketlilik arttıkça öbek sayısının azalması, düğümlerin yalnız bazılarının hareketli olmasıyla rastgele dağılımın bozulması ve bazı noktalarda yoğunluğun artmasından dolayıdır. Verimlilik her iki algoritma için de sabit topolojilerdekine göre daha az olsa da, PCA daha yüksek performans göstermektedir. İki algoritma arasındaki verimlilik farkı Şekil 53c'de sunulmaktadır.

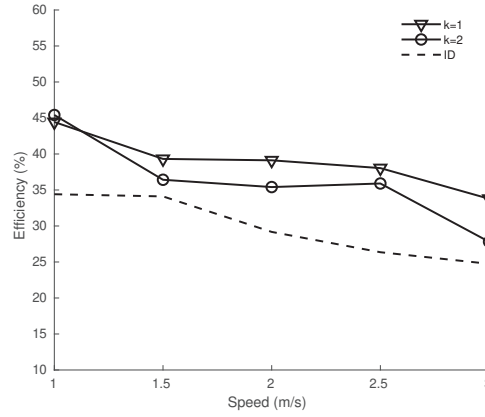
4.6.5 Sonuç

Öbekleme ölçeklenebilir tasarsız ağlar kurmak için bilindik bir yöntemdir. Bu çalışmada, asgari denetim yüküyle çalışan olasılıksal bir öbekleme algoritması (PCA) sunulmuştur. Düğümler kendi komşuluklarında ağ yoğunluğuna göre kendilerini öbek başı ilan etmektedir. Bu olasılık rastgele değişkenlere bağlı olmayıp bir matematik modelle sunulmuştur. Algoritmanın performansı düşük denetim yükü yaratması ile bilinen ICA ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre hem hareketli hem de sabit topolojilerde PCA paket teslim oranı ve verimlilik açısından daha iyi sonuçlar vermektedir.



(a) PCA ve ICA için paket teslim oranı

(b) PCA ve ICA için öbek sayısı



(c) PCA ve ICA için verimlilik

Şekil 53. Dinamik topolojilerde artan düğüm hızlarının paket teslim oranı, öbek sayısı ve verimlilik üzerinde etkileri.

5 SONUÇ

215E127 destek numaralı “Yoğunluk-Uyarlı Kablosuz Şebekeler (DAWN)” projesi TÜBİTAK tarafından, 1001 programı kapsamında desteklenmiştir.

Gezgin baz istasyonlarının ortaya çıkması ile kendi kendini organize eden ağlara duyulan ihtiyaç daha belirgin hale gelmiştir. Yoğun ağlar gereksiz kapsama alanı sağlarken, seyrek ağlarda bağlantı kesintiye uğrayabilmektedir. Bu nedenle, şebeke fonksiyonlarının yoğunluğa uyarlı olması gerekir. Bu proje kapsamında genel olarak şu çalışmalar yapılmıştır:

- Yoğunluğun kablosuz ağ başarımı üzerine etkisi incelenmiştir ve üç boyutlu uzayda çalışacak yenilikçi yoğunluk kestiricileri geliştirilmiştir. Literatürde var olan yöntemlerin çoğu tasarsız ağlar için geliştirilmiştir. Bu proje ile literatüre katkımızı, üç boyutlu gezgin ağlarda uç hesaplama gibi yenilikçi yaklaşımlar kullanılarak yoğunluk kestirici geliştirmek olarak özetleyebiliriz.
- Bu proje öncesi, literatürde yer alan kapsama alanı kontrolü tekniklerinde yoğunluk bir parametre olarak ele alınmıyordu. Projenin literatüre katkısı gezgin ağlarda geliştirmiş olduğumuz yenilikçi yoğunluk-uyarlı kapsama alanı kontrolü yöntemleridir.

5.1 Önemli Bulgular ve Açık Araştırma Konuları

Projenin önemli bulguları şu şekilde özetlenebilir:

- Yapmış olduğumuz inceleme çalışmaları (Onur vd., 2017) ve (Eroğlu vd., 2018) kapsamında yalnızca kapsama alanı kontrolü değil aynı zamanda girişim kontrolü, hareketlilik kontrolü gibi diğer şebeke fonksiyonlarının da yoğunluk-uyarlı ve yoğunluk-farkında olması gerektiğini ve bunların açık araştırma konuları olduklarını sunduk.
- Yaman vd. (2018) ile yaptığımız çalışmada üç önemli sonuç sunduk. Birinci olarak basit bir kesinti olasılık modelini önerildi ve doğrulandı. İkinci olarak, en fazla %3-4 mutlak ortalama yüzde sapma ile doğru sonuçlar veren işbirlikçi yoğunluk kestiricisi geliştirdi ve geçerlendi. Son olarak da, baz istasyonu iletim güçlerini dinamik bir şekilde ayarlayarak enerji tasarrufu ve hizmet kalitesinin artırılması için yoğunluk-farkında bir hücre yakınlaştırma tekniği önerildi. Üç modelin tamamı üç boyutlu bir alan ve dağıtım göz önüne alınarak geliştirildi. Bu kapsamda kurulan modeller üzerine kanal parametrelerin etkilerinin incelenmesi açık araştırma konusudur.
- Mert Çalık'ın proje kapsamında üretilmiş olan yüksek lisans tezi (Çalık, 2018) ile ilgili olarak Çalık vd. (2018) ile yapılan çalışmada, enerji tüketimini azaltmak ve gezgin ağdaki hizmet kalitesini artırmak için yoğunluk-farkında hücre yakınlaştırma ve baz istasyonu çizelgeleme tekniği olan JOCell'i bir eniyileme problemi olarak tanımlayıp, genetik algoritmalarla çözdük. Farklı baz istasyonu ve kullanıcı yoğunlukları için çözümümüzü test ettik ve alternatif bir çözümlerle karşılaştırdık. JOCell, optimize edilmemiş temel modele göre yüksek enerji tasarrufu sağlayabilir. JOCell enerji tasarrufu sağlamak adına, hizmet kalitesinde alternatif çözümün %5'ini gerisinde kalsa da, kullanıcı memnuniyetini %47'ye kadar

arttırır.

- Mollahasani ve Onur (2018) ile birlikte yürüttüğümüz çalışmada enerjiyi korumak ve hizmet kalitesini arttırmak için iki sezgisel algoritma uygulayarak yoğunluk-farkında, enerji verimli ve spektrum-verimli bir uyku planlama tekniği önerdik. Baz istasyonu yoğunluğu, hücre kapasiteleri göz önüne alınarak ve hücreler arasındaki trafik yükünün dengelenmesiyle adapte edilir. Hücre yakınlaştırma tekniği uygulayarak ve SINR'i hücre sınırlarında artırarak kapsama deliklerini önleyip, spektral verimliliği artırdık. Geliştirdiğimiz modeli çoklu erişim uç bulut üzerinde uyguladık. Önerilen model, güvenilir sonuçlar sağlamak için sistem seviyesi simülatörü ile incelendi. Sonuç olarak, ağlarda BS yoğunluğunu değerlendirerek gelecekteki ağların daha akıllı ve daha verimli hale getirebiliriz. Hareketli baz istasyonlarının bu modele entegre edilmesi açık araştırma konusudur.
- Eroglu vd. (2018) ile birlikte yaptığımız çalışma kapsamında kümelenmiş tasarsız ağlardaki mesafelere dayalı yeni bir yoğunluk tahmincisi önerdik. Önerilen yöntem Monte-Carlo simülasyonları ile doğrulandı ve diğer mesafe tabanlı yoğunluk tahmin edicileri ile karşılaştırıldı. Önerilen tahmincinin, mesafe ölçümlerinde önemli hatalar altında bile yüksek bir doğrulukla iyi performans göstermektedir. Bu çalışmada sunduğumuz sonuçlar, ağ performansının kapasite, kapsama alanı ve enerji tasarrufu bakış açılarından daha iyi hale getirilmesi için yoğunluğa duyarlı çözümlerin gerekliliğini göstermektedir.
- Ergenç vd. (2018) ile birlikte yaptığımız çalışma kapsamında asgari denetim yüküyle çalışan olasılıksal yoğunluk-uyarlı bir öbekleme algoritması geliştirildi. Bu algoritmada, düğümler kendi komşuluklarında ağ yoğunluğuna göre kendilerini öbek başı ilan etmektedir. Bu olasılık rastgele değişkenlere bağlı olmayıp yoğunluğa bağlıdır. Algoritmanın başarımı düşük denetim yükü yaratması ile bilinen başka bir yöntem ile karşılaştırıldı ve benzetim sonuçlarına göre hem hareketli hem de sabit topolojilerde paket teslim oranı ve verimlilik açısından daha iyi sonuçlar elde edildi. Bu çalışmanın üç boyutlu yoğunluk kestiricilere entegre edilmesi açık araştırma problemidir.

5.2 Çıktılar

Bu proje kapsamında tamamlanmış lisansüstü tezler şunlardır:

- (Yüksek lisans tezi) Mert Çalık, Joint Optimization of Cell Zooming, Scheduling and User Association, ODTÜ, 02 Şubat 2018, Danışman: Ertan Onur. (Çalık, 2018)

Farnaz Hassanzadeh, Shahram Mollasasani, ve Alperen Eroğlu'un doktora tezleri devam etmektedir.

Sunulmuş olan konferans bildirileri şunlardır:

- Ergenç, D., Eksert, L., ve Onur, E. (2018). "Density-aware probabilistic clustering in ad hoc networks". In Proc. of the 2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Batumi, Georgia. (Ergenç vd., 2018)
- Mollahasani, S. ve Onur, E. (2018). "Density-aware power allocation in mobile networks using edge computing". In Proc. of the IEEE Signal Processing and Communication App-

lications (SIU), İzmir, Turkey. (Mollahasani ve Onur, 2018)

- Çalık, M., Mollahasani, S., ve Onur, E. (2018). "Density-aware joint optimization of cell scheduling and user association". In Proc. of the IEEE WCNC FLEXNETS Workshop 2018, Paris, France. (Çalık vd., 2018)
- Eroglu, A., Onur, E., ve Turan, M. (2018). "Density-aware outage in clustered ad hoc networks". In Proc. of the 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, Paris, France. (Eroglu vd., 2018)
- Yaman, O., Eroglu, A., ve Onur, E. (2018). "Density-aware cell zooming". In Proc. of the 21st Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN) (ICIN 2018), Paris, France. (Yaman vd., 2018)
- Eroğlu, A., Mollahasani, S., Hassanadeh, F., ve Onur, E. (2018), "Yoğunluk Uyarlı Gelecek Nesil Ağlarda Fırsatlar ve Zorluklar." Bilişim 2018. (Eroğlu vd., 2018)

Yayınlanmış kitap bölümleri şunlardır:

- (Kitap bölümü) Mollahasani, S., Eroğlu, A., Ömer Yamaç, ve Onur, E. (2017). "Simulators, test beds and prototypes of 5G mobile networking architectures". Elkhodr, Mahmoud; Hassan, Qusay; Shahrestani, Seyed (Ed.): Chapman and Hall/CRC, Networks of the Future: Architectures, Technologies, and Implementations, ISBN: 9781498783972.(Mollahasani vd., 2017)

Değerlendirme aşamasında olan makeleler şunlardır:

- Onur, E., Mollahasani, S., Eroğlu, A., ve Moftakhar, N. R. (2018). "Density-aware dynamic mobile networks: Opportunities and challenges". arXiv preprint arXiv:1712.09104. (Onur vd., 2017)
- Mollahasani, S., ve Onur, E. (2018) "Density-aware, Energy- and Spectrum-efficient Base Station Scheduling."
- Eroğlu, A., ve Onur, E., (2018) "Density-aware Cellular Coverage Control: Inteference-based Density Estimation."

Bu proje kapsamında üç adet uluslararası çalıştay prestijli konferanslar altında organize edilmiştir:

- IEEE International Conference on Communications (ICC) altında Workshop on Flexible Networks (FlexNets), Mayıs 2017, Paris, Fransa.
- IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) altında Workshop on Flexible and Agile Networks (FlexNets), Nisan 2018, Barselona, İspanya.
- IEEE INFOCOM altında Workshop on Flexible and Agile Networks: 5G and Beyond (FlexNets), Nisan, 2019, Paris, Fransa.

Kaynaklar

- 3GPP (2012). "The 2020 vision for LTE". *White Paper*.
- 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2014). "Evolved universal terrestrial radio access (EUTRA)". Technical Report TR 36.942, radio frequency (RF) system scenarios, in 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- 5G (2016). "5g massive mimo testbed". <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/>. [Online; 2016, December].
- Abdelhady, A. M., Amin, O., ve Alouini, M. S. (2017). "Energy-efficient resource allocation for phantom cellular networks with imperfect CSI". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(6):3799–3813.
- Abrol, A. ve Jha, R. K. (2016). "Power optimization in 5G networks: A step towards GrEEen communication". *IEEE Access*, 4:1355–1374.
- Ahmad, S. A. ve Datla, D. (2015). "Distributed power allocations in heterogeneous networks with dual connectivity using backhaul state information". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(8):4574–4581.
- Ahmed, M. H. ve Yanikomeroglu, H. (2004). "A lower bound on SINR threshold for call admission control in multiple-class CDMA systems with imperfect power-control". In *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, volume 5, pages 3280–3284 Vol.5.
- Aliu, O., Imran, A., Imran, M., ve Evans, B. (2013). "A survey of self organisation in future cellular networks". *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1):336–361.
- Almowuena, S., Rahman, M. M., Hsu, C. H., Hassan, A. A., ve Hefeeda, M. (2016). "Energy-aware and bandwidth-efficient hybrid video streaming over mobile networks". *IEEE Transactions on Multimedia*, 18(1):102–115.
- Andersson, G., Vastberg, A., Devlic, A., ve Cavdar, C. (2016). "Energy efficient heterogeneous network deployment with cell DTX". *IEEE Communications Letters*, 18(6):977–980.
- Andrews, J. G., Gupta, A. K., ve Dhillon, H. S. (2016). "A Primer on Cellular Network Analysis Using Stochastic Geometry". pages 1–38.
- Balas, E. ve Padberg, M. (1976). "Set partitioning: A survey". *SIAM Review*, 18(4):710–760.
- Balasubramaniam, R., Nagaraj, S., Sarkar, M., Paolini, C., ve Khaitan, P. (2013). "Cell zooming for power efficient base station operation". In *Proc. of the 9th IWCMC*, pages 556–560.
- Berman, M., Chase, J. S., Landweber, L., Nakao, A., Ott, M., Raychaudhuri, D., Ricci, R., ve Seskar, I. (2014). "Geni: A federated testbed for innovative network". *Computer Networks*, 61:5–23.
- Bettstetter, C., Resta, G., ve Santi, P. (2003). "The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks". *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 2(3):257–269.

- Björnson, E., Sanguinetti, L., ve Kountouris, M. (2016). "Deploying dense networks for maximal energy efficiency: Small cells meet massive MIMO". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4):832–847.
- Bor-Yaliniz, I. ve Yanikomeroglu, H. (2016a). "The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells". *IEEE Communications Magazine*, 54(11):48–55.
- Bor-Yaliniz, I. ve Yanikomeroglu, H. (2016b). "The new frontier in ran heterogeneity: Multi-tier drone-cells". *IEEE Communications Magazine*, 54(11):48–55.
- Bousia, A., Antonopoulos, A., Alonso, L., ve Verikoukis, C. (2012). "Distance-aware base station sleeping algorithm in LTE-Advanced". In *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1347–1351.
- Braun, W. ve Menth, M. (2014). "Software-defined networking using openflow: Protocols, applications and architectural design choices". *Future Internet*, 6:302–336.
- Cao, D., Zhou, S., ve Niu, Z. (2012). "Optimal base station density for energy-efficient heterogeneous cellular networks". In *Proc. of the IEEE ICC*, pages 4379–4383.
- Chen, C. S. ve Baccelli, F. (2010). "Self-optimization in mobile cellular networks: Power control and user association". In *IEEE ICC*, pages 1–6.
- Chen, Y., Zhang, S., Xu, S., ve Li, G. Y. (2011). "Fundamental trade-offs on green wireless networks". *IEEE Communications Magazine*, 49(6).
- Chitte, S. D., Dasgupta, S., ve Ding, Z. (2009). "Distance estimation from received signal strength under log-normal shadowing: Bias and variance". *IEEE Signal Processing Letters*, 16(3):216–218.
- Choi, J. ve Lee, C. (2011). "Energy consumption and lifetime analysis in clustered multi-hop wireless sensor networks using the probabilistic cluster-head selection method". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(1):156.
- Choi, Y.-H., Lee, J., Back, J., Park, S., uk Chung, Y., ve Lee, H. (2015). "Energy efficient operation of cellular network using on/off base stations". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(8):108210.
- Clerckx, B., Kim, G., ve Kim, S. (2008). "MU-MIMO with channel statistics-based codebooks in spatially correlated channels". In *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–5.
- CREW (2016). "Cognitive radio experimentation world". <http://www.crew-project.eu>. [Online; 2016, December].
- Dahlman, E., Parkvall, S., ve Skold, J. (2013). *4G: LTE/LTE-Advanced for mobile broadband*.
- Deb, S., Monogioudis, P., Miernik, J., ve Seymour, J. (2014). "Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 22(1):137–150.

- Ding, M., Lopez-Perez, D., Claussen, H., ve Kaafar, M. A. (2018). "On the fundamental characteristics of ultra-dense small cell networks". *IEEE Network*, 32(3):92–100.
- Duerig, R., Stoller, J., Wong, L., Chikkulapelly, G., Seok, S., ve Ricci, W. (2012). "Designing a federated testbed as a distributed system". In *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures*, pages 321–337. Springer.
- Dutta, S., Mezzavilla, M., Zhang, M., Akdeniz, M. R., ve Rangan, S. (2015). "5g mmwave module for the ns-3 network simulator". *Proc. of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 283–289.
- Easyc (2016). "Cognitive radio experimentation world, easyc". <http://www.crew-project.eu/easyc>. [Online; 2016, December].
- Ergenç, D., Eksert, L., ve Onur, E. (2018). "Density-aware probabilistic clustering in ad hoc networks". In *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) (IEEE BlackSeaCom 2018)*, Batumi, Georgia.
- Eroglu, A., Onur, E., ve Turan, M. (2018). "Density-aware outage in clustered ad hoc networks". In *Proc. of the 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security*, Paris, France.
- Eroğlu, A. (2015). Density estimation in large scale wireless sensor networks. Master's thesis, ODTÜ, Ankara, Turkey.
- Eroğlu, A., Mollahasani, S., Hassanzadeh, F., ve Onur, E. (2018). "Yoğunluk uyarlı gelecek nesil ağlarda fırsatlar ve zorluklar". In *Bilişim 2018*, Ankara, Türkiye.
- Feng, J. ve Feng, Z. (2017). "Optimal Base Station Density of Dense Network: From the Viewpoint of Interference and Load". *Sensors*, 17(9):2077–2095.
- Feng, M., Mao, S., ve Jiang, T. (2017a). "Base station on-off switching in 5G wireless networks: Approaches and challenges". *IEEE Wireless Communications*, 24(4):46–54.
- Feng, M., Mao, S., ve Jiang, T. (2017b). "Base station on-off switching in 5G wireless systems: Approaches and challenges". *IEEE Wireless Communications*, 24(August):46–54.
- FIRE (2016). "Future internet research and experimentation". <https://www.ict-fire.eu/fire/>. [Online; 2016, August].
- FOKUS (2016). "5g playground". https://www.fokus.fraunhofer.de/go/en/fokus_testbeds/5g_playground. [Online; 2016, December].
- Gandotra, P., Jha, R. K., ve Jain, S. (2017). "Green communication in next generation cellular networks: A survey". *IEEE Access*, 5:11727–11758.
- Ganti, R. K. ve Haenggi, M. (2009). "Interference and outage in clustered wireless ad hoc networks". *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(9):4067–4086.

- Grodzevich, O. ve Romanko, O. (2006). "Normalization and other topics in multi-objective optimization". In *Proc. of the Fields-MITACS Industrial Problems Workshop*.
- Gruber, M., Blume, O., Ferling, D., Zeller, D., Imran, M. A., ve Strinati, E. C. (2009). "EARTH—energy aware radio and network technologies". In *Proc. of the IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–5.
- Guo, W., Wang, S., Chu, X., Zhang, J., Chen, J., ve Song, H. (2013). "Automated small-cell deployment for heterogeneous cellular networks". *IEEE Communications Magazine*, 51(5):46–53.
- Gupta, I., Riordan, D., ve Sampalli, S. (2005). "Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks". In *Proc. of the CNSR*, pages 255–260.
- Guvenc, I. ve Chong, C. C. (2009). "A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 11(3):107–124.
- Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., ve Balakrishnan, H. (2002). "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks". *IEEE Trans. Wireless Comm.*, 1(4):660–670.
- Hong, S., Brand, J., Choi, J. I., Jain, M., Mehlman, J., Katti, S., ve Levis, P. (2014). "Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond". *IEEE Communications Magazine*, 52(2):114–121.
- Horneber, J. ve Hergenröder, A. (2014). "A survey on testbeds and experimentation environments for wireless sensor networks". *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, pages 1820–1838.
- Hossain, M. F., Munasinghe, K. S., ve Jamalipour, A. (2013). "Toward self-organizing sectorization of LTE eNBs for energy efficient network operation under QoS constraints". In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1279–1284.
- Huang, D., Wei, W., Gao, Y., Hou, M., Li, Y., ve Song, H. (2017). "Energy efficient dynamic optimal control of LTE base stations: solution and trade-off". *Telecommunication Systems*, 66(4):701–712.
- Huang, H. ve Wu, J. (2005). "A probabilistic clustering algorithm in wireless sensor networks". In *Proc. of the VTC*, volume 3, pages 1796–1798.
- Huq, K. M. S., Mumtaz, S., Bachmatiuk, J., Rodriguez, J., Wang, X., ve Aguiar, R. L. (2015). "Green hetnet comp: Energy efficiency analysis and optimization". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(10):4670–4683.
- Iris (2016). "Cognitive radio experimentation world, iris". <http://www.crew-project.eu/iris>. [Online; 2016, December].
- Iyer, V., Loukas, A., ve Dulman, S. (2012). "Nest: A practical algorithm for neighborhood discovery in dynamic wireless networks using adaptive beaconing". Technical report, Delft University of Technology.

- Juang, R.-T., Ting, P., Lin, H.-P., ve Lin, D.-B. (2010). "Interference management of femtocell in macro-cellular networks". In *2010 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, pages 1–4.
- Kaddour, F. Z., Pischella, M., Martins, P., Vivier, E., ve Mroueh, L. (2013). "Opportunistic and efficient resource block allocation algorithms for LTE uplink networks". In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 487–492.
- Kaddour, F. Z., Vivier, E., Mroueh, L., Pischella, M., ve Martins, P. (2015). "Green opportunistic and efficient resource block allocation algorithm for LTE uplink networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(10):4537–4550.
- Kamel, M., Hamouda, W., ve Youssef, A. (2016). "Ultra-dense networks: A survey". *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(4):2522–2545.
- Kanwal, K., Safdar, G. A., Ur-Rehman, M., ve Yang, X. (2017). "Energy management in LTE networks". *IEEE Access*, 5:4264–4284.
- Karagiannis, G., Pham, G. T., Nguyen, A. D., Heijenk, G. J., Haverkort, B. R., ve Campfens, F. (2014). "Performance of LTE for smart grid communications". In *Proc. of the 17th International GI/ITG Conference on Measurement, Modelling, and Evaluation of Computing Systems and Dependability and Fault Tolerance - Volume 8376, MMB & DFT 2014*, pages 225–239, New York, NY, USA. Springer-Verlag New York, Inc.
- Keeler, H. P., Blaszczyzyn, B., ve Karray, M. K. (2013). "SINR-based k-coverage probability in cellular networks with arbitrary shadowing". *IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings*, pages 1167–1171.
- Kendall, M. G. ve Moran, P. A. P. (1963). *Geometrical probability*. Number 10.
- Keysight (2016). "Systemvue electronic system-level (esl) design software". <http://www.keysight.com/en/pc-1297131/systemvue-electronic-system-level-esl-design-software?cc=TR&lc=eng>. [Online; 2016, December].
- Khakpour, S., Pazzi, R. W., ve El-Khatib, K. (2017). "Using clustering for target tracking in vehicular ad hoc networks". *Vehicular Communications*, 9:83–96.
- Khamiss, A. A., Chai, S., Zhang, B., Luan, J., ve Li, Q. (2014). "An energy-efficient and density-aware clustering for WSNs". In *Proc. of the 33rd CCC*, pages 377–382.
- Khan, M. I. (2013). "Network parameters impact on dynamic transmission power control in vehicular ad hoc networks". *CoRR*, abs/1310.4475.
- Kitindi, E. J., Fu, S., Jia, Y., Kabir, A., ve Wang, Y. (2017). "Wireless network virtualization with SDN and C-RAN for 5G networks: Requirements, opportunities, and challenges". *IEEE Access*, 5:19099–19115.

- Komnakos, D., Rouskas, A., ve Gotsis, A. (2013). "Energy efficient base station placement and operation in mobile networks". In *Proc. of the 19th European Wireless Conference*, pages 1–5.
- Kusume, K., Queseth, O., Tullberg, H., Fallgren, M., Schellmann, M., Uusitalo, M., Maternia, M., ve Aziz, D. (2015). "Metis project.". *Tech. Rep.*
- Kyriazis, G. ve Rouskas, A. (2016). "Design and operation of energy efficient heterogeneous mobile networks". *Wireless Networks*, 22(6):2013–2028.
- Lateef, H. Y., Shakir, M. Z., Ismail, M., Mohamed, A., ve Qaraqe, K. (2015). "Towards energy efficient and quality of service aware cell zooming in 5G wireless networks". In *Proc. of the IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pages 1–5. IEEE.
- Lee, K., Lee, J., Lee, H., ve Shin, Y. (2010). "A density and distance based cluster head selection algorithm in sensor networks". In *Proc. of the ICACCT*, volume 1, pages 162–165.
- Lee, S. ve Huang, K. (2012). "Coverage and economy of cellular networks with many base stations". *IEEE Communications Letters*, pages 1038–1040.
- Li, L., Peng, M., Yang, C., ve Wu, Y. (2016). "Optimization of base-station density for high energy-efficient cellular networks with sleeping strategies". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(9):7501–7514.
- Li, Y., Liu, W., Cao, B., ve Li, M. (2012). "Green resource allocation in LTE system for unbalanced low load networks". In *Proc. of the IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC)*, pages 1009–1014.
- Li, Z., Zhao, Y., Cui, Y., ve Xiang, D. (2008). "A density adaptive routing protocol for large-scale ad hoc networks". In *Proc. of the IEEE WCNC*, pages 2597 –2602.
- Lin, C. R. ve Gerla, M. (1997). "Adaptive clustering for mobile wireless networks". *IEEE SAC*, 15(7):1265–1275.
- Liu, C., Natarajan, B., ve Xia, H. (2016a). "Small cell base station sleep strategies for energy efficiency". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(3):1652–1661.
- Liu, C., Natarajan, B., ve Xia, H. (2016b). "Small cell base station sleep strategies for energy efficiency". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(3):1652–1661.
- Liu, J., Sheng, M., Liu, L., ve Li, J. (2017). "Effect of densification on cellular network performance with bounded pathloss model". *IEEE Communications Letters*, 21(2):346–349.
- Liu, Z., Li, F., Qi, Y., ve Chen, J. (2015). "An effective receiver sensitivity measurement". In *2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity*, pages 310–313.
- Liyanage, M., Gurtov, A., ve Ylianttila, M. (2015). *Software Defined Mobile Networks (SDMN): Beyond LTE Network Architecture*.

- López-Pérez, D., Ding, M., Claussen, H., ve Jafari, A. H. (2015). "Towards 1 gbps/ue in cellular systems: Understanding ultra-dense small cell deployments". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(4):2078–2101.
- Manegene, S., Musyoki, S., ve Langat, P. (2015). "Application of cell zooming in outage compensation". *Journal of Electronics and Communication Engineering*, 10(4):60–69.
- Marina, M. K., Manickam, S., Nikaein, N., Dawson, A., Knopp, R., ve Bonnet, C. (2014). "Openairinterface: A flexible platform for 5g research.". *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(5):33–38.
- Martello, S. ve Toth, P. (1992). "Generalized assignment problems". In *Proc. of the Algorithms and Computation*, pages 351–369. Springer Berlin Heidelberg.
- Merkel, S., Mostaghim, S., ve Schmeck, H. (2012). "Distributed geometric distance estimation in ad hoc networks", pages 28–41. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mesodiakaki, A., Adelantado, F., Alonso, L., Renzo, M. D., ve Verikoukis, C. (2017). "Energy- and spectrum-efficient user association in millimeter-wave backhaul small-cell networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2):1810–1821.
- Migliorini, D., Stea, G., Caretti, M., ve Sabella, D. (2013). "Power-aware allocation of MBSFN subframes using discontinuous cell transmission in LTE systems". In *Proc. of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pages 1–5.
- Miorandi, D. ve Altman, E. (2005). "Coverage and connectivity of ad hoc networks presence of channel randomness". In *Proc. of the IEEE Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies.*, pages 491–502 vol. 1.
- Mohr, M., Osseiran, W., ve A., Dattling, E. (2009). *Radio Technologies and Concepts for IMT-Advanced*.
- Mohsen, N. ve Hassan, K. S. (2015). "C-ran simulator: A tool for evaluating 5g cloud-based networks system-level performance.". In *2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 302–309. IEEE.
- Mollahasani, S., Eroğlu, A., Ömer Yamaç, ve Onur, E. (2017). "Simulators, test beds and prototypes of 5g mobile networking architectures". Chapman and Hall, CRC Computer and Information Science Series. Chapman and Hall, CRC, networks of the future: architectures, technologies, and implementations edition.
- Mollahasani, S. ve Onur, E. (2018). "Density-aware power allocation in mobile networks using edge computing". In *Proc. of the IEEE Signal Processing and Communication Applications (SIU)*, İzmir, Turkey.
- Mor, V. ve Kumar, H. (2018). "Energy-efficient approaches in wireless network: A review". In Lobiyal, D. K., Mansotra, V., ve Singh, U., editors, *Proc. of the Next-Generation Networks*, pages 135–146, Singapore. Springer Singapore.

- Mordachev, V. ve Loyka, S. (2008). "On node density - outage probability tradeoff in wireless networks". In *Proc. of the IEEE Int. Symposium on Information Theory*, pages 191–195.
- Nagesh, K. N., Satyanarayana, D., Poojary, N., Ramiah, C., ve Prasad, M. N. G. (2013). "Probability analysis of isolated node in wireless ad-hoc sensor network with border effect". In *Proc. of the International Conference on Advanced Communications Technology*, pages 784–788.
- Naqvi, S. A. R., Hassan, S. A., Pervaiz, H., ve Ni, Q. (2018). "Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks". *IEEE Communications Magazine*, 56(1):36–42.
- National (2016). "National instruments". <http://www.ni.com/sdr/usrp/>. [Online; 2016, December].
- NetWorld2020, E. (2014). "5g: Challenges, research priorities, and recommendations". *Joint White Paper September*.
- Nguyen, H. H. ve Hwang, W. J. (2015). "Distributed scheduling and discrete power control for energy efficiency in multi-cell networks". *IEEE Communications Letters*, 19(12):2198–2201.
- NITOS (2016). "Fed4fire". <http://www.fed4fire.eu/nitos/>. [Online; 2016, August].
- Niu, Z., Wu, Y., Gong, J., ve Yang, Z. (2010). "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks". *IEEE Communications Magazine*, 48(11):74–79.
- Oliva, A. D. L., Perez, X. C., Azcorra, A., Giglio, A. D., Cavaliere, F., Tiegelbekkers, D., Lessmann, J., Hausteine, T., Mourad, A., ve Iovanna, P. (2015). "Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5g networks". *IEEE Wireless Communications*, 22(5):32–40.
- Onur, E., Durmus, Y., ve Niemegeers, I. (2012). "Cooperative density estimation in random wireless ad hoc networks". *IEEE Communications Letters*, 16(3):331–333.
- Onur, E., Mollahasani, S., Eroğlu, A., ve Moftakhar, N. R. (2017). "Density-aware dynamic mobile networks: Opportunities and challenges". *arXiv preprint arXiv:1712.09104*.
- Panwar, N., Sharma, S., ve Singh, A. K. (2016). "A survey on 5g: The next generation of mobile communication". *Physical Communication*, 18:64–84.
- Peng, M., Liang, D., Wei, Y., Li, J., ve Chen, H.-H. (2013). "Self-configuration and self-optimization in LTE-Advanced heterogeneous networks". *IEEE Communications Magazine*, 51(5):36–45.
- Peterson, L., Anderson, T., Culler, D., ve Roscoe, T. (2003). "A blueprint for introducing disruptive technology into the internet". *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 33(1):59–64.
- PhantomNet (2016). "Phantomnet". <http://phantomnet.org/>. [Online; 2016, December].

- Pollard, J. H. (1971). "On Distance Estimators of Density in Randomly Distributed Forests". *Biometrics*, 27(4):991–1002.
- Ramanathan, R. ve Rosales-Hain, R. (2000). "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment". In *Proc. of the IEEE INFOCOM*, volume 2, pages 404–413 vol.2.
- Rawat, D. B. ve Reddy, S. R. (2017). "Software defined networking architecture, security and energy efficiency: A survey". *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(1):325–346.
- Raza, M. H., Hughes, L., ve Raza, I. (2008). "Density: A context parameter of ad hoc networks". In *Trends in Intelligent Systems and Computer Engineering*, pages 525–540. Springer.
- Redana, S., Sartori, C., ve Seidel, E. (2015). "5g norma: A novel radio multiservice adaptive network architecture for 5g networks". In *Proc. of the IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5. IEEE.
- Remcom (2016). "5g and mimo using wireless insite". <http://www.remcom.com/5g-mimo>. [Online; 2016].
- Rupp, M., Schwarz, S., ve Taranetz, M. (2016a). *he Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation, Signals and Communication Technology*.
- Rupp, M., Schwarz, S., ve Taranetz, M. (2016b). *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation*. Signals and Communication Technology. 1 edition.
- Samarakoon, S., Bennis, M., Saad, W., Debbah, M., ve Latva-aho, M. (2016). "Ultra dense small cell networks: Turning density into energy efficiency". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(5):1267–1280.
- Samimi, M. K. ve Rappaport, T. S. (2016). "3-d millimeter-wave statistical channel model for 5g wireless system design". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(7):2207–2225.
- Sciancalepore, V., Mancuso, V., Banchs, A., Zaks, S., ve Capone, A. (2016). "Enhanced content update dissemination through D2D in 5G cellular networks". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(11):7517–7530.
- Series, M. (2009). "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced". *Report ITU*, (2135-1).
- Sokun, H. U., Bedeer, E., Gohary, R. H., ve Yanikomeroglu, H. (2017). "Optimization of discrete power and resource block allocation for achieving maximum energy efficiency in OFDMA networks". *IEEE Access*, 5:8648–8658.
- Song, K., Ji, B., Huang, Y., Xiao, M., ve Yang, L. (2017). "Performance analysis of heterogeneous networks with interference cancellation". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(8):6969–6981.

- Soret, B., Pedersen, K. I., Jørgensen, N. T. K., ve Fernández-López, V. (2015). "Interference coordination for dense wireless networks". *IEEE Communications Magazine*, 53(1):102–109.
- Tech (2016). "Lte-enhanced cognitive radio testbed". <http://www.cornet.wireless.vt.edu/lte.html>. [Online; 2016, December].
- Tung, C. T., Chung, Y. L., ve Tsai, Z. (2012). "An efficient power-saving downlink transmission scheme in OFDM-based multiple component carrier systems". In *Proc. of the 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pages 116–120.
- Twist (2016). "Cognitive radio experimentation world, twist". <http://www.crew-project.eu/twist>. [Online; 2016, December].
- Vsn (2016). "Cognitive radio experimentation world". <http://www.crew-project.eu/vsnt>. [Online; 2016, December].
- Wang, X., Chen, M., Taleb, T., Ksentini, A., ve Leung, V. C. M. (2014). "Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems". *IEEE Communications Magazine*, 52(2):131–139.
- Weisstein, E. W. (2003). "Circle-circle intersection". *Wolfram Research, Inc.*
- Wilabt (2016). "Cognitive radio experimentation world, wilabt". <http://www.crew-project.eu/wilabt>. [Online; 2016, December].
- WINS (2016). "Wins lab test-bed". <http://wins.ceng.metu.edu.tr>. [Online; 2016, December].
- Wireless (2016). "What is software defined radio". <http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>. [Online; 2016, December].
- Wu, J., Zhang, Y., Zukerman, M., ve Yung, E. K.-N. (2015). "Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: A survey". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2):803–826.
- Xu, H., Yu, W., Hematian, A., Griffith, D., ve Golmie, N. (2018). "Performance evaluation of energy efficiency with sleep mode in ultra dense networks". In *Proc. of the International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pages 747–751.
- Xu, Y., Lee, W.-C., Xu, J., ve Mitchell, G. (2005). "PSGR: priority-based stateless geo-routing in wireless sensor networks". In *Proc. of the IEEE MASS*, pages 680–688.
- Yaman, O., Eroglu, A., ve Onur, E. (2018). "Density-aware cell zooming". In *2018 21st Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN) (ICIN 2018)*, Paris, France.
- Yang, H. ve Sikdar, B. (2007). "Optimal Cluster Head Selection in the LEACH Architecture". In *Proc. of the IPCCC*, pages 93–100.
- Yang, Z., Zhou, Z., ve Liu, Y. (2013). "From RSSI to CSI: Indoor localization via channel response". *ACM Computing Surveys*, 46(2):25:1–25:32.

- Yassin, M., AboulHassan, M. A., Lahoud, S., Ibrahim, M., Mezher, D., Cousin, B., ve Sourour, E. A. (2017). "Survey of ICIC techniques in LTE networks under various mobile environment parameters". *Wireless Networks*, 23(2):403–418.
- Yassin, M., Lahoud, S., Ibrahim, M., ve Khawam, K. (2014a). "A downlink power control heuristic algorithm for LTE networks". In *Proceedings of the ICTF*, pages 323–327.
- Yassin, M., Lahoud, S., Ibrahim, M., ve Khawam, K. (2014b). "A downlink power control heuristic algorithm for LTE networks". In *Proc. of the 21st International Conference on Telecommunications*, pages 323–327.
- Younis, O. ve Fahmy, S. (2004). "Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach". In *IEEE INFOCOM 2004*, volume 1, page 640.
- Yu, N., Miao, Y., Mu, L., Du, H., Huang, H., ve Jia, X. (2016a). "Minimizing energy cost by dynamic switching on/off base stations in cellular networks". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(11):7457–7469.
- Yu, P., Feng, L., Li, W., ve Qiu, X. (2016b). "Energy-saving management mechanism based on hybrid energy supplies for LTE heterogeneous networks". *Mobile Information Systems*, 2016.
- Yu, W., Xu, H., Hematian, A., Griffith, D., ve Golmie, N. (2016c). "Towards energy efficiency in ultra dense networks". In *Proc. of the IEEE 35th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*, pages 1–8.
- Zhang, Y., Bi, S., ve Zhang, Y. J. A. (2018). "User-centric joint transmission in virtual-cell-based ultra-dense networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(5):4640–4644.
- Zhou, Z., Dong, M., Ota, K., Wang, G., ve Yang, L. T. (2016). "Energy-efficient resource allocation for D2D communications underlaying Cloud-RAN-Based LTE-A networks". *IEEE Internet of Things Journal*, 3(3):428–438.
- Çalık, M. (2018). Joint optimization of cell zooming, scheduling and user association. Master's thesis, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara Turkey. Danışman: Ertan Onur.
- Çalık, M., Mollahasani, S., ve Onur, E. (2018). "Density-aware joint optimization of cell scheduling and user association". In *IEEE WCNC FLEXNETS 2018*, Paris, France.